



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD BASADO EN LA
TECNOLOGÍA DE CORTE, CONSUMO DE ENERGÍA Y ECONOMÍA EN
EL FRESADO DEL AISI 4340 CON ENTORNO DE MÍNIMA CANTIDAD
DE LUBRICACIÓN PARA UNA RUGOSIDAD SUPERFICIAL DE $0.3 \mu\text{m} \pm$
 $0.1 \mu\text{m}$**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingenieros Mecánicos

AUTORES: BAUTISTA CHIMBO HENRRY LEONARDO
MEDINA MOLINA BRYAN ALEXANDER

TUTOR: EDUARDO XAVIER VACA MICHILENA

Quito – Ecuador

2022

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Bautista Leonardo Bautista Chimbo con documento de identificación N° 1723001986 y Bryan Alexander Medina Molina con documento de identificación N° 1724976855; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 23 de marzo del año 2022

Atentamente,



Henry Leonardo Bautista Chimbo
1723001986



Bryan Alexander Medina Molina
1724976855

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Bautista Leonardo Bautista Chimbo con documento de identificación N° 1723001986 y Bryan Alexander Medina Molina con documento de identificación N° 1724976855, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del artículo académico: “Análisis del acabado superficial en acero AISI 4340 para operaciones de fresado plano usando un sistema de lubricación de mínima cantidad de lubricación para una rugosidad superficial de $0.3 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ ”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero mecánico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 23 de marzo del año 2022

Atentamente,



Henry Leonardo Bautista Chimbo
1723001986



Bryan Alexander Medina Molina
1724976855

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Eduardo Xavier Vaca Michilena con documento de identificación N° 1721078424, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS DEL ACABADO SUPERFICIAL EN ACERO AISI 4340 PARA OPERACIONES DE FRESADO PLANO USANDO UN SISTEMA DE LUBRICACIÓN DE MÍNIMA CANTIDAD DE LUBRICACIÓN PARA UNA RUGOSIDAD SUPERFICIAL DE $0.3 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$, realizado por Henry Leonardo Bautista Chimbo y Bryan Alexander Medina Molina, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de artículo académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 23 de marzo del 2022

Atentamente,



.....
Ing. Eduardo Xavier Vaca Michilena, M. Sc.
1721078424

DEDICATORIA

Este proyecto va dedicado fundamentalmente para mis padres, quienes fueron el pilar esencial durante todo mi trayecto de estudios universitarios estando siempre a mi lado brindándome su apoyo hasta en los momentos más difíciles que hemos tenido que pasar, sin olvidar su gran confianza, sus consejos, sus buenos deseos y actitud positiva hacia mi persona con lo cual me han dado la fortaleza y motivación para alcanzar un objetivo más a mi vida profesional.

A mis hermanos, que siempre estuvieron a mi lado apoyándome en las buenas y en las malas, corrigiéndome y en muchos casos aconsejándome, también forman parte de este objetivo alcanzado.

Henry Leonardo Bautista Chimbo

Dedico este proyecto a mis padres, por el apoyo que me han brindado durante mi formación como profesional, por creer en mí siempre y por ser esos excelentes padres que han formado a un hombre de bien.

A mis hermanos, a mis amigos y a todos aquellos que han sido importantes para mí y me han brindado su ayuda de alguna u otra manera.

Bryan Alexander Medina Molina

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a los docentes de la Universidad Politécnica Salesiana, que supieron impartir su buena catedra y experiencia profesional dentro de las aulas, así como en los laboratorios, con el objetivo alcanzado de formar honrados ciudadanos y buenos cristianos, además de unos excelentes profesionales.

A nuestro tutor, el Ingeniero Xavier Vaca quien, dedico tiempo y colaboración para que el proyecto sea aceptable, cabe mencionar que con su tutoría hemos finalizado el proyecto con éxito y obteniendo resultados favorables como se lo había planteado.

Henry Bautista y Bryan Medina

EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD BASADO EN LA TECNOLOGÍA DE CORTE, CONSUMO DE ENERGÍA Y ECONOMÍA EN EL FRESADO DEL AISI 4340 CON ENTORNO DE MÍNIMA CANTIDAD DE LUBRICACIÓN PARA UNA RUGOSIDAD SUPERFICIAL DE $0.3 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$

Bautista Henry ¹, Medina Alexander ²

Resumen

El contenido del siguiente artículo se basa en un estudio sobre la sostenibilidad en el mecanizado y su mejor alternativa en conjunto con parámetros de tecnología de corte, economía y mínima cantidad de lubricación. Además, se especifica la elección de parámetros de corte óptimos mediante un arreglo ortogonal (Taguchi) y el análisis ANOVA. Se muestra resultados de cálculo sobre fuerzas de corte, consumo de energía, tiempos entre otras variables de sostenibilidad. Se realizó 9 ensayos con distintos parámetros de corte y una condición de refrigeración MQL de 25 y 50 [ml·h⁻¹]. En la medición de la calidad superficial se hizo 3 apreciaciones por cada ensayo para descartar un error de medida y así obtener valores más efectivos. Mediante el método AHP-TOPSIS y los parámetros ya mencionados se emplean para obtener el índice de sostenibilidad el cual nos proporciona resultados y nos demuestran que, al utilizar un MQL al 25[ml·h⁻¹] se tiene valores más bajos en cuanto a los índices de sostenibilidad siendo así la mejor alternativa.

Palabras Clave: ANOVA, MQL, Parámetros, Rugosidad, Sostenibilidad, Taguchi.

Abstract

The content of the following article is based on a study on sustainability in machining and its best alternative together with parameters of cutting technology, economy, and minimum amount of lubrication. In addition, the choice of optimal cutting parameters is specified by means of an orthogonal array (Taguchi) and ANOVA analysis. Calculation results on cutting forces, energy consumption, times among other sustainability variables are shown. 9 tests were carried out with different cutting parameters and a refrigeration condition MQL at 25 and 50 [ml·h⁻¹]. In the measurement of surface quality, 3 assessments were made for each test to rule out a measurement error and thus obtain more effective values. Through the AHP-TOPSIS method and the parameters already mentioned, they are used to obtain the sustainability index, which provides us with results and shows us that, when using an MQL at 25 [ml·h⁻¹], lower values are obtained in terms of the sustainability indexes, being thus the best alternative.

Keywords: ANOVA, MQL, Parameters, Roughness, Sustainability, Taguchi.

1. Introducción

En este documento se estudia la sostenibilidad en el mecanizado por fresado, como se sabe las máquinas actualmente ocupan la mayoría de la producción industrial siendo responsables de la mayor contaminación del planeta. Como definición de sostenibilidad se tiene que es mantener la materia prima sin causar daño grave al medio ambiente [1].

La sostenibilidad en una máquina herramienta se determina por varios factores de consumo, uno de ellos es la energía eléctrica que a lo largo de la vida útil de la máquina representa entre 20 y 80 % de la energía que se consume y es de combustibles fósiles en acuerdo con Abele et al. [2] al que provoca gases como el CO_2 NO_x , CH_4 etc. Las concentraciones de estos gases GEI provocan el calentamiento global un principal problema medioambiental en el mundo. Las emisiones de CO_2 son calculadas como el producto de CES para la red eléctrica y consumo de energía eléctrica. Balogun et al. [3] realizaron una investigación sobre la producción de emanación de CO_2 provocadas en el consumo de energía de las máquinas herramienta en el fresado.

Park y Lee [4] mencionan que, la eficiencia energética y mejora del medio ambiente son dependientes del desarrollo de la tecnología industrial. En el campo de la ingeniería el consumo energético ha sido objeto de estudio debido a que puede influir directa o indirectamente en el medioambiente. Durante el proceso de maquinado, los movimientos a través de la herramienta de mecanizado y la probeta de ensayo se realizan mediante el motor principal y servomotores, que pueden proporcionar potencia y el par motor consumiendo electricidad. Esto hablando de una máquina CNC.

La producción de calor constante sobre áreas de corte es el principal motivo de una maquinabilidad deficiente, así como una sostenibilidad baja en el mecanizado. La ubicación del fresado, velocidad de corte entre otros parámetros fueron motivo de investigación para Iqbal et al. [5] quienes afirman que, se produce desgaste en la herramienta, deficiencia en la fuerza de corte, rugosidad y

aumento en el costo de producción. Demostraron que, la mínima cantidad de lubricación reduce de forma eficaz los problemas antes mencionados. Así mismo concluyen que, la velocidad de corte y los grados de hélice de la fresa tienen mayor eficiencia para un fresado sostenible.

Bagherzadeh et al. [6] realizaron un estudio experimental sobre la sostenibilidad, el rendimiento en el mecanizado y utilizaron una cantidad de mínima lubricación. Aplicaron métodos para medir el desgaste de la herramienta, así como las fuerzas de corte, temperatura y rugosidad de la superficie. Con los resultados obtenidos demostraron que, en la velocidad de corte fue donde su obtuvo una mayor eficiencia con lo cual lograron velocidades más altas y con mejor enfriamiento. Concluyeron que con este método se produce una estabilidad entre el medio ambiente y la producción en el fresado, disminuyendo el costo y la reducción en el consumo excesiva de componentes.

Para el proceso de fresado realizaron experimentos de regresión con resultados previos introduciendo ecuaciones matemáticas no lineales de fuerza de corte, rugosidad, potencia y costo de mecanizado según lo mencionan Markopoulos et al. [7] como parámetros óptimos utilizaron un coeficiente R-2 entre 90.62 y 98.74 %, velocidad de avance de 0.01 [mm·diente⁻¹], profundidad de corte de 0.1 [mm] y velocidad de corte de 20 [m·min⁻¹]. Obtuvieron un método para determinar la sostenibilidad en el fresado, satisfacer la seguridad y la salud personal.

Según Yang et al. [8] investigaron sobre fluidos de corte basados en calidad superficial, fuerza de corte, términos ambientales y deterioro de la herramienta. Utilizaron varios fluidos de corte en relación con la sostenibilidad de producción. Demostraron que la cantidad de mínima lubricación (MQL, por sus siglas en inglés) aumenta la eficacia en la superficie acabada y a su vez reduce eficientemente el deterioro en la herramienta y en su fuerza de corte. Por lo cual concluyen que, en cuanto al cuidado ambiental la lubricación en cantidades mínimas es superior

respecto a los demás fluidos de corte siendo eficaz para el proceso de fresado.

En el fresado de superficies en especial las que son más complicadas existen restricciones empíricas de las fuerzas de corte según lo mencionan Batuev et al. [9] realizaron análisis de fuerza para el estudio y control del fresado. Utilizaron ecuaciones las cuales relacionan fuerzas de corte con el momento de giro en conjunto a su ángulo de pendiente y el grado de desgaste obteniendo una gran cantidad de variables. Como resultados demostraron el ajuste de las dependencias de forma analítica que fueron desarrolladas.

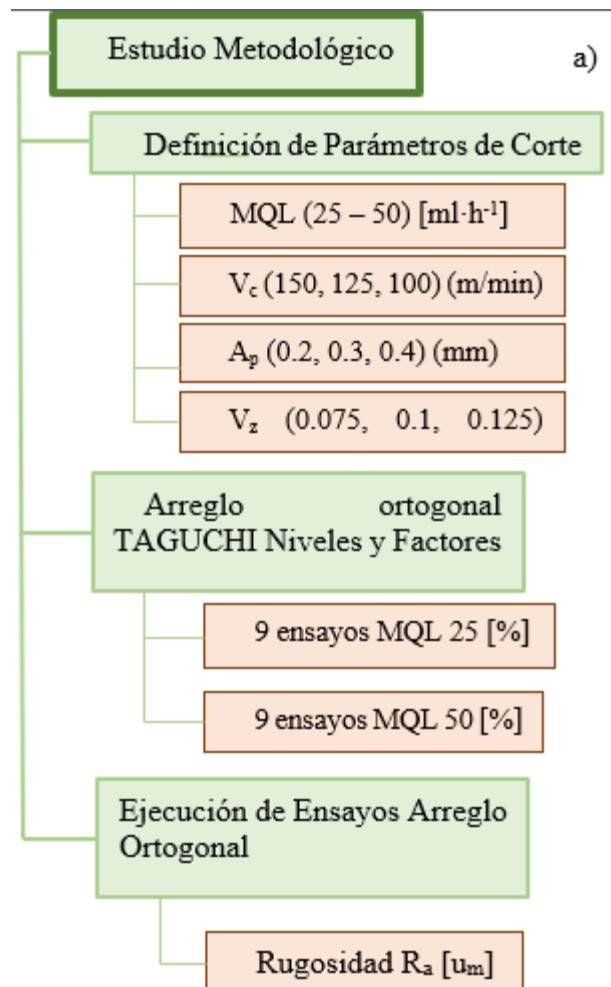
Liu et al. [10] investigaron sobre la energía específica en el fresado en seco, al igual que el resultado que existe en variar los parámetros durante el proceso y también sobre el deterioro de la herramienta teniendo en cuenta la energía de consumo. Además, se enfocaron en las emisiones, sostenibilidad e impacto del medio ambiente. Mencionan que, existe consumo de energía durante el proceso, pero no en el husillo y maquinaria con respecto al deterioro en la herramienta. Sus métodos de anticipación sirven para medir unificar emisiones, energía y daño del ambiente con cantidades de recolección de material. Posteriormente para el análisis de la sostenibilidad se utilizará datos óptimos de rugosidad superficial del acero AISI 4340 en un entorno de MQL en acuerdo con Nole y Paredes [11] el cálculo de fuerzas de corte para la calidad superficial en una probeta maquinada representa factores precisos para fijar parámetros de corte esenciales para completar el mecanizado. Según lo mencionan Sánchez et al. [12] para evaluar el nivel de terminación se prioriza el uso de métodos de medición que incluyen paros en el proceso y en algunos casos, retiro de probetas en mal estado. Esto conduce a consecuencias negativas, tanto en términos de costos bajos, como en términos de confiabilidad en la producción.

El estudio realizado por Gupta et al. [13] mencionan que han intentado con varios fluidos de corte biodegradables para controlar la generación de calor y las huellas ambientales para mejorar la maquinabilidad general. Evaluaron la efectividad

del nitrógeno líquido seco (LN2) y las condiciones híbridas de lubricación criogénica y de cantidad mínima (LN2 + MQL). Se basaron en emanaciones de CO₂ y la energía consumida que también fueron analizados bajo estas condiciones de enfriamiento. Como conclusión obtuvieron que los parámetros de corte más bajos bajo LN2 + MQL produjeron mejores resultados para lograr el índice de sostenibilidad general.

2. Metodología

Para un mejor entendimiento del desarrollo organizativo aplicado en el presente artículo se muestra en la figura 1, un desglose de los temas y subtemas principales que se detallan en el transcurso de este.



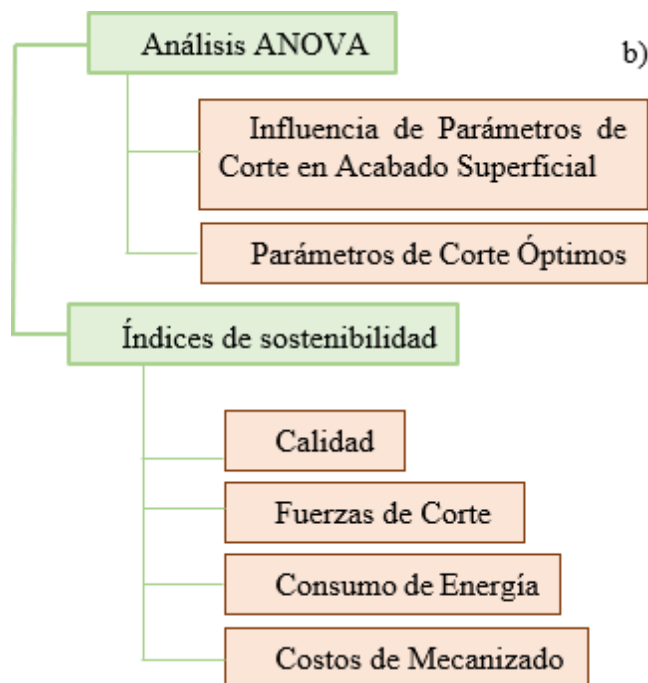


Figura 1. a) Organigrama experimental, b) organigrama analítico.

2.1. Acero AISI 4340

Se trata de una bonificación al cromo, níquel, molibdeno con bastante resistencia y tenacidad mecánica, es decir posee un tratamiento térmico de revenido y temple. Es un proceso que a diferencia de otros otorga una excelente dureza manteniendo bastante la elasticidad, el bonificado es recomendado en procesos de mucha tracción. Alta templabilidad [14]. Usado normalmente en la industria automotriz en piezas que requieren una gran dureza como levas, tornillería de grado 8, cadenas y bielas para motores.

2.2. Propiedades del material

Tabla 1: Propiedades Mecánicas y físicas del AISI 4340 [15].

Propiedades	Valor	Unidades
Resistencia a la tracción	90 - 110	[kg·mm ⁻²]
Reducción de área, Z	45	[%]
Densidad	7.85	[g·cm ⁻³]
Esfuerzo de cedencia	70	[kg·mm ⁻²]

Dureza	270 - 330	[HB]
Elongación, A5	12	[%]

Tabla 2: Propiedades químicas del AISI 4340.[15]

Material	Símbolo	Valor	Unidad
Carbono	C	0.395	[%]
Silicio	Si	0.251	[%]
Molibdeno	Mo	0.2	[%]
Cromo	Cr	1.40	[%]
Manganeso	Mn	0.70	[%]
Níquel	Ni	1.40	[%]

2.3. Tratamiento térmico

2.3.1. Temple (830 – 850) °C

Cuando posee la temperatura adecuada se procede a introducir el material en aceite para enfriarlo y por ende que adquiera las propiedades deseadas. A los 125 °C se pausa el enfriamiento, se retira del aceite y se procede a realizar el revenido.

2.3.2. Revenido

Es calentar a la temperatura deseada después del temple para obtener la dureza mecánica requerida.

2.4. Herramienta de corte

La herramienta de corte utilizada para el experimento es un plato porta insertos de carburo con recubrimiento PVD TiAlN, como se observa en la figura 2. Por motivo de trabajar a velocidades elevadas de corte se optó por tomar este tipo de recubrimiento y se puede utilizar en seco o con un sistema MQL, debido a su estabilidad térmica [20],[21].



Figura 2. (a) Plato porta insertos, (b) inserto de carburo

2.5. Mecanizado con mínima cantidad de lubricación

Los sistemas MQL son los encargados de mantener refrigerada la zona a mecanizar, es decir, tanto en la probeta como en la herramienta. Según investigaciones se determina que son 3 distintas clases de MQL que son las siguientes: En función de la tecnología empleada, el tipo de fluido de corte y el tipo de caudal [16].

En este estudio se implementará el sistema de caudal suministrado de acuerdo con las especificaciones descritas a continuación.

Según lo recomendado en el manual de Walker para la configuración del MQL y de acuerdo con las especificaciones de fresado frontal o lineal utilizadas en este trabajo se tomó 135° en la inclinación de la boquilla con respecto a la pieza a mecanizar, esta inclinación mejora la lubricación de la herramienta, disminuye el uso de aceite y desgaste de la herramienta. El caudal utilizado es de 37.5 ml·h⁻¹ con una presión de 4 bares como lo estipula el manual de Walker.

2.6. Parámetros de corte

2.6. 1. Velocidad de corte

En un torno, la velocidad de corte es definida como la distancia recorrida en metros en un minuto, ya sea por el material o por la herramienta en el caso de una fresa, y se calcula mediante la ecuación 1.

$$V_c = \frac{\pi * D * n}{1000} \left[\frac{m}{min} \right] \quad (1)$$

Donde: n es la velocidad de rotación de la herramienta (husillo) expresada en rev·min⁻¹, D el diámetro exterior de la herramienta expresado en mm y 1000 es el factor de conversión para que nos dé resultado en rev·min⁻¹.

2.6. 2. Velocidad de Avance

El avance es la distancia en milímetros que recorre la pieza por debajo de las aristas cortantes de la fresa mientras esta da un giro con forma que acerca la pieza a la fresa, y se calcula mediante la ecuación 2.

$$V_z = n * f_z * z \quad [m \cdot z^{-1}] \quad (2)$$

2.6. 3. Profundidad de corte

También conocida como profundidad de pasada es la cantidad de material que se va a desprender por cada pasada que realice la herramienta en este caso se tomó datos dados por el catálogo del fabricante [20].

2.6. 4. Cálculos de parámetros de corte

Utilizando la ecuación 1 de donde se despeja n para obtener el número de revoluciones, la velocidad de corte es de igual manera tomada del catálogo del fabricante siendo:

$$V_c = 100 - 150 \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}\text{]},$$

$$f_z = 0.075 - 0.125 \text{ [mm} \cdot \text{z}^{-1}\text{]} \text{ y}$$

$$a_p = 0.2 - 0.4 \text{ [mm]}$$

Para los 3 ensayos respectivamente, en la ecuación 2 tenemos z = 2, para lo cual se obtiene los parámetros óptimos que se muestran en la tabla 3.

Tabla 3: Resultados parámetros de corte

Ex p	Vc [m·min ⁻¹]	f _z [mm·z ⁻¹]	a _p [m]	V _z [mm·min ⁻¹]	n [rp m]
1	100	0.075	0.2	87	579
2	125	0.1	0.3	145	723
3	150	0.125	0.4	217	868

2.7. Análisis estadístico Taguchi (9 ensayos)

Aplicando el método de Taguchi permitirá valorar los diversos resultados del cálculo de las fuerzas de corte de varias iteraciones a realizar. Según lo mencionan Zapata et al. [17] el diseño de Taguchi ve la eficacia como la consecuencia de hacer una fabricación consistente con pocas conmutaciones, con la posibilidad de producir productos con una eficacia más alta, mayor funcionalidad, costos bajos y tiempos de diseño más cortos.

En la tabla 4 se muestra el arreglo ortogonal para nueve ensayos tomando en cuenta los parámetros de corte.

Tabla 4: Arreglo ortogonal L9 para la experimentación.

Exp	V_c [mm·min ⁻¹]	F_z [mm·z ⁻¹]	a_p [mm]
1	150	0,075	0,2
2	150	0,100	0,3
3	150	0,125	0,4
4	125	0,100	0,2
5	125	0,125	0,3
6	125	0,075	0,4
7	100	0,125	0,2
8	100	0,075	0,3
9	100	0,100	0,4

2.8. Análisis ANOVA

El análisis ANOVA para un MQL de 25 [ml·h⁻¹] se muestra en la tabla 5 en donde se denota que el parámetro que más influye durante el mecanizado es V_c con un 61.08 %, la figura 3 indica que el experimento que menor rugosidad se obtiene es cuando V_c es 100 [m·min⁻¹] y a_p es 0.3 [mm] correspondiente al ensayo 8 de la tabla 9.

Tabla 5: Análisis de Varianza al 25 [ml·h⁻¹]

F uente	G L	S C [s]	Contr ibución [%]	S C Ajust	M C Ajust	V alor F	V alor p
V c	2	0,024	61,08	0,024	0,012	0,07	0,197
F z	2	0,005	13,16	0,005	0,002	0,88	0,533
a p	2	0,004	10,74	0,004	0,002	0,72	0,583
Er	2	0,006	15,02	0,006	0,003		
T otal	8	0,040	100,0				

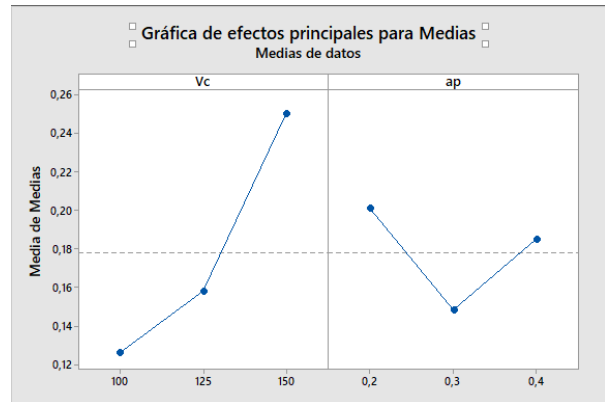


Figura 3. Efectos principales para Medias

El análisis ANOVA para un MQL de 50 [ml·h⁻¹] se muestra en la tabla 6 en donde se sabe que el parámetro que más influye durante el mecanizado es V_c con un 41.85 %, la figura 4 indica que el experimento que menor rugosidad superficial R_a se obtiene es cuando V_c es 100 [m·min⁻¹] y a_p es 0.4 [mm] correspondiente al ensayo 9 de la tabla 10.

Tabla 6: Análisis de Varianza al 50 [ml·h⁻¹]

F uente	G L	S C [s]	Cont ribución [%]	S C Ajust	M C Ajust	V alor F	V alor p
V c	2	0,013	41,85	0,013	0,006	1,58	0,388
F z	2	0,0013	4,37	0,0013	0,0006	0,16	0,859
a p	2	0,008	27,2	0,008	0,004	1,03	0,493
Er	2	0,008	26,5	0,008	0,004		
T otal	8	0,03	100,0				

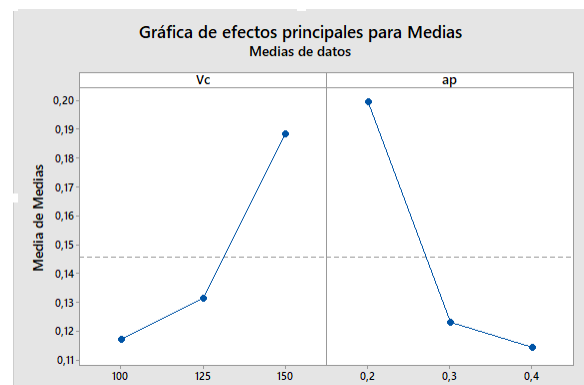


Figura 4. Efectos principales para Medias

2.9. Índices de sostenibilidad

2.7.1. Fuerza de corte

Fuerza necesaria que se requiere para cortar y perfilar una pieza de mecanizado.

La interacción entre la pieza, la herramienta y la viruta producida del mecanizado CNC, equivale a una serie de presiones que se ejercen sobre la herramienta, de esta manera, las fuerzas de corte, de fricción, permite calcular la energía necesaria para mecanizar la pieza dependiendo del y se la obtiene mediante la ecuación 3.

$$F_c = S * f_c \quad [kg] \quad (3)$$

Donde: S: es la sección de la viruta expresada en [mm²], f_c: es la presión de la herramienta sobre la pieza expresada en [kgf·mm²].

Para determinar la fuerza de corte en el mecanizado por fresado tenemos una expresión general la cual está representada por la ecuación 4.

$$F_c(\varphi) = K_c a_p h(\varphi) \quad [kg] \quad (4)$$

Donde se relaciona el grosor de la viruta con la fuerza, la profundidad de corte axial y se representa de acuerdo con la ecuación 5.

$$S = a_p * h(\varphi) \quad [mm^2] \quad (5)$$

En la fuerza específica de corte, tomado en cuenta que el AISI 4340 es denominado acero duro y tiene un rango de kc entre 232 y 300 [kg·mm⁻²] del cual se tomó un kc de 250 [kg·mm⁻²], se tiene en la tabla 4 los resultados de fuerza de corte.

Tabla 7: Resultados Fuerza de Corte

Exp	h (φ) [mm]	a _p [mm]	S [mm ²]	F _c [kg]
1	0.04	0.2	8x10 ⁻³	2
2	0.09	0.4	0.036	9
3	0.15	0.3	0.045	11.25

Como resultado en la tabla 7 se tiene la fuerza de corte para cada una de las diferentes profundidades de corte.

2.7.2. Consumo de energía

Un análisis del consumo energético de una máquina herramienta aporta más información a la organización que la cantidad de energía eléctrica consumida según lo mencionan Gupta et al[13].

El consumo de energía se la puede calcular con la ecuación 6.

$$E_c = \frac{F_c * V_c * T_m}{1000} \quad [kJ] \quad (6)$$

Siendo los términos de la ecuación, F_c: Fuerza de corte principal en [N], T_m: Tiempo de mecanizado en [s], V_c: Velocidad de corte [m·min⁻¹].

2.7.3. Consumo de energía eléctrica

Todos los dispositivos eléctricos necesitan una medida de energía eléctrica para funcionar, basada en su potencia y el tiempo de funcionamiento. Saber cuánto están consumiendo, ayuda a realizar un consumo con mayor eficiencia de la energía para ello se utiliza la ecuación 7 para su determinación.[13]

$$C_e = \frac{\text{Costo unitario de energía}}{\eta * 60 * 1000} * t_m * (C_{cortar} + C_{ocTt}) \quad [\$] \quad (7)$$

Donde: C_{cortar}: es la potencia de corte, C_{ocTt}: el costo de espera de la máquina, el costo unitario de energía para el sector industrial es de 0.799 [\$.kW·h⁻¹] en Ecuador, η: es la eficiencia de máquina del 85 % en general y t_m: el tiempo de mecanizado.

2.7.4. Tiempo total de ciclo

Se utiliza la ecuación 8 del tiempo total de ciclo para determinar la productividad y eficiencia durante el proceso de mecanizado.

$$T_{TCT} = T_{stdby} + T_{ct} + T_{cut} + T_{air} \quad [s] \quad (8)$$

Donde:

T_{stdby}: el tiempo de espera, T_{ct}: el tiempo de cambio de herramienta, T_{air}: el tiempo de corte en el aire y T_{cut}: el tiempo de corte.

La unidad de medida de todos los tiempos está dada en segundos.

El costo total de mecanizado es una buena razón para incentivar la producción sostenible para ello se realiza un estudio focalizado de todo el proceso y se lo puede determinar mediante la ecuación 9.

$$C_T = C_e + C_o + C_t + C_c + C_d \text{ [\$]} \quad (9)$$

Donde: C_e : es el coste de consumo de energía, C_o : los gastos generales, C_t : el costo del inserto de corte, C_c : el costo del refrigerante y C_d : el costo de eliminación de refrigerante.

En el caso de MQL no sería relevante tener en cuenta este costo.

El coste de la herramienta durante la producción en masa de piezas en máquinas herramienta es una parte sustancial del costo total del mecanizado que se la determina con la ecuación 10.

$$C_t = \frac{P_i - P_r}{t_l} * t_m \text{ [\$]} \quad (10)$$

Siendo P_i : el precio del inserto, P_r : el precio de reventa, t_l : la vida útil de herramienta según el catálogo [21] es de 20 min por cada filo del inserto y t_m : el tiempo de mecanizado.

Mediante la ecuación 11 se calcula el coste del refrigerante, por lo tanto, es esencial omitir o reducir los fluidos de corte para asegurar la sostenibilidad del mecanizado.

$$C_c = \frac{C_{\text{Refrigerante}}}{C_l} * f_r * t_m \text{ [\$]} \quad (11)$$

Donde

C_l : es el coste de lubricación,

f_r : la tasa de flujo y

t_m : el tiempo de mecanizado.

Por medio de la ecuación 12 se puede determinar las emisiones de carbono las cuales provocan un daño al medio ambiente y es la causa del incremento de la producción y el elevado consumo de combustibles fósiles que se prefieren como insumos energéticos.

$$C_{ee} = E_c * F_e \text{ [kg - CO}_2\text{]} \quad (12)$$

Siendo E_c : es el consumo de energía eléctrica y F_e : es el factor de emisiones de carbono.

Los costes de eliminación tienen una vida útil definida y se debe eliminar de forma adecuada y cuidadosa con el entorno ambiental [13].

2.10. Método AHP-Topsis

En la evaluación del proceso de sostenibilidad con frecuencia se enfoca en la comparación de diferentes aspectos en conflicto para determinar una alternativa óptima disponible de un grupo determinado de datos.

El método AHP-TOPSIS se ha aplicado debido a las amplias aplicaciones utilizadas en la complejidad de tomar decisiones.

Para la matriz de comparación por pares, se calcularon algunas variables mediante AHP y la ecuación 13 de acuerdo con los parámetros de rugosidad de la superficie (R_a), fuerza de corte (F_c), consumo de energía y emisión de carbono, que están representadas en la tabla 5.

$$W = \{0.0956, 0.1686, 0.3679, 0.3679\} \quad (13)$$

Tabla 8: Matriz de comparación por pares usando AHP

Parámetros	R_a [μ m]	F_c [N]	E_c [J [gm]	Emisiones de carbono [gm]
R_a [μ m]	1	1/3	1/3	1/3
F_c [N]	3	1	1/3	1/3
E_c [J]	3	3	1	1
Emisiones de carbono [gm]	3	3	1	1

La matriz de decisión se obtiene mediante la ecuación 14 y normalizando cada columna de acuerdo con los criterios especificados.

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \forall j \in [1, n] \quad (14)$$

Con la ecuación 15 se obtiene la matriz de decisión ponderada la cual se calcula multiplicando los valores de AHP a la matriz de decisión normalizada.

$$S_{ij} = w_j n_{ij}, \forall i \in [1, m], j \in [1, n] \quad (15)$$

Para determinar la solución ideal positiva y negativa se lo realiza con la ecuación 16 y 17.

$$S_j^+ = (s_1^+, s_2^+, \dots, s_n^+) \\ = ((\max S_{ij} | j \in I), (\min S_{ij} | j \in J)) \quad (16)$$

$$S_j^- = (s_1^-, s_2^-, \dots, s_n^-) \\ = ((\max S_{ij} | j \in I), (\min S_{ij} | j \in J)) \quad (17)$$

Mediante la ecuación 18 y 19 se puede calcular la distancia desde la solución ideal positiva hacia la negativa.

$$e_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (S_{ij} - S_j^+)^2}, \forall i \in [1, m] \quad (18)$$

$$e_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (S_{ij} - S_j^-)^2}, \forall i \in [1, m] \quad (19)$$

Con base en estas distancias, se determina la proximidad relativa a una positiva solución ideal y se la puede calcular mediante la ecuación 20.

$$P_i = \frac{e_i^-}{e_i^- + e_i^+}, \forall i \in [1, m] \quad (20)$$

3. Análisis de Resultados

3.1. Ensayos de rugosidad

Los valores de rugosidad están representados en la figura 4, para los cuales se realizó 3 apreciaciones por cada experimento y a su vez para los dos

niveles de MQL los cuales se observan en las tablas 9 y 10.

Tabla 9: Ensayos de rugosidad MQL 25 [ml·h⁻¹]

E xp	Vc [m/min]	ap [m]	Ra 1	Ra 2	Ra 3	Ra
			[u m]	[u m]	[u m]	[u m]
1	150	0,2	0,3 11	0,2 66	0,2 84	0,2 87
2	150	0,3	0,1 50	0,1 27	0,1 91	0,1 56
3	150	0,4	0,3 02	0,2 60	0,3 57	0,3 06
4	125	0,2	0,2 23	0,1 19	0,1 72	0,1 71
5	125	0,3	0,2 04	0,1 90	0,1 43	0,1 79
6	125	0,4	0,1 77	0,0 99	0,0 95	0,1 24
7	100	0,2	0,1 67	0,1 65	0,1 01	0,1 44
8	100	0,3	0,1 06	0,0 94	0,1 30	0,1 10
9	100	0,4	0,1 14	0,1 18	0,1 42	0,1 25

Tabla 10: Ensayos de rugosidad MQL 50 [ml·h⁻¹]

E xp	Vc [m/min]	ap [m]	Ra 1	Ra 2	Ra 3	Ra
			[u m]	[u m]	[u m]	[u m]
1	150	0,2	0,3 55	0,2 30	0,3 21	0,3 02
2	150	0,3	0,1 28	0,1 44	0,1 34	0,1 35
3	150	0,4	0,1 03	0,1 37	0,1 45	0,1 28
4	125	0,2	0,1 61	0,1 67	0,1 59	0,1 62
5	125	0,3	0,1 76	0,1 10	0,1 35	0,1 40
6	125	0,4	0,0 98	0,0 99	0,0 80	0,0 92
7	100	0,2	0,1 35	0,1 08	0,1 60	0,1 34
8	100	0,3	0,1 02	0,0 83	0,0 98	0,0 94
9	100	0,4	0,1 34	0,1 14	0,1 21	0,1 23

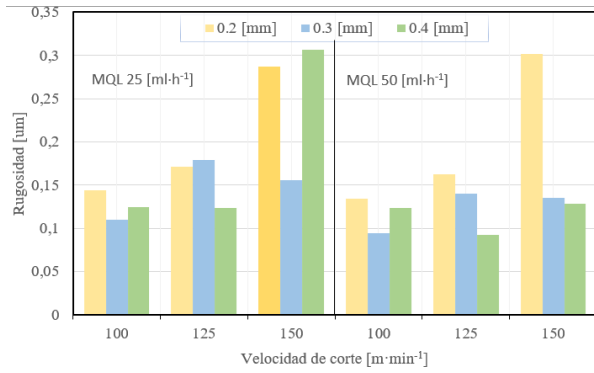


Figura 5. Calidad superficial del AISI 4340

3.2. Consumo de energía

En la figura 5 muestra un gasto energético de 20.21 [kJ] con una profundidad de corte de 0.3 [mm] siendo la más elevada con respecto a los resultados obtenidos con 0.2 [mm] de profundidad de corte según los datos mostrados en las tablas 11 y 12.

Tabla 11: Consumo de energía MQL 25 [ml·h⁻¹]

Ex p	E _c [kJ]	F _c [N]	V _c [m·min ⁻¹]	t _m [min]	ap [mm]
1	3,87	19,6	150	1,32	0,2
2	15,7	110,2	150	0,95	0,3
3	9,04	88,2	150	0,68	0,4
4	2,82	19,6	125	1,15	0,2
5	12,6	110,2	125	0,92	0,3
6	3,68	19,6	125	1,50	0,4
7	2,19	19,6	100	1,12	0,2
8	20,2	110,2	100	1,83	0,3
9	2,65	19,6	100	1,35	0,4

Tabla 12: Consumo de energía MQL 50 [ml·h⁻¹]

Ex p	E _c [kJ]	F _c [N]	V _c [m·min ⁻¹]	t _m [min]	ap [mm]
1	3,63	19,6	150	1,23	0,2
2	15,4	110,2	150	0,93	0,3
3	9,70	88,2	150	0,73	0,4
4	3,10	19,6	125	1,27	0,2
5	12,4	110,2	125	0,90	0,3

6	3,68	19,6	125	1,50	0,4
7	2,19	19,6	100	1,12	0,2
8	20,0	110,2	100	1,82	0,3
9	2,68	19,6	100	1,37	0,4

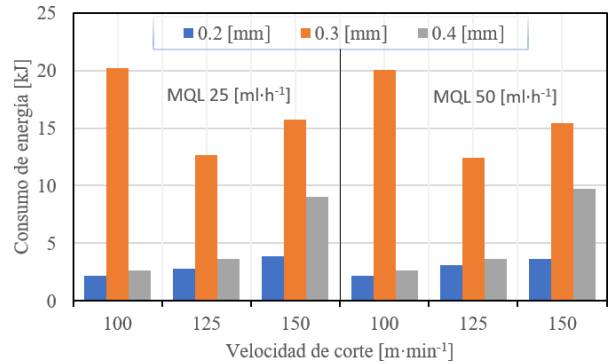


Figura 6. Representación gráfica del consumo de energía

3.3. Tiempo de ciclo de mecanizado

Los tiempos totales del ciclo están representadas mediante la figura 6, los cuales fueron obtenidos mediante la suma de todos los tiempos que involucran el proceso y los dos niveles de MQL que se muestran en las tablas 13 y 14, dando 246 y 264 [s], como resultado mínimo en los valores del ensayo 3.

Tabla 13: Tiempo total del ciclo MQL 25 [ml·h⁻¹]

Exp	T _{TCT} [s]	T _{stdby} [s]	T _{ct} [s]	T _{cut} [s]	T _{air} [s]
1	474	2	3	79	1
2	342,48	2	3	57,08	1
3	246	2	3	41	1
4	414	2	3	69	1
5	330	2	3	55	1
6	540	2	3	90	1
7	402	2	3	67	1
8	660	2	3	110	1
9	486	2	3	81	1

Tabla 14: Tiempo total del ciclo MQL 50 [ml·h⁻¹]

Exp	T _{TCT} [s]	T _{stdby} [s]	T _{ct} [s]	T _{cut} [s]	T _{air} [s]
1	444	2	3	74	1
2	336	2	3	56	1
3	264	2	3	44	1

4	456	2	3	76	1
5	324	2	3	54	1
6	540	2	3	90	1
7	402	2	3	67	1
8	654	2	3	109	1
9	492	2	3	82	1

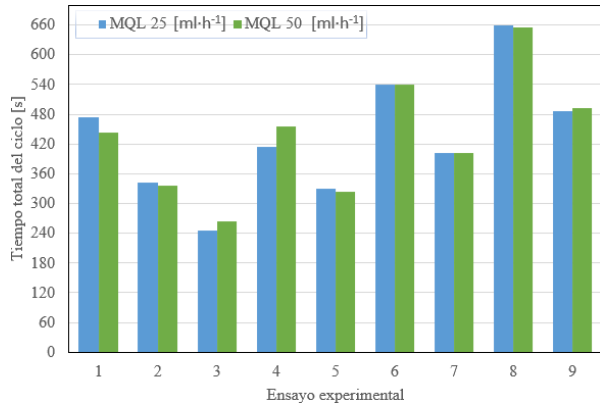


Figura 7. Tiempo total del ciclo de mecanizado

3.4. Costo del consumo de energía

La figura 7 representa el costo del consumo de la energía eléctrica teniendo los valores más elevados en los ensayos 3, 6 y 9 en los dos niveles de MQL cuyos valores están en las tablas 15 y 16.

Tabla 15: Costo de consumo de energía MQL 25 ml·h⁻¹

E xp	C _e [\$]	C. unitario [\$]	η [%]	t _m [s]	C _{c ortar} [W]	C _{ocTt} [\$]	ap [m]
1	1,22 E-08	0,799	0,85	0,022	0,036	0	0,2
2	2,21 E-08	0,799	0,85	0,016	0,089	0	0,3
3	3,16 E-08	0,799	0,85	0,011	0,177	0	0,4
4	1,07 E-08	0,799	0,85	0,019	0,036	0	0,2
5	2,13 E-08	0,799	0,85	0,015	0,089	0	0,3
6	6,94 E-08	0,799	0,85	0,025	0,177	0	0,4
7	1,04 E-08	0,799	0,85	0,019	0,036	0	0,2
8	4,25 E-08	0,799	0,85	0,031	0,089	0	0,3
9	6,25 E-08	0,799	0,85	0,023	0,177	0	0,4

Tabla 16: Costo de consumo de energía MQL 50 ml·h⁻¹

E xp	C _e [\$]	C. unitario [\$]	η [%]	t _m [s]	C _{c ortar} [W]	C _{ocTt} [\$]	ap [m]
1	1,14 E-08	0,799	0,85	0,021	0,036	0	0,2
2	2,16 E-08	0,799	0,85	0,016	0,089	0	0,3
3	3,39 E-08	0,799	0,85	0,012	0,177	0	0,4
4	1,17 E-08	0,799	0,85	0,021	0,036	0	0,2
5	2,09 E-08	0,799	0,85	0,015	0,089	0	0,3
6	6,94 E-08	0,799	0,85	0,025	0,177	0	0,4
7	1,04 E-08	0,799	0,85	0,019	0,036	0	0,2
8	4,21 E-08	0,799	0,85	0,030	0,089	0	0,3
9	6,32 E-08	0,799	0,85	0,023	0,177	0	0,4

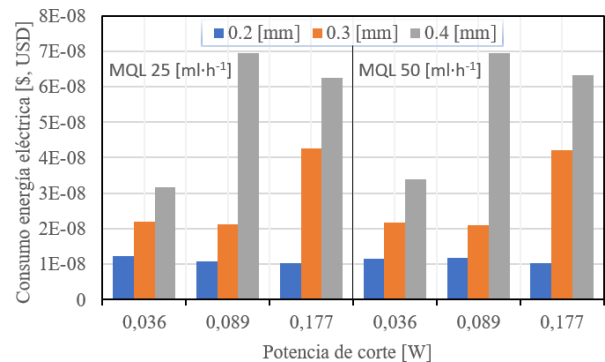


Figura 8. Costo de consumo de energía eléctrica

3.5. Costo de Mecanizado

El costo total de mecanizado no representa variación en los 9 ensayos realizados con MQL 25 [ml·h⁻¹] pero tiene una diferencia notable de [\$] 0.20 aproximadamente respecto a los ensayos con MQL 50 [ml·h⁻¹] los cuales se muestran en las tablas 17 y 18, el valor de C_d es cero debido a que en MQL el costo de eliminación es despreciable y esta representados gráficamente en la figura 8.

Tabla 17: Costo total del mecanizado MQL 25 [ml·h⁻¹]

Ex p	C _r [\$]	C _e [\$]	C _o [\$/]	C _t [\$/]	C _c [\$/]	C _d [\$/]
1	8,28	1,22E-08	0	8,11	0,167	0
2	8,28	2,21E-08	0	8,11	0,167	0

3	8,2 8	3,16E- 08	0	8,1 1	0,16 7	0
4	8,2 8	1,07E- 08	0	8,1 1	0,16 7	0
5	8,2 8	2,13E- 08	0	8,1 1	0,16 7	0
6	8,2 8	6,94E- 08	0	8,1 1	0,16 7	0
7	8,2 8	1,04E- 08	0	8,1 1	0,16 7	0
8	8,2 8	4,25E- 08	0	8,1 1	0,16 7	0
9	8,2 8	6,25E- 08	0	8,1 1	0,16 7	0

Tabla 18: Costo total del mecanizado MQL 50 [ml·h⁻¹]

Ex p	C _T [\$]	C _e [\$]	C _o [\$]	C _t [\$]	C _c [\$]	C _d [\$]
1	8,4 9	1,14E- 08	0	8,1 5	0,33 7	0
2	8,4 9	2,16E- 08	0	8,1 5	0,33 7	0
3	8,4 9	3,39E- 08	0	8,1 5	0,33 7	0
4	8,4 9	1,17E- 08	0	8,1 5	0,33 7	0
5	8,4 9	2,09E- 08	0	8,1 5	0,33 7	0
6	8,4 9	6,94E- 08	0	8,1 5	0,33 7	0
7	8,4 9	1,04E- 08	0	8,1 5	0,33 7	0
8	8,4 9	4,21E- 08	0	8,1 5	0,33 7	0
9	8,4 9	6,32E- 08	0	8,1 5	0,33 7	0

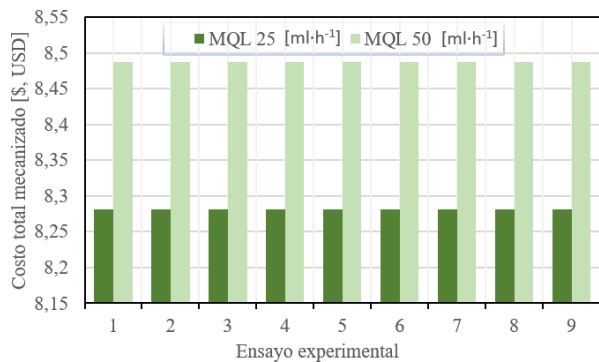


Figura 9. Costo total del ciclo de mecanizado

3.6. Emisiones de CO₂

En la figura 9 está representada la producción de emisiones de carbono y se observa que en los ensayos 2 y 8 en los dos niveles de MQL presentan valores de 6.65 y 8.55 [kg-CO₂] siendo los más

elevados del proceso los cuales se muestran en las tablas 19 y 20.

Tabla 19: Producción de emisiones de CO₂ MQL 25 [ml·h⁻¹]

Exp	C _{ee} [kg-CO ₂]	E _c [kJ]	F _e
1	1,64	3,87	0,42
2	6,65	15,73	0,42
3	3,82	9,04	0,42
4	1,19	2,82	0,42
5	5,34	12,63	0,42
6	1,55	3,68	0,42
7	0,93	2,19	0,42
8	8,55	20,21	0,42
9	1,12	2,65	0,42

Tabla 20: Producción de emisiones de CO₂ MQL 50 [ml·h⁻¹]

Exp	C _{ee} [kg-CO ₂]	E _c [kJ]	F _e
1	1,53	3,63	0,42
2	6,53	15,44	0,42
3	4,10	9,70	0,42
4	1,31	3,10	0,42
5	5,24	12,40	0,42
6	1,55	3,68	0,42
7	0,93	2,19	0,42
8	8,47	20,03	0,42
9	1,13	2,68	0,42

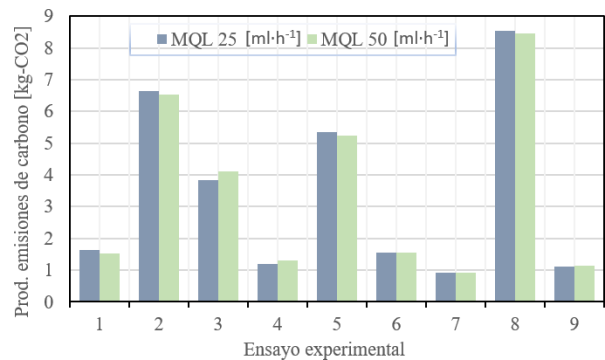


Figura 10. Producción de emisiones de carbono (CO₂)

3.7. Índice global de sostenibilidad

El índice global de sostenibilidad realizado en 9 ensayos con un MQL de 25 y 50 [ml·h⁻¹] se muestra en la figura 10, donde se aprecia la mejor alternativa de 0,971 con $V_c = 100$ [m·min⁻¹] y a_p [mm] = 0,4 y peor alternativa de 0,028 con $V_c = 100$ [m·min⁻¹], a_p [mm] = 0,3

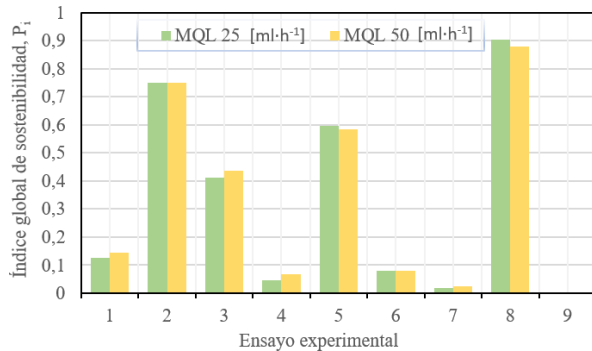


Figura 11. Matriz de comparación AHP

4. Conclusiones

Este artículo analiza la sostenibilidad del mecanizado en torno de MQL en el fresado del AISI 4340 disponible en la industria. Se tomó en cuenta diferentes aspectos sobre el medio ambiente, la lubricación y la tecnología.

De los hallazgos presentados, se resume las siguientes conclusiones:

- Los parámetros de corte se establecieron mediante las ecuaciones mencionadas en el actual documento teniendo como resultados $V_c = 100 - 150$ [m·min⁻¹], $f_z = 0.075 - 0.125$ [mm·z⁻¹], $a_p = 0.2 - 0.4$ [mm] y se utilizó un MQL de 25 y 50 [ml·h⁻¹] para los 9 ensayos propuestos.
- Los valores de rugosidad para los 9 ensayos tanto con MQL de 25 y 50 [ml·h⁻¹] se determinaron mediante el rugosímetro con una configuración de $\lambda = 4.8$ [mm] siendo la distancia de medición.
- Mediante la ecuación 3 se calculó las fuerzas de corte tomando en cuenta un k_c entre 232 y 300 [kg·mm⁻²] debido al material AISI 4340 y se obtuvo como resultado 2, 9 y 11.25 [kg] siendo las principales fuerzas de corte.
- El análisis de consumo de energía muestra que tanto el mecanizado con MQL de 25 y 50 [ml·h⁻¹] tuvieron resultados óptimos debido a que es el

mismo tipo de lubricante. Sin embargo, los resultados para los diferentes parámetros de corte si presentan una variación de 18.02 unidades entre la más alta y la más baja. Por lo tanto, con una velocidad de corte entre 100 y 150 [m·min⁻¹], una profundidad de corte de 0.2 [mm] serían los óptimos para su aplicación debido a que con dichos valores se tiene un menor gasto energético.

- En el análisis de la producción de emisiones de carbono se muestran resultados similares a los de consumo de energía en cuanto a la variación de MQL, sin embargo, en los datos presentados mediante tablas se puede apreciar que, con un consumo de energía de 2.19 [kJ], un factor de emisiones de carbono de 0.42 se obtiene para los dos niveles de MQL una producción de 0.93 [kg·CO₂] siendo la más baja de los 9 ensayos y por tanto la más factible.
- El costo total de mecanizado muestra resultados iguales para los 9 ensayos con MQL de 25 y 50 [ml·h⁻¹] de 8.28 y 8.49 [\$] respectivamente, teniendo una variación de 0.21 unidades. Por lo tanto, se tiene un menor costo de mecanizado en los primeros 9 ensayos con un MQL de 25 [ml·h⁻¹].
- Mediante el método AHP y TOPSIS obtenemos resultados efectivos con valores de velocidad de avance y velocidad de corte los cuales son óptimos para el proceso y que tienen un impacto mínimo al medio ambiente. Según el índice de sostenibilidad calculado se concluye que, la condición de refrigeración MQL de 25 [ml·h⁻¹] representa la mejor alternativa en cuanto a la sostenibilidad en el mecanizado en comparación con la condición de refrigeración MQL de 50 [ml·h⁻¹].

Referencias

- [1] RAE (Real Academia Española), “Sostenibilidad,” 2020. <https://dle.rae.es/sostenible>.
- [2] E. Abele, T. Sielaff, A. Schiffler, and S. Rothenbücher, “Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing,”

- Glocalized Solut. Sustain. Manuf.*, pp. 280–285, 2011, doi: 10.1007/978-3-642-19692-8.
- [3] S. . Balogun, V.A., Aramcharoen, A., Mativenga, P.T., Chuan, “Impact of machine tools on the direct energy and associated carbon emissions for a standardized NC toolpath,” *Re-engineering Manuf. Sustain.*, pp. 197–202, 2013.
- [4] Y. J. Park and G. B. Lee, “Analysis of energy efficiency and productivity in dry process in PCB manufacturing,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 14, no. 7, pp. 1213–1221, 2013, doi: 10.1007/s12541-013-0165-0.
- [5] A. Iqbal *et al.*, “Sustainable milling of Ti-6Al-4V: Investigating the effects of milling orientation, cutter’s helix angle, and type of cryogenic coolant,” *Metals (Basel)*, vol. 10, no. 2, 2020, doi: 10.3390/met10020258.
- [6] A. Bagherzadeh, E. Kuram, and E. Budak, “Experimental evaluation of eco-friendly hybrid cooling methods in slot milling of titanium alloy,” *J. Clean. Prod.*, vol. 289, p. 125817, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.125817.
- [7] A. P. Markopoulos *et al.*, “Sustainability assessment, investigations, and modelling of slot milling characteristics in eco-benign machining of hardened steel,” *Metals (Basel)*, vol. 10, no. 12, pp. 1–17, 2020, doi: 10.3390/met10121650.
- [8] X. Yang, X. Cheng, Y. Li, G. Zheng, and R. Xu, “Machinability investigation and sustainability analysis of minimum quantity lubrication–assisted micro-milling process,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 234, no. 11, pp. 1388–1401, 2020, doi: 10.1177/0954405420921727.
- [9] V. A. Batuev, V. V. Batuev, D. V. Ardashev, L. V. Shipulin, and A. S. Degtyareva-Kashutina, “Analytical Calculation of Cutting Forces and Analysis of their Change at 3-D Milling,” *Procedia Manuf.*, vol. 32, pp. 42–49, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.02.181.
- [10] Z. Y. Liu, Y. B. Guo, M. P. Sealy, and Z. Q. Liu, “Energy consumption and process sustainability of hard milling with tool wear progression,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 229, pp. 305–312, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2015.09.032.
- [11] R. F. NOLE NOLE and A. M. PAREDES GARCÍA, “ANÁLISIS DEL ACABADO SUPERFICIAL EN ACERO AISI 4340 PARA OPERACIONES DE FRESADO PLANO USANDO UN SISTEMA DE LUBRICACIÓN DE MÍNIMA CANTIDAD,” *Tesis*, p. 25, 2021, [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5081/1/UPS-CYT00109.pdf>.
- [12] M. Sánchez-Carrillero, M. Marcos, M. Álvarez-Alcón, and V. M. Sánchez-Corbacho, “Evaluación de la calidad superficial de piezas mecanizadas a partir del análisis de la fuerza de corte,” *Rev. Metal.*, vol. 34, no. Extra, pp. 27–31, 1998, doi: 10.3989/revmetalm.1998.v34.iextra.702.
- [13] M. K. Gupta *et al.*, “Ecological, economical and technological perspectives based sustainability assessment in hybrid-cooling assisted machining of Ti-6Al-4 V alloy,” *Sustain. Mater. Technol.*, vol. 26, p. e00218, 2020, doi: 10.1016/j.susmat.2020.e00218.
- [14] PROVEIN (Comercializadora de aceros especiales e insumos para la industria metalmecánica y petrolera), “ACEROS CONSTRUCCIÓN MECÁNICA,” 2020. <https://provein.com.ec/aceros-construccion-mecanica/>.
- [15] BOHMAN, “Aceros y Materiales,” pp. 117–99;8, [Online]. Available: https://drive.google.com/file/d/1iVOEY9N CkIotloMQciZyRL_bA5oQWCIQ/view.
- [16] C. F. GOMEZ BARRANTES and H. F. ROMERO PINZÓN, “OPTIMIZACION DE LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL EN ACERO AISI 1045 UTILIZANDO EL METODO DE SUPERFICIE DE RESPUESTA,” *Ekp*, vol. 13, no. 3, pp. 1576–1580, 2017.

- [17] A. Zapata Gómez and W. A. Sarache Castro, “Mejoramiento de la calidad del café soluble utilizando el método Taguchi,” *Ingeniare. Rev. Chil. Ing.*, vol. 22, no. 1, pp. 116–124, 2014, doi: 10.4067/s0718-33052014000100011.