



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
MECÁNICA – DISEÑO MECÁNICO

CONSUMO DE ENERGÍA EN PROCESO DE MAQUINADO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:
GUSTAVO MANUEL MINQUIZ XOLO

TUTORES PRINCIPALES
DR. VICENTE BORJA RAMÍREZ, FACULTAD DE INGENIERÍA.
DR. MARCELO LÓPEZ PARRA, FACULTAD DE INGENIERÍA.
DR. LEOPOLDO RUÍZ HUERTA, CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO
TECNOLÓGICO.

COMITÉ TUTOR
DR. ALEJANDRO CUAUHTÉMOC RAMÍREZ REIVICH, FACULTAD DE INGENIERÍA.
DR. ÁLVARO AYALA RUÍZ, FACULTAD DE INGENIERÍA.

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. DICIEMBRE 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. MARCELO LÓPEZ PARRA
Secretario: DR. LEOPOLDO RUÍZ HUERTA
Vocal: DR. VICENTE BORJA RAMÍREZ
1^{er}. Suplente: DR. ALEJANDRO CUAUHTÉMOC RAMÍREZ REIVICH
2^{do}. Suplente: DR. ÁLVARO AYALA RUÍZ

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Productivity Center de la empresa Sandvik Coromant y Laboratorio de Manufactura Sustentable de la Universidad de Berkeley California.

TUTOR DE TESIS:

DR. VICENTE BORJA RAMÍREZ



A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Vicente Borja Ramírez', is written over a horizontal dashed line.

FIRMA

Agradecimientos

Se agradece el apoyo a la empresa Sandvik Coromant, al Productivity Center por las facilidades prestadas para la realización de este trabajo y la tutoría brindada por el Ing. Pablo Flores gerente de Ingeniería, así como al Ing. Alejandro Yamamoto Sanchez Training & Center Manager y al Ing. Jose Luis Mendoza Macías.

Así también se realizaron unos experimentos en el Laboratorio de Manufactura Sustentable de la Universidad de Berkeley California, con el apoyo y tutoría brindada por el profesor David Dornfeld y al PhD. Raunak Bhinge.

Así como a mis tutores y asesores del posgrado de ingeniería Dr. Vicente Borja Ramírez, Dr. Marcelo López Parra, Dr. Leopoldo Ruiz Huerta, Dr. Alejandro Ramírez Reivick y al Dr. Álvaro Ayala Ruiz. Los cuales han formado parte de este proyecto desde un inicio hasta la conclusión del mismo. Las contribuciones han sido en compartir sus experiencias, conocimientos, sugerencias y apoyo en cada etapa del proyecto.

El apoyo brindado al Instituto Tecnológico de Puebla por las facilidades proporcionadas durante el estudio del Doctorado.

Se agradece el apoyo brindado al proyecto brindado por la DGAPA a través del proyecto PAPIIT IT103012 y a la beca otorgada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (beca: 288411 & apoyo: 355272) y Proyecto SEP-CONACYT-Ciencia Básica No. 83239).

La ayuda proporcionada por la empresa Ramsa Maquinados S.A. de C.V en el desarrollo de algunos experimentos ha sido determinante en los inicios de este trabajo de investigación, particularmente el apoyo del Sr. Macario Ibáñez Pérez, Ing. Carlos Ramírez Ramos y al Ing. Horacio Mena Perales.

Tabla de Contenidos

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.2	Estructura del trabajo	6
2.	ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE.....	7
2.1	Proceso de maquinado	7
2.2	Operaciones de maquinado	10
2.3	Herramientas de corte	12
2.4	La demanda de potencia en un centro de maquinado CNC	17
2.5	Modelos de energía en centros de maquinado CNC.....	21
2.6	Medición y monitoreo de la energía	26
2.7	Diseño de experimentos.....	28
2.8	Configuración y trayectorias de la herramienta de corte	32
2.9	Selección de máquina CNC	37
2.10	Fluido de corte	38
2.11	Acabado superficial	40
2.12	Discusión del estado del arte.....	44
3.	PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	46
3.1	Objetivo.....	46
3.2	Alcances.....	46
3.3	Hipótesis	47
3.4	Justificación	47
3.5	Aportación.....	48
4.	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	49
4.1	Diseño de pieza de caso de estudio (Características dimensiones).....	50
4.2	Selección del material	52
4.3	Selección de herramienta de corte	53
4.4	Selección de maquinaria	55
4.5	Análisis y planteamiento de modelado de potencia, diseño de experimentos	56
4.6	Selección y configuración de trayectorias de recorrido de la herramienta	59
4.7	Diseño de experimentos.....	63
4.8	Configuración de instrumentos para toma de datos de potencia y energía.....	65
4.9	Características de instrumentos de medición.....	67
4.10	Software para generar el código NC de maquinado	70
5.	RESULTADOS.....	71
5.1	Comportamiento de potencia y energía desde la perspectiva de trayectoria	71
5.2	Modelado de modelos para predicción de potencia.....	76
5.3	Comportamiento de potencia y energía a partir del diseño DOE	81

5.4 Características geométricas finales de la pieza de caso de estudio.....	87
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....	89
REFERENCIAS.....	93
7. ANEXOS	98
Anexo A Modelado matemático	98
Anexo B Gráficas de potencia y energía a partir del diseño DOE.....	104
Anexo C Plano de pieza de caso de estudio.....	108
Anexo D Datos de operaciones.....	109
Anexo E Artículo de caso de estudio de operación de cajado – análisis de vida útil, potencia, energía y emisiones de CO2.	111
Anexo F Productos y actividades realizadas en el proyecto	119

Lista de tablas

Tabla 2.1 Energía necesaria para operaciones de corte [9].....	10
Tabla 2.2 Valores típicos de dureza a temperatura ambiente y Resistencia a la ruptura transversal para varios materiales de herramienta [11].....	13
Tabla 2.3 Fórmulas de maquinado [9]	17
Tabla 2.4 Características de potencia y energía del proceso de maquinado (Adaptación de [44]).	38
Tabla 2.5 Promedio de rugosidad, en comparación con grados ISO 1302 [45].	42
Tabla 4.1 Detalles dimensionales del caso de estudio.	52
Tabla 4.2 Propiedades del acero AISI 1045 [52].....	52
Tabla 4.3 Características de fresadora vertical Haas VM3®.....	55
Tabla 4.4 Detalles de la configuración del planeado.	61
Tabla 4.5 Detalles de configuración de los cajeados.	62
Tabla 4.6 Parámetros para determinar potencia de tara en operación - planeado.....	64
Tabla 4.7 Parámetros de corte seleccionados en diferentes operaciones de maquinado.	65
Tabla 4.8 Características de Medidor Fluke 430 Serie.	66
Tabla 4.9 Características de máquina de medición por coordenadas Checkmaster - HELMEL. .	68
Tabla 4.10 Características de Rugosímetro Mitutoyo SurfTest SJ-210.	69
Tabla 5.1 Resultados de potencia de operaciones de maquinado en Vacío.....	76
Tabla 5.2 Resumen de modelado no lineal - Vacío	77
Tabla 5.3 Resumen de modelado lineal – Vacío.....	78
Tabla 5.4 Resultados de potencia de operaciones de maquinado - Planeado.	78
Tabla 5.5 Resumen de modelado no lineal – Planeado.	79
Tabla 5.6 Resumen de modelado lineal – Planeado.	80
Tabla 5.7 Resultados de potencia de operaciones de barrenado.	80
Tabla 5.8 Datos de la operación de superficie.	86
Tabla 5.9 Detalles dimensionales de 8 piezas maquinadas.....	87
Tabla 5.10 Diámetro de las diferentes características de la pieza de caso de estudio.	88
Tabla 5.11 Acabado superficial de la pieza de caso de estudio	88
Tabla 6.1 Parámetros que mejor convergen en kW, kWh y Ra.	91
Tabla 7.1 Parámetros Estimados.....	98
Tabla 7.2 Analysis of Variance.....	98
Tabla 7.3 Model Summary	98
Tabla 7.4 Coefficients.....	98
Tabla 7.5 Parámetros Estimados.....	99
Tabla 7.6 Analysis of Variance.....	99
Tabla 7.7 Model Summary	99

Tabla 7.8 Coefficients.....	99
Tabla 7.9 Resultados de potencia de operaciones de contorno.....	100
Tabla 7.10 Analysis of Variance.....	100
Tabla 7.11 Model Summary	100
Tabla 7.12 Coefficients.....	101
Tabla 7.13 Resultados de potencia de operaciones de superficie.	101
Tabla 7.14 Analysis of Variance.....	102
Tabla 7.15 Model Summary	102
Tabla 7.16 Coefficients.....	102
Tabla 7.17 Parametros Estimados.....	102
Tabla 7.18 Resumen de modelado superficie- Levenberg Marquardt.....	103
Tabla 7.19 Comparativo de contornos con profundidad de corte de 20 mm.	104

Lista de figuras

Fig. 1.1	Potencia de estado básico y de inicio en centros de maquinado [4].	1
Fig. 1.2	Distribución de la demanda de potencia de MHP MDSI CNC- Torno CNC [4].	2
Fig. 1.3	Desglose de consumo de energía de 3 centros de maquinado por Kordonowy [6].	3
Fig. 1.4	Tiempo de procesamiento y consumo de energía de 5 trayectorias diferentes [8].	4
Fig. 1.5	Definición de la pendiente ‘n’ y constante ‘C’ de la ecuación de Taylor [10].	5
Fig. 2.1	a) Fresadora horizontal b) Fresadora vertical [12].	7
Fig. 2.2	Formación de viruta de corte durante el maquinado [9].	8
Fig. 2.3.	Fuerza de corte durante el maquinado [9].	8
Fig. 2.4	Operaciones de fresado a) Plano b) Frontal o externo [12].	10
Fig. 2.5	Esquema de fresado convencional y concurrente [9].	11
Fig. 2.6	Operaciones: a) Perfilado, b) cajeado y c) contorno superficial [9].	11
Fig. 2.7	Herramienta desgastada [11].	12
Fig. 2.8	Geometría de la herramienta de corte (Buril) [10].	14
Fig. 2.9	a) Geometría de fresa vertical b) Detalles geométricos del diente [16].	15
Fig. 2.10	Esquema de avance por diente [17].	16
Fig. 2.11	Esquema de diámetro de corte real [17].	16
Fig. 2.12	Línea del tiempo de modelos propuestos de potencia, fuerza y acabado superficial. ...	18
Fig. 2.13	Desglose de potencia demandada de máquina Bridgeport Torq-Cut TC3 [6].	19
Fig. 2.14	Modelo de red neuronal artificial [28].	20
Fig. 2.15	Línea del tiempo de modelos propuestos de energía.	21
Fig. 2.16	Respuesta de eficiencia de Máquina FV-32 [19].	22
Fig. 2.17	Desglose de energía en un centro de maquinado CNC [35].	23
Fig. 2.18	Desglose de consumo de energía específica [36].	24
Fig. 2.19	Comportamiento de consumo de energía con diferentes trayectorias. [18]	26
Fig. 2.20	a) Adquisición de voltaje y amperaje Fluke®i200s b) Modulo de voltaje NI 9225 c) Modulo de corriente NI 9229 d) Chasis de adquisición de datos NI cDAQ-9172 e) PC f) Diagrama de block en Lab VIEW g) Panel frontal de LabVIEW. [37].	27
Fig. 2.21	Experimentos con dos factores de dos niveles [39].	28
Fig. 2.22	Trayectoria de la herramienta [42].	32
Fig. 2.23	a) Empalme constante b) Dynamic en vaciados [16].	33
Fig. 2.24	a) a_e igual a 50% y b) a_e mayor al 50% [17].	33
Fig. 2.25	Entrada de la herramienta en hélice.	34
Fig. 2.26	Plunge angle.	34
Fig. 2.27	Trayectorias a) ZigZag b) One Way c) Dynamic.	35
Fig. 2.28	Trayectoria de maquinado a) “True Spiral” b) “High Speed Dynamic”.	35
Fig. 2.29	Barrenado a) Chip breaker b) Counter boring	36

Fig. 2.30 Pieza de caso de estudio de Behrendt [44].	37
Fig. 2.31 Esquema de los métodos adecuados de aplicación de fluidos de corte a) Cilindrado b) Tallado de rosca y taladro [9].	40
Fig. 2.32 Entrada de la herramienta (Mayor a menor espesor) [17].	40
Fig. 2.33 Características de la superficie [10].	41
Fig. 2.34 Posición de colocación de requerimientos complementarios [45].	43
Fig. 2.35 Rugosidades superficiales producidas por métodos de producción [10].	43
Fig. 4.1 Secuencia de metodología.	50
Fig. 4.2 Pieza de estudio.	51
Fig. 4.3 Letras y colores de acuerdo a norma ISO [15]. (Clasificación del material).	53
Fig. 4.4 a) Porta-herramienta “345-050C5-13M”, b) herramienta “345R-1305M-PL 4230” [17].	53
Fig. 4.5 a) Porta-herramienta “392.45CG-40 20 060”, b) herramienta “1P240-1200-XA 1630” [17].	54
Fig. 4.6 a) Porta-herramienta “392.45CG-40 20 060”, b) herramienta “860.1-1400-040A1-PM 4234” [17].	54
Fig. 4.7 a) Porta-herramienta “392.45CG-40 20 060”, b) herramienta “860.1-1400-040A1-PM 4234” [17].	55
Fig. 4.8 Herramienta “1B240-1200-XA 1630” [17].	55
Fig. 4.9 Desglose de potencia de máquina CNC.	56
Fig. 4.10 Factores influyentes en potencia variable.	57
Fig. 4.11 Factores influyentes en potencia de corte.	59
Fig. 4.12 Secuencia de evaluación de trayectorias.	60
Fig. 4.13 Trayectorias a) Zig zag b) One way c) Dynamic.	60
Fig. 4.14 Cajeados a) High Speed Dynamic b) True Spiral.	62
Fig. 4.15 Barrenados a) Drill counterbore b) Chip break	63
Fig. 4.16 Configuración de toma de datos de potencia y energía.	67
Fig. 4.17 CMM Helmel.	68
Fig. 4.18 Rugosímetro Mitutoyo SurfTest SJ-210	69
Fig. 5.1 Esquema de secuencia de resultados	71
Fig. 5.2 Comparativo de tiempo ciclo en la operación de planeado.	72
Fig. 5.3 a) Comparativo de potencia en la operación de planeado. b) Comparativo de energía en la operación de planeado.	73
Fig. 5.4 Comparativo de tiempo ciclo en la operación de cajeados.	73
Fig. 5.5 a) Comparativo de potencia en la operación de cajeados. b) Comparativo de energía en la operación de cajeados.	74
Fig. 5.6 a) Comparativo de tiempo ciclo en la operación de barrenado. b) Comparativo de potencia en la operación de barrenado.	75

Fig. 5.7 Comparativo de energía en la operación de barrenado.....	75
Fig. 5.8 Planeado vacío a) Comportamiento de vacío de probabilidad normal. b) Comportamiento de vacío – Ajuste.....	77
Fig. 5.9 Planeado a) Comportamiento de planeado de probabilidad normal. b) Comportamiento de planeado – Ajuste.....	79
Fig. 5.10 Barrenado a) Comportamiento de planeado de probabilidad normal. b) Comportamiento de planeado – Ajuste.....	81
Fig. 5.11 Comportamiento de potencia considerando tres trayectorias en operación de planeado en vacío.....	82
Fig. 5.12 Comportamiento de energía considerando tres trayectorias en operación de planeado en vacío.....	82
Fig. 5.13 Comportamiento de energía total con trayectoria Dynamic en operación de planeado.....	83
Fig. 5.14 Comportamiento de potencia con trayectoria Dynamic.....	84
Fig. 5.15 Comparativo de demanda de potencia experimental, modelo predictivo lineal y no lineal.....	85
Fig. 7.1 Potencia de operación de contorno – Real Vs Teórica.....	104
Fig. 7.2 Comportamiento de energía de operación de contorneado.....	105
Fig. 7.3 Comportamiento potencia en operación de barrenado Real vs teórico.....	105
Fig. 7.4 Comportamiento de energía de operación de barrenado.....	106
Fig. 7.5 Comportamiento de potencia en operación de superficie.....	106
Fig. 7.6 Comportamiento de potencia y remoción de material de las 27 pruebas.....	107
Fig. 7.7 Plano de pieza de caso de estudio.....	108

Abstract

Este trabajo muestra la investigación al evaluar un proceso de fresado de una pieza de caso de estudio con material de acero 1045. Para maquinar la pieza se seleccionaron distintas trayectorias de recorrido de la herramienta y 27 combinaciones diferentes de parámetros de corte (Profundidad de corte, velocidad de corte y avance). Con el objetivo de conocer el comportamiento energético, acabado superficial, tiempo ciclo. Adicionalmente a partir de la identificación de trayectorias de recorrido de la herramienta generar un planteamiento de un modelo predictor de potencia y la relación con el consumo de energía. Para el desarrollo esta investigación se utilizó máquinas CNC, medidores de calidad de energía, máquinas de medición por coordenadas, microscopio electrónico de barrido, rugosímetros y calibradores vernier. Para el desarrollo experimental planteó un diseño DOE 3³. Los resultados obtenidos se han mostrado en diversos artículos: “A Comparative Study of CNC Part Programming Addressing Energy Consumption and Productivity”, “Evaluación de consumo de energía: Caso de estudio Fresado”, A Comparative Study of CNC Part Programming Addressing Energy Consumption and Productivity y “A Nonlinear Model to Predict Power Consumption as a Function of Cutting Parameters in a multioperation milling process”. Las principales aportaciones se enfocan en la identificación y datos de consumo de energía en términos de la trayectoria, obtención de un modelo predictivo de potencia y datos de acabado superficial y las diferencias en potencia demandada y consumo de energía en una pieza con diversas operaciones de mecanizado.

1. INTRODUCCIÓN

La manufactura en México ha cobrado importancia a partir de los años 80, la industria automotriz registro 30.8% de exportaciones hasta alcanzar el 84.3% de las exportaciones en el 2013. En este sector es necesario aplicar manufactura avanzada, es decir con alto grado de diseño y tecnología de computo como (CAD, CAM y CAM) [1]. El sector de productos representa el 3.65% de energía eléctrica total consumida, las industrias en este sector son la automotriz y aeronáutica [2]. Sin embargo, como resultado de la actividad industrial y el alto consumo de energía se generan los gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O). Estos gases generan un gran daño al medio ambiente, debido a que el sector consume materiales renovables y no renovables (ej. metales, combustibles fósiles, materiales y agua) [3].

La imagen 1.1 muestra una gráfica de la potencia que demandan los centros de maquinado CNC, la potencia ha sido dividida en dos secciones, potencia básica y potencia de inicio. Se realizó un estudio a tres centros de maquinado CNC MHP Lathe, Takisawa CNC milling machine y Mikron HSM 400 High Speed Milling center. Los resultados mostraron que la potencia básica fue de 53%, 72% y 63% de la potencia total respectivamente. Esta potencia incluye el encendido general, encendido de motor de husillo, servos, bomba de soluble. El dato de potencia fue medido en una escala del 0 al 100 % por lo que el resto corresponde a potencia de inicio, esto es posible observarlo en la imagen 1.1 [4].

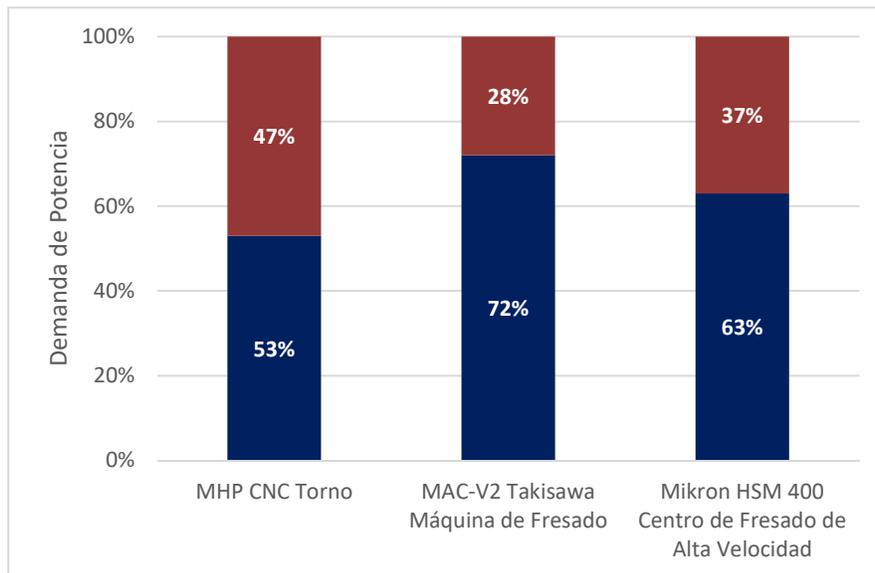


Fig. 1.1 Potencia de estado básico y de inicio en centros de maquinado [4].

Aunque existe variación en la potencia de cada centro de maquinado, es posible notar que la potencia básica demanda es la que representa más del 50% (Fig. 1.1). La potencia de inicio involucra la velocidad de corte y el avance de la mesa, estos son los cambios rápidos configurados por el usuario.

La eficiencia de la energía consumida en un centro de maquinado depende de la potencia de entrada y la potencia consumida por cada componente eléctrico, esta relación permite determinar el aprovechamiento del equipo. Por ejemplo Balogun et al [4]. Analizó los componentes eléctricos que componen a un centro de maquinado. Estos se han dividido en diferentes formas, aunque siempre en función de los componentes eléctricos en un centro de maquinado. En la figura 1.2 es notable que el arranque del centro de maquinado y la velocidad del husillo representan las altas potencias demandadas con 24% respectivamente, los servos que están relacionados con el posicionamiento de la pieza representan el 16.27 %, la bomba hidráulica el 14.26% y el resto de la potencia está dividida en el interruptor principal, computadoras, cambio de herramienta.

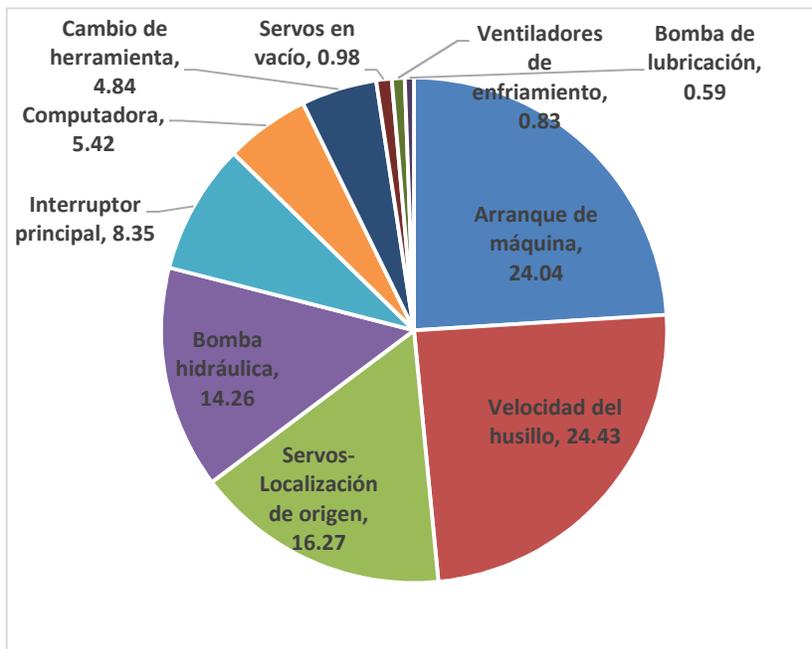


Fig. 1.2 Distribución de la demanda de potencia de MHP MDSI CNC- Torno CNC [4].

Aunque la distribución de la potencia en la figura 1.2 muestra un desglose de la potencia, ha sido posible establecer una agrupación en tres secciones. La Fig. 1.3 muestra el comparativo de tres máquinas, la Bridgeport TC3 (máquina manual), Cincinnati 7VC (máquina de 3 ejes) y Haas (máquina de 5 ejes). En esta imagen es posible observar la potencia empleada para la remoción de material. En una máquina manual la potencia es

mayor en comparación con las máquinas CNC, aproximadamente el 65.8% de la potencia en una fresadora manual, mientras que en una de tres ejes es 48.3% y en la de 5 ejes es 24.2% [5]. La figura 1.3 muestra una clasificación de la potencia:

- De maquinado es igual a la potencia de remoción de material.
- La constante depende del tiempo de operación en vacío.
- La remoción de material decrece en función del número de ejes automatizados.
- Es posible notar que una gran parte de la potencia se demanda cuando la máquina no está cortando material en las máquinas CNC.

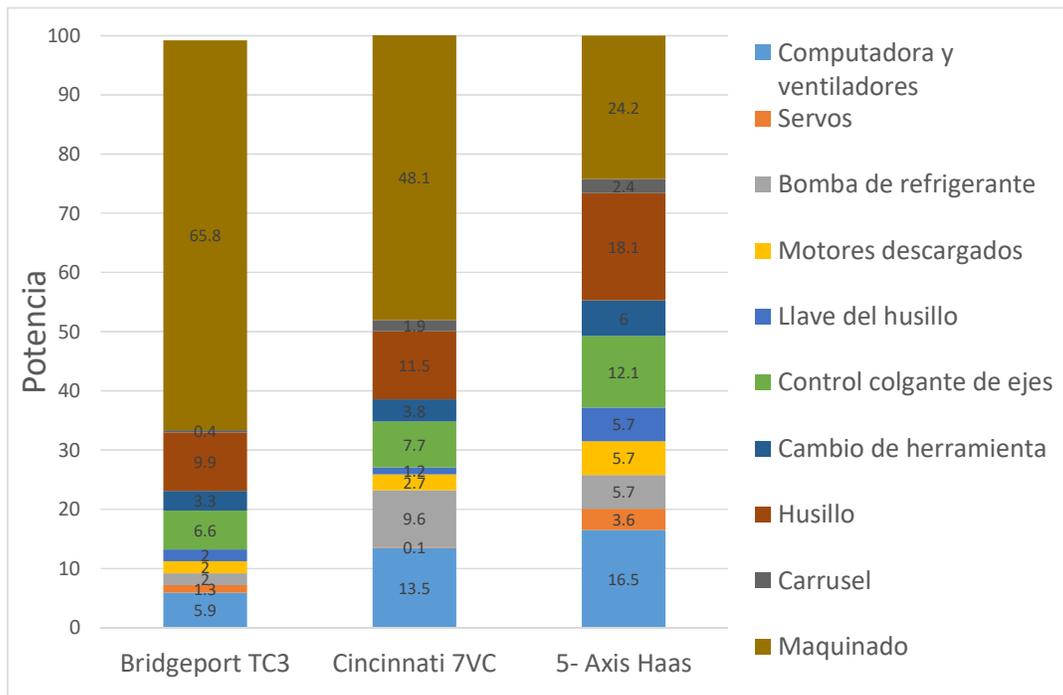


Fig. 1.3 Desglose de consumo de energía de 3 centros de maquinado por Kordonowy [6].

Existen diferentes estrategias en la trayectoria de maquinado, esta actividad se define durante la configuración del proceso. Esto es posible realizarlo utilizando software comerciales de CAM, el programa que se genera, es procesado por el controlador de la máquina herramienta y traducido a los movimientos y acciones de la que dispone la máquina. Sin embargo pruebas realizadas por Díaz et al [7]. En una Máquina CNC – Mori Seiki NV1500 DCG mostró que el mover el eje en la dirección ‘Y’ requiere más energía en comparación con el eje ‘X’, el utilizar los dos ejes al mismo tiempo incrementa el consumo de energía. En la Fig. 1.4 muestra el estudio comparativo de tiempo de procesamiento y consumo de energía, cuando se configura diferentes trayectorias, la fig.

1.4 a muestra el consumo cuando la herramienta de corte realiza el recorrido sobre el eje X, mientras que la 1.4 b muestra el recorrido al utilizar interpolación o recorrido en el eje X & Y. La Fig. 1.4 muestra la diferencia en tiempo ciclo al realizar trayectorias de recorrido en forma radial. Las trayectorias analizadas en este caso de estudio mostraron comportamientos diferentes en energía y tiempo ciclo, al realizar la misma operación de maquinado.

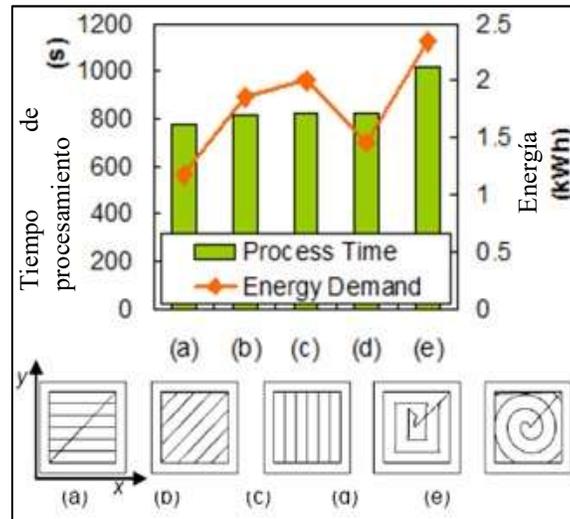


Fig. 1.4 Tiempo de procesamiento y consumo de energía de 5 trayectorias diferentes [8].

Aunque la trayectoria de corte influye en la demanda de potencia, el desgaste de la herramienta es progresivo, como consecuencia el radio de la nariz de la herramienta presenta un desgaste progresivo que a su vez afecta el acabado superficial. Taylor propuso una ecuación (ver ecuación 9) para predecir el desgaste de la herramienta de corte, que depende de la 'V' velocidad de corte y 'T' tiempo de vida útil de la herramienta, n es la pendiente que se determina de los resultados de los datos experimentales de velocidad de corte y el tiempo de vida de la herramienta (ver figura 1.5). También es posible observar que 'C' es la velocidad máxima a la que puede trabajar la herramienta de corte durante un minuto de trabajo, antes de llegar a dañarse la herramienta. Cada línea de tendencia mostrada (ECT, significa el espesor de viruta efectivo) este tiende a incrementar de 0.1, 0.25, 0.5 y 0.7 con el tiempo de trabajo de la herramienta.

$$V \cdot T^n = C. \quad [9]$$

La pendiente 'n' y la constante 'C' definen la vida útil de un valor particular de avance 'v_f', profundidad de corte 'a', ángulo de la punta 'LA', radio de la punta 'r', el área 'A' y de las constantes n, m, p, q y s que son obtenidas a partir de los resultados de experimentos y están en relación a las propiedades de maquinabilidad del material (Fig. 1.5). La ecuación de Taylor generalizada queda como:

$$T^n = A \cdot v_f^m \cdot a^p \cdot LA^q \cdot r^s [9].$$

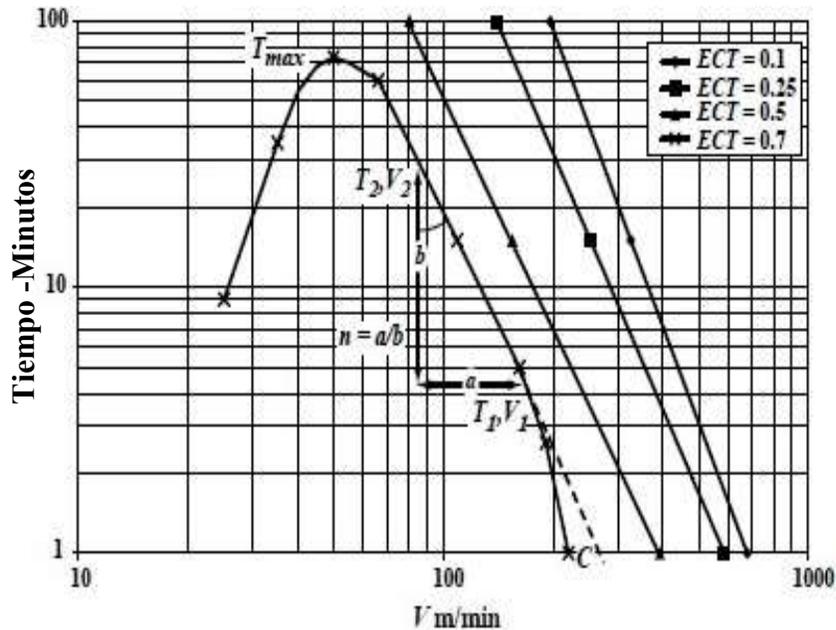


Fig. 1.5 Definición de la pendiente 'n' y constante 'C' de la ecuación de Taylor [10].

Por lo antes mencionado es posible establecer que:

- La Fig. 1.3 muestra que se puede producir una pieza con dimensiones similares en diferentes centros de mecanizado y como resultado la demanda de potencia será diferente.
- La potencia de los componentes eléctricos puede analizarse en secciones, de tal manera que la potencia necesaria para la remoción de material es analizado independiente a los componentes electricos, aunque en función del movimiento de los ejes y la velocidad del husillo, éstos dependen de los parámetros de corte.
- Las trayectorias de recorrido de la herramienta interfieren en la demanda de potencia y consumo de energía.

- Modelar la ecuación de Taylor a partir de parámetros ha sido planteado a partir de los parámetros de corte, así también está relacionado con la fuerza y potencia necesaria para la remoción de material.

Esta tesis reporta datos de potencia demanda y consumo de energía basado en trayectorias de recorrido y parámetros de corte. La estructura de esta tesis se presenta en el siguiente apartado.

1.2 Estructura del trabajo

La sección 2 de esta tesis muestra información del proceso de mecanizado y antecedentes relevantes de los modelados de potencia y energía. Esta sección se realizó consultando libros, artículos y tesis de investigaciones publicadas durante el año 2001 y 2016. La información obtenida fue fundamental para asentar las bases de la investigación.

La sección 3 muestra los objetivos, limitantes, justificación e hipótesis de la investigación. Esta sección es el resultado del análisis de antecedentes y el estado del arte.

La sección 4 muestra detalles de experimentos de la investigación realizada: Material utilizado, maquinaria, parámetros de corte, operaciones de maquinado y toma y análisis de datos de potencia y energía. Así como los resultados obtenidos de los diversos experimentos realizados.

La sección 5 muestra detalles de los resultados y las conclusiones.

2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

2.1 Proceso de maquinado

Un proceso de maquinado es utilizado para remover el exceso de material de una pieza, de tal forma que el material remanente tenga la forma deseada [11]. Las máquinas CNC más usuales para llevar a cabo esta actividad son la fresadora horizontal (ver Fig. 2.1a) y verticales (ver Fig. 2.1b). Éstas se integran por componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos. Los principales elementos que componen a las fresadoras son: La base también es conocida como bancada o bastidor es la unión entre la máquina y el suelo, aunque la función principal es ser soporte del resto de la fresadora; El eje movimiento de rotación, es también conocido como husillo, éste es el encargado de sujetar la herramienta de corte (fresa) y a su vez dotarla de movimiento rotatorio, mediante una caja de transmisión; La mesa dispone de varios movimientos que permiten el desplazamiento de la pieza en direcciones transversales (eje 'X'), longitudinales (eje 'Y') y verticales (eje 'Z'); La consola es un elemento fijo que está acoplado a la columna por medio de correderas.

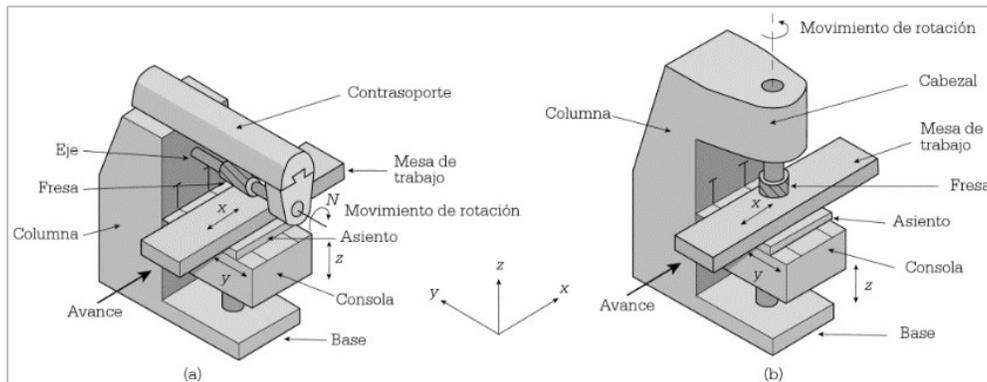


Fig. 2.1 a) Fresadora horizontal b) Fresadora vertical [12].

La característica principal de una fresadora vertical es el husillo fijo, sobre la columna tipo C y la mesa de trabajo es la que realiza los movimientos en los ejes x & y. La herramienta de corte es acoplada al husillo a diferentes revoluciones por minuto. La pieza de trabajo es montada sobre la mesa de trabajo, ésta se encuentra sobre un mecanismo movido por servomotores en las diferentes posiciones en los ejes x & y [13]. Para remover el material se aplica una fuerza sobre el material f_c (Fig.2.2), esta fuerza afectada por la velocidad es la potencia, este dato es determinante para obtener la energía necesaria para remover el

material. La acción se ejerce sobre un plano llamado cizallamiento, el cual tiende a generar un ángulo ϕ con la superficie de la pieza, llamado ángulo cortante [9].

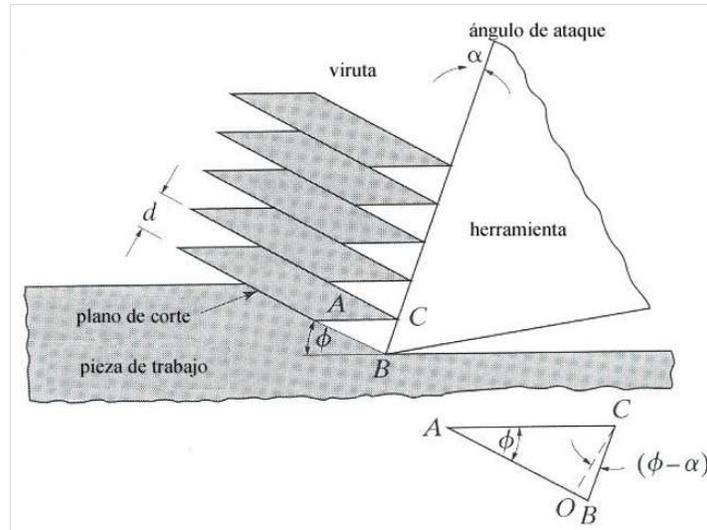


Fig. 2.2 Formación de viruta de corte durante el maquinado [9].

La Fig. 2.3 muestra como la herramienta de corte ejerce la fuerza de corte f_c actúa en dirección de la velocidad de corte, la fuerza de empuje f_i actúa en dirección normal a la velocidad de corte. Esta fuerza queda perpendicular a la pieza, estas fuerzas generan la fuerza resultante R . Esta última se puede descomponer en dos fuerzas, de la cual resulta la fuerza de fricción que resulta ser el ángulo β [9].

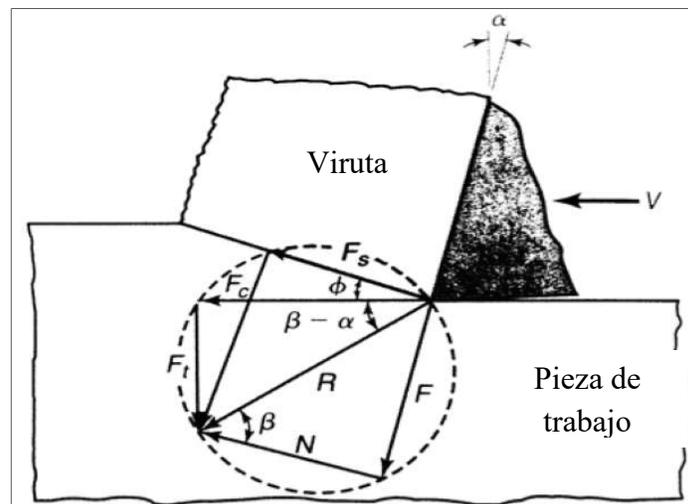


Fig. 2.3. Fuerza de corte durante el maquinado [9].

La ecuación 2.1 describe la fuerza de cizallamiento f_s y la ecuación 2.2 describe la fuerza normal f_n . Mientras que la ecuación 2.3 es para determinar la fuerza, es posible ver la distribución de las fuerzas en la fig. 2.2. La ecuación 2.4 muestra la fuerza de fricción f que es la relación de la resultante por el seno del ángulo B . La ecuación 2.4 muestra la velocidad de cizallamiento V_s y está afectada por la velocidad de corte y el coseno del ángulo α . La ecuación 2.5 muestra la velocidad de remoción de la viruta, donde los factores que interviene son la velocidad de corte y los ángulos ϕ y α .

$$f_s = f_c \cos \phi - f_t \operatorname{sen} \phi \quad \text{Ecuación 2.1}$$

$$f_n = f_c \operatorname{sen} \phi + f_t \cos \phi \quad \text{Ecuación 2.2}$$

$$f = R \operatorname{sen} \beta \quad \text{Ecuación 2.3}$$

$$v_s = \frac{v \cos \alpha}{\cos(\phi - \alpha)} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

$$v_c = \frac{v \operatorname{sen} \phi}{\cos(\phi - \alpha)} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

Para determinar la potencia de corte es necesario conocer la fuerza, este dato es posible obtenerlo utilizando dinamómetros o transductores de fuerza. Conociendo este dato de se puede aplicar la ecuación de potencia (2.6), esta muestra la relación entre la velocidad y el avance.

$$\text{Potencia} = f_c * v = f_s * v_s + f * v_c \quad \text{Ecuación 2.6}$$

La energía específica de corte puede ser determinada a partir de la ecuación 2.7, donde w es el espesor de corte, d es la profundidad de corte y f es el avance de la mesa, v es la velocidad [9]. Con el fin de conocer el comportamiento de los materiales han sido determinado constantes de energía. La tabla 2.1 muestra constantes de energía en función del material, basados en datos experimentales.

$$u_s = \frac{f_s * v_s}{w * d * v} + \frac{f * v_c}{w * d * v} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

Material y energía específica W.s/mm³

Aleaciones de aluminio	0.4-1.1
Hierros fundidos	1.6-5.5
Aleaciones de cobre	1.4-3.3
Aleaciones - alta temperatura	3.3-8.5
Aleaciones de magnesio	0.4-0.6

Material y energía específica W.s/mm³

Aleaciones de níquel	4.9-6.8
Aleaciones refractarias	3.8-9.6
Aceros inoxidables	3.0-5.2
Aceros	2.7-9.3
Aleaciones de titanio	3.0-4.0

Tabla 2.1 Energía necesaria para operaciones de corte [9].

2.2 Operaciones de maquinado

Existen diversas operaciones de maquinado tipo fresado y la combinación de varias operaciones son necesarias para poder obtener una pieza con las características geométricas deseadas. Otro factor son las características de la máquina CNC, la herramienta de corte, herramientas y accesorios disponibles. Las dos operaciones de fresado son [9]:

- Fresado plano: Es donde el eje de rotación de la fresa es paralelo a la superficie de la pieza que se va a maquinar (Fig. 2.4a)
- Fresado frontal: La superficie cortada está en ángulo recto con el eje de la fresa (Fig. 2.4b).

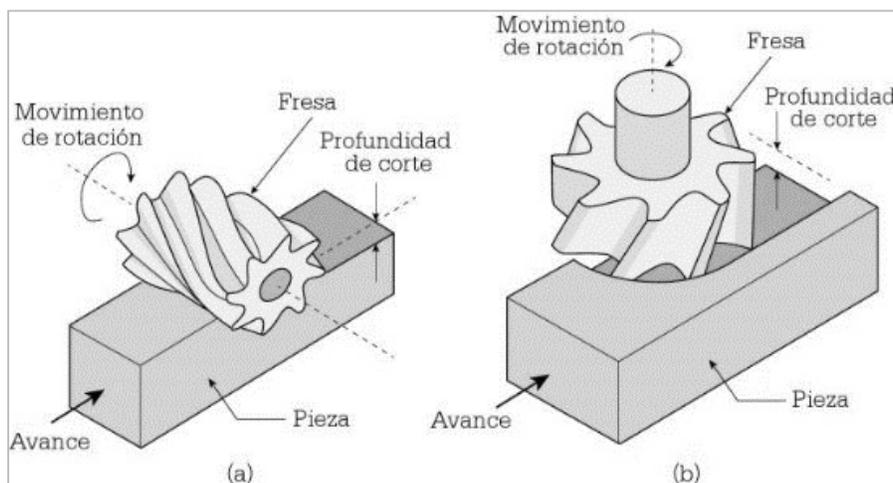


Fig. 2.4 Operaciones de fresado a) Plano b) Frontal o externo [12].

Otra configuración está relacionada con la dirección del fresado y la dirección de giro de la herramienta. Los dos más comunes son dos: a) Maquinado convencional (Fig. 2.5a) actúa en dirección contraria al avance y es comúnmente utilizado en operaciones de desbaste. Mientras el b) Maquinado concurrente (Fig. 2.5b) actúa en dirección del avance y es utilizado para operaciones de acabado [9].

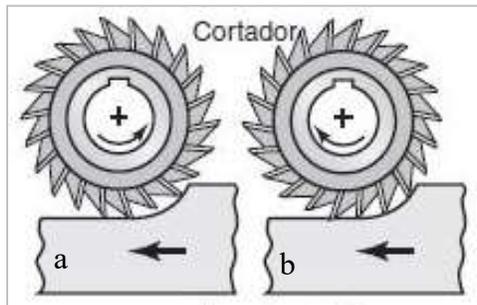


Fig. 2.5 Esquema de fresado convencional y concurrente [9].

Otras operaciones de maquinado se pueden ver en la fig. 2.6 donde la operación de perfilado muestra la remoción de material a un contorno, además la operación de cajado es la que se le conoce como vaciado, que puede tener formas diversas. Adicionalmente se muestra la de contorno de superficie en donde es posible observar que la herramienta de corte es una fresadora esférica, debido a que la superficie a obtener no tiene características prismáticas.

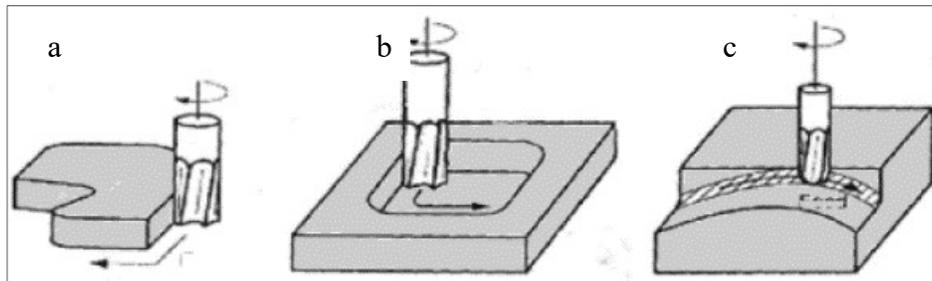


Fig. 2.6 Operaciones: a) Perfilado, b) cajado y c) contorno superficial [9].

Es importante mencionar que diversas piezas mecanizadas, llevan orificios, los cuales comúnmente se utilizan para ensamblar con: pernos, tornillos o remaches. El maquinado de estos orificios se lleva a cabo con diversas máquinas como: Taladro, torno o fresadora. En este proceso se utilizan brocas como herramientas y la principal característica es que la relación diámetro de corte es pequeña en relación a la longitud. Por lo que es posible producir orificios relativamente profundos [11].

2.3 Herramientas de corte

Para realizar la remoción de material se utilizan herramientas de corte. Las altas fuerzas que se generan entre la herramienta - material a cortar y altas temperaturas generan un ambiente agresivo que determinan posibilidades de fallas en las herramientas. Dos aspectos principales en la tecnología de la herramienta son: El material y geometría de la herramienta.

El material persigue la capacidad de soportar las fuerzas, temperaturas y la acción de desgaste. Las características de geometría de la herramienta son importantes para realizar el corte de acuerdo para la operación a realizar [14].

Las tres fallas comunes son:

- I. Falla por fractura: Ocurre cuando la fuerza de corte en la punta de la herramienta es excesiva [11].
- II. Falla por temperatura: Ocurre cuando la temperatura de corte es demasiado alta para el material [11].
- III. Desgaste gradual: El desgaste gradual genera una pérdida de la forma de la herramienta, por lo que la eficiencia de la herramienta se reduce [11].

La fig. 2.7 muestra la herramienta desgastada, la principal zona es el desgaste en cráter que es una sección cóncava de la superficie de ataque de la herramienta, formada por la acción de la viruta que se desliza contra la superficie y el desgaste del radio de la nariz, este ocurre en el flanco o superficie de incidencia de la herramienta.

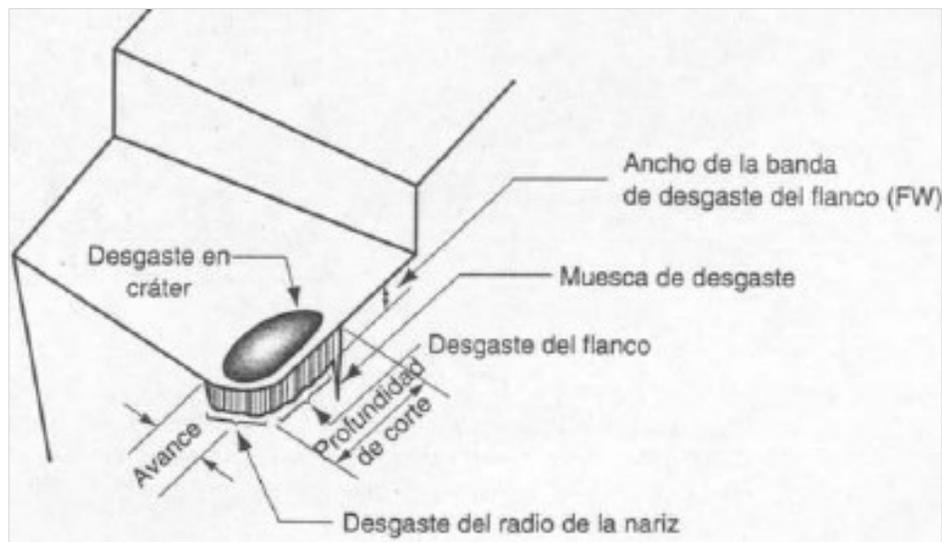


Fig. 2.7 Herramienta desgastada [11].

La ecuación (2.8) de Taylor se utiliza para determinar la vida de la herramienta: Donde “ v ” es la velocidad de corte (pies/min o m/min), “ T ” es la vida de la herramienta (min) y “ n ” y “ c ” son parámetros dependientes del avance, profundidad de corte, material de corte de la herramienta [10].

$$vT^n = C \quad \text{Ecuación 2.8}$$

Las propiedades de algunos materiales de herramientas son extensas.

- Aceros de alta velocidad: Son aceros aleados que durante el mecanizado, mantienen su dureza a altas temperaturas. Los dos principales grupos son: Tungsteno y Molibdeno.
- Carburos: Estos son compuestos de materiales cerámicos y metálicos. A su vez se clasifican en carburos cementados, cermet y carburos recubiertos.
- Carburos cementados: Estos son materiales duros formulados con carburo de tungsteno (WC), carburo de titanio (TiC), carburo de tantalio (TaC) o Carburo de niobio (NbC). Estos son fabricados con metalurgia de polvos [15].

La tabla 2.2 muestra la dureza para diferentes materiales, ésta se relaciona con la resistencia a la remoción. Los aceros al carbón muestran una dureza baja con respecto al resto de los materiales [11].

Material	Dureza	lb/pulg ²	(MPa)
Acero al carbón	60HRC	750 000	5200
Acero de alta velocidad	65HRC	600 000	4100
Aleación de fundición cobalto	65HRC	325 000	2250
Carburo cementado WC			
Bajo contenido de Co	93HRA, 1800HK	200 000	1400
Alto contenido de Co	90HRA, 1700HK	350 000	2400
Cermet (TiC)	2400HK	250 000	1700
Alúmina (Al ₂ O ₃)	2100HK	60 000	400
Nítruro Cúbico de Boro	5000HK	100 000	700
Diamante poli cristalino	6000HK	150 000	1000
Diamante natural	8000HK	215 000	1500

Tabla 2.2 Valores típicos de dureza a temperatura ambiente y Resistencia a la ruptura transversal para varios materiales de herramienta [11].

Las herramientas de corte tienen una geometría que corresponde al tipo de operación de maquinado. Por lo que existen herramientas para torneado, tronzado, fresas, brocas y muchas otras herramientas de corte. Las herramientas de corte se pueden clasificar en dos categorías principales: Punta sencilla y de borde o filos de corte múltiples. La figura 2.8 muestra un diagrama detallado de la forma general de una punta sencilla. La orientación de la superficie de ataque se define por dos ángulos, el ángulo de ataque posterior (Flanco principal) y el ángulo de ataque lateral (Flanco lateral). Los ángulos mencionados son los encargados de direccionar el flujo de la viruta sobre la cara o superficie de ataque. Además la superficie de la herramienta se define por el ángulo de incidencia frontal y el ángulo de incidencia lateral.

Los ángulos mencionados determinan la magnitud del claro entre la herramienta y superficie de trabajo. Adicionalmente el borde de corte de las herramientas se divide en filo de corte principal y secundario. Estas secciones se encuentran divididas por un radio en la (punta de la herramienta) llamado radio de nariz. El ángulo de filo de corte es determinante para la entrada de material, por lo que es un factor que puede considerarse para reducir la fuerza a la que es sometido la herramienta. El radio de la nariz es determinante en el acabado superficial que queda en la superficie removida. Además una de las funciones del ángulo de filo de corte frontal es que sirve como claro entre el borde de salida de la herramienta y la superficie de trabajo, por lo que esta reduce el roce y la fricción.

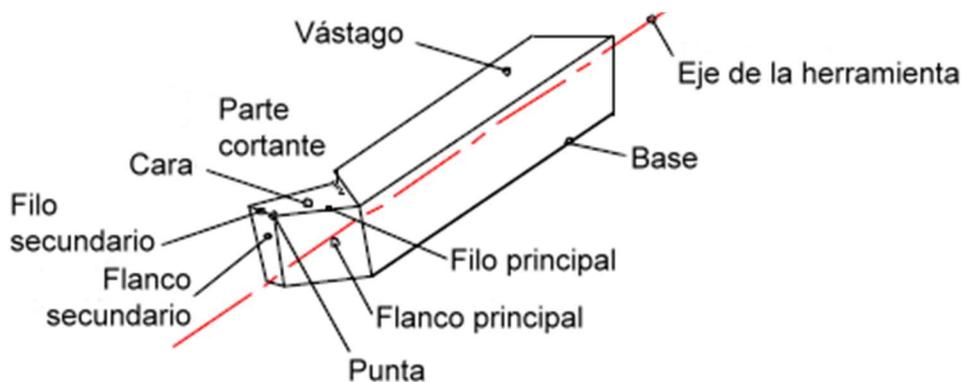


Fig. 2.8 Geometría de la herramienta de corte (Butil) [10].

Los cortadores verticales de fresado tienen diferentes formas geométricas que afectan el proceso de corte, la figura 2.9 muestra un panorama de los detalles. Las características geométricas son importantes en la selección dependiendo del material a maquinar. Para materiales dúctiles el ángulo de ataque (*rake angle*) radial y axial debe de ser positivo y grande. Para materiales frágiles, ángulos pequeños son preferibles. La formación de la viruta y los ángulos de ataque son factores importantes en el proceso de remoción de material. Un ángulo de ataque positivo proporciona una mejor evacuación de viruta y un mejor empalme de los filos de corte. Un ángulo de ataque negativo guía la viruta hacia el material incrementando la fuerza de corte y en la fricción. El ángulo de ataque negativo pierde el filo, por lo que se incrementa el esfuerzo en el filo de corte. Para materiales suaves, los ángulos grandes de incidencia (axial y radial) son comúnmente usados. Esta condición genera que el desgaste de la herramienta sea más lento [16].

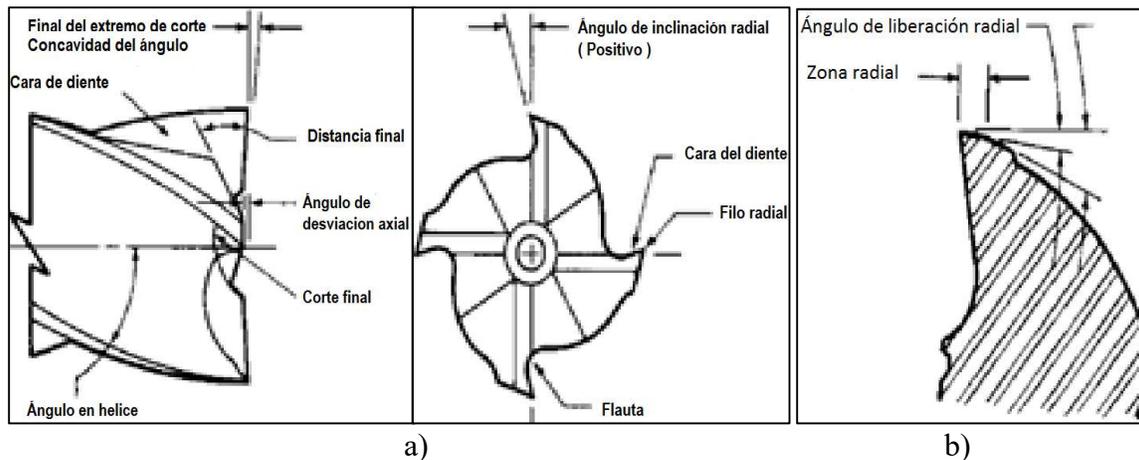


Fig. 2.9 a) Geometría de fresa vertical b) Detalles geométricos del diente [16].

La geometría de la herramienta, el tipo de material del que está fabricado y el tipo de material a remover son factores determinantes para el cálculo de los parámetros de corte en el proceso de maquinado [16]:

- I. Diámetro de corte D_c : Es el diámetro de la herramienta de corte.
- II. Longitud de corte l_m : Es la longitud total que recorre la herramienta de corte, con el fin de remover el material excedente.
- III. Profundidad de corte a_p : Es la profundidad que la herramienta de corte actúa sobre la pieza, durante el proceso de maquinado. Este parámetro comúnmente es proporcionado por el proveedor y está en función de las características de diseño de la herramienta.

- IV. Avance por diente f_z : Es la relación entre el avance de pieza de trabajo fijada a la mesa y la velocidad del husillo – número de dientes (Fig. 2.10) [16].
- V. Número de dientes z_c (dientes): Es el número de filos en un cortador vertical o insertos en una herramienta indexable (Fig. 2.10).

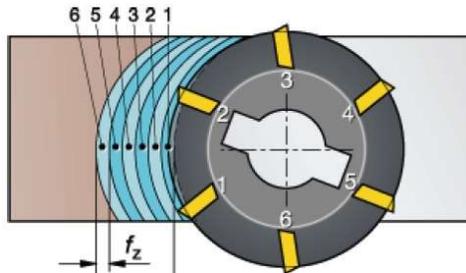


Fig. 2.10 Esquema de avance por diente [17].

- VI. Avance por revolución f_n : Es la relación entre la velocidad de avance y la velocidad del husillo.
- VII. Velocidad del husillo n : Revoluciones por unidad de tiempo.
- VIII. Diámetro real de corte a_c : El diámetro total de la herramienta, que actúa sobre la pieza de trabajo (Fig. 2.11).

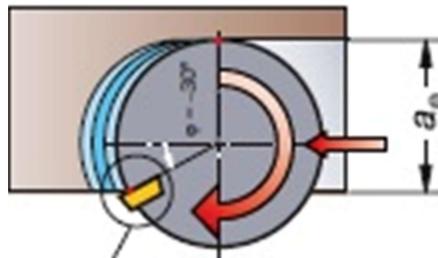


Fig. 2.11 Esquema de diámetro de corte real [17].

La tabla 2.3 muestra las expresiones utilizadas en el proceso de maquinado. La velocidad de corte, la profundidad de corte y el avance por diente son datos proporcionados por el proveedor de la herramienta ya que están relacionados con las características geométricas y propiedades del material del que están fabricados [9]. A partir de los datos que proporciona el fabricante se calcula la velocidad del husillo y avance de la mesa. Estos datos son configurados en el código NC.

Fórmula	Unidades.
Velocidad de corte – $v_c = \frac{\pi D_c n}{1000}$	$\frac{m}{min}$
Avance por diente – $f_z = \frac{v_f}{n * z_c}$	mm
Velocidad del husillo – $n = \frac{v_c * 1000}{\pi * D_c}$	$\frac{rev}{min}$
Avance de la mesa – $v_f = f_z * n * z_c$	$\frac{mm}{min}$
Tiempo ciclo - $t_c = \frac{l_m}{f_z}$	min

Tabla 2.3 Fórmulas de maquinado [9]

2.4 La demanda de potencia en un centro de maquinado CNC

Las máquinas CNC están integradas por componentes eléctricos y mecánicos. Por lo que cada máquina tiene una demanda específica de potencia, en el caso del husillo y los ejes respectivamente están sujetos al uso del motor y servos, el cual depende del tipo de trayectoria, material y parámetros de corte, los cuales están en función de las características de la herramienta [18, 19]. La potencia es una indicación de cuánto trabajo puede efectuarse en una cantidad específica de tiempo (watt = Joule/segundo) [20]. La potencia efectiva es la que transforma la energía eléctrica en movimiento o fuerza (ver ecuación 2.9), el dato de potencia activa es el valor medio de la potencia absorbida por una resistencia a lo largo del periodo [21]. Además, la potencia está relacionada con el consumo de energía. Por lo que actualmente el planteamiento de modelos teóricos que determinen las cargas que experimentan los componentes electrónicos continúa siendo un tema de investigación [6]. La ecuación 2.9 muestra la relación para determinar la potencia, donde N es el número de muestras, v_n es la tensión eléctrica de muestra e i es la corriente de muestra.

$$W = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v_n i \quad \text{Ecuación 2.9}$$

La demanda de potencia, la fuerza de corte y el acabado superficial han sido modelados a través del tiempo.

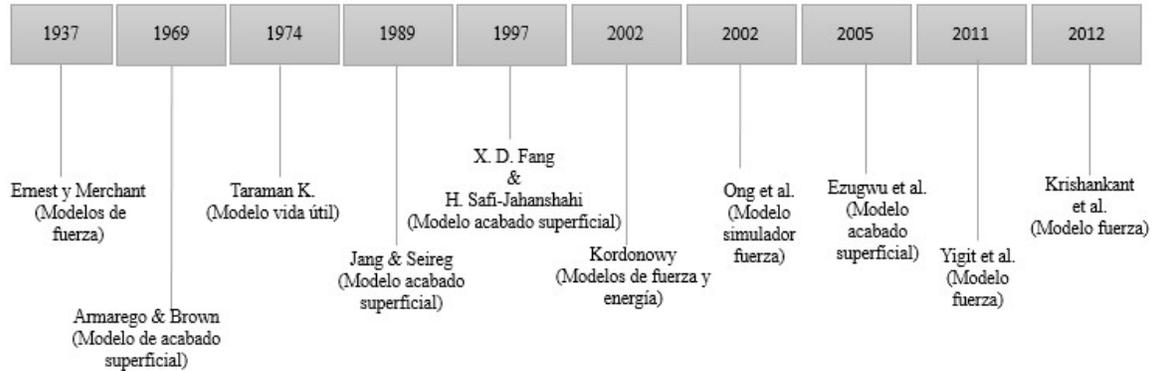


Fig. 2.12 Línea del tiempo de modelos propuestos de potencia, fuerza y acabado superficial.

La figura 2.12 muestra en una línea del tiempo las propuestas de modelos matemáticos más relevantes. En 1969 Armarego & Brown plantearon modelos matemáticos con el objetivo de predecir el acabado superficial [22]. En 1974 Taraman K, propuso un modelo matemático que incrementaría la vida útil de la herramienta de corte, sin afectar el acabado superficial de la pieza [23]. En 1989 Jang & Seireg propusieron un modelo de simulación dinámica para predecir el acabado superficial en un torno [24]. En 1997 X. D. Fang & H. Safi-Jahanshahi presentaron un algoritmo para predecir el acabado superficial, a través del análisis de correlación y métodos de regresión (de 1er orden, 2ndo orden y exponencial [25]), utilizaron diferentes tipos de insertos y con el inserto TNMG 160408 se encontraron los promedios de error en 3.85-2.30-2.20 % respectivamente [26]. Ellos propusieron 3 modelos.

- En la ecuación 2.10 las literales b_0, b_1, b_2, b_3 son valores que se cambian según el experimento planteado y las literales x_0, x_1, x_2, x_3 son constantes que se determinan a partir del experimento y la literal y es la variable de salida [25].
- En la ecuación 2.11 las literales b_0, b_1, b_2, b_3 y v_4, v_5, v_6, v_7, v_8 son valores que se cambian según el experimento planteado y las literales x_0, v, f, d son constantes que se determinan a partir del experimento y la literal R_a es la variable de salida [25].

- En la ecuación 2.12 las literales c_0, c_1, c_2, c_3 son valores que se cambian según el experimento planteado y las literales v, f, d son constantes que se determinan a partir del experimento y la literal R_a es la variable de salida [25].

$$y = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 - 1^{er} \text{ orden Ecuación 2.10}$$

$$R_a = b_0x_0 + b_1v + b_2f + b_3d + v_4v^2 + v_5f^2 + v_6d^2 + v_7vf + v_8vd - 2do \text{ orden Ecuación 2.11}$$

$$R_a = c_0v^{c_1} + f^{c_2} + d^{c_3} - \text{Exponencial Ecuación 2.12}$$

En 2002 Kordonowy [6] realizó experimentos en tornos y fresadoras automatizadas, logrando desarrollar modelos de potencia en función de la carga de cada componente eléctrico. En este estudio Kordonowy comparó los datos experimentales y los datos teóricos de las máquinas (Bridgeport Torq-Cut TC3 y Cincinnati Milacron VC-750). Los datos fueron divididos en potencia constante, el cual es durante el proceso de arranque (panel, computadora, servos, bomba de refrigerante, husillo y motor), constante de operación (ejes x, y & z, cambio de herramienta, husillo y carrusel) y variable (maquinado o arranque de material). (Fig. 2.13).

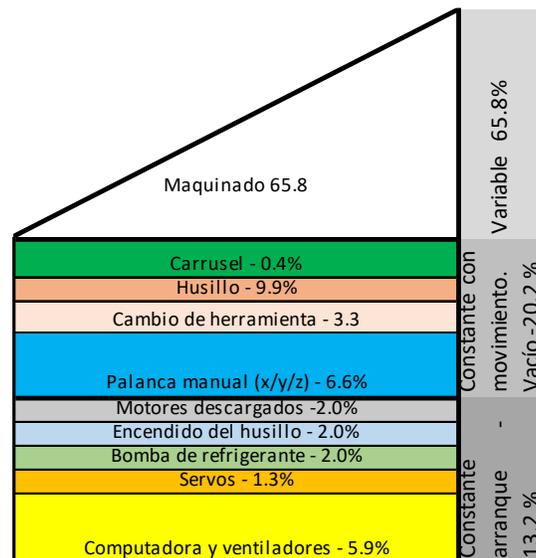


Fig. 2.13 Desglose de potencia demandada de máquina Bridgeport Torq-Cut TC3 [6].

En 2002 Ong et al [27] desarrolló un prototipo de software fresado CNC virtual. En éste fue posible ver la simulación, interpretación del código G, obtener datos de fuerza, torque, potencia de corte y vida útil. Los cálculos en el modelo mencionado, fueron realizados utilizando las ecuaciones mencionadas en la sección 2.1. En 2005 Ezugwu et al [28], propuso un modelo de correlación entre corte y parámetros de corte en maquinado de alta velocidad para Inconel 718 utilizando una red neuronal artificial (Ver Fig. 2.14). Este modelo mostró valores de predicción desde 0.6595 hasta 0.9976 de certeza, además de proporcionar los parámetros adecuados en función del acabado superficial y por último se encontró que en maquinados largos propiciaban el incremento en la potencia y desgaste de flanco.

Entradas	Proceso	Salida
Velocidad de corte	Red Neuroartificial	Fuerza de corte
Avance		Potencia de corte
Tiempo de corte		Rugosidad de la superficie
Presión del refrigerante		Desgaste de la herramienta

Fig. 2.14 Modelo de red neuronal artificial [28].

En 2011 Yigit et al [29] desarrollaron un estudio de multi-optimización de las fuerzas de corte de torneado utilizando *Grey- Based* (método Taguchi). Este método consideró como variables de salida, la tasa de remoción de material, fuerza de corte y acabado superficial. En 2012 Krishankant et al [30] aplicaron un diseño de experimento Taguchi, en el proceso de torneado, los parámetros considerados fueron: velocidad de corte, velocidad del husillo, avance de la mesa y profundidad de corte. Mediante este método se encontraron valores óptimos en la distribución normal. En el mismo año Wang desarrolló un planteamiento de modelo matemático (Ver ecuación: 2.13) para predecir el acabado superficial, éste fue aplicado a un proceso de maquinado de alta velocidad utilizando AlMn1Cu y el experimento fue planteado a través de un diseño factorial y regresión parcial por mínimos cuadrados. Los resultados mostraron datos de acabados superficiales dentro de 0.145 y 0.187 μm .

$$R_{a,j} = b_{0,j} + b_{1,j}v_c + b_{2,j}f_z + b_{3,j}a_p + b_{4,j}v_c f_z + b_{5,j}f_z a_p + b_{6,j}v_c a_p + b_{7,j}v_c^2 + b_{8,j}f_z^2 + b_{9,j}a_p^2 \quad \text{Ecuación 2.13}$$

De los modelos desarrollados, es posible notar, que se han propuesto enfoques estadísticos y virtuales. Esto ha sido posible considerando los parámetros de corte como velocidad de corte, avance y profundidad. Lo notable de las diversas investigaciones es que el porcentaje ha sido corroborado en rangos de 85 a 99% [28] de certeza. Lo cual demuestra que los modelados de predicción de potencia son una alternativa en el campo de la manufactura.

Para la investigación en este trabajo se definen los siguientes conceptos:

- Potencia Total: Potencia constante + Potencia variable + Potencia de corte
- Potencia constante: Puesta en marcha (computadora, paneles, servos, bomba de refrigerante, husillo, encendido de motores).
- Potencia variable: Durante el movimiento de los ejes (X, Y & Z, cambio de herramienta y husillo). Sin realizar el corte.
- Potencia de corte o de maquinado: La utilizada para remover el material por cm^3 .
- Potencia de tara: La potencia constante + la potencia variable.

2.5 Modelos de energía en centros de maquinado CNC

A través de investigaciones se han desarrollado modelos matemáticos para predecir la energía (ver Fig. 2.15). Desde que fue planteada la teoría de Ernest y Merchant en 1937 sobre el planteamiento de un modelo de las fuerzas ortogonales y oblicuas de corte en mecanizado [31].

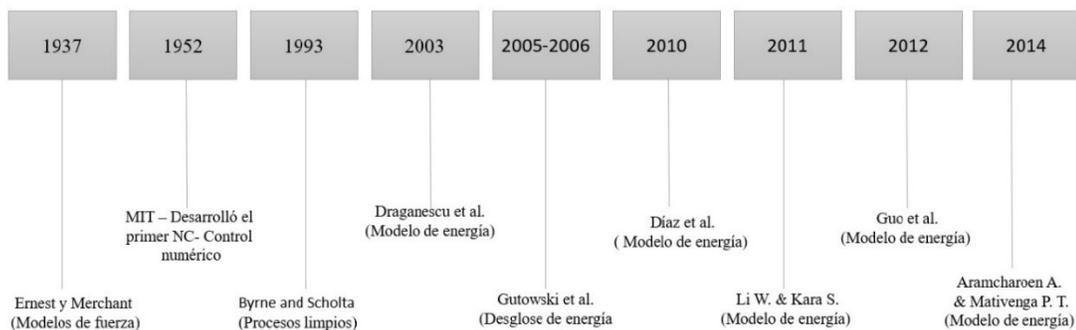


Fig. 2.15 Línea del tiempo de modelos propuestos de energía.

En 1952, el Instituto de Tecnología de Massachusetts MIT dio a conocer el primer control numérico (NC) de maquinado, el cual consiste en aceptar entradas de comandos, los cuales son leídos por un controlador y ejecutados por equipos periféricos (ejemplo- servos) [32].

Las funciones incluyen: Arranque y apagado de componentes (bomba de soluble), posicionamiento de mesa de trabajo y herramienta de corte, modificar velocidades, avances y velocidad de husillo [32]. El control numérico mostró ventajas en precisión en las máquinas CNC al controlar el mecanismo y reducir el porcentaje de error. Por lo consiguiente, la precisión en el maquinado de piezas y el incremento en los avances y velocidades de maquinado fueron las principales ventajas mostradas. En 1993, Byrne and Scholta discutieron la necesidad de incrementar el esfuerzo en la investigación en el campo de la manufactura para incorporar el desarrollo de procesos de maquinados limpios, debido a que los procesos eran convencionales y limitados con tendencias ambientales [33]. En 2003, Draganescu et al. modelaron la eficiencia energética de un centro de maquinado CNC – FV-32 en términos de diferentes parámetros de corte. El análisis consideró la eficiencia de la máquina en función de las revoluciones por minuto del husillo y el torque del motor (Ver Figura 2.16) [19].

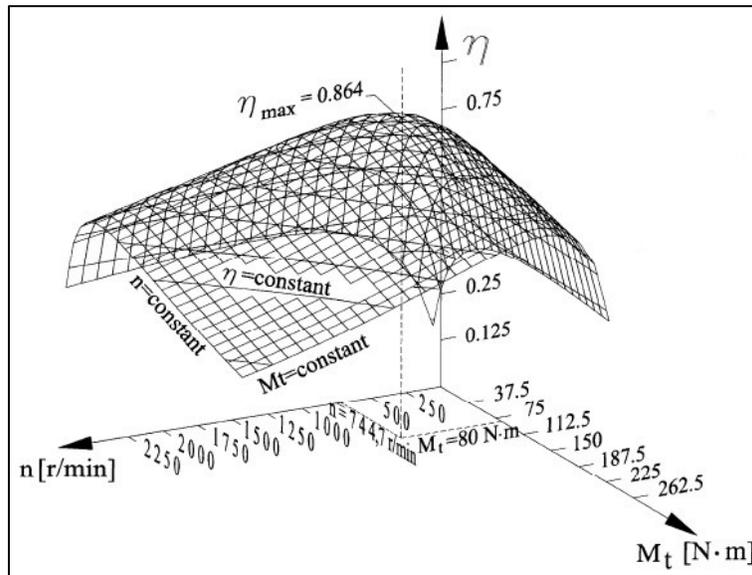


Fig. 2.16 Respuesta de eficiencia de Máquina FV-32 [19].

En esta investigación se planteó una ecuación para calcular la energía específica consumida (E_{cs}) (ecuación 2.14), que considera los parámetros de corte. Donde ' D ' es el diámetro de la fresa, ' s_z ' es el avance por diente, ' t ' es la profundidad de corte, ' B ' es la longitud de contacto de la herramienta, ' z ' el número de dientes de la herramienta de corte, ' F_t ' es la componente de una fuerza tangencial de corte y ' η ' es la eficiencia de la máquina. De este trabajo se determinó que el avance por diente impacta la remoción de material, por el contrario la demanda de potencia incrementa a un ritmo más lento y por lo consiguiente el consumo de energía.

$$E_{cs} = \frac{\pi D F t}{3.672 \cdot 10^6 s_z t B z \eta} \quad \text{Ecuación 2.14}$$

En 2005, Gutowski et al. [34] propusieron que la energía constante se divide en: Enfriado, colector de niebla, bomba de aceite, refrigerante. Mientras la energía de maquinado es la que tiene que ver con la remoción de material. Los estudios mostraron que el maquinado consume el 14.8 % del total de energía consumida. (Ver Fig. 2.17). En 2006, Gutowski et al. [35], desarrollaron una ecuación de energía, basado en que los procesos actuales incluyen una variedad de pasos y funciones, por ejemplo: lubricación, remoción de material, cambio de herramienta. El resultado de la energía dominante o requerida por los componentes eléctricos es: la constante y la de maquinado. Derivado de esta información la potencia total (Ecuación 2.15) ‘ p ’ es igual a potencia de vacío ‘ p_0 ’, más ‘ k ’ que es un dato constante de energía específica derivado del proceso físico o datos físicos, este multiplicado por ‘ \dot{v} ’ que es la tasa de remoción de material.

$$p = p_0 + k\dot{v} \therefore B_{elect} = \frac{p_0}{\dot{v}} + k \quad \text{Ecuación 2.15}$$

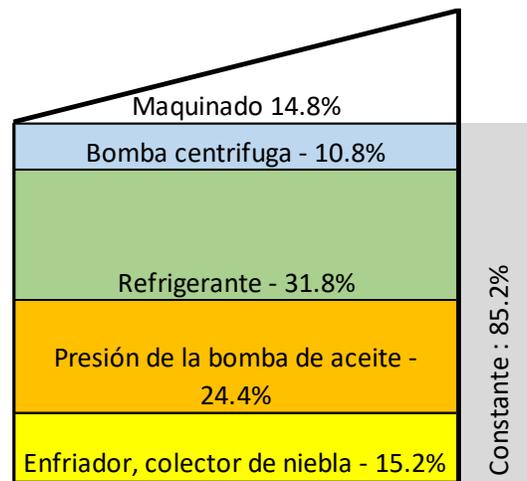


Fig. 2.17 Desglose de energía en un centro de maquinado CNC [35].

En 2010, Díaz et al. plantearon un modelo de energía, éste modelo considera el volumen de trabajo, la velocidad del husillo y el avance como principales restricciones en la máquina CNC. Con estas restricciones, que son las máximas cargas que el motor del husillo puede soportar, el operador de la máquina nunca alcanzara la tasa de remoción del material cercano al infinito. Por lo que queda inhabilitado alcanzar la energía específica a cero en altas remociones de material. La ecuación de energía de corte (ecuación 2.16) e_{cut} muestra

‘*a*’ con unidades de potencia, ‘*b*’ como un valor de estado estable y M.R.R. como la tasa de remoción de material [8].

$$e_{cut} = a * \frac{1}{M.R.R} + b \quad \text{Ecuación 2.16}$$

En 2011, Li W. & Kara S. analizaron el consumo energético de un torno CNC, en estados de *Stand by* y vacío. Del análisis se determina que la potencia está compuesta por equipos auxiliares y descarga de componentes para garantizar la operación de la máquina. De este análisis se realizó una descomposición [36]. El consumo de energía específica ‘*SEC*’ fue separada en cuatro segmentos como se puede ver en la Fig. 2.18.

- I. Energía específica fija (*SFE*): Es la energía utilizada para asegurar que la máquina esta lista para la operación o para remover 1 cm³ de material [36].
- II. Energía específica operacional (*SOE*): Es la energía esencial para operaciones, como rotación de husillo, movimiento de la herramienta de corte, requerido durante el periodo de operación para remover 1 cm³ de material [36].
- III. Energía específica en la punta de la herramienta (*STE*): Esta es la energía requerida en la punta de la herramienta para remover 1 cm³ de material [36].
- IV. Energía específica improductiva (*SUE*): Ésta es la energía que se convierte en calor sobre el periodo de operación, requerido para remover 1 cm³ [36].

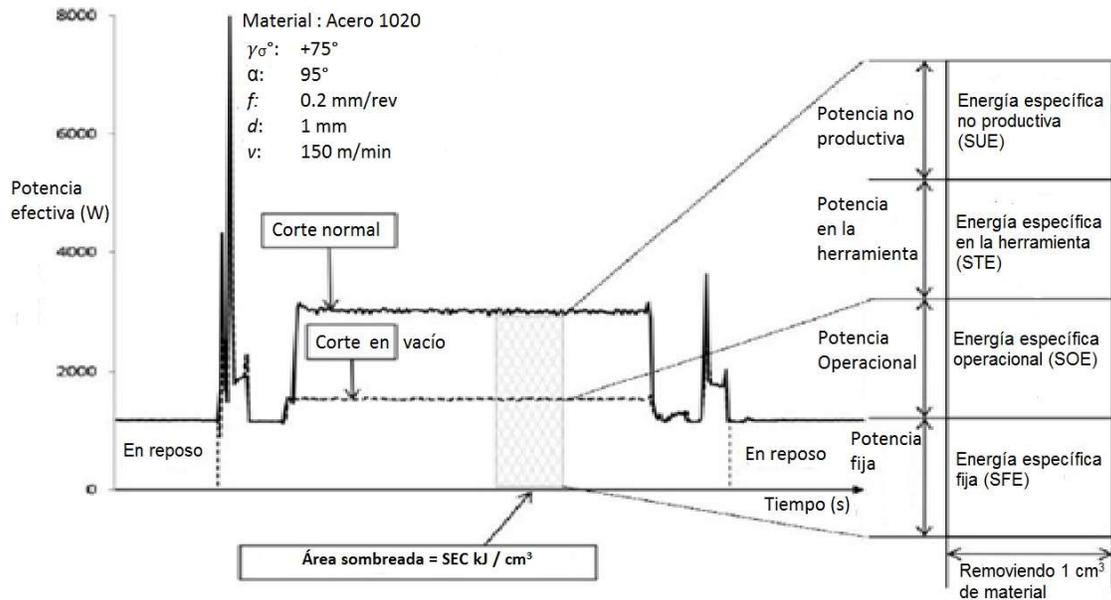


Fig. 2.18 Desglose de consumo de energía específica [36].

En 2011 Guo et al. propusieron un modelo de optimización de energía considerando variables de salida como energía y acabado superficial. Las variables de salida quedaron en función de los parámetros de corte. La energía específica en la herramienta TSE (ecuación 2.17) fue modelada con la ecuación. Donde ' v_c ' es la velocidad de corte, ' f ' es el avance, ' a_p ' es la profundidad de corte, ' D ' diámetro final de la pieza de trabajo y " c_0 '- ' c_1 '- ' α '- ' β '- ' γ '- ' φ ' " son constantes. Para la rugosidad R_a se propuso la ecuación 2.18. Donde " C '- ' n '- ' p '- ' m ' , son constantes derivados de los experimentos y relacionados a propiedades mecánicas del material.

$$TSE = c_0 \cdot v_c^\alpha \cdot f^\beta \cdot a_p^\gamma \cdot D^\varphi + \frac{c_1}{v_c \cdot f \cdot a_p} \quad \text{Ecuación 2.17}$$

$$R_a = C \cdot v_c^n \cdot f^p \cdot a_p^m \quad \text{Ecuación 2.18}$$

En 2014, Aramcharoen A. & Mativenga P.T. desarrollaron una metodología, su modelo predice el consumo de energía y que muestra la influencia de la trayectoria (Figura 2.19), el tiempo ciclo, consumo de energía y acabado superficial. En el experimento 5 trayectorias de corte fueron analizadas, obteniendo datos de energía en relación a la trayectoria. Del estudio realizado la energía demandada en la punta de la herramienta mostró variación según el desgaste. Para determinar la energía total fue planteada la ecuación 2.19. Donde la energía básica ($E_{básica}$) es influenciada por: Sistema de servos, motores, computadoras, paneles y luces. La energía de cambio de herramienta ($E_{herramienta}$) es la energía requerida para realizar el cambio de herramienta, éste incluye el movimiento de la torreta y el cambio de herramienta (carga y descarga del hidráulico y la carga de la herramienta). Esta energía mantiene al centro de maquinado en un estado listo para ser operado, mientras ($E_{husillo}$) es la energía requerida por el módulo de transmisión del husillo, el cual es controlado por códigos de arranque & paro y velocidad del husillo. La energía de corte (E_{corte}) es la necesaria para remover material de la pieza de trabajo en forma de viruta. La energía de alimentación ($E_{alimentación}$) es la energía necesaria para realizar el movimiento de la mesa de trabajo (ejes x, y & z). La energía del fluido de corte ($E_{corte-fluid}$) es la del motor de la bomba de soluble.

$$E_{total} = E_{basica} + E_{herramienta} + E_{husillo} + E_{corte} + E_{alimentación} + E_{corte-fluido} \quad \text{Ecuación 2.19}$$

Los modelos matemáticos para predecir el consumo de energía consideran la tasa de remoción de material y la potencia fija. Los modelos específicos son los que consideran, la

energía en la herramienta, energía de cambio de herramienta, energía constante, energía en vacío. Los resultados muestran que los modelos que consideran más factores proporcionan mayor certeza en la predicción del consumo de energía.

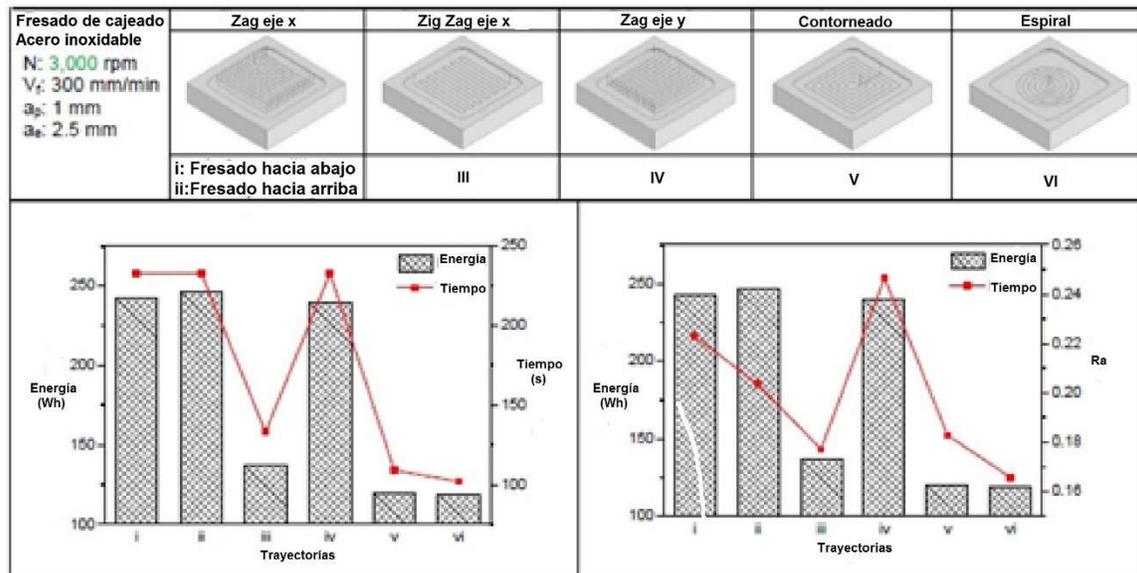


Fig. 2.19 Comportamiento de consumo de energía con diferentes trayectorias. [18]

2.6 Medición y monitoreo de la energía

Con el fin de mejorar el tiempo de respuesta, los motores de nueva tecnología ofrecen una rápida aceleración y desaceleración. Estos comportamientos se reflejan en picos de potencia. Los comportamientos de potencia durante el maquinado han sido mostrados que son dinámicos (ver Fig. 2.18), por lo tanto garantizar la precisión de los datos recolectados e identificar patrones de comportamiento, es un factor determinante para el desarrollo de una investigación [37]. La resolución del instrumento es una característica determinante durante el desarrollo de un experimento. Para ello existen diferentes formas de realizar la configuración de adquisición de datos. De acuerdo a Li las características a considerar en el proceso de toma de datos son [37]:

- I. La resolución de salida de 0.25 a 0.1 s.
- II. Intervalo de muestreo constante.
- III. Configurar la: Potencia (activa, aparente y reactiva) y factor de potencia.
- IV. La comunicación de la interface debe ser compatible con la resolución de los datos.
- V. Capacidad para procesar gran cantidad de datos en tiempo real.
- VI. Sistemas portátiles y de fácil instalación.

La figura 2.20 muestra la configuración de hardware y software. Las conexiones se realizan con pinzas de gancho (fig. 2.20 a), acoplados a la toma principal del centro de maquinado y a los módulos de corriente y voltaje (fig. 2.20 b y c). Se obtienen datos de potencia y energía que pasan por el chasis de adquisición de datos, y estos son enviados a una computadora. La información obtenida se analiza con LabVIEW (fig. 2.20 f y g). Otra alternativa para la toma de datos es a través del uso de equipos de medición de calidad de la energía, los cuales pueden ser portátiles y de fácil configuración en la toma de datos.

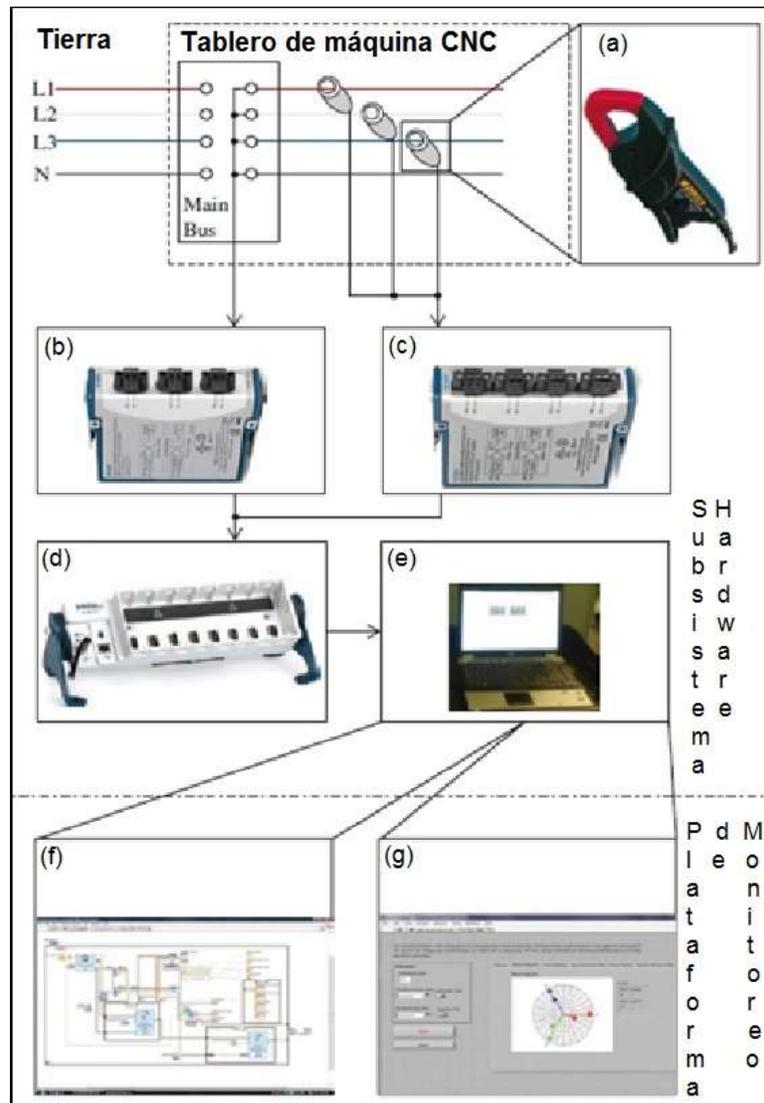


Fig. 2.20 a) Adquisición de voltaje y amperaje Fluke®i200s b) Módulo de voltaje NI 9225 c) Módulo de corriente NI 9229 d) Chasis de adquisición de datos NI cDAQ-9172 e) PC f) Diagrama de block en Lab VIEW g) Panel frontal de LabVIEW. [37].

2.7 Diseño de experimentos

El análisis y diseño de experimento (siglas en inglés-DOE-*Design of experiment*) ha sido introducido en el año de 1971 [38]. Éste incluye técnicas estadísticas, con el fin de realizar un planteamiento de experimentos y análisis de resultados. Los experimentos se realizan cuando se necesitan identificar el efecto de cierta cantidad de variables que influyen en el resultado de un proceso [25].

Al realizar un planteamiento de diseño de experimentos, se le asignan el nombre de factor (m) a las variables que influyen en el comportamiento, y es interpretado como los elementos de entrada durante el DOE. Por lo cual, aquello que influye en el resultado final puede ser considerado como un factor. La cantidad de experimentos necesarios de realizar, se le denomina nivel (n). Por lo tanto un diseño y análisis de experimentos se define como DOE n^m .

El resultado es una medida del desempeño. Éste es factible obtenerlo en términos cuantitativos. Aunque existen casos donde es posible obtenerlos en términos cualitativos. Por lo cual se puede decir que el resultado es la respuesta.

En el diseño de experimentos son necesarios los arreglos ortogonales, ya que ayudan a limitar el tamaño de experimentos a examinar. Es decir los factores en diferentes combinaciones. La notación comúnmente utilizada para los factores es (A, B, C, D, E etc.), para los niveles es (a_1, b_2, c_3, d_4, e_5 , etc.). Por ejemplo dos factores, A (niveles a_1 y a_2) y B (niveles b_1 y b_2) [39] (Ver Fig. 2.21).

	a1	a2	
b1	Experimento 1	Experimento 3	Factor A → a_1 y a_2
b2	Experimento 2	Experimento 4	
Cuatro experimentos: a_1b_1 a_1b_2 a_2b_1 a_2b_2			

Fig. 2.21 Experimentos con dos factores de dos niveles [39].

La importancia de los métodos estadísticos radica en la relación que existe entre los procesos variables y las respuestas observadas. Con el fin de mejorar la confiabilidad de

modelos matemáticos teóricos, las técnicas estadísticas se han acoplado para mejorar el conocimiento de los procesos [25]. Debido a que la relación entre variables del proceso y respuestas (energía específica del proceso) puede tener un comportamiento lineal o no-lineal, por lo que la curva de estimación es el análisis más confiable para estimar el efecto de cada factor [37]. El software estadístico Minitab® tiene opciones de modelos de curvas de estimación como los cuadráticos, logarítmicos, exponencial, inverso o logísticos. Este software también muestra R-square o valores R^2 , para cada combinación del tipo de modelo y factor probado. Esto es referido a la proporción de variabilidad en la respuesta observada que puede ser el modelo de regresión. Los valores de R^2 cercanos a 1 indican que el modelo de regresión están ajustados con las tendencias observadas. La ecuación 2.20 es para determinar R^2 . Donde SS_E se refiere a la suma de errores cuadrados (variable desconocida), y SS_T se refiere a la suma de cuadrados (variabilidad total).

$$R^2 = 1 - \frac{SS_E}{SS_T} \quad \text{Ecuación 2.20}$$

La ecuación para determinar SS_E la suma de errores cuadrados es la ecuación 2.21 y la ecuación 2.22 es para calcular SS_T la suma de cuadrados. Donde y_i es la respuesta observada, \hat{y}_i es el valor predictor, e_i es el error de ajuste del modelo a la i th observación (o residual), \bar{y} es la observación o respuesta. Si R^2 es más grande que 0.8, el modelo puede concluirse como suficiente. Los residuos de un buen modelo deben de ser aleatoriamente distribuido o normal. Los modelos más precisos son derivados de múltiples regresiones lineales. Como cualquier modelo de regresión puede ser reescrita en forma lineal, independiente de la forma de la superficie observada, los modelos derivados de la estimación de la curva se puede convertir en un formato lineal o no lineal [25].

$$SS_E = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad \text{Ecuación 2.21}$$

$$SS_T = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad \text{Ecuación 2.22}$$

Por ejemplo, el factor x_1 ajusta al modelo inverso para predecir la variable de respuesta Y (Ecuación 2.23). El recíproco de x_1 puede ser escrito como un nuevo factor x'_1 . Por lo tanto, el inverso del modelo puede ser reescrito como lineal.

$$Y = c_0 + \frac{c_1}{x_1} \quad \text{Como} \quad x'_1 = \frac{1}{x_1} \quad \therefore \quad Y = c_0 + c_1 \cdot x'_1 \quad \text{Ecuación 2.23}$$

Mientras los modelos lineales muestran una forma y comportamiento básico, la ecuación no lineal puede tomar muchas formas diferentes. Las ecuaciones no lineales se ajustan a una curva que sea funcional. Los modelos no lineales pueden definir que 'Y' es el factor predictor de la función no lineal. Aunque los modelos no lineales pueden tener más de un factor predictor. Por ejemplo, la ecuación 2.24 de acabado superficial (R_a), es una ecuación no lineal. Donde a_1 es la constante, b_1 es la variable independiente, β es el coeficiente determinado y R_a es la variable dependiente [40].

$$R_a = a_1 + b_1^\beta \qquad \text{Ecuación 2.24}$$

Para realizar la interpretación de los resultados, es necesario el análisis. El proceso de toma de decisiones para una prueba de hipótesis se puede basar en el valor de probabilidad (valor p) para la prueba específica [40].

- I. Si el valor p es menor o igual a un nivel predeterminado de significancia (nivel α), usted rechaza la hipótesis nula y da crédito a la alternativa.
- II. Si el valor p es mayor que el nivel α , no se rechaza la hipótesis nula y no se puede dar crédito a la alternativa.

Además, los valores (P) de la tabla de efectos y coeficientes estimados para determinar los efectos que son significativos. Si el valor-p es igual o menor a 0.05 (nivel de significancia), la hipótesis nula se rechaza.

Modelado de ecuaciones no lineales

Las ecuaciones no lineales, se traducen en regresiones matemáticas no lineales y describen un comportamiento no lineal entre las variables de respuesta y las variables predictoras. Esta es una alternativa cuando no es posible ajustar los datos el modelo a parámetros lineales [25].

Los métodos comunes utilizados para resolver este tipo de casos son algoritmos iterativos como Gauss-Newton y Levenberg-Marquardt. Estos métodos emplean la siguiente metodología para la solución de problemas [41]:

- a. Optimización del problema: Para determinar el estimador de mínimos cuadrados, se debe de minimizar la suma de cuadrados. Este paso no puede ser realizado de manera explícita con aproximaciones locales lineales de la función de regresión. Donde Y_i son valores determinados en el espacio dimensional y $\eta_i(-\theta)$ corresponde a los datos observados del análisis experimental.

$$S(\underline{\theta}) := \sum_{i=1}^n (y_i - \eta_i(\underline{\theta}))^2$$

- b. El procedimiento de solución se divide en 4 etapas. Se considera la iteración de $(j + 1)$ -th. Para simplificar el problema, se considera que la función de regresión $h(\cdot)$ tiene solo un parámetro desconocido. Por lo tanto la solución es denotada por $\theta^{(j)}$. $\theta^{(0)}$, para el valor inicial.

- I. Aproximación: La función de regresión $h(x_i, \theta) = \eta(\theta)_i$ con el parámetro unidimensional θ en el punto $\theta^{(j)}$ es aproximado linealmente:

$$\eta_i(\theta) \approx \eta_i(\theta^{(j)}) + \frac{\partial \eta_i(\theta)}{\partial \theta} \Big|_{\theta^{(j)}} (\theta - \theta^{(j)}) = \eta_i(\theta^{(j)}) + a_i(\theta^{(j)}) (\theta - \theta^{(j)})$$

Para una θ multidimensional con ayuda de un hyper plano es aproximado.

$$h(x_i, \underline{\theta}) = \eta_i(\underline{\theta}) \approx \eta_i(\underline{\theta}^{(j)}) + \theta_i^{(1)}(\underline{\theta}^{(j)}) (\theta_1 - \theta_i^{(1)}) + \dots + a_i^{(p)}(\underline{\theta}^{(j)}) (\theta_p - \theta_p^{(j)})$$

Donde

$$a_i^{(k)}(\underline{\theta}) := \frac{\partial h(x_i, \underline{\theta})}{\partial \theta_k}, k = 1, \dots, p.$$

Con vectores y matrices la ecuación puede escribirse como:

$$\underline{\eta}(\underline{\theta}) \approx \underline{\eta}(\underline{\theta}^{(j)}) + A^{(j)}(\underline{\theta} - \underline{\theta}^{(j)}) \quad \text{Ecuación 2.25}$$

- II. Modelado local lineal: Esta etapa asume que la aproximación en el 1er paso sostiene exactamente para el modelo real. Por lo tanto en esta etapa se consiguen los residuos.

$$r_i^{(j+1)} = y_i - \{ \eta(\theta^{(j)})i + a_i(\theta^{(j)})(\theta - \theta^j) \} = \bar{y}_i^{(j+1)} a_i(\theta^{(j)}) \beta^{(j)}$$

$$\bar{y}_i^{(j+1)} := y_i - \eta(\theta^{(j)}) \quad y \quad \beta^{(j+1)} := \theta - \theta^{(j)}. \quad \text{Ecuación 2.26}$$

- III. Estimación de mínimos cuadrados en un modelo local lineal: Para determinar el mejor ajuste $\hat{\beta}^{(j+1)}$ para el dato, se minimiza la suma de cuadrados residuales: $\sum_{i=1}^n (r_i^{(j+1)})^2$, éste es un problema común lineal de mínimos cuadrados con $\bar{y}_i^{(j+1)} \equiv y_i$, $a_i(\theta^{(j)}) \equiv x_i$ y $\beta^{(j+1)} \equiv \beta$. La solución para este problema, $\hat{\beta}^{(j+1)}$, proporciona la mejor solución para aproximar la línea.
- IV. Iteración: Con $\beta^{(j+1)} = \theta^{(j)} + \hat{\beta}^{(j)}$, se repite el paso 1, y 3 hasta aproximar los valores. La solución convergente minimiza $S(\theta)$, por lo tanto corresponde al valor de estimación deseada $\hat{\theta}$.

2.8 Configuración y trayectorias de la herramienta de corte

Un software comercial de manufactura asistida por computadora incluye alternativas de configuraciones de trayectorias de recorrido de la herramienta. A continuación se describen conceptos de relevancia que se utilizan en el diseño del proceso de mecanizado.

Trayectoria (*tool path*): Es una serie de posiciones de coordenadas que determinan la posición de la herramienta, durante la operación de mecanizado (Figura 2.22) [42].

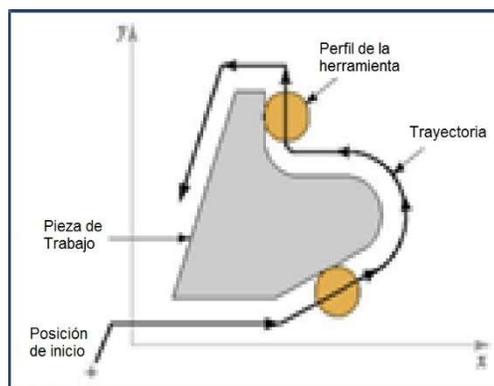


Fig. 2.22 Trayectoria de la herramienta [42].

Fresado dinámico (*dynamic*): Es una técnica que mantiene el ángulo de la herramienta de corte constante durante la trayectoria de maquinado, con el fin de mantener la carga de trabajo constante, ver figura 2.23. [16, 43].

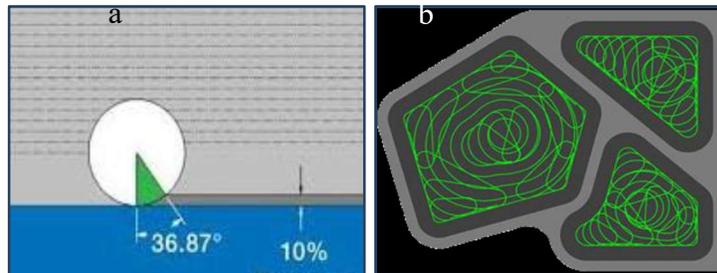


Fig. 2.23 a) Empalme constante b) Dynamic en vaciados [16].

Alta velocidad dinámica (*high speed dynamic*): Es una combinación de bajo compromiso radial de trabajo de la herramienta de corte con alta profundidad de corte, pero alta velocidad de corte y avance por diente [16].

Stepover a_e (diámetro de trabajo): Es la cantidad de diámetro de la herramienta configurado a realizar el corte [42]. La imagen 2.24 a muestra como los filos de la herramienta coincide con el material (a_e igual al 50 del diámetro de la herramienta), lo que causa un daño en los radios de corte. Por otro lado la figura 2.24b muestra cómo se remueve el material y la formación de la viruta. Con esta configuración se reduce la fricción.

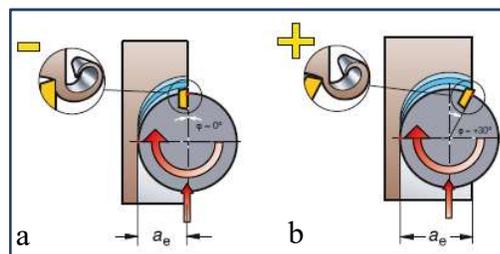


Fig. 2.24 a) a_e igual a 50% y b) a_e mayor al 50% [17].

Paso de desbaste (profundidad): Es la profundidad que se configura para llegar a la profundidad deseada, se le conoce como (*max rough step*).

Método de entrada: Existen diversas opciones como “hélix motion”, “profile”, “media” entre otras opciones.

Interpolación en hélice (*helical interpolation*): Un movimiento coordinado en ejes x, y & z, ésta configuración logra que la herramienta siga un movimiento en hélice [42]. La configuración de entradas en interpolación requiere de ajustes de parámetros como el del radio de Hélice (Fig. 2.25): El cual se refiere al radio en el que se va a realizar la entrada de desbaste.

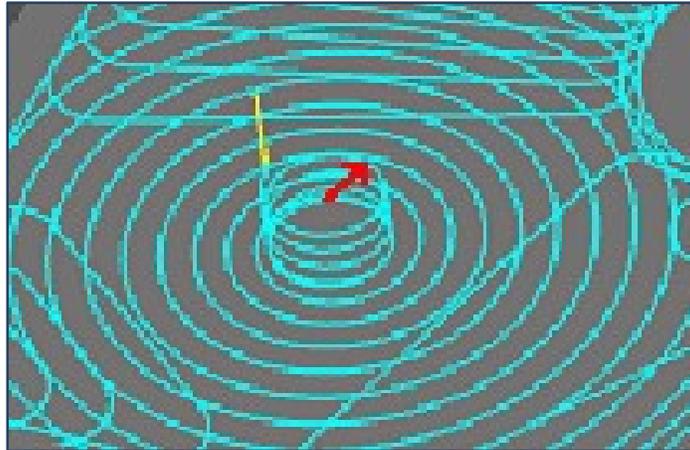


Fig. 2.25 Entrada de la herramienta en hélice.

El movimiento rápido en ángulo (*plunge angle*): Es el ángulo de corte direccionado hacia abajo. Emula una perforación con ángulo de torsión (Ver 2.26 a). Es común que en vez de configurar entradas directas (*plunge*), se configure el (*entry pitch*) entrada en el material (Ver 2.26 b).

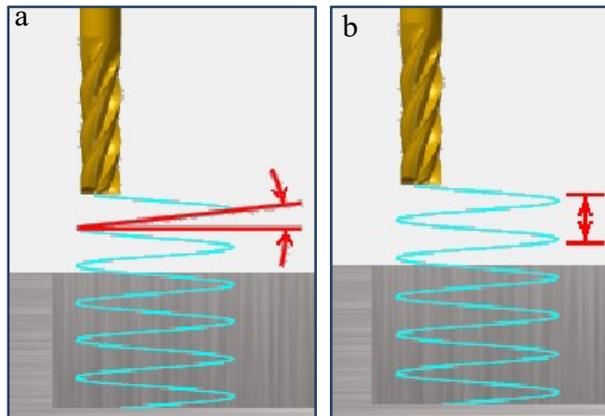


Fig. 2.26 Plunge angle.

Estilo de recorrido de corte de la herramienta: Es la configuración de la trayectoria de la herramienta al realizar el desbaste de material, algunas de las configuraciones son *ZigZag*, *One Way* o *Dynamic* (Fig. 2.27).

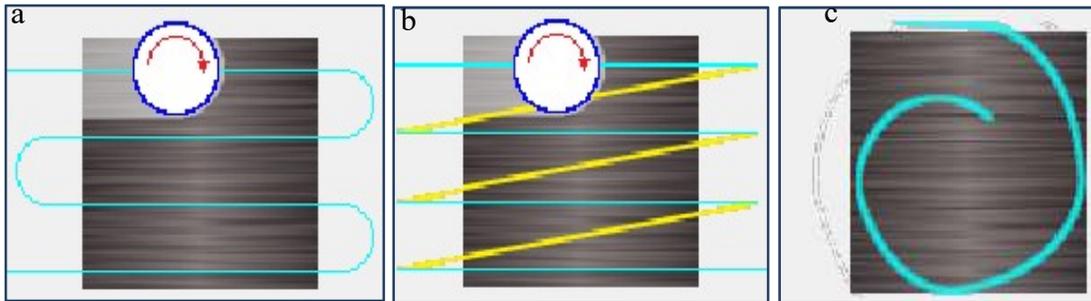


Fig. 2.27 Trayectorias a) *ZigZag* b) *One Way* c) *Dynamic*.

Alta velocidad dinámica (*high speed dynamic - HSD*): Es la configuración de la trayectoria de recorrido de la herramienta para realizar operación de cajeadado. La entrada se realiza con interpolación en hélice hasta llegar a la profundidad deseada, este primer recorrido es realizado con parámetros de corte medurado o reducidos. Al llegar la herramienta a la profundidad configurada, el maquinado emplea alta velocidad con trayectoria dinámica, ésta estrategia consiste en alta profundidad de corte y poco diámetro de corte (Menor al 12% del diámetro de la herramienta) – (Ver Fig. 2.28 a).

Espiral verdadero (true spiral): Es la configuración de trayectoria de recorrido de la herramienta para realizar el cajeadado. La cual consiste en una entrada en hélice, estas consideran reducidas profundidades de corte y desbaste con trayectorias en espiral hasta obtener el contorno de la geometría configurado. La operación se repite hasta obtener la profundidad deseada - (Ver Fig. 2.28 b).

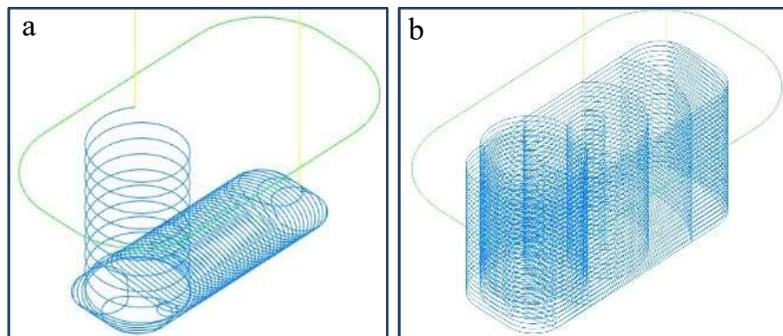


Fig. 2.28 Trayectoria de maquinado a) “*True Spiral*” b) “*High Speed Dynamic*”.

Barrenado - Rompe viruta (chip breaker – Fig. 2.29a): Es una característica de la herramienta, que consiste en romper viruta ejerciendo una fuerza directa sobre el material a remover, a través de movimientos curvilíneos hacia el material. Este método de perforación realiza pequeños cortes en la pieza de trabajo, se retrae con movimientos rápidos y lo realiza hasta llegar a la profundidad final.

Barrenado - Avellanado (counterboring – Fig. 2.29b): Operación de mecanizado, que consiste en un movimiento radial, éste sigue la trayectoria vertical hasta llegar a la profundidad configurada.

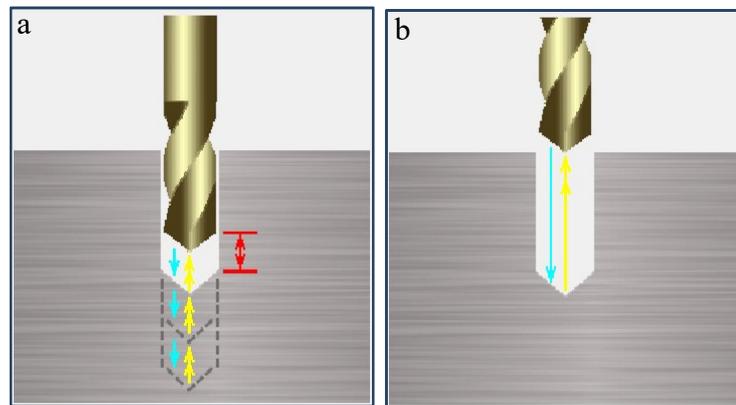


Fig. 2.29 Barrenado a) Chip breaker b) Counter boring

2.9 Selección de máquina CNC

La demanda de potencia y consumo de energía se deriva principalmente de tres factores: Selección de la máquina, trayectoria de corte y condiciones del proceso [32]. La JSA (*Japanese Standards Association*) ha diseñado el estándar (JIS TS B 0024-1:2010), que consiste en un método para evaluar la energía utilizada para maquinar una pieza. Aunque este procedimiento no considera cambios de dimensiones de la pieza. La selección de la máquina herramienta es una condición que aún no se ha estandarizado, por lo consiguiente no existen normas que permitan hacer una selección de la máquina basada en un procedimiento. Cada centro de maquinado tiene una tendencia demanda de potencia y consumo de energía derivado de los componentes electrónicos que lo componen. Behrendt et al, desarrollo un procedimiento de monitoreo de consumo energético de máquinas herramientas, el cual consiste en evaluar diferentes centros de maquinado con el fin de identificar la correcta selección en términos de eficiencia energética [44]. La pieza de caso de estudio analizada se muestra en la figura 2.30.

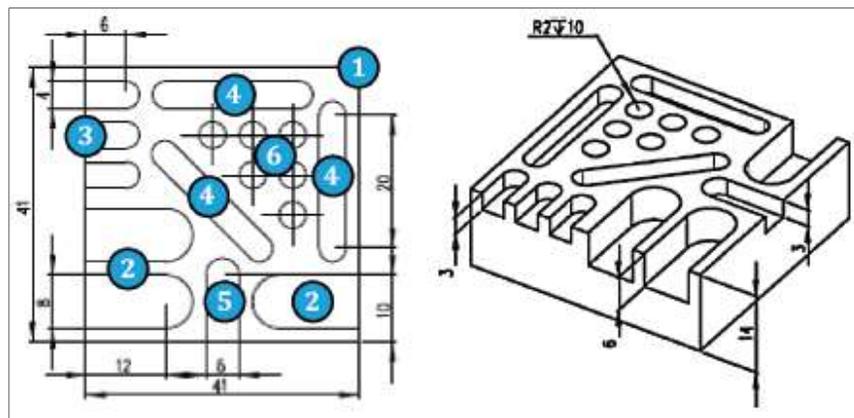


Fig. 2.30 Pieza de caso de estudio de Behrendt [44].

El estudio realizado en el proyecto mencionado seleccionó nueve máquinas CNC, de las cuales Behrendt propuso la clasificación en: Pequeño (Área de mesa de trabajo $\leq 0.1\text{m}^2$), mediana ($0.1 < \text{Área de mesa de trabajo} \leq 1\text{m}^2$) y grande en (Área de mesa de trabajo $> 1\text{m}^2$). La pieza mostrada en la Fig. 2.30 quedó clasificada como pequeña y el tamaño fue duplicado en máquina de tamaño medio y de la misma forma para el tamaño grande. La tabla 2.4 muestra los datos de tiempo ciclo (T. Ciclo), energía (E), energía de corte en porcentaje (Q corte) y picos de potencia (P. Picos). Los datos corresponden a la evaluación

de ocho máquinas. La diferencia de energía del tamaño pequeño al grande es de 0.1845 a 9.2907 kWh. Por otro lado, la variación de energía de corte en porcentaje (Q corte) es de 1.85 a 20.53%. Los picos de potencia también tuvieron variación, y el máximo valor encontrado fue de 55 600 W [44]. También es posible observar que es mayor el consumo de energía que muestra las máquinas de tamaño pequeño con respecto a las máquinas de tamaño medio, esto es posible debido a que las RPM que alcanzan las máquinas de tamaño pequeño son de hasta 70 000 RPM, mientras que las máquinas de tamaño medio alcanzan hasta 8000 RPM.

Valor	Unidad	NVD1500&NMV1500	Haas VF-0&DV5060	NMV5000&NH8000
Tamaño	-	Pequeño-Pequeño	Medio-Medio	Grande-Grande
T. Ciclo	[h]	0:10:45 - 0:10:45	0:15:00- 0:15:00	1:16:15 - 1:16:15
E	[kWh]	0.1845 - 0.7142	0.3638 - 0.5557	1.9323 - 9.2907
Q corte	[%]	3.65 - 1.85	20.53 - 14.7	4.25 - 7.57
P. Picos	[W]	3320 - 20,130	15,610 - 16,440	36,900 - 55,600

Tabla 2.4 Características de potencia y energía del proceso de maquinado (Adaptación de [44]).

2.10 Fluido de corte

En el proceso de maquinado o remoción de materiales, se busca continuamente mejorar la productividad. El proceso de maquinado pueden realizarse en seco, sin embargo las aplicaciones del fluido de corte permiten: Alcanzar altas velocidades de corte, altos avances, profundidades de cortes mayores en comparación con profundidades cortas, incrementar la vida útil de la herramienta, mejora el acabado superficial, incrementa la precisión en las tolerancias definidas, lava y retira la viruta, reduce la potencia de corte a través de minimizar la fricción entre el material y la herramienta de corte [10, 9]. La característica de los diferentes fluidos de corte hace necesario conocer sus propiedades y principales funciones.

Los fluidos de corte se pueden clasificar como: Aceites de corte, los cuales incluyen aceites puros y compuestos más aditivos; Los fluidos mezclados con agua los cuales contienen emulsiones de aceites, fluidos químicos o sintéticos y fluidos semi-químicos; Las pastas y los lubricantes sólidos es la tercera alternativa los cuales son frecuentemente aplicados directamente a la pieza de trabajo o herramienta de corte.

Los aceites de corte: Son comúnmente compuesto por minerales con adiciones de aceites vegetales o marinos, con el fin de mejorar las propiedades mecánicas. Compuestos de azufre, cloruro y fósforo son los llamados aditivos de presión extrema (EP), estos elementos son los que proporcionan las características de lubricidad. Estos fluidos no se enfrían tan bien como los fluidos mezclados con agua [10].

Fluidos mezclados con agua: Aceites emulsiones o solubles son suspensiones de gotas de aceite mezcladas en agua. Generalmente son mezclas de aceites con agentes emulsificantes. Estos fluidos tienen la característica de lubricar y prevenir la oxidación, estas propiedades dependen de la concentración de la emulsión. Concentraciones bajas proporcionan un mejor enfriamiento, altas concentraciones tienen un efecto contrario. Al agregar azufre, cloruro y fósforo como los aceites de corte, el rendimiento de la herramienta de corte se optimiza, y el fluido de corte llega a la interface filtrándose desde los lados de la viruta.

Métodos de aplicación

La Fig. 2.31 muestra el esquema de lubricación directo hacia la viruta y hacia herramienta-viruta. Aunque se puede plantear una clasificación por:

- Enfriamiento por inundación: Este es el método de aplicación que más utilidad tiene. Para herramientas mono-filos los flujos son de 10 litros por minuto (3 galones por minuto). Por otro lado con herramientas indexables en operaciones como fresado se llegan a utilizar presiones de 700 a 14000 kPa en el lavado y retirado de virutas [9].
- Enfriamiento por niebla: Este método suministra el fluido en áreas inaccesibles del proceso de corte. El método es eficiente con fluidos a base de agua y operaciones de rectificado. Este tipo de enfriamiento requiere ventilación para evitar inhalación de partículas.
- Sistemas de alta presión: Estos sistemas agilizan la remoción de material y rompe virutas largas. Las presiones oscilan entre 5.5 a 36 MPa (800 a 5000 psi).

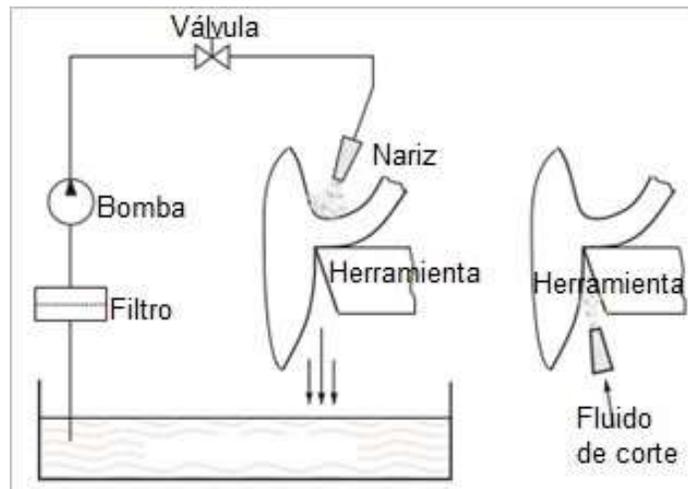


Fig. 2.31 Esquema de los métodos adecuados de aplicación de fluidos de corte a) Cilindrado b) Tallado de rosca y taladro [9] .

2.11 Acabado superficial

La operación de fresado se desarrolla de forma discontinua debido a las entradas y salidas de las trayectorias de recorrido de la herramienta. Por lo tanto, las fuerzas de corte no son constantes durante el recorrido de remoción de material. La figura 2.32 muestra cómo la herramienta de corte entra con mayor área en comparación que a la salida. En la imagen mostrada, la carga es mayor cuando se remueve más material, el cual está en función del avance [17].

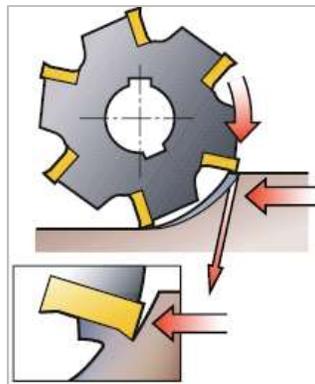


Fig. 2.32 Entrada de la herramienta (Mayor a menor espesor) [17].

Las operaciones de mecanizado son utilizadas en diversos sectores industriales, estos componentes mecanizados comúnmente son utilizados para ensamble o componentes para maquinaria. Los organismos ANSI/ ASME establecieron normas con el fin de estandarizar

y reducir las irregularidades geométricas en superficies de materiales sólidos. Se definieron términos referentes a la textura de la superficie: [10]

- Lay: Es la dirección predominante de la superficie patrón y está determinada por el método de producción.
- Rugosidad: Éstas son las irregularidades de texturas finas de la superficie, son marcas del avance transversal, derivados del proceso de producción.
- Superficie: Son los límites de separación de un objeto.
- Ondulación: Es la sección más espaciada del componente de la textura de la superficie. Estas incluyen todos los espacios de irregularidades.
- Textura de superficie: Es repetitivo y desviación aleatoria de la superficie real que se forma Figura 2.33.

Los factores mencionados son los que determinados por características del proceso y maquinaria como: deflexión de trabajo, vibración, tratamiento de calentamiento.

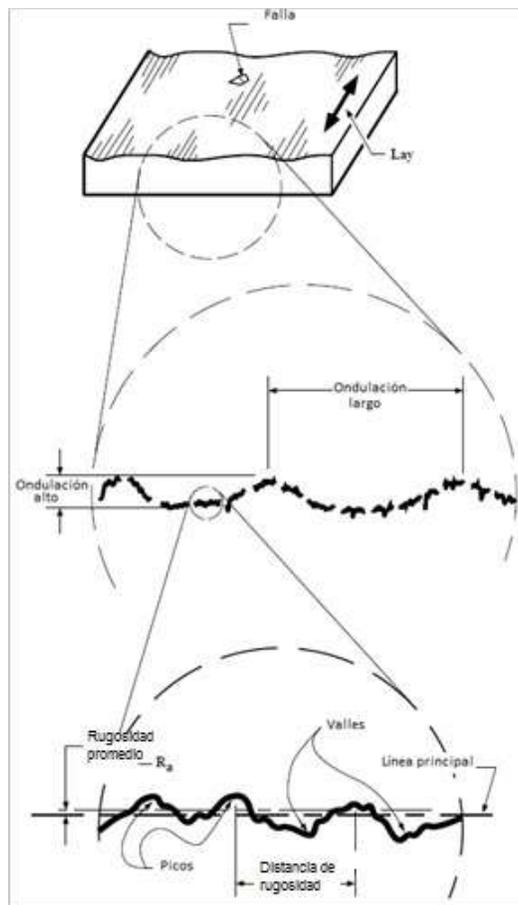


Fig. 2.33 Características de la superficie [10].

La figura 2.33 muestra los espacios de rugosidad (*Roughness spacing*), los cuales son analizados con rugosímetros. Por ejemplo una traza de *mm* con una altura de $10\ \mu\text{m}$ desde el pico más alto al valle más bajo. Esta información se puede ampliar para haber en 160 mm de ancho y 100 mm de alto de la trama. Los métodos más comunes en la interpretación de estos datos son a través de:

R_a : En la cual ‘R’ significa rugosidad y ‘a’ es sinónimo de promedio.

R_q : Raíz cuadrada (RMS) Rugosidad.

R_z : Promedio máximo de altura de perfil.

R_t : Máxima altura de perfil.

La tabla 2.5 muestra los grados de rugosidad de acuerdo a la norma ISO 13020: 1992.

Valores de rugosidad R_a	Valores de rugosidad R_a	Numero de grados de rugosidad
μm	μin	Basado en ISO 1302
50	2000	N12
25	1000	N11
12.5	500	N10
6.3	250	N9
3.2	125	N8
1.6	63	N7
0.8	32	N6
0.4	16	N5
0.2	8	N4
0.1	4	N3
0.05	2	N2
0.025	1	N1

Tabla 2.5 Promedio de rugosidad, en comparación con grados ISO 1302 [45].

Para el caso de la nomenclatura de la superficie obtenida mediante la remoción de material por proceso de torneado, fresado, barrenado o contorneado (ver Figura 2.34).

- Requisitos de textura de la superficie individual.
- Dos o más requisitos de calidad superficial.
- Método de manufactura.
- Dirección y orientación de la superficie.
- Tolerancia de maquinado.

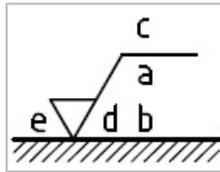


Fig. 2.34 Posición de colocación de requerimientos complementarios [45].

Los valores de R_a , que se obtienen de los métodos de procesamiento se muestran en la fig. 2.35. Es posible observar que para el proceso de fresado los rangos de R_a son de 25 μm a 0.20 μm en promedio [10].

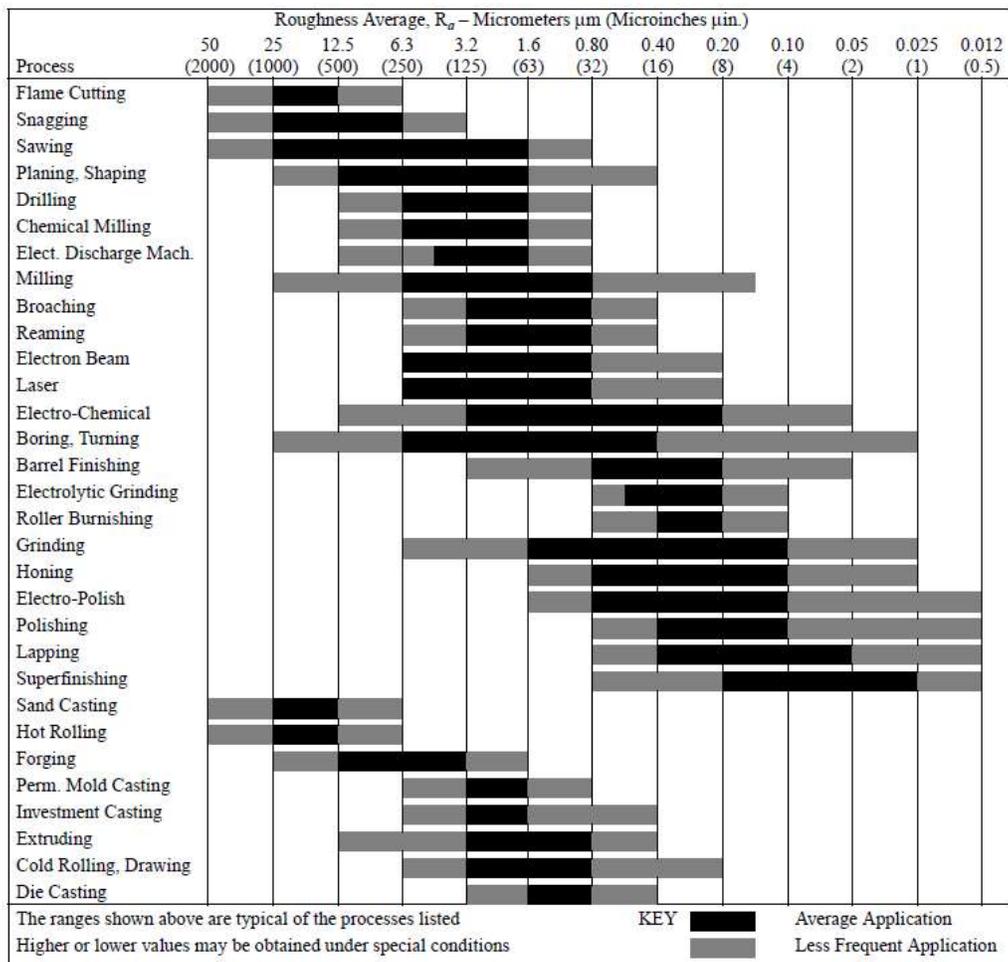


Fig. 2.35 Rugosidades superficiales producidas por métodos de producción [10].

2.12 Discusión del estado del arte

La estructura de las máquinas herramienta ha evolucionado considerablemente en términos de precisión, dimensiones, velocidad de respuesta de los motores y equipamiento eléctrico, entre otros. Debido a la diversidad de marcas los cambios más notables en una máquina CNC son en características de bombas, motores, sensores, en general componentes eléctricos [11]. La Organización Internacional de Estandarización (ISO) dentro del marco “Evaluación ambiental de las maquinas herramientas” como la norma (ISO 14955-1:2014) [46] o como la Estándares Industriales Japonés (JIS TS B 0024-1:2010) han realizado propuestas de métodos de evaluación de selección de máquinas y procesos de mecanizado, sin embargo no existe un método o procedimiento definido para realizar esta actividad. A través de diversas investigaciones se han logrado importantes avances en la evaluación de la demanda de potencia, aunque en método para evaluar la potencia propuesto por Dahmus y Gutowski, mostró ser eficiente y práctico, debido a que se divide la potencia constante, variable y de corte [47]. El método puede ser realizado a través del proceso de arranque de cada componente eléctrico hasta obtener la potencia de remoción de material.

La energía de corte ha sido caracterizada para diferentes materiales en unidades de J / mm^3 , aunque estos datos son referencias, existen diversos factores como la composición química de los materiales, la colada y las características de las herramientas de corte como la geometrías (radios, ángulos). Por lo consiguiente es necesario definir un material como caso de estudio.

La geometría y material del que están fabricadas las herramientas de corte son determinantes en un proceso de maquinado, ya que están relacionadas a la fuerza de corte, temperaturas y resistencia al desgaste.

Debido a que la fuerza de corte está asociada a la herramienta y al tipo de material se han propuesto modelos matemáticos de potencia desde el año 1969. Éstas han sido realizadas en función de potencia, fuerza y acabado superficial. Las propuestas han sido basadas en ecuaciones de 1^{er} orden y 2^{do} orden.

La energía de corte fué analizada por primera vez en el año 1937 por Ernerst y Merchant, le siguieron diversos estudios que han aportado conocimiento importante, como Draganescu et al, que modeló la eficiencia de la máquina CNC en función de la velocidad del husillo o Li W. & Kara S. [36], éste analizó y propuso un desglose de consumo de energía.

Las trayectorias de recorrido de la herramienta también han sido demostradas que tienen influencia en diversas variables de salida como energía, tiempo y acabado superficial. Para ello ha sido necesario conocer las diversas metodologías de conexiones para la adquisición de potencia y energía.

Se ha demostrado también que las máquinas pueden dividirse en pequeñas, medianas y grandes, y ha sido relacionado con el tamaño de la pieza, velocidad del husillo y avance de la mesa [44].

Los acabados superficiales son una característica de gran importancia en un proceso de maquinado, por lo consiguiente este factor deberá ser considerado en un caso de estudio.

Puntos relevantes del análisis del estado del arte:

- La fuerza de corte y la potencia están relacionados con la ecuación de vida útil de la herramienta, la cual depende de los parámetros de corte (Ernest y Merchant 1937) como velocidad de corte, profundidad de corte y avance. Si la ecuación de potencia implica los parámetros de corte es posible ser modelada y obtener datos de potencia a través de la experimentación. A partir de los datos proponer una ecuación de predicción de potencia.
- Los estudios realizados han demostrado que existe variación en la demanda de potencia al utilizar diferentes trayectorias de recorrido de la herramienta durante la remoción de material, por lo que es posible analizar los tipos de trayectorias de acuerdo al tipo de operación de maquinado [18]. Diversos estudios se han realizado en operaciones de planeado, sin embargo las piezas de aplicación industrial incluyen más de tres operaciones diferentes en una sola pieza. Por lo consiguiente se plantea como caso de estudio en una pieza que incluya diversas operaciones de maquinado y así conocer el comportamiento de la potencia.
- Diseñar procesos con enfoque de optimización de energía son una tendencia en temas de investigación sobre procesos de manufactura sustentable, considerando que las contribuciones en el consumo de energía es determinante en un proceso industrial debido a los altos volúmenes de producción y a la manufactura continua de piezas. Más aún existe la necesidad de utilizar normas como Energy Star y diversas regulaciones de la norma ISO que deben cumplir los productos para su comercialización. Este trabajo considera la planeación del proceso, selección de la herramienta y el maquinado de la pieza considerando el consumo de energía.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

3.1 Objetivo

Evaluar el consumo energético de diferentes operaciones de fresado, utilizadas en la manufactura de una pieza, considerando distintas trayectorias y parámetros de corte.

Metas:

- Identificar las trayectorias que requieren menos potencia y energía en las operaciones de planeado, barrenado y cajado.
- Identificar los comportamientos de acabado superficial en relación a las trayectorias de recorrido de la herramienta seleccionada.
- Desarrollar una ecuación de predicción de la potencia, por operaciones de planeado, contorno, barrenado y acabado superficial.
- Identificar los parámetros de corte que satisfagan requerimientos de baja demanda de potencia y consumo de energía, sin descuidar el acabado superficial para un caso de estudio con diversas operaciones de mecanizado.

3.2 Alcances

El presente trabajo tiene como alcance evaluar una pieza caso de estudio, utilizando un diseño DOE 3^3 considerando como variables de entrada los parámetros de corte. Las operaciones más comunes de maquinado como: contorno, cajado, barrenos, planeado y superficie son considerados. En términos de demanda de potencia, consumo de energía y acabado superficial. Para el caso de estudio seleccionado será posible obtener datos experimentales de potencia y acabado superficial, para modelarlos en una ecuación lineal y no lineal para predecir la demanda de potencia en vacío, así como para cada una de las operaciones de maquinado seleccionadas. Derivado de los experimentos se buscara identificar estrategias de configuración durante el desarrollo del proceso de maquinado, que propicien la reducción del consumo de energía.

3.3 Hipótesis

Hipótesis 1. Debido a que existen diferentes trayectorias de recorrido de la herramienta de corte para la remoción de material por ejemplo: Lineales, en Zigzag o Dynamic. Habrá diferentes orientaciones de la herramienta y por consiguiente diferentes ángulos de ataque. Esta característica hará que la fuerza empleada para remover el material sea diferente. Por lo tanto la potencia de corte (ecuación 3.1) para cada trayectoria tendrá un comportamiento diferente, debido a que está relacionada con la fuerza de corte F_c por la velocidad de corte V_c , esta relación es el equivalente a conocer la fuerza de cizallamiento F_s por la velocidad de cizallamiento V_s más la multiplicación de la fuerza de fricción F por velocidad de desprendimiento de viruta.

$$Potencia = F_c * V = F_s \cdot V_s + F \cdot V_c [9]. \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Hipótesis 2. La velocidad y profundidad de corte y avance son parámetros calculados antes de realizar el proceso de fresado y están relacionado con la remoción de material. A través de estos parámetros, es posible realizar un planteamiento de experimentos para la obtención de datos y a partir de estos determinar una ecuación de predicción del comportamiento de potencia (ecuación 3.2), la cual puede quedar modelada como:

$$Potencia = x_1 \cdot v_c^{x_2} \cdot f^{x_3} \cdot a_p^{x_4} \quad \text{Ecuación 3.2}$$

3.4 Justificación

El consumo de energía en México en el sector industrial manufacturero representa el 57% [3, 2], del cual los 5 principales sectores son: Industria de metales 19%, química 13%, minerales no metálicos 12%, alimentos 10%, equipo y transporte 9% [1]. Por lo tanto la industria de los metales incluye los procesos de maquinado que están relacionado con la fabricación de componentes en la industria automotriz, aeroespacial y de maquinaria. Consecuentemente este trabajo se enfoca en los siguientes puntos:

- Realizar una correcta selección de la trayectoria de la herramienta en un proceso de maquinado, puede representar un ahorro de hasta 100 Wh por pieza maquinada [18, 7].

- Predecir la potencia a partir de modelos predictores que relacionan parámetros de corte es útil para identificar y maximizar procesos de maquinado [48, 34, 32, 22].
- Considerar un estudio de una pieza con diversas operaciones de maquinado es una alternativa para conocer el comportamiento energético cercano a una aplicación real en procesos de manufactura [49, 50].

3.5 Aportación

Del desarrollo de esta tesis cubre los siguientes aspectos:

- I. Identificar las diferencias de demanda de potencia y el consumo de energía al seleccionar diferentes trayectorias de recorrido de la herramienta.
- II. Se desarrolla una ecuación de predicción de potencia, a partir del modelado predictor del comportamiento de potencia seleccionar los parámetros de corte V_c , a_p y f_z .
- III. Cuál es la trayectoria de menor potencia demandada en las operaciones seleccionadas.
- IV. Identifica estrategias y parámetros con menor consumo de energía.

4. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Para realizar la evaluación del comportamiento de energía y acabado superficial en el proceso de maquinado, el cual fue definido en el capítulo 3 como objetivo del presente trabajo de investigación. Se utilizó la metodología propuesta por Wang Z.H. et al. & Krishankant et al. [30, 51], ésta fue adaptada a un caso de estudio y consiste en 8 etapas.

- Etapa 1: Diseño de pieza de estudio (definición de forma geométrica, dimensiones y diseño CAD).
- Etapa 2: Selección del material (propiedades químicas y mecánicas).
- Etapa 3: Selección de herramienta de corte (en referencia a la geometría de la pieza a maquinar, definida en la etapa 1).
- Etapa 4: Diseño de experimentos DOE (Seleccionando los factores de velocidad, avance y profundidad y niveles bajo, medio y alto. [18, 8].)
- Etapa 5: Diseño CAM, (selección y configuración de trayectorias de recorrido de la herramienta).
- Etapa 6: Maquinado de la pieza en máquina CNC.
- Etapa 7: Medición de potencia y energía (configuración de instrumentos para toma de datos).
- Etapa 8: Análisis y modelado a partir de los datos recolectados.

La Fig. 4.1 muestra la secuencia de la metodología para la obtención de datos de potencia y energía. El esquema muestra desde el diseño de la pieza, selección del material, herramienta. El diseño de experimentos, el cual está en relación a los parámetros de corte. Posteriormente las trayectorias y configuración de recorrido de la herramienta son simulados a través del software comercial. Además al realizar el maquinado de la pieza de caso de estudio, los datos de potencia y energía son medidos con el medidor de calidad de la energía. Por último los datos son analizados en términos de energía y se seleccionan los datos para modelarlos en términos de potencia.

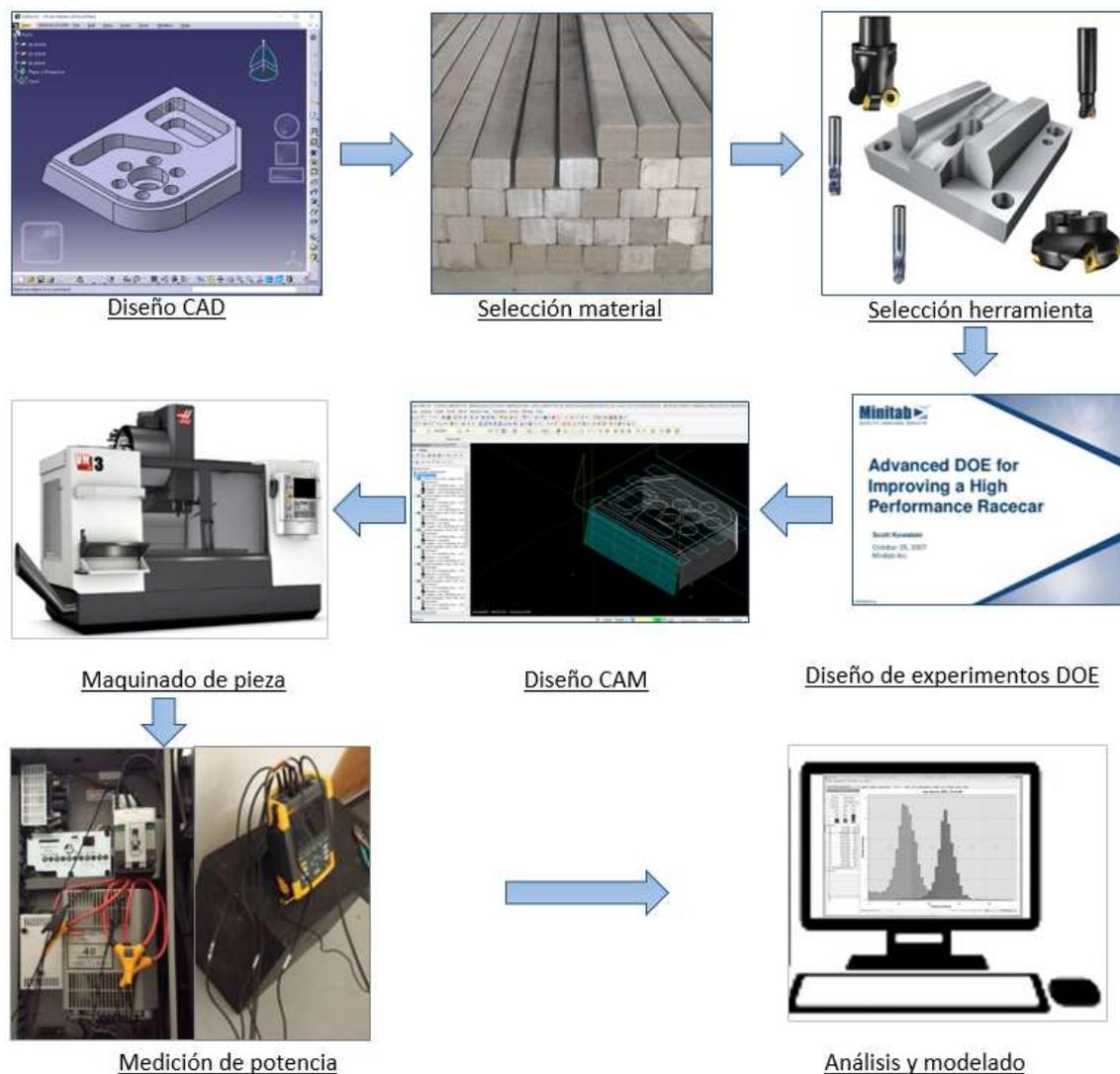


Fig. 4.1 Secuencia de metodología.

4.1 Diseño de pieza de caso de estudio (Características dimensiones).

La pieza de estudio tiene un largo total de 180 mm por 150 mm de alto y un espesor de 40 mm. Su manufactura requiere ocho operaciones: A) Planeado, B) Perfilado, C) Perfilado escalón D-E) Cajado cuadrado, F) Cajado con ángulo, G-H) Cajado circular (I-J-K-L-

M-N) 6 Barrenos y O) Superficie angular (ver fig. 4.2). El material seleccionado fue acero AISI 1045. Las características geométricas que incluye la pieza se definieron en relación a las operaciones más utilizadas en la industria [52], y que el tamaño correspondiera a una pieza de tamaño estándar a una máquina de tamaño medio, como la seleccionada.

La operación de planeado “A” consiste en un desbaste inicial a la pieza, a partir del desbaste realizado se generan las dimensiones especificadas para el resto de las características de la pieza. La operación de perfilado ‘B’ incluye desbaste lineal, angular y radial, tal como se muestra en la ° (O).Fig. 4.2 adicionalmente se agregó un perfilado escalón ‘C’. Se agregaron 3 tipos de cajeados: angular, cuadrado y circular ‘D, E y F’. Se incluyeron 6 barrenos ciegos de características geométricas similares (I, J, K, L, M y N). Por último la pieza incluye una superficie tipo ángulo de 75° (O).

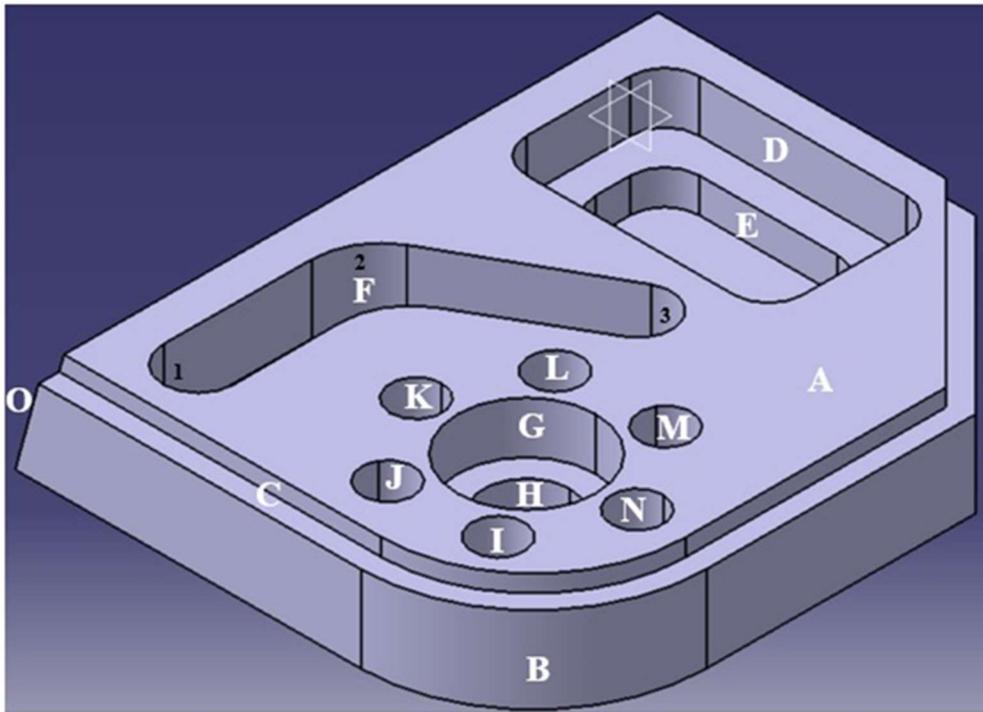


Fig. 4.2 Pieza de estudio.

La Tabla 4.1 muestra detalles de profundidad, radio y ángulos de las diversas formas geométricas que tiene la pieza de estudio. (Ver Fig. 7.7 Plano de pieza de caso de estudio).

Característica	Profundidad - mm	Diámetro - mm
A	0.5	NA
B	30	100
C	5	88
D	15	20
E	10	20
F1	20	20
F2	20	20
F3	20	20
G	15	40
H	10	25
I-J-K-L-M-N	20	14
O	75°	

Tabla 4.1 Detalles dimensionales del caso de estudio.

4.2 Selección del material

El material seleccionado para el caso de estudio fue el acero AISI 1045 debido a que es un material de medio contenido de carbono y se utiliza en la fabricación de componentes de maquinaria, cigüeñales, flechas y moldes. Por lo consiguiente el uso en la industria es amplio. Las propiedades del acero se muestran en la Tabla 4.2. Una vez seleccionado el material y las operaciones es posible seleccionar las herramientas de corte.

Composición química = (0.43 - 0.5 % C) + (0.6 - 0.9 % Mn) + (0.04 % P) + (0.05 %S)

Propiedad	Sistema internacional	Sistema Inglés
Densidad	$7.87 \frac{g}{cm^3}$	$0.284 \frac{lb}{in^3}$
Esfuerzo de fluencia	310 MPa	45000 PSI
Esfuerzo máximo	565 MPa	81900 PSI
Módulo de elasticidad	200 GPa	29000 KSI
Máquinabilidad	57% (AISI 1212=100%)	
Dureza	163 HB (84 HRb)	

Tabla 4.2 Propiedades del acero AISI 1045 [53].

4.3 Selección de herramienta de corte

La pieza de caso de estudio mostrada en la ^o (O). Fig. 4.2 incluye 5 tipos de operaciones diferentes. Se seleccionaron herramientas de carburo ya que tienen una elevada dureza y escasa ductilidad, esta característica es apropiada para el maquinado de piezas de acero, de acuerdo con la norma ISO 513:2004-07 [15]. Para el experimento se realizó:

1. Elegir la calidad del material de la herramienta de corte de acuerdo a la norma ISO 513:2004-07 [54]. Las letras y colores involucrados se muestran en la Fig. 4.3.



Fig. 4.3 Letras y colores de acuerdo a norma ISO [15]. (Clasificación del material).

2. Elegir la geometría de la herramienta: Se considera el diámetro de la herramienta en términos del área a maquinar y operación a maquinar para definir la geometría a seleccionar, considerando el cajeado, ángulo o superficie a desbastar.
3. Seleccionar el ángulo de corte: 90, 75, 45 o menor grado. Los ángulos mayores se eligen para operaciones de desbaste por lo que los acabados superficiales no son eficientes.

La pieza incluye el planeado (Fig. 4.2): Esta abarca un área de 13000 mm², se eligió un porta-herramienta “345-050C5-13M” (Ver Fig. 4.4 a), con diámetro de 50 mm, incluye cuatro herramientas de corte (Insertos), con ángulo de corte de 45°, la profundidad máxima de corte es 6 mm, con sentido horario de corte. La herramienta de corte utilizada es “345R-1305M-PL 4230” (Ver Fig. 4.4 b), consiste en una herramienta indexable, con radio de corte de 0.8 mm, ángulo de corte máximo de 45°, profundidad máxima de corte de 6 mm y con 4 filos cada inserto.



Fig. 4.4 a) Porta-herramienta “345-050C5-13M”, b) herramienta “345R-1305M-PL 4230” [17].

Para el perfilado (Fig. 4.2): se eligió un porta-herramienta “392.45CG-40 20 060” (ver Fig. 4.5 a). La herramienta de corte utilizada es “1P240-1200-XA 1630” (Ver Fig. 4.5 b), esta consiste en un cortador vertical de carburo sólido, con ángulo de corte de 45° , tiene una profundidad máxima de corte de 26.5 mm, con sentido horario de corte, ancho de chaflán de esquina de 0.2 mm, máximo ángulo de rampa de 5° y cuatro filos efectivos de corte.

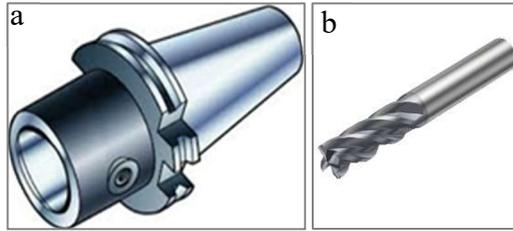


Fig. 4.5 a) Porta-herramienta “392.45CG-40 20 060”, b) herramienta “1P240-1200-XA 1630” [17].

El barrenado (Fig. 4.2): se eligió el porta-herramienta “930-V40-HD-20-082” (Ver Fig. 4.6 a). La herramienta de corte utilizada es “860.1-1400-040A1-PM 4234” (Ver Fig. 4.6 b), la cual es de carburo sólido, con diámetro de corte de 14 mm, longitud de ranura de viruta de 60 mm, ángulo de ataque es de 144° , con 2 filos efectivos y sentido horario de corte.

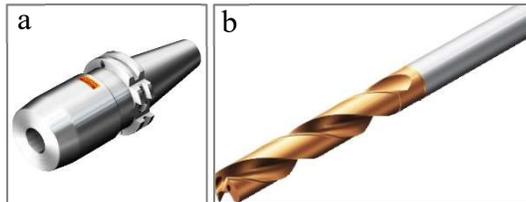


Fig. 4.6 a) Porta-herramienta “930-V40-HD-20-082”, b) herramienta “860.1-1400-040A1-PM 4234” [17].

La superficie fue realizada en dos operaciones, desbaste y acabado.

La superficie desbaste (Fig. 4.2). El porta-herramienta seleccionado es “495-025A25-7509H” (Ver Fig. 4.7 a), esta tiene un ángulo de corte de 75° , con tres filos de corte. La herramienta utilizada en esta operación es “495-09T3M-PM-1030” (Ver Fig. 4.7 b), la longitud de corte efectiva es de 7.4 mm, el radio de 0.8 mm y tiene como ángulo máximo de corte a 90° .

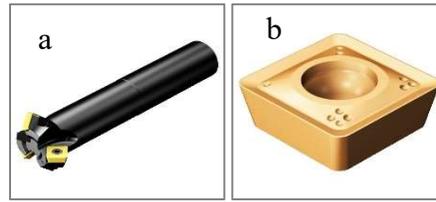


Fig. 4.7 a) Porta-herramienta “392.45CG-40 20 060”, b) herramienta “860.1-1400-040A1-PM 4234” [17].

Para el acabado de la superficie (Fig. 4.2): el porta- herramienta utilizado es “392.45CG-40 20 060” (Ver Fig. 4.8 a). La herramienta de corte es “1B240-1200-XA 1630” (Ver Fig. 4.8), un cortador esférico con diámetro de corte de 12 mm, la profundidad máxima de corte es de 26 mm, cuatro filos efectivos de corte, y radio de corte de 6 mm.



Fig. 4.8 Herramienta “1B240-1200-XA 1630” [17].

4.4 Características de la maquina CNC

Características		S. Internacional	S. Ingles
Recorrido	X	1016 mm	40”
Eje	Y	660 mm	26”
	Z	635 mm	25”
	Máxima		
Velocidad husillo		12 000 RPM	
Movimientos	X		
Rápidos en	Y	18.0 $\frac{m}{min}$	710 $\frac{in}{min}$
Ejes	Z		
Empuje	X		
Máximo	Y	18238 N	4100 lb
del motor	Z		

Tabla 4.3 Características de fresadora vertical Haas VM3®.

La máquina CNC (Tabla 4.3) seleccionada fue considerando las características de la pieza de estudio (180 mm X 150 mm X 40 mm), estas dimensiones caen dentro del rango de trabajo de la Haas VM3. Adicionalmente, la velocidad del husillo determinada para utilizar en el proceso de corte con las características de las herramientas de corte entra en el rango de los 4000 y 11000 RPM, considerando las características que la máquina Haas VM3 tiene un máximo de 12 000 RPM, es posible utilizar esta máquina CNC.

4.5 Análisis y planteamiento de modelado de potencia, diseño de experimentos

Se plantearon dos etapas:

- Análisis de demanda de potencia
- Diseño de experimentos

Análisis de demanda de potencia

Para medir la potencia demanda por las operaciones de fresado para producir la pieza de estudio, se tomó como referencia la metodología seguida por Dahmus J. B. and Gutowski T. G. [47]. La Fig. 4.9 muestra cómo es el desglose de potencia de máquina CNC, el cual se seguirá en el experimento del caso de estudio:

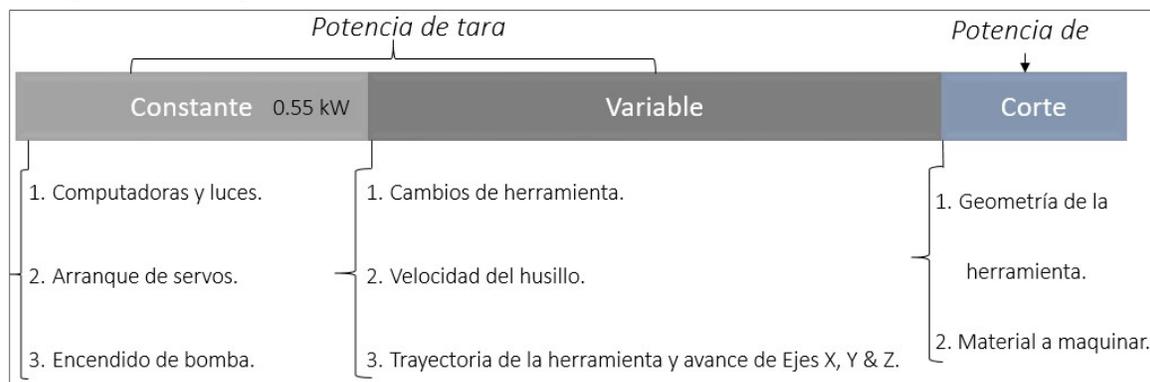


Fig. 4.9 Desglose de potencia de máquina CNC.

Potencia constante:

Para determinar la potencia constante, los componentes de la máquina CNC son computadoras, luces, arranque de servos y el encendido de la bomba. Por lo que este dato fue medido arrancando el centro de maquinado y dejando la máquina en estado (*stand by*) durante varios minutos. Este proceso fue realizado en diferentes horas del día y la demanda de potencia constante fue de 0.55 kW.

Este dato de potencia está implícito durante la operación de una máquina CNC. Este dato es único para cada marca y condiciones de la máquina CNC [6].

Potencia variable:

Para determinar la potencia variable se consideraron los componentes del centro de maquinado. Los elementos considerados en el centro de maquinado son: los cambios de herramienta, velocidad del husillo y el desplazamiento de los ejes X, Y & Z. Debido a que este caso de estudio analizó la pieza que incluye diferentes operaciones de maquinado fue necesario plantear un modelo para cada una de las 6 herramientas de corte utilizadas. Es importante mencionar que el cambio de herramienta no se consideró para obtener el dato de potencia. Los componentes de velocidad del husillo y el desplazamiento de los ejes (X, Y & Z), se analizaron como se muestran en la Fig. 4.10. Sin embargo, después de realizar los cálculos con los parámetros seleccionados de velocidad de corte, avance por diente y profundidad de corte; fue posible calcular la velocidad del husillo. La Fig. 4.10 muestra el arreglo del diseño de experimentos, donde es posible ver dos factores, velocidad del husillo y avance (Velocidad de alimentación), cada factor con tres niveles diferentes.

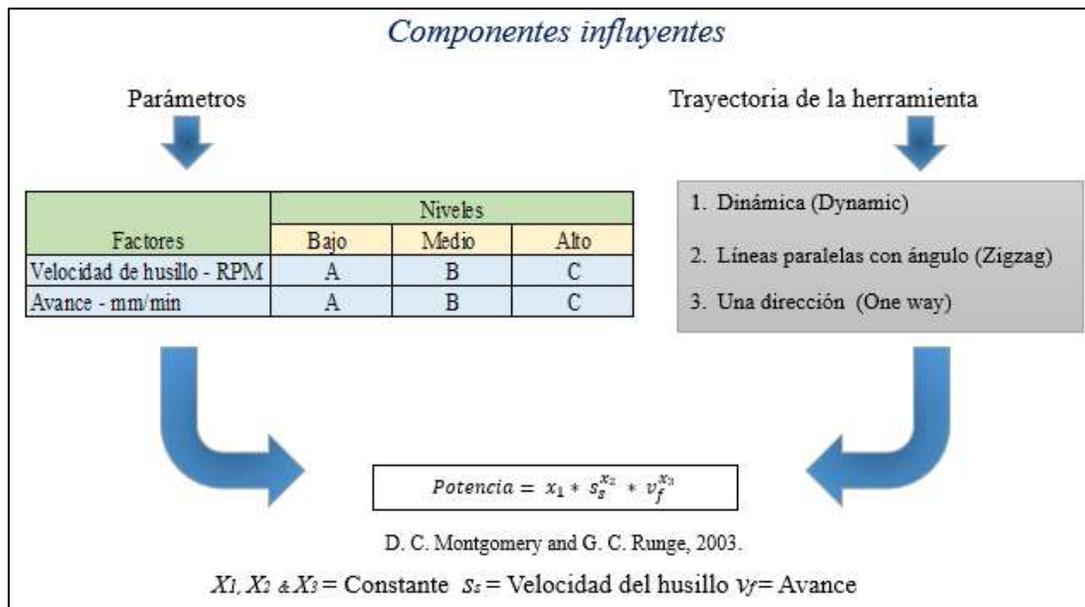


Fig. 4.10 Factores influyentes en potencia variable.

Potencia de tara:

Como se muestra en la Fig. 4.9, la potencia de tara es la sumatoria de la potencia constante más la potencia variable. Por lo tanto, la potencia de tara es la demandada por la máquina CNC en vacío, antes de realizar la remoción de material. El modelo de ecuación seleccionado para determinar la potencia es el mostrado en la Fig. 4.10, de la ecuación mostrada x_1 , x_2 & x_3 son constantes determinadas a partir de los resultados de potencia obtenidos de manera experimental. Además v_s es la velocidad del husillo y v_f es el avance.

Potencia de corte:

La potencia de corte para realizar un mecanizado se determina a partir del volumen de arranque de viruta y la fuerza necesaria para la remoción de material. Los factores que interfieren son los mostrados en la Fig. 4.9. Una vez seleccionados los factores mencionados fue necesario realizar la selección de parámetros de corte. Estos son proporcionados por el proveedor de herramientas de corte Sandvik Coromant ®. Los parámetros son: velocidad de corte, avance por diente y profundidad de corte (como se muestra en la Fig. 4.11). Los datos mostrados en la tabla muestran que fueron seleccionados 3 niveles para los parámetros proporcionados por el proveedor (éstos quedaron dentro de lo sugerido). A partir de los parámetros sugeridos, se calculan la velocidad del husillo y el avance (desplazamiento de los ejes X , Y & Z). Estos datos son los que se agregan en el código G para el mecanizado de la pieza. Adicionalmente, de acuerdo a estudios mostrados por Aramcharoen A. y Mativenga P. T. [18, 8] la trayectoria de recorrido de la herramienta por ejemplo: Dynamic, Zigzag y One Way) es otro factor que interfiere en la demanda de potencia. Por lo tanto, la ecuación de predicción de potencia mostrada en la Fig. 4.11 es diferente para cada trayectoria. En dicha ecuación x_1 , x_2 , x_3 & x_4 son constantes determinados a partir de los resultados de potencia obtenidos de manera experimental. Además, V_c es la velocidad de corte, a_p es la profundidad de corte y f_z es el avance.

La forma de obtener este dato es posible a través de la ecuación 4.1:

$$\text{Potencia de corte} = \text{Potencia total} - \text{potencia de tara} \qquad \text{Ecuación 4.1}$$

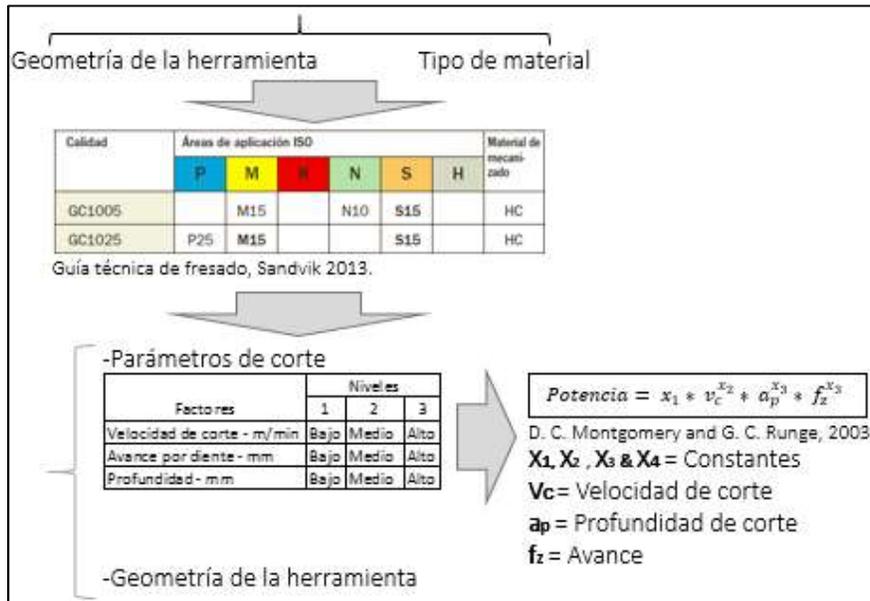


Fig. 4.11 Factores influyentes en potencia de corte.

La potencia total (ecuación 4.2): Es el dato obtenido de la medición del consumo de energía al realizar experimentos con un equipo de medición de calidad de la energía. Ésta puede ser representada con la fórmula.

$$Potencia\ total = Potencia\ constante + Potencia\ variable + potencia\ de\ corte$$

Ecuación 4.2

4.6 Selección y configuración de trayectorias de recorrido de la herramienta

Para la definición de trayectorias para maquinar la pieza estudiada se diseñó del proceso, se utilizó el software MasterCamX8, debido a la disponibilidad. Este software incluye diferentes alternativas de trayectorias, según la operación de maquinado. Las trayectorias seleccionadas se muestran en la Fig. 4.12.



Fig. 4.12 Secuencia de evaluación de trayectorias.

Planeado:

Las trayectorias de recorrido de la herramienta seleccionadas son: Lineales paralelas con ángulo (Zigzag), unidireccional (One Way) y dinámica (Dynamic) (Ver Fig. 4.13). Para las trayectorias lineales paralela y unidireccional requieren detalles de entrada, salida y parámetros de corte se muestran en la (Tabla 4.4). Para la trayectoria Dynamic aplican solo parámetros de aproximación y el diámetro de compromiso de trabajo.

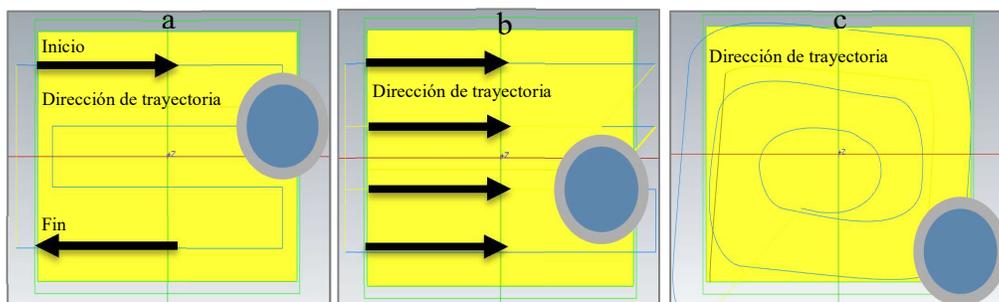


Fig. 4.13 Trayectorias a) líneas paralelas con ángulo b) Unidireccional c) Dinámico.

	Zig zag & One way	Dynamic
Extensión de más perpendicular al corte (Across overlap %)	10	--
Extensión de más perpendicular al corte (Along overlap %)	30	--
Distancia de aproximación primer pasada (Approach distance %)	50	50
Distancia de aproximación de salida (Exit distance %)	50	-
Distancia adyacente a las pasadas de la trayectoria (Max. stepover %)	75	75
Velocidad de corte (Cutting speed RPM)	5777	5777
Tasa de remoción de material (Move removal rate mm/min)	2607	2607
Profundidad de corte (Depth of cut- mm)	0.5	0.5

Tabla 4.4 Detalles de la configuración del planeado.

Cajeados:

Para realizar la operación de cajeados se seleccionaron dos trayectorias de recorrido de la herramienta, High Speed Dynamic (HSD) y True Spiral (TS). La Tabla 4.4 muestra detalles de configuración de parámetros. El plunge angle, hélix radius son parámetros similares en ambos casos.

Para la operación de HSD, la velocidad de entrada es de 205 m/min y la velocidad de la trayectoria dinámica es de 300 m/min. Esta condición es posible ya que el compromiso de trabajo a_e es menor al 10% del diámetro de la herramienta, que es igual a 0.96 mm. Además, el avance de la herramienta para la trayectoria de entrada es menor con respecto a la trayectoria dinámica. La profundidad de corte es de 15 mm. Para la operación de TS, la velocidad de la trayectoria de entrada y espiral es la misma, 205 m/min. El avance fue el mismo en ambos casos, 0.077 mm. Y la profundidad de desbaste fue de 0.6 mm, hasta llegar a la profundidad de 15 mm. El compromiso de trabajo fue de 4.8 mm.

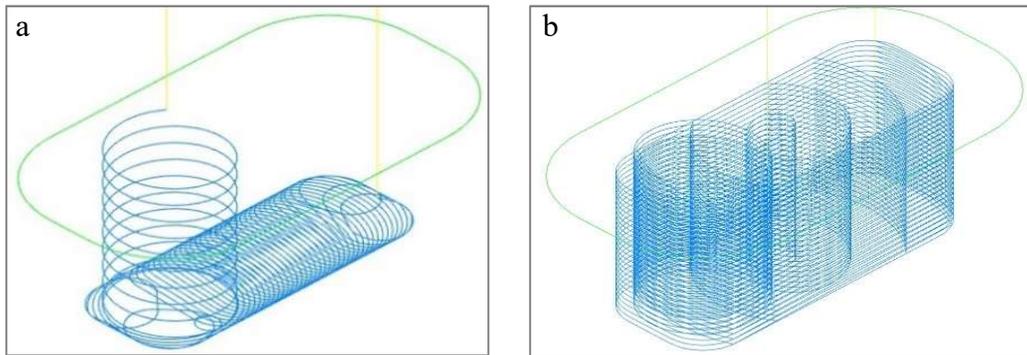


Fig. 4.14 Cajeados a) Alta velocidad dinámica (High Speed Dynamic) b) Espiral verdadero (True Spiral)

	High speed		True spiral	
	Entry	Dynamic	Entry	Spiral
Extensión de exceso (Stepover %)	8	--	40	--
Radio mínimo de la trayectoria (Min toolpath radius %)	10	--	--	--
Tamaño de holgura de herramienta (Gap size tool diameter %)	100	--	--	--
Tolerancia del re-maquinado (Tolerance for remachining %)	--	--	5	--
Ángulo de trayectoria de entrada y salida respecto a plano XY. (Plunge angle °)	3	--	3	--
Movimiento de entrada en radios hélices (Helix radius – Entry motion mm)	6	--	6	--
Velocidad de corte (Cutting speed $\frac{m}{min}$)	205	300	205	205
Avance por diente (Feed per tooth mm)	0.077	0.133	0.077	0.077
Profundidad de corte Depth of cut (mm)	--	15	--	0.6
Working engagement (mm)	--	0.96	--	4.8

Tabla 4.5 Detalles de configuración de los cajeados.

Configuración de barrenado:

Con la finalidad de evaluar dos de las alternativas más usadas en la operación de barrenado, se seleccionaron las trayectorias de recorrido es contra el agujero (drill counterbore) y rompimiento de viruta (chip break) (Fig. 4.15). La profundidad final del barreno fue de 15 mm. Con la opción de drill counterbore no se configura retract debido a que la broca entra hasta alcanzar la profundidad deseada, mientras la opción de chip break el retract se configuró en 2 mm. La velocidad de corte de $125 (v_c) - \frac{m}{min}$ y el avance por vuelta es de $0.45 (f_n) - mm/r$.

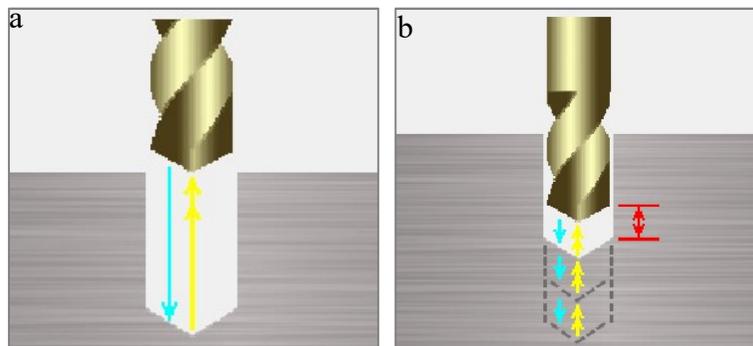


Fig. 4.15 Barrenados a) Barrenado contra agujero (Drill counterbore) b) Rompimiento de viruta (Chip break).

4.7 Diseño de experimentos

El diseño de experimentos se realizó considerando dos secciones: Potencia de tara y potencia total. Dentro de cada sección fueron seleccionados diferentes niveles (mínimo, medio y máximo), con el fin de identificar cuál de las trayectorias evaluadas tiene una menor demanda de potencia y consumo de energía. Ya que la trayectoria seleccionada se utilizará para el modelado de la ecuación de predicción.

Potencia de tara:

La potencia de tara es igual a la sumatoria de potencia fija y variable. Siguiendo la metodología mencionada en el capítulo 4.0. La primer etapa es la de diseño de la pieza, en esta se seleccionó la operación de planeado para determinar cómo se comporta la potencia de tara en los rangos mostrados en la Tabla 4.6. Los rangos seleccionados corresponden a los mínimos y máximos valores de avance y velocidad de husillo posibles de encontrar en

la operación de planeado. Por lo que se plantearon experimentos en vacío. De acuerdo a la Tabla 4.6, se estableció el diseño de experimentos DOE 2³ [25]. El diseño mostrado es el equivalente a realizar 9 experimentos y a partir de ellos obtener los valores de potencia de salida.

Potencia de Tara	Factores	Niveles		
		Mínimo	Medio	Máximo
Maquinado Vacío	Avance (v_f)	2005	5777	9549
	Velocidad del husillo (n) - RPM	802	2607	4412

Tabla 4.6 Parámetros para determinar potencia de tara en operación - planeado.

Potencia total:

Con el material y herramienta de corte seleccionado, el siguiente paso fue establecer diferentes experimentos para determinar la ecuación no lineal de predicción en términos de los parámetros de corte y dejar como variable de salida la potencia total de corte. Los parámetros de corte fueron consultados en los catálogos del fabricante Sandvik Coromant ®. Para las operaciones de planeado, superficie de desbaste y superficie de acabado el diseño DOE es de tres factores con tres niveles 3³ [25], los factores son velocidad de corte, avance y profundidad. Los niveles son bajo, medio y alto (Ver Tabla 4.7). Los experimentos desarrollados son 27. En las operaciones de perfilado y barrenado el diseño DOE es de dos factores y 3 niveles 2³, los factores son velocidad de corte y avance. Mientras que los niveles son bajo, medio y alto (Ver Tabla 4.7). En estos se plantearon 9 experimentos. En la operación de perfilado la estrategia de maquinado fue Dynamic, la principal característica es entrar con mucha profundidad de corte y poco diámetro de corte (Una sección del total del diámetro de la herramienta de corte). La misma condición en la profundidad de corte constante fue para el barrenado, debido a que en esta operación se configura la profundidad final.

Operación	Factores (Parámetros de corte)	Niveles		
		Mínimo	Medio	Bajo
Planeado	Velocidad de corte (v_c) $\frac{m}{min}$	315	350	385
	Avance por diente (f_z) – mm	0.15	0.175	0.2
	Profundidad de corte (a_p)- mm	0.5	1	1.5
Perfilado	Velocidad de corte (v_c) $\frac{m}{min}$	350	375	400
	Avance por diente (f_z) – mm	0.015	0.077	0.0825
	Profundidad de corte (a_p)- mm		20	
Barrenos	Velocidad de corte (v_c) $\frac{m}{min}$	315	350	385
	Avance – mm	0.15	0.175	0.2
	Profundidad de corte (a_p)- mm		15	
Superficie Desbaste	Velocidad de corte (v_c) $\frac{m}{min}$	340	355	465
	Avance por diente (f_z) – mm	0.15	0.175	0.0.2
	Profundidad de corte (a_p)- mm	2	3	4
Superficie Acabado	Velocidad de corte (v_c) $\frac{m}{min}$	350	400	450
	Avance por diente (f_z) – mm	0.077	0.108	0.139
	Profundidad de corte (a_p)- mm	0.3	0.4	0.5

Tabla 4.7 Parámetros de corte seleccionados en diferentes operaciones de maquinado.

4.8 Configuración de instrumentos para toma de datos de potencia y energía

La potencia fue medida utilizando el analizador de calidad de la energía (trifásico) Fluke ® 430 series II. Éste consiste en un equipo portátil equipado con pinzas amperimétricas diseñadas para la medida de la calidad eléctrica y potencia. Este instrumento de medición se utiliza para verificar la calidad del servicio conforme a las normas estándares IEC 61000-4-30 y llevar a cabo estudios de carga. El cual fue configurado en la opción 3Ø WYB, el cual aplica para medir tres fases y el neutro. La frecuencia fue definida con 60 Hz.

Equipo Fluke @ Serie 430 II	Característica	Registro de datos: 0.5 min.	
		Resolución	Precisión
	Voltaje - Vrms	0.1 V	±0.5% de la tensión nominal
	Amperaje - Arms	0.0 A	±0.5%
	Hz ²	0.001 Hz	±0.01 Hz

Tabla 4.8 Características de Medidor Fluke 430 Serie.

La configuración realizada para adquirir los datos de potencia se muestran en la Fig. 4.16. La conexión fue realizada en el tablero posterior de la máquina CNC, que es donde se encuentra el interruptor principal, en este punto fueron colocadas las pinzas de cocodrilo y sonda de corriente de CA 6.000 A flexible. Se seleccionó una frecuencia de registro de 0.5 segundos, con el fin de identificar la potencia y energía consumida con el movimiento de los ejes. Además el rango utilizado fue de 60 Hertz. Se realizó un registro individual para cada operación de maquinado, con el fin de no obtener datos erróneos. Una vez registrada la lectura, los datos se descargaron en una PC. Debido a la cantidad de datos obtenidos, se tomó el promedio de potencia activa, la cual corresponde al consumo real de los elementos en uso. El análisis se realizó utilizando el software Power_Log, mediante el cual es posible analizar los datos en forma de armónica, e identificar el comportamiento (arranques, picos, movimientos en vacío, remoción de material). Esta configuración y método de toma de datos se mantuvo constante en todos los experimentos del caso de estudio.

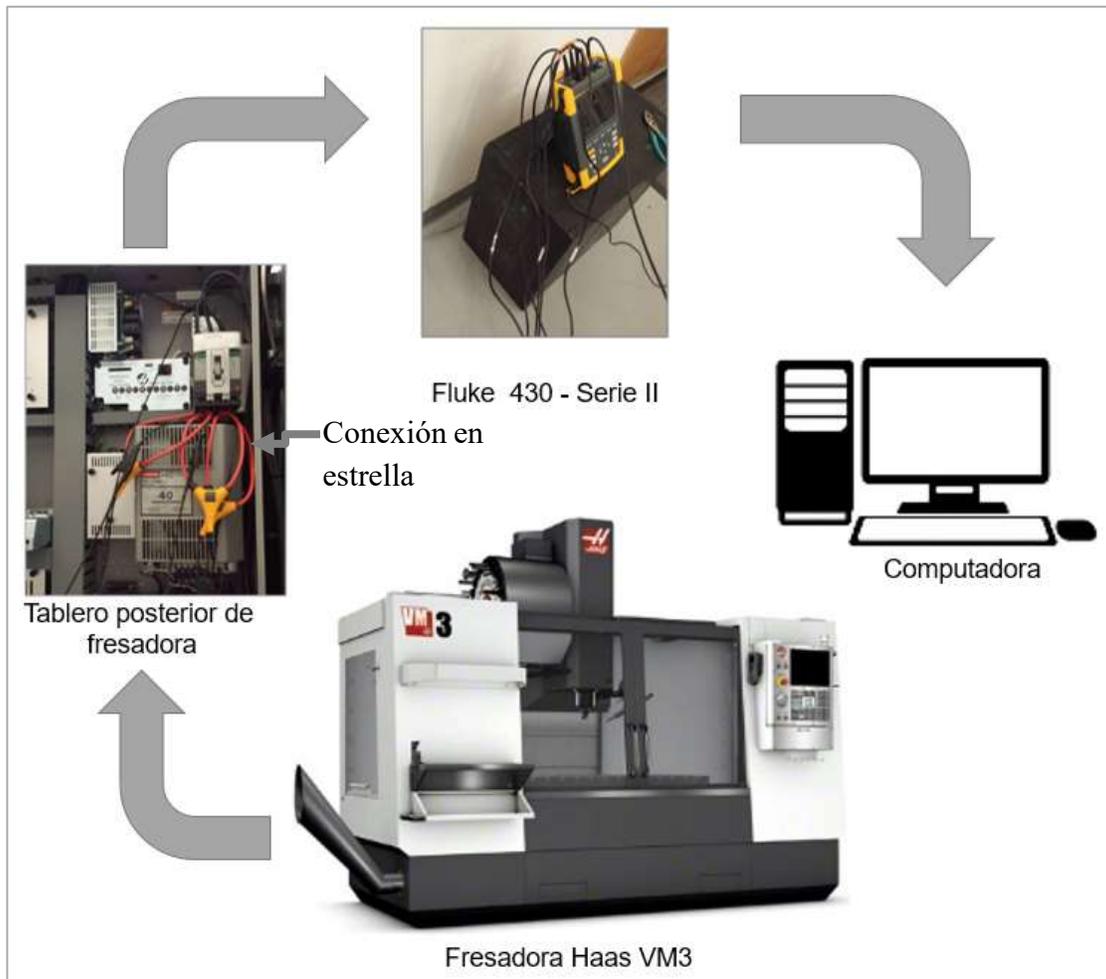


Fig. 4.16 Configuración de toma de datos de potencia y energía.

4.9 Características de instrumentos de medición

La máquina de medición por coordenadas CMM (Fig. 4.17)- Helmel fue utilizada para dimensionar los diámetros, profundidades y longitudes en la pieza de caso de estudio (Fig. 4.2), éste utiliza el software GEOMET Junior Plus 3D. Las especificaciones se muestran en la Tabla 4.9.



Fig. 4.17 CMM Helmel.

Características		S. Internacional	S. Ingles
Recorrido	X	300 mm	12"
Eje	Y	300 mm	12"
	Z	250 mm	10"
Resolución		0.5 μ m	0.000020"
Repetabilidad		-	0.00014"
Linear		0.00016" + 0.000005"/inch	
Volumétrica		0.00034"	0.00038"
Esfera de calibración		25.4 mm	1.0"
Sistema de prueba Renishaw		TP-ES - MH20i	
Palpador de medición – A-5000-3603		Diámetro 2 X 20 mm	
Especificaciones		100-240 VAC, 50-60Hz 10A	

Tabla 4.9 Características de máquina de medición por coordenadas Checkmaster - HELMEL.

El equipo portátil para medir el acabado superficial es un Surftest SJ-210 Serie 178 (Fig. 4.18). Este equipo cuenta con características para calibración automática, con pantalla de visualización de curvas y armónicas de comportamiento de la superficie, las características del equipo se muestran en la Tabla 4.10.

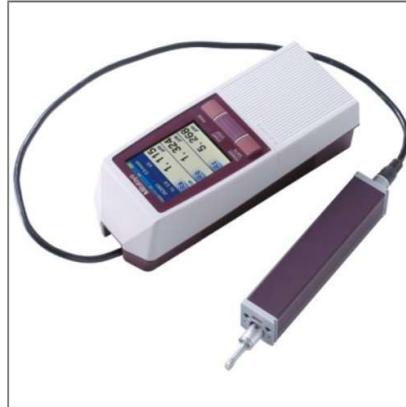


Fig. 4.18 Rugosímetro Mitutoyo SurfTest SJ-210

Características		S. Internacional	S. Ingles
Recorrido	X	17 mm	12"
Eje	Z	14200 μm	10"
Radio de punta del estilite			5 μm
Fuerza de medición			4 mN
Resolución			360 μm / 0.02 μm
Dimensiones generales			52.1 X 65.8 X 160 mm

Tabla 4.10 Características de Rugosímetro Mitutoyo SurfTest SJ-210.

4.10 Software para generar el código NC de maquinado

El software utilizado es Mastercam X8, este es un programa de CAD/CAM, la versión 16. El software es útil en la elaboración de códigos NC, los cuales son trayectorias de recorrido de la herramienta de corte en función de la pieza para proceso de torneado y fresado. El software incluye novedades en trayectorias de recorrido de la herramienta como:

- I. Movimientos dinámicos: La trayectoria calcula el área a maquinar y también considera condiciones cambiantes en las diferentes etapas del mecanizado.
- II. Simulación de las trayectorias de alta velocidad en 2D; consiste en reducir la velocidad cuando la herramienta de corte entra en el material e incrementarla durante la remoción,
- III. Mostrar detalles de tiempo ciclo, movimientos rápidos y movimientos con corte.

El caso de estudio utilizó el fresado con trayectorias de recorrido dinámicas y configuraciones que reducen la fricción en el proceso de mecanizado. Los software comerciales de CAM se han comparado en relación al tiempo de simulación con el tiempo real experimental [55], estos han resultado ser un 95% certeros en el tiempo ciclo real.

5. RESULTADOS

Los experimentos especificados en la tabla 4.7 fueron realizados en las instalaciones de la empresa Sandvik Coromant (Productivity Center). En cada uno de los 27 experimentos se tomaron lecturas de potencia, energía, y características dimensionales y superficiales de la pieza de estudio. Los datos obtenidos de los instrumentos de medición se incluyen en esta sección.

La Fig. 5.1 muestra un esquema del tratamiento de los resultados obtenidos. La primera sección muestra datos de la evaluación de las trayectorias, la segunda sección muestra el modelado matemático, la tercera sección muestra resultados del diseño de experimentos DOE, la cuarta sección muestra resultados dimensionales de la pieza.

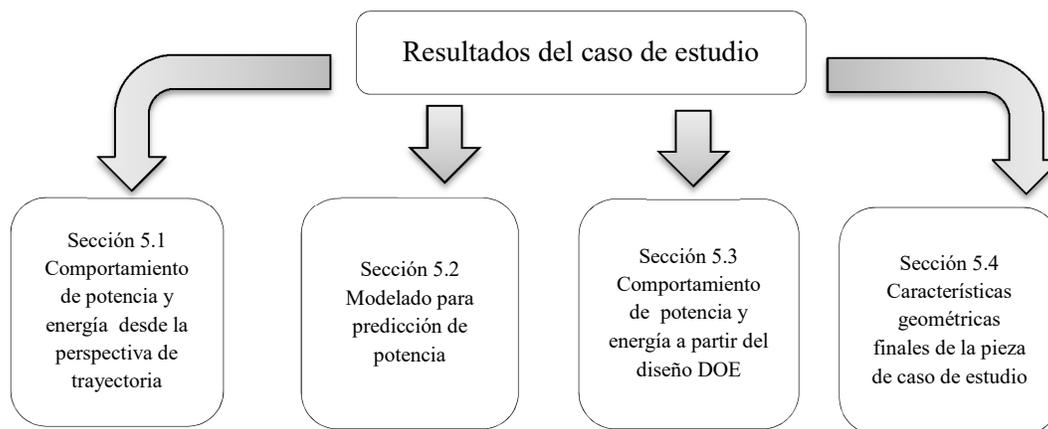


Fig. 5.1 Esquema de secuencia de resultados

5.1 Comportamiento de potencia y energía con relación a la trayectoria

Esta sección muestra resultados de evaluar las trayectorias en la operación de planeado, cajeado y barrenado. El conocer el comportamiento de potencia y energía a partir de la trayectoria sirve para seleccionar la trayectoria con bajo consumo de energía y utilizarla para desarrollar el modelo predictivo.

Operación de planeado:

La potencia que demanda la operación y el tiempo ciclo de maquinado, son referencias en el consumo de energía, sin embargo la selección de la trayectoria de recorrido de la herramienta determina las variables de salida.

La Fig. 5.2 muestra el promedio de realizar 9 experimentos en el tiempo ciclo de las tres trayectorias de recorrido: Zigzag, OneWay y Dynamic. Con la trayectoria Dynamic tuvo un promedio de 0.055 h, con una desviación estándar de 0.038, con la trayectoria OneWay el promedio fue de 0.042 h, con una desviación estándar de 1.28, mientras con Zigzag es de 0.059 h, con una desviación estándar de 1.43. Los datos fuentes se encuentran en el anexo D, datos de planeado. La trayectoria Dynamic resulto con el menor tiempo de ciclo registrado.

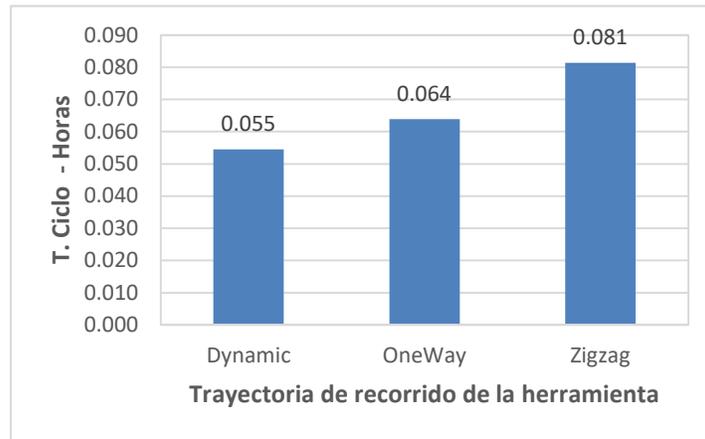


Fig. 5.2 Comparativo de tiempo ciclo en la operación de planeado.

Los datos mostrados la Fig. 5.3-a fueron analizados de manera similar a los datos de tiempo ciclo de la figura 5.2. Estos muestran la potencia demandada por cada trayectoria de recorrido: Zigzag, OneWay y Dynamic. La trayectoria con mayor potencia demanda es la de Dynamic con 1.334 kW, con una desviación estándar de 0.578, mientras la trayectoria Zigzag es la que demanda menor potencia con 1.269 kW, con una desviación estándar de 0.510. Por último la potencia con la trayectoria OneWay fue la que obtuvo un valor medio con respecto a las otras dos trayectorias, el valor es de 1.329 kW, con una desviación estándar de 0.531. Sin embargo, la Fig. 5.3 - b muestra que la trayectoria Dynamic es la que tiene el menor consumo de energía con 0.070 kWh, con una desviación de 1.54.

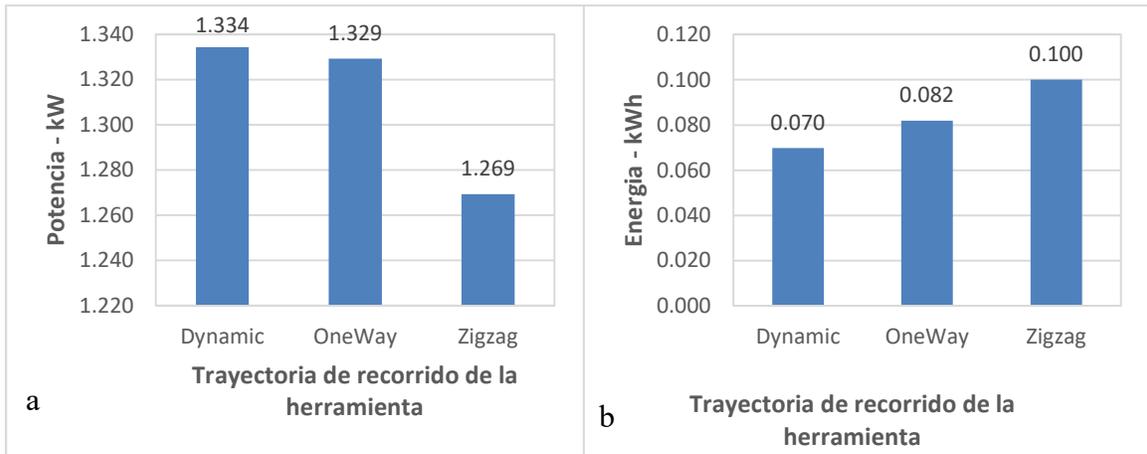


Fig. 5.3 a) Comparativo de potencia en la operación de planeado. b) Comparativo de energía en la operación de planeado.

Operación de cajeadado:

La Fig. 5.4 muestra el comportamiento en tiempo ciclo al utilizar la trayectoria de True Spiral y la de High Speed Dynamic. El grafico muestra que la trayectoria High Speed Dynamic tiene 0.028 h, con una desviación estándar de 0.0012. En comparación con True Spiral que tiene 0.097 de h, con una desviación estándar de 0.0010.

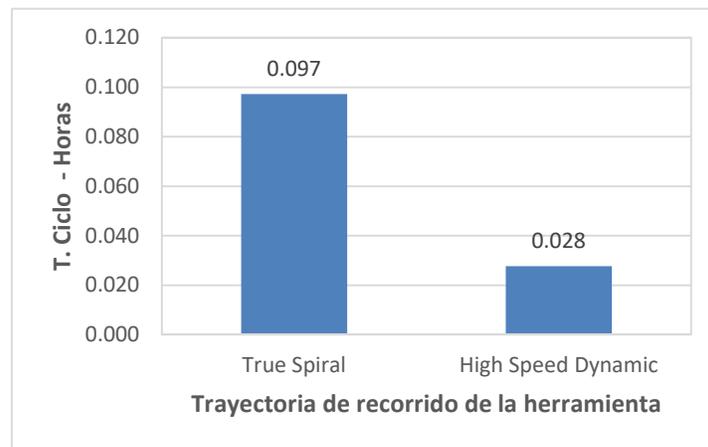


Fig. 5.4 Comparativo de tiempo ciclo en la operación de cajeadado.

La operación de cajeado registró 2.7 kW de potencia demanda con la trayectoria de High Speed Dynamic, con una desviación estándar de 0.05. Por lo que la operación de True Spiral tiene 2.1 kW, con una desviación estándar de 0.40. La Fig. 5.5-a muestra el comportamiento de la potencia para cada trayectoria. Considerando que la energía es el factor determinante, ya que relaciona la potencia por el tiempo ciclo. La Fig. 5.5-b muestra el comportamiento de la energía es menor con 0.076 kWh, con la trayectoria de High Speed Dynamic, esta tiene una desviación estándar de 0.013. Éste comportamiento se debe a que el tiempo empleado para realizar el maquinado con esta trayectoria es menor en comparación con True Spiral.

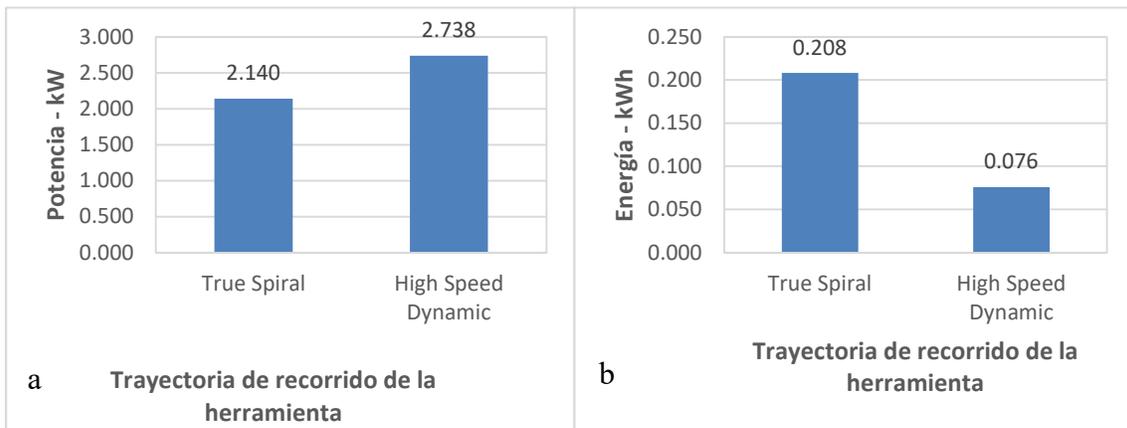


Fig. 5.5 a) Comparativo de potencia en la operación de cajeado. b) Comparativo de energía en la operación de cajeado.

Operación de barrenado:

El tiempo ciclo con la trayectoria chip break es de 0.002 h, con una desviación estándar 0.0002 y Counterbore es de 0.003 h, con una desviación estándar 0.0004. Los tiempos ciclos en ambas trayectorias son muy similares, mostrando diferencias de una milésima de segundo (Fig. 5.6-a).

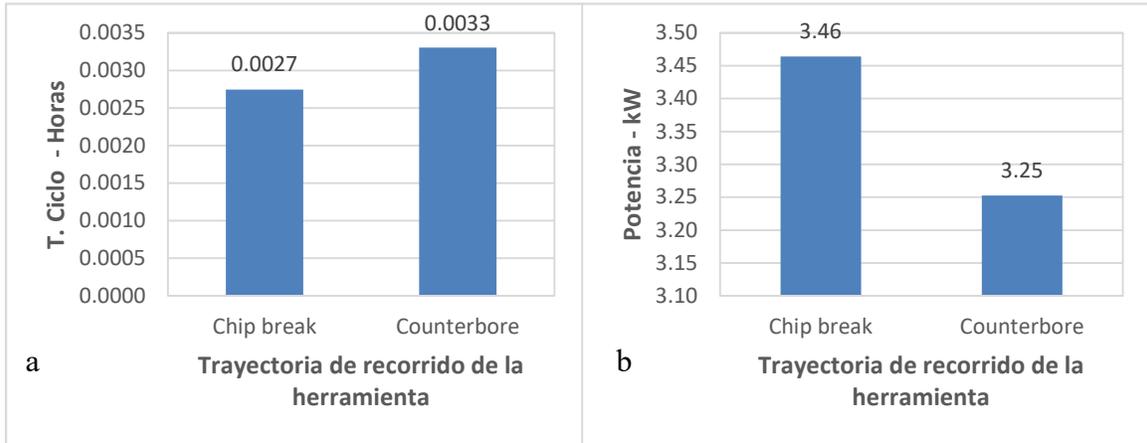


Fig. 5.6 a) Comparativo de tiempo ciclo en la operación de barrenado. b) Comparativo de potencia en la operación de barrenado.

La trayectoria chip break mostró 3.46 kW de potencia, con una desviación estándar de 0.44. Mientras la trayectoria Counterbore mostró 3.25 kW, con una desviación estándar 0.36 (Fig. 5.6-b). Sin embargo el comportamiento energético es menor con la trayectoria chip break con 0.0095 kWh, con una desviación estándar de 0.013 debido a que se registra el menor tiempo ciclo porque la herramienta no incluye movimientos de retract (Fig. 5.7).

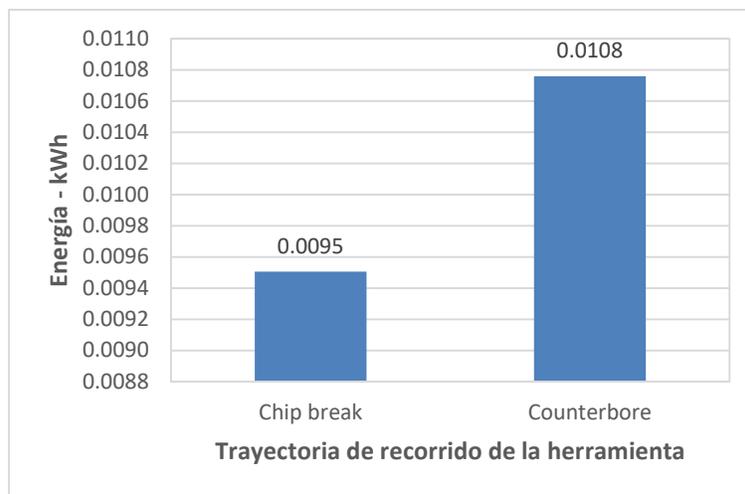


Fig. 5.7 Comparativo de energía en la operación de barrenado.

Los datos muestran la influencia en el consumo de energía al realizar el maquinado con diferentes trayectorias de recorrido de la herramienta.

5.2 Modelado predictivo de potencia

Esta sección muestra el modelado predictivo de la ecuación de planeado en vacío (Tara), planeado con corte y barrenado. Este fue realizado a partir de los datos recolectados de los diferentes experimentos realizados. Los datos del modelado matemático de las operaciones de contorno y superficie se encuentran en la sección 6.1 del capítulo de anexos.

Modelado de ecuación de vacío o tara:

La tabla 5.1 muestra el planteamiento de los 9 experimentos realizados, las combinaciones de cada experimento relacionan la (velocidad del husillo y avance de la mesa). La (Tabla 5.1) muestra los datos de potencia.

Núm.	$n(rpm)$	$f_z(mm)$	$W-kW$
1	2005	802	0.794
2	2005	2607	0.770
3	2005	4412	0.866
4	5777	802	0.930
5	5777	2607	1.041
6	5777	4412	1.266
7	9549	802	1.868
8	9549	2607	1.901
9	9549	4412	1.988

Tabla 5.1 Resultados de potencia de operaciones de maquinado en Vacío.

Para realizar el modelado se utilizó el software Minitab 17, éste software utiliza el algoritmo Gauss – Newton mostrado en la sección 3.7 para la solución de modelos no lineales, éste método analiza la convergencia de la suma de errores cuadrados (SSE). También se analizan las gráficas de probabilidad normal y error residual.

La Fig. 5.8-a muestra la gráfica de probabilidad normal, el eje de las abscisas muestra el residuo en un rango de -0.50 a 0.50. Es posible notar que las anomalías ajustadas a la línea no son amplias, por lo que se considera que se distribuye normalmente.

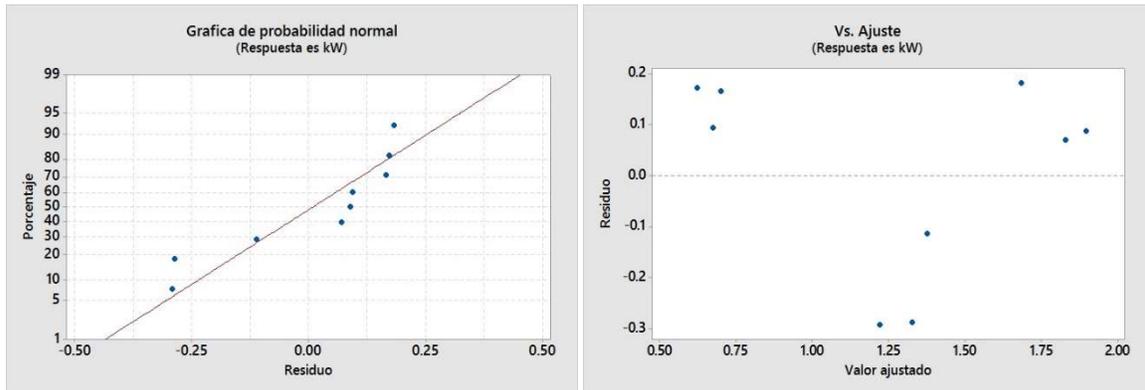


Fig. 5.8 Planeado vacío a) Comportamiento de vacío de probabilidad normal. b) Comportamiento de vacío – Ajuste.

La varianza no constante se muestra en la Fig. 5.8-b con rangos de 0.5 a 2.0 en el eje de las abscisas, el valor ajustado. Es posible observar que la relación de residuo se dispersa aleatoriamente en torno al cero. Adicionalmente se muestra la ecuación 5.1, de predicción de potencia:

$$kW = 0.00301386 * n^{0.63911} * f_z^{0.0702071} \quad \text{Ecuación 5.1}$$

La razón por la que el predictivo es menor, es por qué obedece a un sistema físico. El método de solución Iterativo mostró haber realizado 55 iteraciones y la sumatoria de errores quedó en 0.292096 (Tabla 5.2). Ver tabla 7.1 de parámetros estimados.

Iteraciones (Iteraciones)	55
Error de suma de cuadrados (Final SSE)	0.292096
Grados de libertad (Degrees of freedom DFE)	6
Media de suma de cuadrados (Mean of sum of squares SE)	0.0486827
Error estimado (S)	0.220641

Tabla 5.2 Resumen de modelado no lineal - Vacío

La Tabla 5.3 muestra el modelado de regresión lineal, el error estimado (S) es de 0.163098, mientras que R-Squared es de 90.92%. Adicionalmente, el R-Squared ajustado es 90.16%. Por último el valor de R-Squared predictivo es de 88.89%.

S	R-Cuadrada	R-Cuadrada (ajustada)	R-Cuadrada(predictiva)
0.1630	90.92%	90.16%	88.89%

Tabla 5.3 Resumen de modelado lineal – Vacío.

Modelado de ecuación de planeado:

Los resultados de las pruebas realizadas con el diseño de experimentos planteado en la Tabla 4.7 se reportan en la tabla 5.4, la tabla muestra las 27 combinaciones entre profundidad de corte, velocidad de corte y avance. Como variable dependiente la potencia (Tabla 5.4), la cual fue medida con el analizador de redes presentada en la tabla 4.8.

Núm.	a_p (mm)	v_c (m/min)	f_z (mm)	W kW	Núm.	a_p (mm)	v_c (m/min)	f_z (mm)	kW
1	1.0	315	0.150	1.981	14	1.5	350	0.175	2.983
2	1.0	315	0.175	2.249	15	1.5	350	0.200	3.213
3	1.0	315	0.200	2.394	16	1.5	385	0.150	3.023
4	1.0	350	0.150	2.255	17	1.5	385	0.175	3.099
5	1.0	350	0.175	2.437	18	1.5	385	0.200	3.310
6	1.0	350	0.200	2.591	19	2.0	315	0.150	3.022
7	1.0	385	0.150	2.373	20	2.0	315	0.175	3.355
8	1.0	385	0.175	2.542	21	2.0	315	0.200	3.603
9	1.0	385	0.200	2.699	22	2.0	350	0.150	3.310
10	1.5	315	0.150	2.556	23	2.0	350	0.175	3.569
11	1.5	315	0.175	2.784	24	2.0	350	0.200	3.873
12	1.5	315	0.200	3.006	25	2.0	385	0.150	3.562
13	1.5	350	0.150	2.825	26	2.0	385	0.175	3.822
					27	2.0	385	0.200	4.098

Tabla 5.4 Resultados de potencia de operaciones de maquinado - Planeado.

La Fig. 5.9-a muestra la gráfica de probabilidad normal, en el eje de las abscisas se muestra el residuo en un intervalo de -0.15 y 0.10. Es posible observar que los puntos o no normalidades se ajustan a la recta. Por lo tanto, la desviación es aceptable y se observa que se distribuye normalmente. La varianza se muestra en la Fig. 5.9-b, en el eje de las abscisas

se muestra un rango de 2 a 4 el valor ajustado y en el eje de las ordenadas muestra la relación del residuo en relación al cero, con rangos de -0.15 y 0.5.

Adicionalmente se muestra el modelo de ecuación de predicción de potencia para la operación de planeado (ecuación 5.2). Este relaciona la a_p profundidad de corte, v_c velocidad de corte y f_z avance de la mesa.

$$kW = 0.119379 * a_p^{0.586379} * v_c^{0.660086} * f_z^{0.501722} \quad \text{Ecuación 5.2}$$

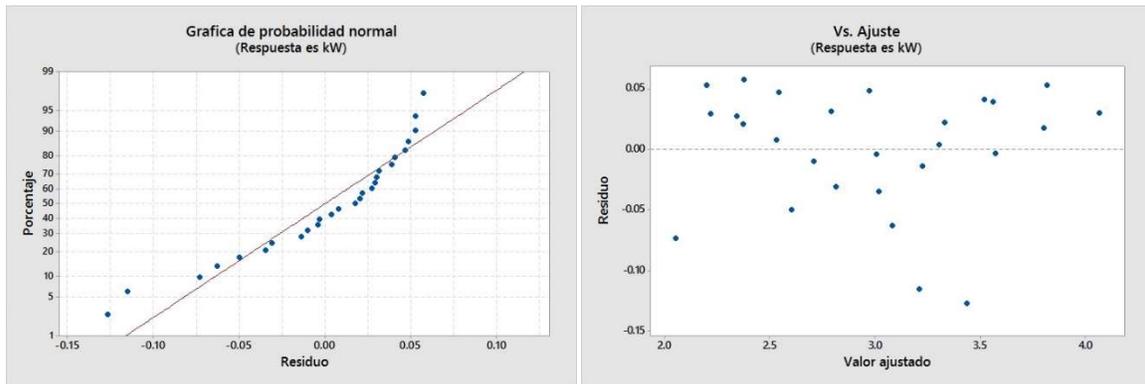


Fig. 5.9 Planeado a) Comportamiento de planeado de probabilidad normal. b) Comportamiento de planeado – Ajuste.

El método de solución por el método iterativo (Tabla 5.5) mostró haber realizado 29 iteraciones y la sumatoria de errores quedo en 0.0649877, mientras los grados de libertad son 23.

Iteraciones	29
Final SSE (Error de suma de cuadrados)	0.0649877
DFE (Grados de libertad)	23
MSE (Media de suma de cuadrados)	0.0028256
S (Error estimado)	0.0531559

Tabla 5.5 Resumen de modelado no lineal – Planeado.

La Tabla 5.6, muestra resultados del modelado de regresión lineal, muestra el error estimado (S) es de 0.0626935, mientras que R- Squared es de 98.87%, adicionalmente el R- Squared ajustado es 98.72%. Y por último el valor de R-Squared predictivo es de 98.36%.

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0626935	98.87%	98.72%	98.36%

Tabla 5.6 Resumen de modelado lineal – Planeado.

Modelado de ecuación de barrenado:

La Tabla 5.7 muestra datos de la configuración de velocidad de corte y avance por diente y como variable de salida la demanda de potencia, como se puede observar fueron 9 los experimentos realizados. La demanda de potencia se encuentra en un intervalo de 2.96 hasta 3.93 kW.

Núm.	v_c	f_n	kW
1	140	0.21	2.96091
2	140	0.30	2.94100
3	140	0.45	3.23444
4	180	0.21	3.33300
5	180	0.30	3.22100
6	180	0.45	3.45333
7	250	0.21	4.11500
8	250	0.30	3.98700
9	250	0.45	3.93000

Tabla 5.7 Resultados de potencia de operaciones de barrenado.

La Fig. 5.10-a muestra la gráfica de probabilidad normal, en el eje de las abscisas se muestra el residuo en un rango de -0.15 y 0.20. Es posible observar que los puntos o no normalidades se ajustan a la recta. Por lo tanto la desviación es aceptable y se observa que se distribuye normalmente.

La varianza se muestra en la Fig. 5.10-b, en el eje de las abscisas se muestra un rango de 3 a 4 el valor ajustado y en el eje de las ordenadas muestra la relación del residuo en relación al cero, con rangos de -0.15 y 0.2. Adicionalmente se muestra el modelo de ecuación de

predicción de potencia para la operación de planeado (ecuación 5.3). Este relaciona la a_p profundidad de corte, v_c velocidad de corte y f_z avance de la mesa.

$$kW = 0.27747 * v_c^{0.486936} * f_n^{0.0197716} \quad \text{Ecuación 5.3}$$

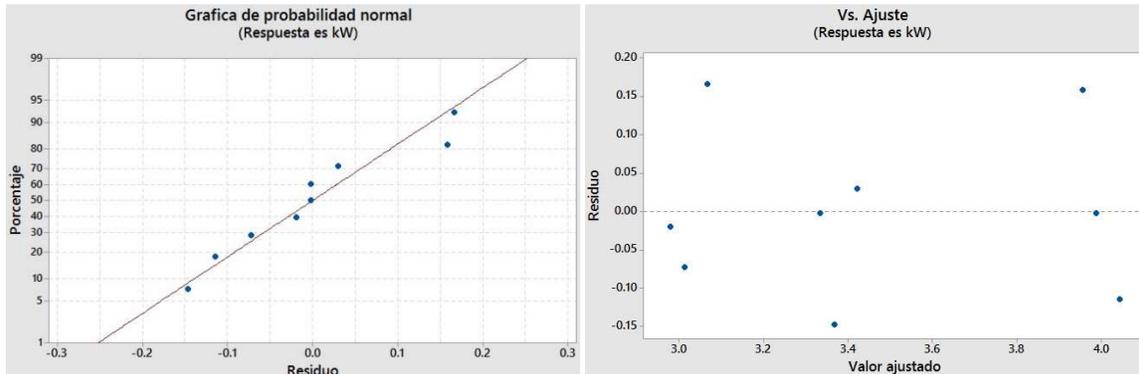


Fig. 5.10 Barrenado a) Comportamiento de planeado de probabilidad normal. b) Comportamiento de planeado – Ajuste.

5.3 Comportamiento de potencia y energía a partir del diseño DOE

Esta sección muestra el comportamiento de potencia y energía de la operación de planeado en vacío (Tara) y planeado con corte. Los datos de experimentos realizados para el modelado matemático de las operaciones de barrenado, contorno y superficie se encuentran en la tabla 4.7. Además se muestran datos comparativos de potencia: resultados experimentales, modelo no lineal y lineal.

Resultados de operación de planeado en vacío (Tara):

Los datos de potencia planteados en la sección 4 (Tabla 4.7), se muestran en la Fig. 5.11 El eje de las abscisas muestra la velocidad del husillo (2005, 5777 Y 9549), cada velocidad del husillo fue configurada con tres avances (802, 2647 y 4412). El eje de las ordenadas muestra el comportamiento de la potencia demandada para cada configuración y trayectoria. La potencia incrementa en relación a la velocidad del husillo y avance. Aunque la trayectoria que ha mostrado la menor potencia es la Dynamic. Los datos de potencia inician en 0.79 kW, hasta alcanzar 1.99 kW. Adicionalmente se muestra una curva de tendencia (dynamic teorica), la cual corresponde a los datos obtenidos con la ecuación 5.1.

Adicionalmente la Fig. 5.12 muestra el comportamiento de la energía con las tres trayectorias (Dynamic, One Way y Zigzag). También muestra que al incrementar el avance y la velocidad del husillo el consumo de energía se reduce.

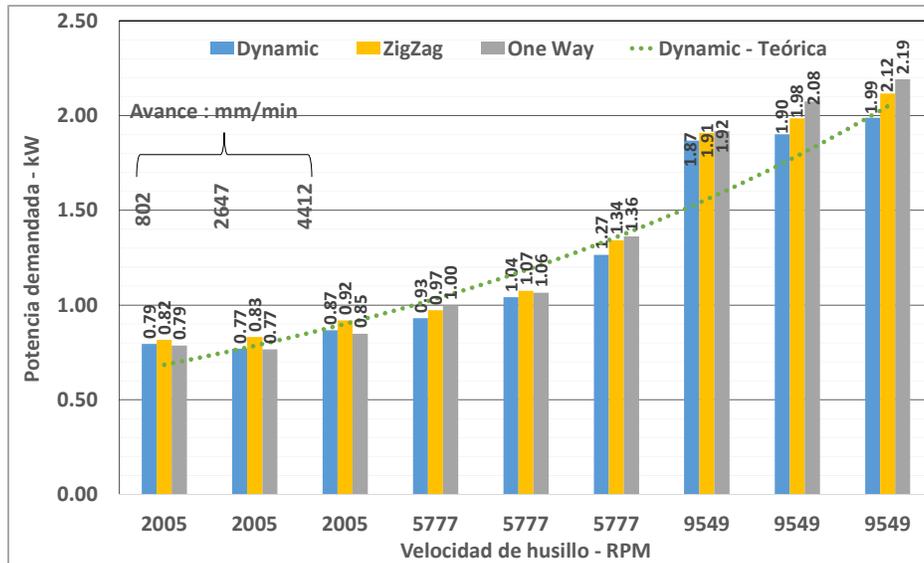


Fig. 5.11 Comportamiento de potencia considerando tres trayectorias en operación de planeado en vacío.

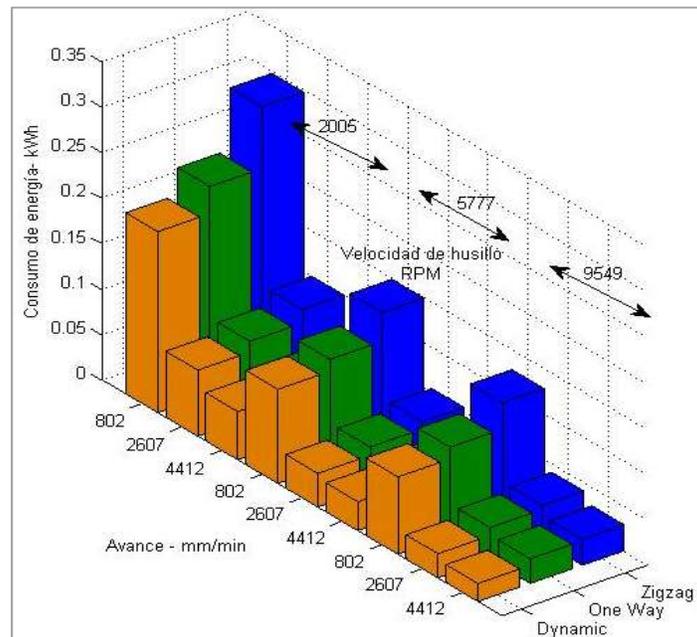


Fig. 5.12 Comportamiento de energía considerando tres trayectorias en operación de planeado en vacío.

Resultado de la potencia total en operación de planeado:

Esta sección muestra los resultados de los experimentos planteados en la Tabla 4.7 para la operación de planeado. La Fig. 5.13 muestra el comportamiento de consumo de energía en relación a la velocidad de corte. La tendencia muestra que al incrementar el avance por diente, el consumo de energía se reduce. Sin embargo el incremento del consumo de energía también está relacionado con la profundidad de corte.

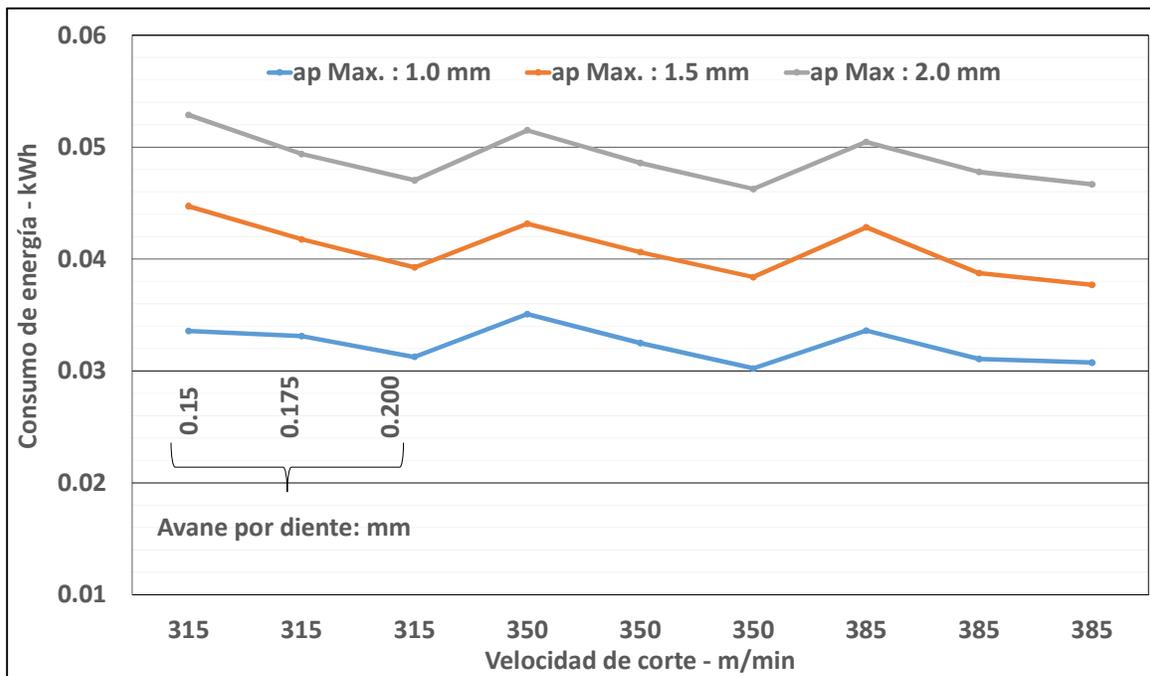


Fig. 5.13 Comportamiento de energía total con trayectoria Dynamic en operación de planeado.

La Fig. 5.14 muestra un comparativo de la potencia con la trayectoria Dynamic y la trayectoria con la ecuación 5.2. Los 27 experimentos realizados mostraron datos de potencia, estos fueron comparados con la ecuación 5.2.

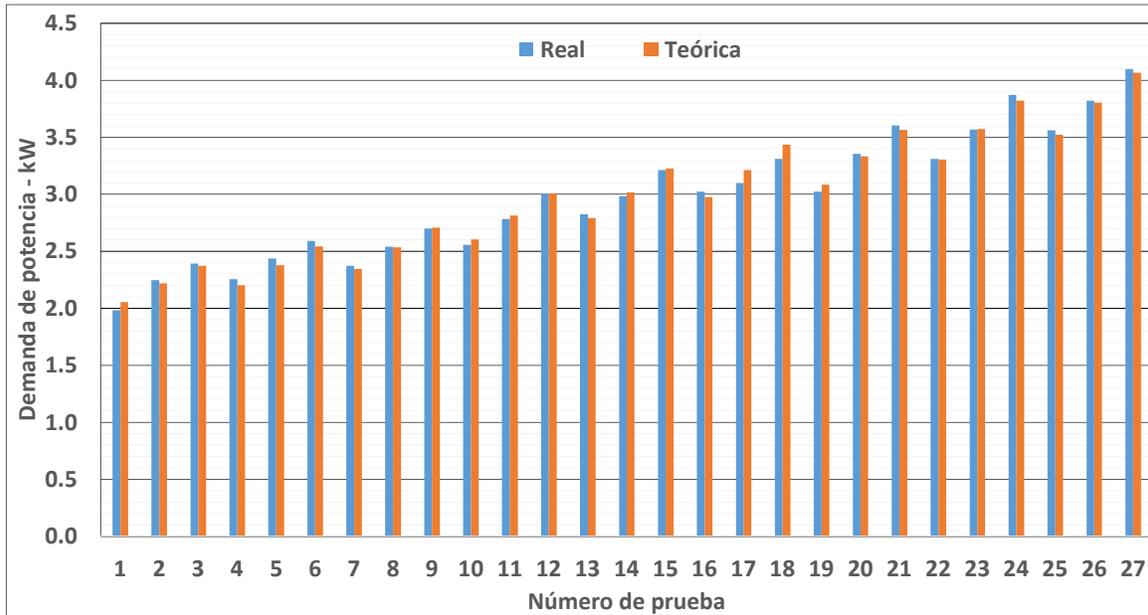


Fig. 5.14 Comportamiento de potencia con trayectoria Dynamic.

Comparativo de modelo predictivo lineal y no lineal de la operación de superficie acabado:

La figura 5.15 muestra los datos de potencia demandada experimentalmente, del modelo predictivo lineal y modelo predictivo no lineal. Con el modelo no lineal el porcentaje de error es de 0.0003342 %, mientras que con el modelo lineal es de 0.00043%. La diferencia porcentual de una alternativa y otro es de 0.0000958%.

En la figura se observan los colores de la tendencia del modelo predictivo lineal con color verde, no lineal con color azul, estos colores mencionados son los más visibles, debido a que el comportamiento con el modelo predictivo no lineal y el obtenido experimentalmente se encuentra sobrepuesto uno encima de otro. Debido a la cercanía de ellos, (Los detalles de datos para generación de Fig.5.15 se muestran en la tabla 5.8).

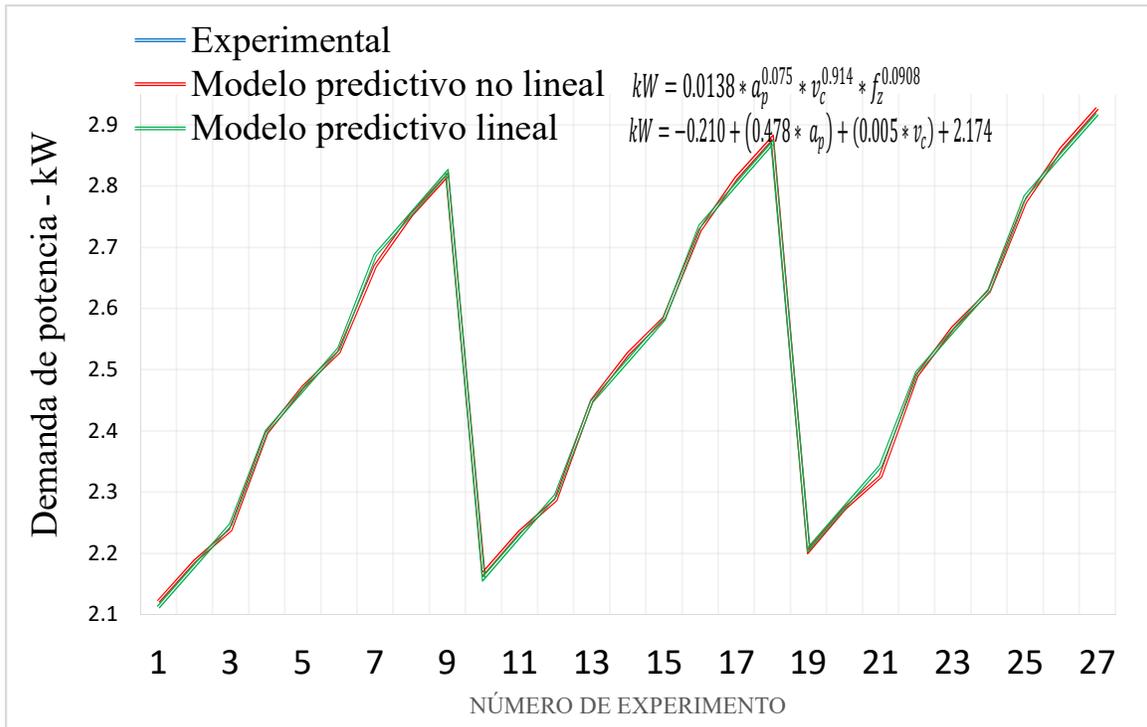


Fig. 5.15 Comparativo de demanda de potencia experimental, modelo predictivo lineal y no lineal.

Número de experimento	a_p -mm	V_c - m/sec ²	f_z - mm	Experimental - kW	Modelo predictivo no lineal - kW	Modelo predictivo lineal - kW
1	0.3	350	0.077	2.121	2.121	2.112
2	0.3	350	0.108	2.188	2.188	2.180
3	0.3	350	0.139	2.238	2.238	2.247
4	0.3	400	0.077	2.397	2.397	2.400
5	0.3	400	0.108	2.472	2.472	2.467
6	0.3	400	0.139	2.529	2.529	2.535
7	0.3	450	0.077	2.669	2.669	2.687
8	0.3	450	0.108	2.753	2.753	2.755
9	0.3	450	0.139	2.817	2.817	2.822
10	0.4	350	0.077	2.168	2.168	2.160
11	0.4	350	0.108	2.235	2.235	2.228
12	0.4	350	0.139	2.287	2.287	2.295
13	0.4	400	0.077	2.449	2.449	2.448
14	0.4	400	0.108	2.526	2.526	2.515
15	0.4	400	0.139	2.584	2.584	2.582
16	0.4	450	0.077	2.728	2.728	2.735
17	0.4	450	0.108	2.813	2.813	2.802
18	0.4	450	0.139	2.878	2.878	2.870
19	0.5	350	0.077	2.204	2.204	2.208
20	0.5	350	0.108	2.273	2.273	2.275
21	0.5	350	0.139	2.326	2.326	2.343
22	0.5	400	0.077	2.491	2.491	2.495
23	0.5	400	0.108	2.568	2.568	2.563
24	0.5	400	0.139	2.628	2.628	2.630
25	0.5	450	0.077	2.774	2.774	2.783
26	0.5	450	0.108	2.860	2.860	2.850
27	0.5	450	0.139	2.927	2.927	2.918

Tabla 5.8 Datos de la operación de superficie.

5.4 Características geométricas finales de la pieza de caso de estudio

La Fig. 7.7 muestra los detalles dimensionales de la pieza de estudio. Las mediciones se realizaron en el laboratorio de metrología del Instituto Tecnológico de Puebla en la máquina de medición de coordenadas mencionada en Fig. 4.17. La Fig. 5.9 muestra los resultados de medir 8 piezas con dimensiones finales, en referencia a: profundidades, largo y ancho. Los datos son mostrados en una precisión de decimas de milímetros. La característica D se refiere a la característica de cajeadado cuadrado mayor, esta tiene tres características principalmente largo, ancho y profundidad. Además la tabla muestra detalles de las diversas profundidades que incluye la pieza de caso de estudio.

Pieza	Característica - mm											
	B	C	D			E			F	G	H	I
	Profundidad	Profundidad	Largo	Ancho	Profundidad	Largo	Ancho	Profundidad	Profundidad	Profundidad	Profundidad	Profundidad
1	30.0	5.01	80.1	50	15.3	59.5	29.2	9.71	19.98	14.71	9.91	19.9
2	29.9	5.08	79.9	49.6	15.1	59.9	29.8	9.95	19.90	15.04	10.01	19.9
3	29.9	5.03	79.8	49.8	14.8	60.0	29.9	10.02	20.10	14.90	10.30	19.8
4	30.1	5.04	79.9	49.9	15.2	59.9	30.0	9.93	19.88	15.15	10.2	19.6
5	29.9	5.04	79.9	49.9	15.0	59.9	29.9	10.03	19.36	15.33	10.10	19.8
6	29.9	5.23	79.9	49.9	14.9	59.9	29.9	9.99	20.10	14.82	9.94	20.0
7	30.0	4.89	79.8	50.0	15.0	60.0	29.9	9.97	20.20	14.93	10.02	20.2
8	30.1	5.19	79.9	49.9	15.1	59.9	29.9	10.06	19.93	15.04	9.88	20.1

Tabla 5.9 Detalles dimensionales de 8 piezas maquinadas.

La tabla 5.10 muestra los diámetros que incluye la pieza de caso de estudio, la característica F fue dividida en tres secciones debido a que tiene un ángulo con tres secciones de radios debido a que es un cajeadado con ángulo. Las otras características que se muestran en la Tabla 5.10 son de los diámetros que incluye la pieza. Al igual que la tabla 5.9, la Tabla 5.10 se debe referenciar con la característica de la letra en la ° (O). Fig. 4.2.

Pieza	Diámetro - mm										
	G	H	I	J	K	L	M	N	F		
									Sección 1	Sección 2	Sección 3
1	39.9	24.3	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0	19.9	19.8	19.8
2	39.9	24.5	14.0	14.0	14.0	14.0	14.3	14.0	20.0	20.0	24.5
3	39.9	24.8	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0	20.1	20.0	20.1
4	39.9	24.9	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0	20.1	20.6	20.1
5	39.9	24.5	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0	20.0	20.1	20.0
6	39.9	24.8	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0	19.3	19.6	19.5
7	39.5	24.4	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0	19.4	19.2	20.5
8	39.9	24.9	14.0	14.0	14.0	14.1	14.0	14.0	19.3	19.5	19.7

Tabla 5.10 Diámetro de las diferentes características de la pieza de caso de estudio.

Pieza	Acabado Superficial-Ra- μm					
	A	B	C	D	E	O
1	0.84	1.09	1.12	0.70	0.52	0.36
2	1.14	1.05	1.14	0.49	0.21	0.34
3	1.08	1.22	0.89	0.30	0.18	0.48
4	1.27	1.29	1.31	0.37	0.26	0.33
5	1.15	0.90	0.84	0.18	0.20	0.39
6	1.06	0.73	1.14	0.65	0.24	0.39
7	1.12	1.03	0.69	0.69	0.23	0.33
8	0.76	1.47	1.27	0.41	0.21	0.34

Tabla 5.11 Acabado superficial de la pieza de caso de estudio

La tabla 5.11 muestra detalles de acabado superficial de las diferentes secciones de la pieza de caso de estudio.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Esta sección muestra un análisis de los resultados y a partir de ellos se planteó una lista de conclusiones. De acuerdo a los objetivos de esta tesis se desglosan los resultados en tres secciones: Trayectorias de recorrido de las herramientas, modelado matemático de la potencia y parámetros de corte óptimos para el caso de estudio.

I. Trayectorias de recorrido de la herramienta:

Los datos de la figura 5.3-a muestra que la operación con menor demanda de potencia fue la de Zigzag, ya que la trayectoria OneWay es 4.7% mayor, sin embargo la trayectoria Dynamic es mayor con 5.12%. Por otro lado el consumo de energía mostró comportamientos diferentes, esto debido a los tiempos ciclos. El menor consumo de energía lo registró la operación Dynamic con 0.070, y la operación con mayor consumo de energía fue la Zigzag con 0.1 kWh.

Conclusión 1: La trayectoria Dynamic que tiene entradas y salidas radiales con un compromiso de la herramienta constante (a_e) durante el corte, tiene un menor tiempo de recorrido y es un factor que influye en la baja demanda potencia y consumo de energía.

La fig. 5.5 muestra los datos de potencias de la operación de cajeadado, la trayectoria High Speed Dynamic, ésta trayectoria es la que demanda más potencia en un 27% más con respecto a la trayectoria True Spiral. No obstante, la estrategia High Speed Dynamic que combina dos trayectorias de recorrido entrada en hélice y movimientos dinámicos de alta velocidad, en consecuencia es mayor la tasa de remoción de material, y con el consumo de energía más bajo con un 100% menor, con respecto a la trayectoria True Spiral.

Para la operación de contorno y contorno escalón realiza el mismo recorrido Dynamic, por lo que se considera como método de remoción más viable en estas operaciones de maquinado.

Conclusión 2: La combinación de poco diámetro de corte efectivo ($8\% \leq a_e \leq 11\%$) con alta profundidad de corte ($a_p \geq 50\%$ de longitud de corte efectiva de la fresa de corte) y alta velocidad de corte, permiten. Propicia el menor consumo de energía en la trayectoria de High Speed Dynamic, en comparación con True Spiral.

En la operación de barrenado la trayectoria Chip break obtuvo una menor demanda de potencia en un 6% con respecto a la trayectoria Counterbore. Sin embargo, el consumo de energía fue diferente, la trayectoria Chip Break fue más bajo con respecto a la trayectoria Counterbore.

Conclusión 3: Debido a que la operación de barrenado es más rápida en comparación con las operaciones de fresado, se realizó el análisis de la demanda de potencia en las entradas que es cuando se registró el pico de potencia. Sin embargo con la trayectoria Chip break la potencia es mayor en comparación con Counterbore. Pero considerando la relación de tiempo ciclo, la trayectoria que propicia el bajo consumo de energía es Chip Break hasta con un 13% menos en comparación con Counterbore.

Conclusión 4: La trayectoria de recorrido de la herramienta de corte en una operación de maquinado se puede maximizar desde 0.009 kWh hasta 0.282 kWh al maquinar en un acero AISI 1045. Debido al porcentaje de carbono que tienen los aceros, el cual es un factor en las propiedades de dureza [9], es posible mencionar que en aceros al carbono se puede maximizar el consumo de energía a través de selección de parámetros de corte y trayectorias.

Nota: La hipótesis 1, respecto al comportamiento de la fuerza, misma que está relacionada con la trayectoria de recorrida, se acepta. Mas a un se obtuvieron datos de potencia para cada trayectoria.

II. Modelado predictivo:

El modelo de predicción o modelados a partir de datos experimentales de potencia y energía con el método de solución de mínimos cuadrados no lineales “Levenberg Marquardt y Regresión lineal a partir de diseño DOE” mostraron valores predictores con datos de R- Square de 88% hasta un 99%. En las diferentes operaciones de maquinado como: Planeado, contorno, barrenado y superficie.

Por lo tanto la hipótesis 2, planteada en la sección 3.3, en donde se menciona la factibilidad de determinar los valores de X_1 , X_2 y X_3 a partir de datos experimentales, para determinar la potencia. Permite aceptar la hipótesis 2 de la factibilidad de obtenerlos experimentalmente a través del diseño DOE.

Conclusión 5: El modelo de predicción a partir de los parámetros de corte (a_p , V_c , f_z) es una alternativa para conocer el comportamiento de la potencia de manera teórica y maximizar un proceso de maquinado.

Ejemplo:

$$kW_{Superficie} = 0.0719115 * a_p^{0.277254} * v_c^{0.528011} * f_z^{0.190756}$$

Nota: En el diseño DOE 3³, Las réplicas son útiles para reducir el error en la suma de cuadrados [25].

Conclusión 6: En el modelado de potencia a partir de un arreglo de diseño DOE 3³ en donde los factores son profundidad, avance por diente y velocidad de corte. El valor de error es más bajo al utilizar un modelo predictivo no lineal, con respecto a uno lineal.

Parámetros de cortes:

De acuerdo a la Fig. 4.2, pieza de caso de estudio que incluye las operaciones de planeado, cajeado, contorno, barrenado y superficie. De los experimentos y los modelos determinados se analizaron los datos que mejor convergen en potencia, menor consumo de energía y acabado superficial óptimo se muestran en la Tabla 6.1 5.11. Ahí se muestra el resumen de los datos seleccionados.

Operación	Parámetros de corte			Valores de salida			
	a_p - mm	V_f - m/min	F_z mm por diente	f_n mm/r	Potencia - kW	Energía - kWh	R_a - μ m
Planeado	2	350	0.2	NA	3.87	0.046	0.66
Contorno	20	205	0.07	NA	2.8	0.028	NA
Barrenado	20	140	NA	0.045	2.9	0.009	NA
Cavidad	15	300	0.133	NA	2.83	0.08	NA
Superficie	0.4	400	0.139	NA	2.6	0.082	0.39

Tabla 6.1 Parámetros que mejor convergen en kW, kWh y Ra.

La tabla muestra los parámetros que mejor convergen para la pieza de estudio, el acabado superficial fue medido solo para las operaciones de planeado y superficie, debido a que muestran la vista superficial de la pieza. También es posible observar la variación de

demanda de potencia entre operaciones, es el caso que existe variación de hasta 1.1 kW o en el caso del consumo de energía de hasta 0.073 kWh.

Conclusión 7: Al fabricar una pieza con diversas operaciones de maquinado, los consumos de energía presentan variación en la potencia demandada y consumo de energía. Éste comportamiento está relacionado a la trayectoria de recorrido de la herramienta. Por lo consiguiente en una pieza con operaciones diversas será importante identificar la operación de mayor consumo de energía, a fin de maximizar el proceso a través de los parámetros de corte.

Conclusión 8: Se identificaron los acabados superficiales de las operaciones de planeado y superficie dentro de los valores $0.39 \mu\text{m}$ a $0.66 \mu\text{m}$.

El empane de a_e de área de maquinado es determinante en el acabado superficial, ya que es la huella que deja al maquinar [17].

Los productos y colaboraciones obtenidas se mencionan en el anexo F.

REFERENCIAS

- [1] G. Dutrénit, Política de Innovación Para Fortalecer las Capacidades en Manufactura Avanzada en México, Santiago - Chile: CIEPLAN, 2015.
- [2] J. Marroquín Arreola, O. Neme Castillo y A. L. Valderrama Santibáñez, «Producción Manufacturera, Consumo de Energía y Empleo en México: Un Análisis Por Clases Manufactureras,» *Cuadernos de Economía*, vol. 65, n° 34, pp. 377-400, 2014.
- [3] J. R. Duflou, J. W. Sutherland, D. Dornfeld, C. Herrmann, J. Jeswiet, S. Kara, M. Hauschild y K. Kellens, «Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach,» *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 61, pp. 587-609, 2012.
- [4] V. A. Balogun y P. T. Mativenga, «Modelling of direct energy requirements in mechanical machining processes,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 41, pp. 179-186, 2012.
- [5] S. S. Pavanaskar, Improving Energy Efficiency in CNC Machining, Berkeley, California, 2015.
- [6] D. N. Kordonowy, A power assessment of machining tools, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2002.
- [7] N. Diaz, S. Choi, M. Helu, Y. Chen, S. Jayanathan, Y. Yasui, D. Kong, S. Pavanaskar y D. Dornfeld , «Machine Tool Design and Operation Strategies for Green Manufacturing,» *Green Manufacturing and Sustainable Manufacturing Partnership*, p. 7, 2010.
- [8] N. Diaz, M. Helu y D. Dornfeld, «Design and Operation Strategies for Green Machine Tool Development,» *Green Manufacturing and Sustainable Manufacturing Partnership*, 2010.
- [9] S. Kalpakjian y S. R. Schmid, Manufactura, Ingeniería y Tecnología, New Jersey: Pearson Education, 2002.
- [10] E. Oberg, F. D. Jones, H. L. Horton y H. H. Ryffel, Machinery's Handbook, New York: Industrial Press Inc, 2000.
- [11] M. P. Groover, Fundamentos de Manufactura Moderna, McGrawHill, 2007.
- [12] M. Moro Vallina, Tecnología industrial I, Paraninfo, 2013.
- [13] D. A. Dornfeld, The Path of Precision, Japan: Mori Seiki Co., Ltd., 2008.

- [14] G. Mikell P., Fundamentos de Manufactura Moderna - Materiales, proceso y sistemas, McGraw Hill, 1997.
- [15] Sandvik, «Materiales,» *Sandvik*, pp. H1-H41, 2015.
- [16] E. Ersvik y R. Khalid, Milling in hardened steel - a study of tool wear in conventional and dynamic milling, Upsala, Suecia: Uppsala University, 2015.
- [17] Sandvik Coromant, «Aplicaciones de Fresado - D,» pp. 2-221.
- [18] A. Aramcharoen and P. T. Mativenga, "Critical factors in energy demand modelling for CNC milling and impact of toolpath strategy," *Journal of Cleaner Production*, pp. 63-74, 2014.
- [19] F. Draganescu, M. Gheorghe y C. Doicin, «Models of machine tool efficiency and specific consumed energy,» *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 9-15, 2003.
- [20] R. L. Boylestad, Introducción al análisis de circuitos, Prentice Hall, 2004.
- [21] J. Gómez Campomanes, Circuitos Electricos, Universidad de Oviedo - Servicio de publicaciones.
- [22] E. Armarego y R. Brown, Machining of Metals, New Jersey: Prentice Hall, 1969.
- [23] K. Taraman, «Multi machining output±multi independent variable turning,» *International Journal of Production Research*, vol. 12, nº 2, pp. 233-245, 1974.
- [24] J. D. Y. y S. A., «Dynamic Simulation for Predicting Surface Roughness in Turning,» *Proceedings of the 12th Biennial Conference on Mechanical Vibration and Noise*, pp. 31-36, 1989.
- [25] D. C. Montgomery y W. W. Hines, Probabilidad y Estadística Para Ingeniería y Administración, Atlanta, Georgia: Limusa Wiley, 1993.
- [26] X. Fang y H. Safi- Hahanshahi, «A new algorithm for developing a reference-based model for predicting surface roughness in finish machining of steels,» *International Journal of Production Research*, vol. 35, nº 1, pp. 179-199, 1997.
- [27] S. Ong, L. Jiang y A. Nee, «An Internet-Based Virtual CNC Milling System,» *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 20, nº 1, pp. 20-30, 2002.
- [28] E. Ezugwu, D. Fadare, J. Bonney, R. Da Silva y W. Sales, «Modelling the correlation between cutting and process parameters in high-speed machining of Inconel 718 alloy using an artificial neural network,» *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 45, pp. 1375-1385, 2005.

- [29] Y. Kazancoglu, U. Esme, M. Bayramoglu, O. Guven y S. Ozgun, «Multi-Objective Optimization of the Cutting Forces in Turning Operations Using the Grey-Based Taguchi Method,» *Materials and technology*, vol. 45, n° 2, pp. 105-1110, 2011.
- [30] Krishankant, J. Taneja, M. Bector y R. Kumar, «Application of Taguchi Method for Optimizing Turning Process by the effects of Machining Parameters,» *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, vol. 2, n° 1, pp. 263-274, 2012.
- [31] G. Boothroyd y W. A. Knight, *Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools*, Third Edition, United States of America: Taylor & Francis, 2006.
- [32] N. Diaz-Elsayed, *Development of Energy Models for Production Systems and Processes to Inform Environmentally Benign Decision-Making*, Berkeley, California - USA.: University of California, Berkeley, 2013.
- [33] G. Byrne y E. Scholta, «Environmentally Clean Machining Processes — A Strategic Approach,» *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 42, n° 1, pp. 471-474, 1993.
- [34] T. Gutowski, C. Murphy, D. Allen, D. Bauer, B. Bras, T. Piwonka, P. Sheng, J. Sutherland, D. Thurston y E. Wolff, «Environmentally benign manufacturing: Observations from Japan, Europe and the United States,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 13, pp. 1-17, 2005.
- [35] T. Gutowski, J. Dahmus y A. Thiriez, «Electrical Energy Requirements for Manufacturing Processes,» *13th CIRP International Conference of Life Cycle Engineering*, 2006.
- [36] W. Li y S. Kara, «An empirical model for predicting energy consumption of manufacturing processes: a case of turning process,» *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, pp. 1636-1646, 2011.
- [37] W. Li, *Efficiency of Manufacturing Processes*, Sydney: Springer, 2015.
- [38] F. Ronald A., *The Design of Experiments*, New York: Hafner Publishing Company, 1971.
- [39] R. K. Roy, *Design of Experiments Using the Taguchi Approach*, Canada: John Wiley & Sons, inc., 2001.
- [40] Minitab, *Meet Minitab 15*, Estados Unidos de América: Minitab Inc., 2007.
- [41] A. Ruckstuhl, *Introduction to Nonlinear Regression*, 2010.

- [42] CNCCookbook, «CNC Dictionary,» CNCCookbook, Inc., 2010-2016. [En línea]. Available: <http://www.cnccookbook.com/CCDictionary.htm>. [Último acceso: 09 06 2016].
- [43] G. M. Miquiz, V. Borja, M. López-Parra, D. Dornfeld y P. Flores , «A Comparative Analysis Between High Speed Dynamic and Traditional Pocketing Toolpaths in Precision Milling Machines,» *ASME 2016 11th International Manufacturing Science and Engineering Conference*, vol. 3, p. 8, 2016.
- [44] T. Behrendt, A. Zein y S. Min, «Development of an energy consumption monitoring procedure for machine tools,» *CIRP Annals-ManufacturingTechnology*, vol. 61, pp. 43-46, 2012.
- [45] International Standard - ISO 1302, Geometrical Product Specifications, Geneva: ISO, 2002-02-01.
- [46] ISO, «ISO 14955-1:2014:Machine tools — Environmental evaluation of machine tools — Part 1: Design methodology for energy-efficient machine tools,» vol. 1, p. 47, 2014.
- [47] J. B. Dahmus y T. G. Gutowski, «An Environmental Analysis of Machining,» *Proceedings of IMECE2004*, 2004.
- [48] Y. Guo, J. R. Dufloy, J. Qian, H. Tang y B. Lauwers, «An operation - mode based simulation approach to enhance the energy conservation of machine tools,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 1, p. 12, 2015.
- [49] Rassini, «Rassini Frenos,» 29 12 2016. [En línea]. Available: <http://www.rassini.com/frenos.html>. [Último acceso: 29 12 2016].
- [50] schaeffler, «schaeffler - After Market,» 29 12 2016. [En línea]. Available: http://www.schaeffler-aftermarket.com.mx/content.schaeffler_as.mx/es/products_automotive_aftermarket/Products.jsp. [Último acceso: 29 12 2016].
- [51] G. M. Miquiz, V. Borja, M. López-Parra y C. Ramírez R., «Diseño del proceso de maquinado considerando el consumo energetico: Caso de estudio de fresado,» *TOMO I. Avances de la Ingeniería Mecánica en Diseño Mecánico - SOMIM*, vol. 1, p. 7, 2014.
- [52] J. Robert B y R. Okhyun, «NCML: A Data Exchange Format For Internet Based Machining,» *Proceedings of the JUSFA -Japan USA Symposium on Flexible Automation*, nº U-063, 2002.

- [53] T. y. b. huecas, «Tubos y barras huecas,» 23 12 2016. [En línea]. Available: <http://www.tubosybarrashuecas.com/aceros-al-carbon-aisi-1045>. [Último acceso: 23 12 2016].
- [54] G. Karl-Heinrich y E. K. Antonsson, Engineering, Volume 10, California, USA: Springer, 2009.
- [55] G. M. Minquiz, V. Borja, M. Lopez-Parra, A. C. Ramírez-Reivich, M. A. Dominguez y A. Alcaide, A comparative study of CNC part programming addressing energy consumption and productivity, Berkeley, USA: Elsevier, 2014.
- [56] EIA; U.S. Energy Information Administration, «Annual Energy Outlook 2015,» 2015.
- [57] CFE, «Informe Anual 2014,» 2014.
- [58] CFE, «Estadísticas de consumo-clientes,» [En línea]. Available: http://www.cfe.gob.mx/ConoceCFE/1_AcercadeCFE/Estadisticas/Paginas/clientes.aspx. [Último acceso: 12 2 2016].
- [59] D. Dornfeld y D.-E. Lee, Precision Manufacturing, New York: Springer Science & Business Media, LLC, 2008.
- [60] W. Muller, Electronica de potencia, Barcelona : Reverte S.A., 1994.
- [61] J. Yan y L. Li, «Multi-objective optimization of milling parameters e the trade-offs between energy, production rate and cutting quality,» *Journal of Cleaner Production*, pp. 462-471, 2013.
- [62] J. Marroquín Arreola, O. Neme Castillo y A. L. Valderrama Santibáñez, «Producción Manufacturera, Consumo de Energía y Empleo en México: un Análisis por Clases Manufactureras,» *Cuadernos de Economía*, pp. 380-400, 2015.

7. ANEXOS

Esta sección muestra tablas y los modelos predictivos, gráficas de potencias y energía de diseño DOE, el plano de la pieza de caso de estudio y un artículo de un caso de estudio de operación de cajeado en el análisis de vida útil, potencia, energía y emisiones de CO₂.

Anexo A Modelado matemático

Operación de planeado en vacío (Tara):

Análisis de regresión no lineal:

	Parámetros	Estimado	SE Estimado
	X ₁	0.003014	0.003773
	X ₂	0.639114	0.123164
	X ₃	0.070207	0.078683

Tabla 7.1 Parámetros Estimados

Análisis de regresión lineal de modelado de vacío: kW versus n, f_z

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	2	6.39201	3.19600	120.15	0.000
n	1	6.19033	6.19033	232.71	0.000
f _z	1	0.20168	0.20168	7.58	0.011
Error	24	0.63842	0.02660		
Lack-of-Fit	6	0.58683	0.09781	34.13	0.000
Pure Error	18	0.05159	0.00287		
Total	26	7.03043			

Tabla 7.2 Analysis of Variance

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.163098	90.92%	90.16%	88.89%

Tabla 7.3 Model Summary

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	0.2600	0.0868	2.99	0.006	
n	0.000155	0.000010	15.25	0.000	1.00
f _z	0.000059	0.000021	2.75	0.011	1.00

Tabla 7.4 Coefficients

Regression Equation

$$kW = 0.2600 + 0.000155 n + 0.000059 f_z$$

Operación de planeado con remoción de material:

Análisis de regresión no lineal:

	Parámetros	Estimado	SE Estimado
	X ₁	0.119379	0.0296690
	X ₂	0.586379	0.0127844
	X ₃	0.660086	0.0414910
	X ₄	0.501722	0.0290065

Tabla 7.5 Parámetros Estimados

Análisis de regresión lineal de modelado de planeado: kW versus a_p, v_c, f_z

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	17.5204	5.8401	1214.04	0.000
a _p	1	15.8429	15.8429	3293.39	0.000
v _c	1	0.7960	0.7960	165.48	0.000
f _z	1	0.8815	0.8815	183.25	0.000
Error	32	0.1539	0.0048		
Total	35	17.6744			

Tabla 7.6 Analysis of Variance

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0693578	99.13%	99.05%	98.83%

Tabla 7.7 Model Summary

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-1.960	0.175	-11.19	0.000	
a _p	1.1867	0.0207	57.39	0.000	1.00
v _c	0.005203	0.000405	12.86	0.000	1.00
f _z	7.666	0.566	13.54	0.000	1.00

Tabla 7.8 Coefficients

Regression Equation

$$kW = -1.960 + 1.1867 a_p + 0.005203 v_c + 7.666 f_z$$

Operación de contorno:

	Núm.	a_p	v_c	f_z	kW
	1	0.015	350	0.0715	2.5885
	2	0.015	350	0.077	2.62468
	3	0.015	350	0.0825	2.67875
	4	0.015	375	0.0715	2.8157
	5	0.015	375	0.077	2.81854
	6	0.015	375	0.0825	2.84788
	7	0.015	400	0.0715	2.98022
	8	0.015	400	0.077	2.98706
	9	0.015	400	0.0825	2.98536
	10	0.02	350	0.0715	2.60847
	11	0.02	350	0.077	2.63398
	12	0.02	350	0.0825	2.68773
	13	0.02	375	0.0715	2.77064
	14	0.02	375	0.077	2.79236
	15	0.02	375	0.0825	2.81988
	16	0.02	400	0.0715	2.9936
	17	0.02	400	0.077	3.02202
	18	0.02	400	0.0825	2.90529

Tabla 7.9 Resultados de potencia de operaciones de contorno.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	0.353526	0.117842	103.43	0.000
a_p	1	0.000478	0.000478	0.42	0.528
v_c	1	0.350703	0.350703	307.81	0.000
f_z	1	0.002345	0.002345	2.06	0.173
Error	14	0.015951	0.001139		
Total	17	0.369477			

Tabla 7.10 Analysis of Variance

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0337544	95.68%	94.76%	92.12%

Tabla 7.11 Model Summary

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	0.085	0.208	0.41	0.689	
a_p	-2.06	3.18	-0.65	0.528	1.00
v_c	0.006838	0.000390	17.54	0.000	1.00
f_z	2.54	1.77	1.43	0.173	1.00

Tabla 7.12 Coefficients

Equation

$$kW = 0.0719115 * a_p ^ 0.277254 * v_c ^ 0.528011 * f_z ^ 0.190756$$

Operación de superficie:

	Num.	a_p	v_c	f_z	kW
	1	2	340	0.052	1.080
	2	2	340	0.104	1.231
	3	2	340	0.207	1.387
	4	2	355	0.052	1.139
	5	2	355	0.104	1.244
	6	2	355	0.207	1.398
	7	2	365	0.052	1.138
	8	2	365	0.104	1.260
	9	2	365	0.207	1.416
	10	3	340	0.052	1.242
	11	3	340	0.104	1.396
	12	3	340	0.207	1.589
	13	3	355	0.052	1.229
	14	3	355	0.104	1.413
	15	3	355	0.207	1.615
	16	3	365	0.052	1.260
	17	3	365	0.104	1.438
	18	3	365	0.207	1.649
	19	4	340	0.052	1.258
	20	4	340	0.104	1.479
	21	4	340	0.207	1.694
	22	4	355	0.052	1.292
	23	4	355	0.104	1.519
	24	4	355	0.207	1.740
	25	4	365	0.052	1.334
	26	4	365	0.104	1.551
	27	4	365	0.207	1.780

Tabla 7.13 Resultados de potencia de operaciones de superficie.

Análisis de regresión lineal:

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	0.90893	0.302978	144.26	0.000
a_p	1	0.30787	0.307868	146.59	0.000
v_c	1	0.01220	0.012202	5.81	0.024
f_z	1	0.58886	0.588865	280.38	0.000
Error	23	0.04831	0.002100		
Total	26	0.95724			

Tabla 7.14 Analysis of Variance

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0458286	94.95%	94.30%	92.87%

Tabla 7.15 Model Summary

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-0.001	0.306	-0.00	0.998	
a_p	0.1308	0.0108	12.11	0.000	1.00
v_c	0.002069	0.000858	2.41	0.024	1.00
f_z	2.287	0.137	16.74	0.000	1.00

Tabla 7.16 Coefficients

Análisis de regresión no lineal:

Parámetro	Estimado	SE Estimado
X_1	0.071911	0.047453
X_2	0.277254	0.011787
X_3	0.528011	0.112412
X_4	0.190756	0.005874

Tabla 7.17 Parametros Estimados

$$kW = 0.0719115 * ap ^ 0.277254 * vc ^ 0.528011 * fz ^ 0.190756$$

Iterations	9
Final SSE	0.0132054
DFE	23
MSE	0.0005741
S	0.0239614

Tabla 7.18 Resumen de modelado superficie- Levenberg Marquardt

Anexo B Gráficas de potencia y energía a partir del diseño DOE

Operación de contorno:

Experimento 1		Experimento 2	
f_z : 0.077mm.	V_c : 195 m/min	f_z : 0.077mm.	V_c : 205 m/min
a_e -%	kWh	a_e -%	kWh
4.1	0.049	16.6	0.028
10.4	0.037	16.6	0.028
16.6	0.032	16.6	0.029

Tabla 7.19 Comparativo de contornos con profundidad de corte de 20 mm.

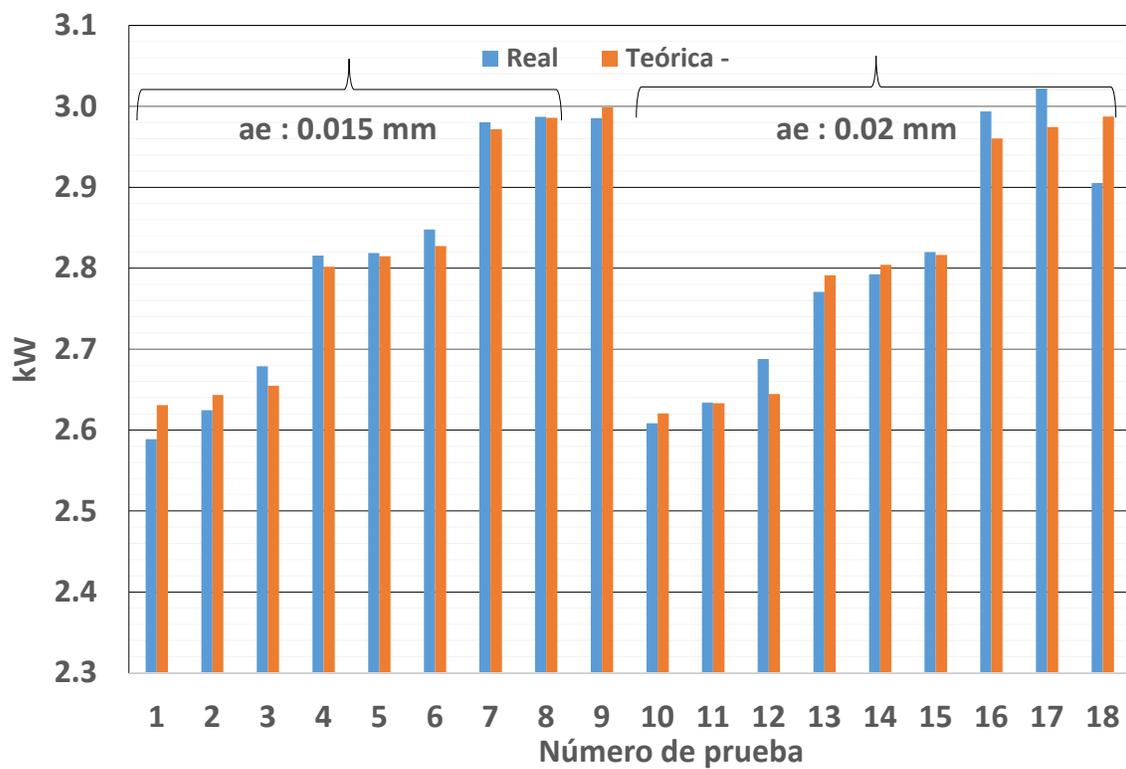


Fig. 7.1 Potencia de operación de contorno – Real Vs Teórica.

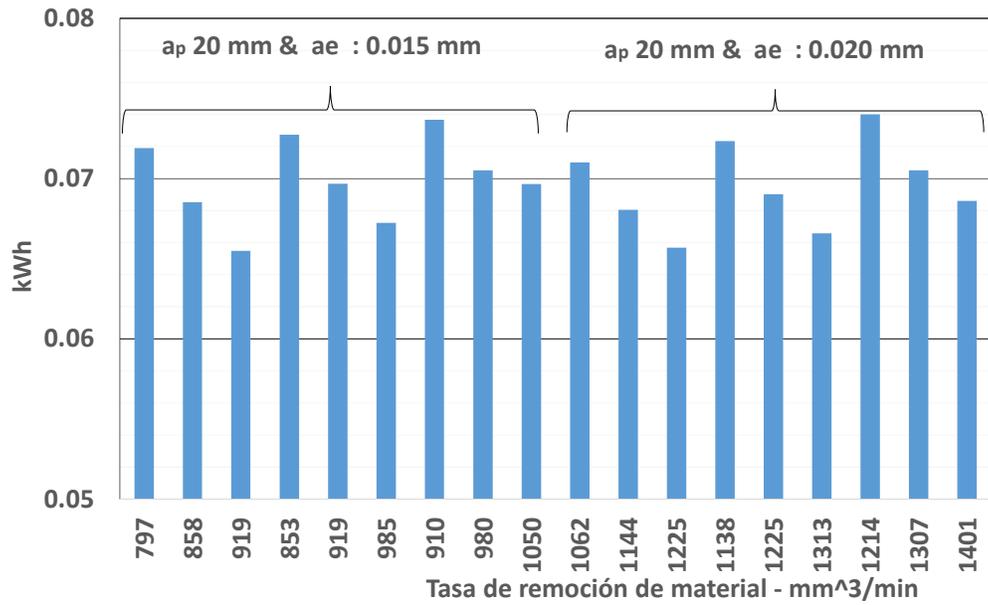


Fig. 7.2 Comportamiento de energía de operación de contorneado.

Operación de barrenado:

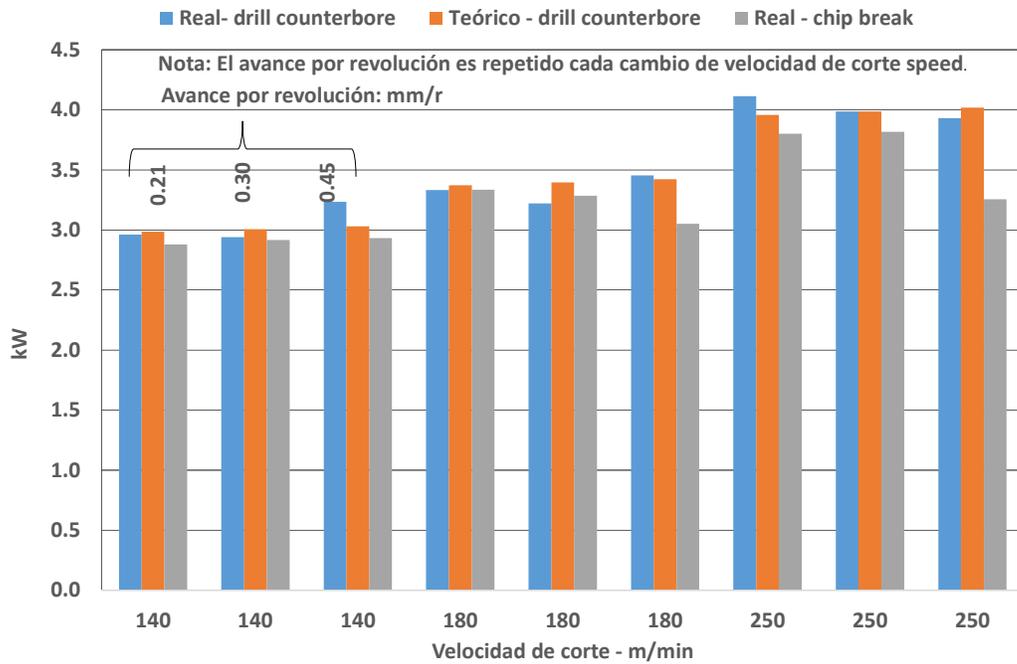


Fig. 7.3 Comportamiento potencia en operación de barrenado Real vs teórico.

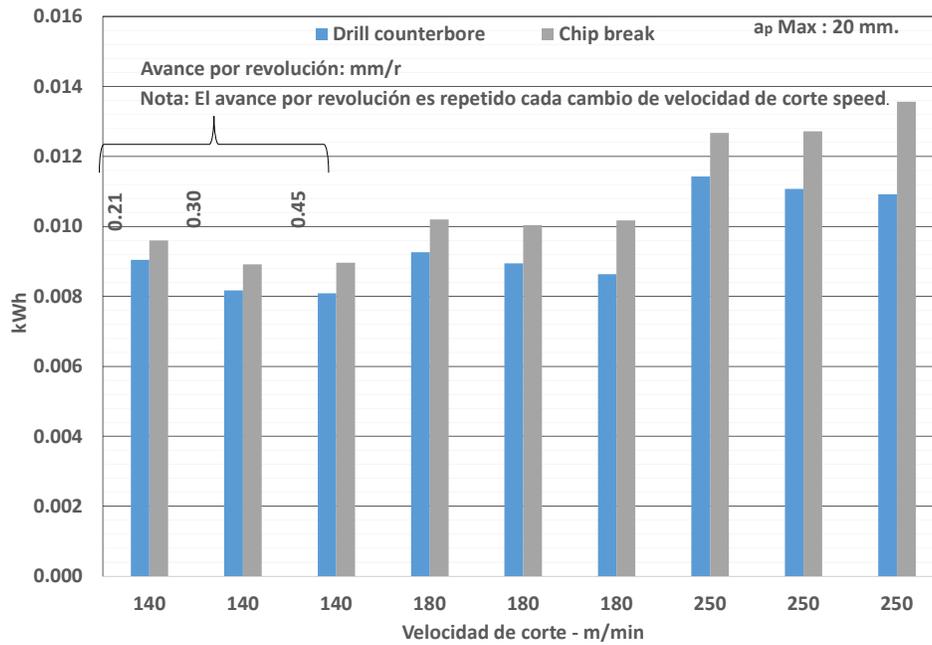


Fig. 7.4 Comportamiento de energía de operación de barrenado.

Operación de superficie:

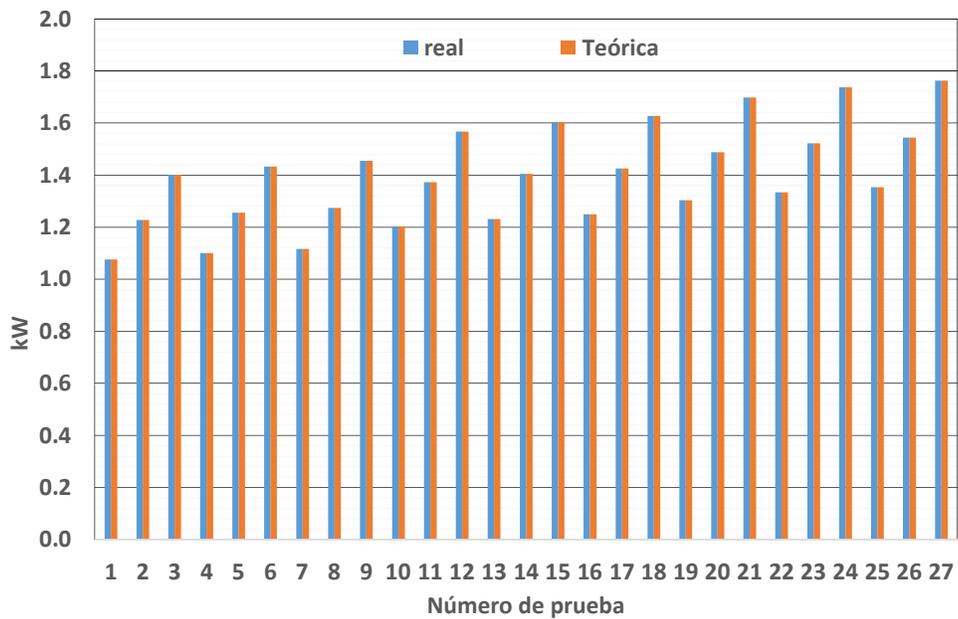


Fig. 7.5 Comportamiento de potencia en operación de superficie.

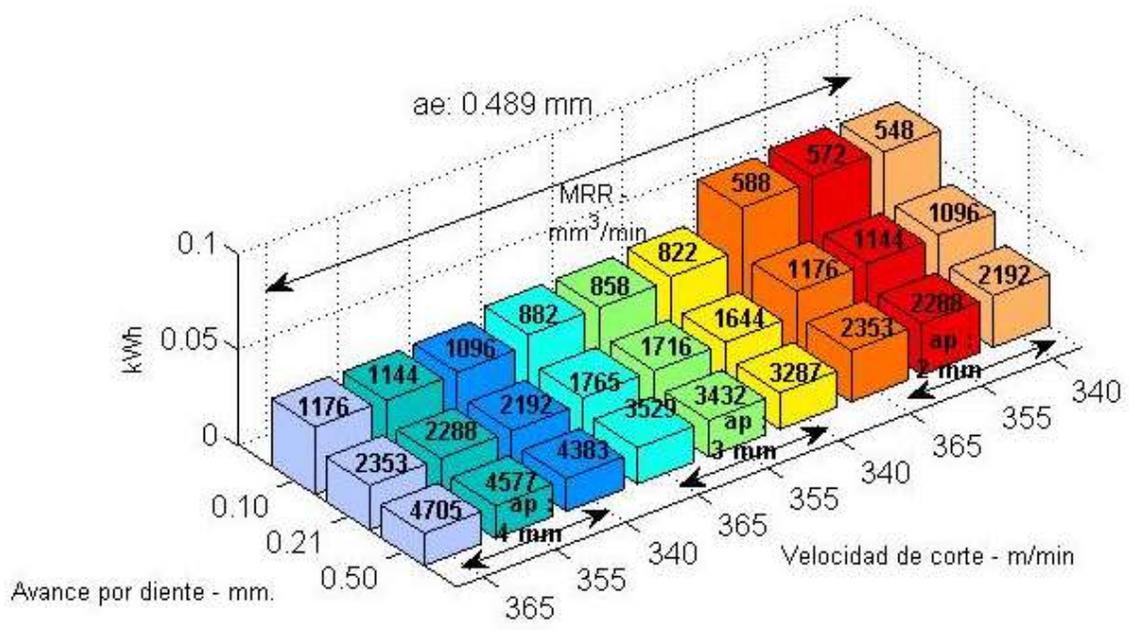


Fig. 7.6 Comportamiento de potencia y remoción de material de las 27 pruebas.

Anexo D Datos de operaciones.

Tablas de planeado:

Experimento	T. Ciclo hrs			Potencia kW		Energy consumption - kWh			
	Dynamic	OneWay	Zigzag	Zigzag	OneWay	Dynamic	Dynamic	OneWay	Zigzag
1	0.11	0.12	0.16	0.79	0.82	0.79	0.08	0.10	0.13
2	0.03	0.04	0.05	0.77	0.83	0.77	0.03	0.04	0.04
3	0.02	0.03	0.03	0.85	0.92	0.87	0.02	0.03	0.03
4	0.10	0.12	0.16	1.00	0.97	0.93	0.10	0.12	0.15
5	0.03	0.04	0.05	1.06	1.07	1.04	0.04	0.05	0.05
6	0.02	0.03	0.03	1.36	1.34	1.27	0.03	0.04	0.04
7	0.10	0.12	0.16	1.92	1.91	1.87	0.20	0.23	0.30
8	0.04	0.04	0.05	2.08	1.98	1.90	0.07	0.08	0.10
9	0.02	0.03	0.03	2.19	2.12	1.99	0.05	0.06	0.07
Promedio	0.05	0.06	0.08	1.33	1.33	1.27	0.07	0.08	0.10
Desviación Estandar	0.04	0.04	0.06	0.58	0.53	0.51	0.06	0.06	0.08

Tabla de cajeadado:

Experimento	T. Ciclo - h		Potencia - kW		Energía - kWh	
	True Spiral	High Speed	True Spiral	High Speed	True Spiral	High Speed
		Dynamic		Dynamic		Dynamic
1	0.098	0.028	2.1	2.6	0.2	0.1
2	0.098	0.027	2.1	2.8	0.2	0.1
3	0.097	0.027	2.1	2.3	0.2	0.1
4	0.097	0.027	2.1	2.8	0.2	0.1
5	0.097	0.028	2.1	2.8	0.2	0.1
6	0.097	0.028	2.2	2.8	0.2	0.1
7	0.097	0.028	2.2	2.8	0.2	0.1
8	0.098	0.028	2.2	2.9	0.2	0.1
9	0.097	0.028	2.2	2.8	0.2	0.1
Promedio	0.097	0.028	2.140	2.738	0.208	0.076
Desviación Estandar	0.0010	0.0012	0.0505	0.4046	0.0055	0.0131

Tabla de barrenos:

Experimento	T. Ciclo - h		Potencia - kW		Energía - kWh	
	Counterbore	Chip break	Counterbore	Chip break	Counterbore	Chip break
1	0.003	0.003	3.0	2.9	0.0	0.0
2	0.003	0.003	2.9	2.9	0.0	0.0
3	0.003	0.003	3.2	2.9	0.0	0.0
4	0.003	0.003	3.3	3.3	0.0	0.0
5	0.003	0.003	3.2	3.3	0.0	0.0
6	0.003	0.003	3.5	3.1	0.0	0.0
7	0.003	0.003	4.1	3.8	0.0	0.0
8	0.003	0.003	4.0	3.8	0.0	0.0
9	0.003	0.004	3.9	3.3	0.0	0.0
Promedio	0.0027	0.0033	3.46	3.25	0.01	0.01
Desviación Estandar	0.0002	0.0004	0.44	0.36	0.0013	0.0018

Anexo E Artículo de caso de estudio de operación de cajeadado – análisis de vida útil, potencia, energía y emisiones de CO₂.

Proceedings of the ASME 2016 International Manufacturing Science and Engineering Conference
MSEC2016
June 27 – July 1, 2016, Blacksburg, Virginia, USA

MSEC2016-8746

A comparative analysis between High Speed Dynamic and Traditional pocketing toolpaths in precision milling machines

Gustavo M. Minquiz
Universidad Nacional Autónoma de México
Av. Universidad 3000, México, D.F., 04510, México
Instituto Tecnológico de Puebla
Av. Tecnológico Num. 420 Col. Maravillas Puebla CP 72220.

Vicente Borja
Faculty of Engineering,
Universidad Nacional Autónoma de México
Av. Universidad 3000, México, D.F., 04510, México

Marcelo López-Parra
Faculty of Engineering,
Universidad Nacional Autónoma de México
Av. Universidad 3000, México, D.F., 04510, México

David Dornfeld
Department of Mechanical Engineering, University of California at Berkeley, Berkeley, CA 94720, United States

Pablo Flores
Sandvik Coromant S.A de C.V. (México)
Vía Gustavo Baz No.352, La Loma, Tlalnepantla Estado de México, 54060, México

KEYWORDS

Toolpath, high speed dynamic, true spiral, carbon emissions, flank wear, energy consumption.

ABSTRACT

Different types of toolpaths have been extensively studied with regards to different factors such as energy consumption and tool wear. However, toolpaths have been introduced recently, where high speeds and dynamic movements are combined to provide higher performance. The aim of this paper is to compare a spiral toolpath strategy, which has been studied previously with good results in energy consumption, with a high speed dynamic toolpath strategy, which combines helical and dynamic movements, with regards to energy consumption, tool wear and carbon emissions. Several advantages are identified with a high speed dynamic toolpath strategy over the typical spiral toolpath strategy in terms of tool wear, energy consumption and carbon emissions. The results show that the high speed dynamic toolpath is a better alternative for different milling operations such as slotting, pocketing, and face milling.

NOMENCLATURE

CO_2 Carbon dioxide
HSD High speed dynamic
TS True spiral
 \bar{v}_b Width of the flank wear average
MQL Minimum quantity lubrication
MR Material removed
 a_p Depth of cut
 a_e Working engagement

D_c Cutting diameter
CAM Computer-aided manufacturing
CAD Computer-aided design
 z_n Number of teeth
 n Spindle speed
 F_z Feed per tooth

INTRODUCTION

The energy consumption in manufacturing processes has been estimated to have an annual growth of 2.0% for natural gas, which is one of the most common fossil fuels used in energy generation [1]. 9.1 quadrillion Btu of energy has been used in 2013 and the projection is that 11.2 quadrillion Btu will be used annually by 2040 [1]. In the same way, carbon emissions are estimated to increase by 0.5% each year and the industrial sector will have increased emissions from 462 million metric tons of CO₂ in 2013 to 563 million metric tons in 2040 [1]. It is predicted that there will be an improvement in energy-efficiency and productivity in manufacturing processes, based on new technologies in communication to collect real-time data and laboratory experimentation [2]. Energy consumption has been analyzed over many different types of toolpaths, which has been possible considering the wide variety of toolpaths available in commercial CAM software [3]. Recently, five different toolpaths, including one path generated based on streamlines of a vector-field, were compared and the results showed a significant advantage in cycle time and energy consumption of that toolpath over other toolpaths available in a CAM software [4]. In an effort to improve energy-efficiency towards sustainable manufacturing, several studies have compared

conventional machining processes with high speed machining, claiming that the high speed machining toolpath is lower in energy consumption and higher in productivity as compared to the conventional machining toolpaths [5]. On the other hand, the dynamic toolpath is an alternative where the working engagement is constant, but also reduces forces and vibrations, which are related to the energy consumption and flank wear [6]. Flank wear has been analyzed for different machining scenarios to develop sustainable techniques such as MQL, cryogenic treatment and alternative cutting fluids [7]. These studies are necessary because the cutting force and vibration are related to the power demand [8]. So, it is important to explore different toolpaths and measure their impacts on energy consumption.

There exist studies comparing conventional machining with high speed machining. However, the combination of high speeds with a dynamic toolpath is a topic not well explored. The aim of this paper is to compare the energy consumption, flank wear and carbon emissions of a typical toolpath strategy, which is a true spiral in our case study, with the high speed dynamic toolpath.

BACKGROUND

In order to improve the energy consumption, an optimal work piece orientation approach had been proposed. The model is based on the use two coefficients per each axes (Mass and friction), the reduction value was 3-4% [9]. There exists a clear difference between the cycle times and energy consumption patterns for different toolpaths. For example, Aramcharoen & Mativenga compared five different toolpaths: X-direction milling, Zigzag along X-axis, Y-direction milling, contouring and spiraling, and the two most energy-efficient and time-efficient toolpaths were the contouring and spiraling toolpaths [10]. The high speed dynamic toolpath has the characteristics of combining a high depth of cut and small working engagement. The working engagement is constant even in the corner of the cut, which makes it different from true spiral toolpath strategies [11]. Many studies have attempted to reduce the cutting forces, which are directly related to the flank wear. For example, it has been shown that orienting the workpiece at a certain angle is preferable in order to achieve a longer tool life [12]. Another factor considered is the cutting tool angle, which is related to the type of milling operation [13]. Apart from this, the toolpath selection impacts the flank wear, cycle time and energy consumption, but the flank wear also affects the energy consumption [10]. Additionally, the surface quality has been improved by using high speeds in corners and applying a spiral toolpath instead of a raster toolpath which consists of entrance and exit movements [14]. This behavior to avoid cutting more material, specifically in corners, as shown in Fig. 1, has been extensively studied by Sui et al in order to reduce the cutting forces and vibrations [6]. Their results showed the potential to reduce the cutting forces by 16% to 22% and the vibrations by 8% to 40%.

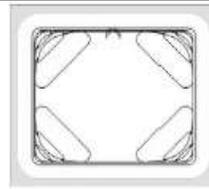


Fig. 1. Toolpath with two restrictions, cutting force and dynamic [6].

It has been studied that an increase in flank wear adversely affects the cutting force, and this increase in cutting force is directly proportional to the increase in flank wear [15]. There exists a recommended maximum allowable flank wear, for example 0.3 mm in the case of uniform wear, and 0.5 mm at a specific point on any individual cutting tooth [16]. Chip formation is associated with the cutting force, workpiece material, tool geometry and toolpath strategy and can be correlated to the energy consumption pattern and flank wear [17]. Different types of chips can be formed during the machining process which are a function of the workpiece material. For soft materials and ductile metals, chips are continuous with a built-up edge (see Fig. 2 "a"). This behavior is common with low cutting speeds. However, the desirable type of chips are those without tool damage (Fig. 2 "b") [18]. The characteristics of the chips formed during the machining process have been used to establish methods to predict flank wear [19].

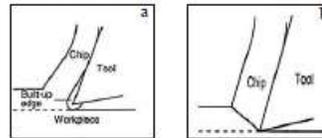


Fig. 2. Chips (a) Continue with Built-up. (b) Continue 'desirable' [17].

In order to select the cutting parameters, researchers often take supplier recommendations [20]. Based on this assumption, this research considers three basic constraints in order to select the cutting parameters which are depth of cut, working engagement and cutting diameter [21]. For example, in order to use 'medium' cutting parameters proposed in catalogs, it is possible to use them only if the product between a_p and a_e is less than D_c . (See Fig. 3).

$$a_p \cdot a_e > D_c \text{ or } a_p \cdot a_e < D_c \text{ or } a_e < 0.06 \cdot D_c$$

↑ Low ↑ Medium ↑ High

Fig. 3. Constraint to select cutting parameters [21].

Additionally, it is possible to increase the feed rate when the working engagement is less than 1 mm, which is often the case for a contour. Fig. 4 shows that the working engagement is short. It is also possible to see that the depth of cut is large and is constant.



Fig. 4. Working engagement in contour operation – HSD.

Based on this assumption, the equation to calculate the feed rate (v_f) is shown in Eq. 1 [13]. K_1 is the compensation factor, with which it is possible to calculate the relationship between the cutting diameter and the working engagement (Eq. 2) [13].

$$v_f = k_1 \cdot z_n \cdot n \cdot f_z \quad (1)$$

$$k_1 = \frac{D_c}{a_e} \quad (2)$$

Two toolpaths are chosen using MasterCam X8® for this study, namely the high speed dynamic toolpath and the true spiral toolpath, in order to mill the same pocket geometry.

High Speed Dynamic (HSD) toolpath: This tool path for pocketing is divided into two sections. In the first phase, it follows a helical path in order to reach the final depth, and in the second phase, it uses high speed dynamic movements and short working engagements with constant depth of cut (see fig. 5 “a”). When the tool reaches the final depth, the behavior in toolpath and working engagement are the same as in the contour (Fig. 4).

True Spiral (TS) toolpath: In this toolpath, incremental depths of cut are used to remove the material and achieve the final geometry. In order to reach an incremental depth of cut, a spiral motion is followed, after which the depth is held constant and the geometry is milled. This is repeated until the final depth is achieved (see Fig. 5 “b”).

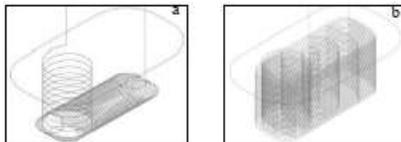


Fig. 5. Toolpath strategy (a) High speed dynamic (b) True spiral.

In order to measure the carbon emissions in a manufacturing process, Jeswiet and Kara proposed an equation to calculate the amount of carbon emissions CE_{part} [22], where CE_{part} is the energy consumed and CES is a carbon emission signature of the power grid, which depends on the type of fossil fuel (Eq. 3). This research considers the value from natural gas which is 54.71 $kgCO_2/MMBTu$ [1], and is the main fuel used in Berkeley, CA, where the study is conducted.

$$CE_{part} = EC_{part}(GJ) \cdot CES \left(\frac{kgCO_2}{GJ} \right) \quad (3)$$

METHODOLOGY

A test part is designed in this case study in order to collect data for flank wear and energy consumption. This set of experiments is conducted at the UC Berkeley Mechanical Engineering Machine Shop. Table 1 shows the experimental details used for the case study.

Table 1. Details of the experiment

Work piece dimensions:	25 mm X 45 mm, depth 15 mm. Corner radii 10 mm
Work piece material:	1018 cold-rolled carbon steel
Machine type:	Haas VF0 3-axis milling machine tool
Tool material:	A 4-Tooth solid carbide square end mill IP240-1200-XA 1630
Tool diameter:	1/2" - 12 mm

Two toolpath strategies, as described earlier, are used in this study. The parameters for each tool path strategy are shown in table 2. For HSD toolpath strategy, it is necessary to choose two different set of parameters. This is because the working engagement (a_e) is not the same for entry movements as for the dynamic movements, and because the entry movements are designed to reach a large depth of cut (15 mm in our case). In the entry movements, a helix radius is set which refers to working engagement. The helix radius is 6 mm for entry and is 0.96 mm for working engagement (See Table 2). As a consequence of the differences in the working engagement, the cutting speed and feed per tooth for entry and for dynamic movements are different (See Table 2). For TS toolpath, it is not possible to choose different cutting speeds and feed per tooth, even including entry movements and spiral movements, because the strategy is designed to make a short depth of cut (See Fig. 5 “b”). As the TS toolpath has a short depth of cut (0.6 mm) the working engagement is 4.8 mm in spiral movements (see Table 2).

Table 2. Parameters

	High speed		True spiral	
	Entry	Dynamic	Entry	Spiral
Plunge angle (°)	3	--	3	--
Helix radius - Entry motion (mm)	6	--	6	--
Cutting speed ($\frac{m}{min}$)	205	300	205	205
Feed per tooth (mm)	0.077	0.133	0.077	0.077
Depth of cut (mm)	--	15	--	0.6
Working engagement (mm)	--	0.96	--	4.8

The power consumption is measured using a Yokogawa CW240 wattmeter in a three-phase, three-wire, and three current configuration. The data are collected at a sampling rate of 10Hz (see Fig. 6). However, the data collected with the measuring instrument is the total power consumption the NC-code is run without an actual workpiece and this idle power is subtracted from the total power to calculate the cutting power (Eq. 4).

$$Cutting\ Power = Total\ power - Idle\ power \quad (4)$$

The flank wear is measured using a Microscope Olympus SZ60, which has an attached DP25 Olympus camera. A 6.3X magnification was set in the microscope, and its equivalent conversion factor is $949.54 \frac{Pixel}{mm}$. The final flank wear and built-up edge are measured on a Hitachi TM-1000 Scanning Electron Microscope (see Fig. 6).

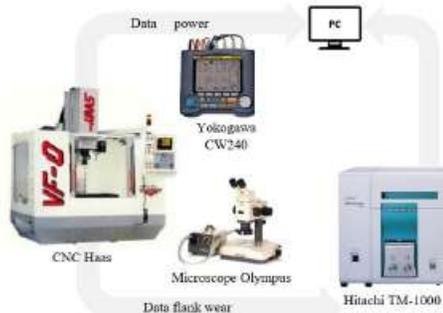


Fig. 6. Schematic representation for collecting data (Power & Flank wear).

RESULTS

POWER CONSUMPTION AND MATERIAL REMOVED

The total toolpath length with HSD is 2755 mm per pocket, and the cycle time per pocket is 0.027 hr. Fig. 7 shows the

cumulative cycle time and cutting power which are related with the number of pockets. In this case, 30 pockets are machined in 0.823 hr. Fig. 7 shows the cutting power which started at 465 W until it reached 542 W. This behavior is related with the flank wear average behavior through, whose maximum value is 0.067 mm with the maximum power at 542 W.

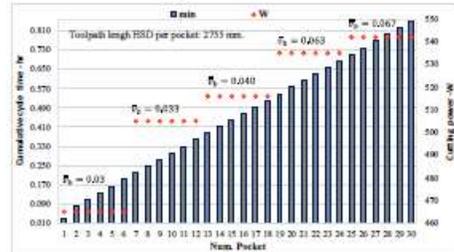


Fig. 7. Comparing average flank wear and cutting power for the HSD toolpath.

The toolpath length per pocket with TS toolpath is 9017 mm, which is larger than the HSD toolpath and the cycle time with TS toolpath per pocket is 0.097 hr. which is 0.070 hr. higher than the HSD toolpath. On the other hand, the power consumption has the same tendency to increase with the flank wear, but the maximum power demand reached with TS toolpath is 130 W whereas 542 W was the highest power demand with HSD toolpath (see Fig. 8).

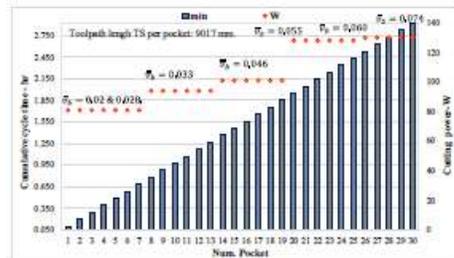


Fig. 8. Comparing average flank wear and cutting power for the TS toolpath.

Fig. 9 compares the total power to machine the 30 pockets with the two strategies. In both cases there is a tendency for mean power to increase. For TS toolpath, the mean power begins at 2140 W until it reaches 2158 W, whereas for the toolpath HSD, it starts at 2600 W until it reaches 2838 W.

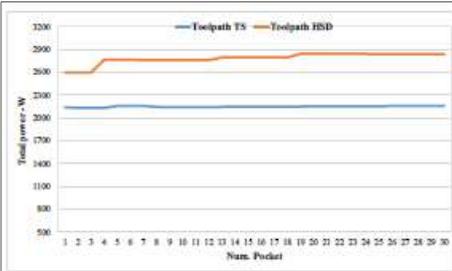


Fig. 9. Total cutting power comparison between HSD and TS toolpaths.

ENERGY, FLANK WEAR AND CO₂ EMISSIONS

Fig. 10 shows the energy consumption calculated based on the total power consumption, for the HSD toolpath strategy with relation to the flank wear. The energy consumption starts with 70.2 Wh initially, until it reaches a maximum of 80.5 Wh with the maximum flank wear which is 0.067 mm. It is possible to see that when the flank wear average reaches 0.0005 mm, the rate of increase is negligible.

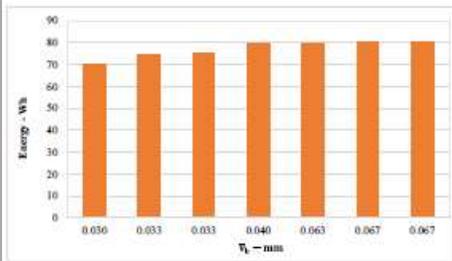


Fig. 10. Behavior in average flank wear and energy. (HSD Toolpath).

The energy consumption trend with TS toolpath strategy is shown in Fig. 11. It is possible to see that the energy consumption starts at 207.9 Wh initially until it reaches 210.6 Wh, this value is bigger than 80.5 Wh when compared to HSD toolpath. Besides, similar to the HSD toolpath strategy, when the flank wear average reaches 0.055 mm and the maximum flank wear is 0.074 mm.

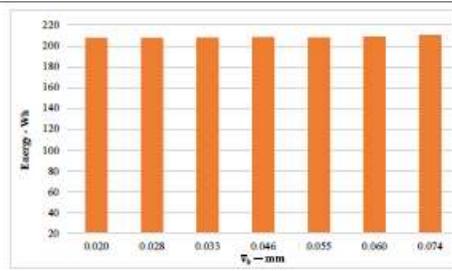


Fig. 11. Behavior in average flank wear and energy. (TS Toolpath).

Fig. 12 shows the carbon emissions using HSD toolpath related with the material removed. The carbon emissions started with 0.013 kg-CO₂, removing 62360 mm³ of material until it reached a maximum of 0.014 kg-CO₂. Fig. 12 shows the time worked per tooth related to the material removed. This data shows the time to remove 467700 mm³.

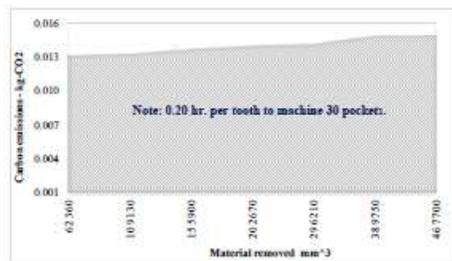


Fig. 12. Behavior in kg-CO₂ with material removed mm³. (HSD Toolpath).

Fig. 13 shows the carbon emissions based on the material removed using TS toolpath. The minimum carbon emission is 0.038 kg-CO₂, removing 62360 mm³. This value is bigger than 0.013 kg-CO₂, removing 93540 mm³ when compared with HSD toolpath. Also the Fig. 13 shows the time worked per tooth related to the material removed. It took 0.75 hr. to remove 467700 mm³ this value is lower in comparison with 0.2 hr. to remove the same volume with HSD toolpath.

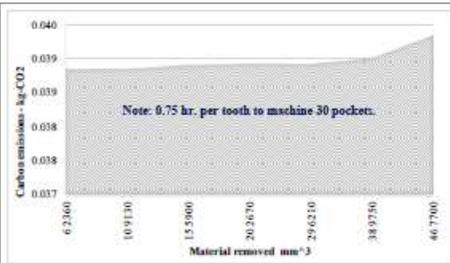


Fig. 13. Behavior in kg-CO₂, with material removed mm³. (TS Toolpath).

FLANK WEAR

Each cutting tool is measured at the end of the experiment, and the final results with the HSD toolpath strategy show that the maximum flank face wear and rake angle sections are 0.07 mm and 0.06 mm respectively. These values are reached within 0.823 hr. of workpiece engagement for the cutting tool (see Table 3). In the same way, the tool used with the TS toolpath strategy registered a maximum flank face wear of 0.06 mm and 0.13 mm at the rake angle respectively. These values were reached within 2.91 hr. of workpiece engagement with the cutting tool.

Table 3. Final flank wear per tooth

Tooth	0.823 Hr.		2.91 Hr.	
	HSD - Maximum V _r (mm)		TS - Maximum V _r (mm)	
	Flank Face	Rake Angle	Flank Face	Rake Angle
1	0.07	0.05	0.06	0.12
2	0.04	0.06	0.03	0.13
3	0.07	0.06	0.06	0.13
4	0.04	0.05	0.05	0.12

Fig. 14 a. (scale x40) shows the final flank wear with HSD toolpath strategy, where it is possible to notice the uniform flank wear along the entire length of the active cutting edge including the rake angle of the cutting tool for each flute (Fig. 14 b). Considering the fact that the HSD toolpath works with dynamic movements, where the cutting tool is directly set into the final depth, the flank wear is measured for each tooth along the entire length of the edge and a uniform flank wear is observed.

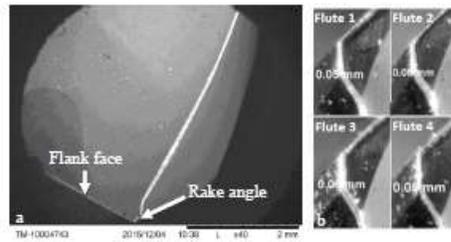


Fig. 14. Final flank wear for the HSD toolpath strategy.

On the other hand, with the TS toolpath strategy, the same measurements are made along the edge (see Fig. 15 a. scale x100), but the tool wear is not uniform in the rake angle, this behavior was found in the fourth flute (Fig. 15 b). This section registers as a maximum of 0.13 mm, which has the highest value of flank wear in the experiment. Fig. 8 shows that the flank wear has a built-up edge at the corner of the cutting tool, which is a typical characteristic in soft materials. As a result, the flank wear has increased in this particular section.

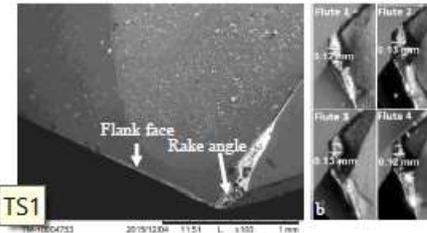


Fig. 15. Final flank wear for the TS toolpath strategy.

Fig. 16 shows the chip formation for the two toolpath strategies where the photo (a) shows a continuous chip with a small width formed with the HSD toolpath strategy, which is not a common characteristic in machining soft materials. Fig. 16 (b) shows a continuous chip with built-up material formed for the TS toolpath strategy, even when the cutting speed is high, based on the values suggested by the supplier. Fig. 15 shows a hint of plastic deformation in the rake angle, which corresponds to the chips from Fig. 16 (b).



Fig. 16. Chip formation (a) High speed; (b) True spiral.

CONCLUSIONS

A comparative analysis has been conducted in this study to evaluate the flank wear, energy consumption, and carbon emissions for two different pocketing toolpaths. Nowadays, traditional toolpath strategies are used in different machines and manufacturing enterprises, and most of time, this is done for the fear of excessive flank wear. However, according to the results in the study, it is found that the flank wear using the HSD toolpath strategy is uniform along the edge, and this factor impacts the forces and vibration [23]. On the other hand, the TS toolpath strategy has a uniform flank wear along the edge but in the chamfer corner a built-up edge and the largest flank wear are identified at this end.

The energy consumption is related to the power demand and cycle time, and in this case, the mean power demand is higher for the HSD toolpath strategy as compared to the TS toolpath strategy. However, the determining factor is the cycle time, and for the sake of comparison, in this experiment, it took 0.823 hr. to machine 30 pockets with the HSD toolpath strategy whereas it took 2.91 hr. to machine 30 pockets with the TS toolpath strategy. This affected the energy consumption as well, as the resulting energy consumption for the HSD toolpath strategy represents about 38% of the energy consumption for the TS toolpath strategy. Since carbon emissions are a function of the energy consumption, the CO₂ emissions registered a maximum of 0.039 kg-CO₂ for the TS toolpath strategy as compared to 0.014 kg-CO₂ for the HSD toolpath strategy. Finally, the comparison between the maximum rake angle wear reached with HSD and TS toolpath, showed that with TS toolpath is 54 % bigger. In spite of this, it is necessary to study different scenarios, for example different working engagement, different materials or different environments such as MQL or Dry conditions considering the cutting tool grade options from different suppliers.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank the support provided by Laboratory for Manufacturing and Sustainability (LMAS), Dennis Lee, Jesus Lopez and Scott McCormick from the Mechanical Engineering Machine shop from U.C. Berkeley and Raunak Bhinge (LMAS-U.C.Berkeley), Alejandro Yamamoto (Sandvik Coromant

México) who have provided helpful discussions through the research. The research reported in this paper was sponsored by the Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM-DGAPA-PAPIIT IT103012 and IT101816), Sandvik Coromant (México) and Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (beca: 288411 & apoyo: 355272) and Proyecto SEP-CONACYT-Ciencia Básica No. 83239).

REFERENCES

- [1] EIA; U.S. Energy Information Administration, "Annual Energy Outlook 2015," 2015.
- [2] R. Gao, L. Wang, R. Teti, D. Dornfeld, S. Kumara, M. Mori y M. Helu, «Cloud-enabled prognosis for manufacturing.» *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, pp. 749-772, 2015.
- [3] H. K. Miao, N. Sridharan y J. J. Shah, «CAD-CAM integration using machining features.» *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2010.
- [4] S. Pavanaskar, S. Pande, Y. Kwon, Z. Hu, A. Sheffer y S. McMainsa, «Energy-efficient vector field based toolpaths for CNC pocketmaching.» *Journal of Manufacturing Processes*, pp. 314-320, 2015.
- [5] K. A. Al-Ghamdi and A. Iqbal, "A sustainability comparison between conventional and high-speed machining," *Journal of Cleaner Production*, pp. 192-206, 2015.
- [6] S. Sui, Y. Li, W. Shao and P. Feng, "Tool path generation and optimization method for pocket flank milling of aircraft structural parts based on the constraints of cutting force and dynamic characteristics of machine tools," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015.
- [7] Chetan, S. Ghosh y P. V. Rao, «Application of sustainable techniques in metal cutting for enhanced machinability: a review.» *Journal of Cleaner Production*, pp. 17-34, 2015.
- [8] J. Wang, P. Wang y R. X. Gao, «Tool life prediction for sustainable manufacturing.» *Proceedings of the 11th Global Conference on Sustainable Manufacturing - Innovative Solutions*, 2013.
- [9] G. Campatelli, A. Scippa, L. Lorenzini and R. Sato, "Optimal Workpiece Orientation to Reduce the Energy Consumption of a Milling Process," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, vol. 2, no. 1, pp. 5-13, 2015.
- [10] A. Aramcharoen and P. T. Mativenga, "Critical factors in energy demand modelling for CNC milling and impact of toolpath strategy," *Journal of Cleaner Production*, pp. 63-74, 2014.
- [11] E. Ersvik and R. Khalid, "Milling in hardened steel a study of tool wear in conventional and dynamic milling," *Uppsala Universitet*, pp. 5-7, 2015.

- [12] C. Toh, "A study of the effects of cutter path strategies and orientations in milling," *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 346-356, 2004.
- [13] Sandvik Coromant, "Milling." 2016. [Online]. Available: http://www.livesteamhobby.be/sandvik/tech_d.pdf. [Accessed 04 3 2016].
- [14] C. K. Toh, «Surface Topography Analysis When High-Speed Rough Milling Hardened Steel.» *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 18, pp. 849-862, 2007.
- [15] M. Kiou, A. Ouahabi, M. Boudraa, R. Serra and A. Cheknane, "Detection process approach of tool wear in high speed milling." *Measurement*, pp. 1439-1446, 2010.
- [16] ISO 8688-2:1989 , "Tool life testing in milling -- Part 2: End milling." 2011. [Online]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:8688:-2:ed-1:vl:en>.
- [17] S. Subbiah, "Science of Machining," in *Handbook of Manufacturing Engineering and Technology*, Springer, London, 2015, pp. 788-810.
- [18] D. A. Stephenson and J. S. Agapiou, *Metal Cutting theory and practice*, Taylor & Francis, 2006.
- [19] G. Zhang, S. To and G. Xiao, "Novel tool wear monitoring method in ultra-precision raster milling using cutting chips," *Precision Engineering*, no. 38, pp. 555-560, 2014.
- [20] C. Camposeco-Negrete, J. d. D. Calderon Najera y J. C. Miranda-Valenzuela, «Optimization of cutting parameters to minimize energy consumption during turning of AISI 1018 steel at constant material removal rate using robust design.» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, p. 2015, 2015.
- [21] Rotating tools milling. "Sandvik Coromant," p. 232, 2012.
- [22] J. Jeswiet and S. Kara, "Carbon emissions and CES-TM in manufacturing," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 57, pp. 17-20, 2008.
- [23] N. Fang, P. S. Pai and S. Mosquea, "Effect of tool edge wear on the cutting forces and vibrations in high-speed finish machining of Inconel 718: an experimental study and wavelet transform analysis," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 65-77, 2011.
- [24] Kennametal, «Kenna Perfect.» *Milling catalog*, 2014.
- [25] J. H. Ko, "Machining Dynamics in Manufacturing," in *Handbook of Manufacturing Engineering and Technology*, London, Springer-Verlag, 2015, pp. 867-897.

Anexo F Productos y actividades realizadas en el proyecto

Escritos:

- I. G. M. Minquiz, V. Borja, M. Lopez-Parra, A. C. Ramírez-Reivich, M. A. Dominguez y A. Alcaide, A comparative study of CNC part programming addressing energy consumption and productivity, Berkeley, USA: Elsevier, 2014. ISSN 2212-8271, 2014.
- II. G. M. Minquiz, V. Borja, M. López-Parra y C. Ramírez R., «Diseño del proceso de maquinado considerando el consumo energetico: Caso de estudio de fresado,» TOMO I. Avances de la Ingeniería Mecánica en Diseño Mecánico - SOMIM, vol. 1, p. 7, 2014. ISBN 978-607-96746-1-8, 2014
- III. G. M. Minquiz, V. Borja, M. López-Parra, D. Dornfeld y P. Flores, «A Comparative Analysis Between High Speed Dynamic and Traditional Pocketing Toolpaths in Precision Milling Machines,» ASME 2016 11th International Manufacturing Science and Engineering Conference, vol. 3, p. 8, 2016. ISBN: 978-0-7918-4991-0, 2016.
- IV. “Modeling of power consumption for machining operations” – Enviado a revision.

Colaboración con empresas y universidades:

- I. Empresa: RAMSA Maquinados S.A. de C.V.
Dirección: Texololoc s/n, San Diego Metepec, Tlaxcala, C.P. 90110, Tlax. Tel: (246)468-0197.
- II. Empresa: Sandvik Coromant – Productivity center.
Dirección: México, México, Tlalnepantla, 54060, Gustavo Baz No. 352
- III. Universidad: University of California, Berkeley – LMAS, laboratorio de Manufactura y sustentabilidad.
Dirección: 110 Sproul Hall # 5800 Berkeley, CA 94720-5800. USA. 2015.
- IV. Universidad: Instituto Tecnológico de Puebla - Laboratorio de Manufactura Avanzada y Departamento de Ingeniería Mecánica.
Dirección: Avenida Tecnológico 420, Maravillas, 72220 Puebla, Pue.