



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA: “EXPERIMENTACIÓN DE LAS ESTRATEGIAS DE
MECANIZADO ADAPTATIVAS EN EL FRESADO A ALTA VELOCIDAD EN
ALUMINIO PRODAX”**

AUTOR: INFANTE CASTILLO, FRANCISCO JAVIER

DIRECTOR: ING. CULQUI CULQUI, BORYS HERNÁN Msc.

SANGOLQUÍ

2019



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y

MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**EXPERIMENTACIÓN DE LAS ESTRATEGIAS DE MECANIZADO ADAPTATIVAS EN EL FRESADO A ALTA VELOCIDAD EN ALUMINIO PRODAX**” fue realizado por el señor **INFANTE CASTILLO FRANCISCO JAVIER** el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 4 de Julio del 2019

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Borys Culqui', written over a horizontal line.

Ing. Borys Culqui

C.C. 1710436427



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORIA DE RESPONSABILIDAD

Yo, *INFANTE CASTILLO FRANCISCO JAVIER*, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: Título **“EXPERIMENTACIÓN DE LAS ESTRATEGIAS DE MECANIZADO ADAPTATIVAS EN EL FRESADO A ALTA VELOCIDAD EN ALUMINIO PRODAX”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas. Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 4 de Julio del 2019

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Francisco Infante', written over a horizontal line.

Francisco Javier Infante Castillo

C.C.: 1722253091



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA
AUTORIZACIÓN**

Yo, **INFANTE CASTILLO FRANCISCOS JAVIER** autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: Título: **“EXPERIMENTACIÓN DE LAS ESTRATEGIAS DE MECANIZADO ADAPTATIVAS EN EL FREŠADO A ALTA VELOCIDAD EN ALUMINIO PRODAX”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 4 de Julio del 2019

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Francisco Javier Infante Castillo', written over a horizontal line.

Francisco Javier Infante Castillo

C.C.: 1722253091

DEDICATORIA

En este presente trabajo quiero dedicar al apoyo de mis padres por su constante apoyo quienes han sido fieles testigos del esfuerzo a lo largo de la carrera, a mi abuelito Bolivar que se encuentra en la gracia del señor y ha estado todas las etapas de mi vida. A mi tío Pablo que me brindó su apoyo desde el inicio de la carrera aun que se encuentra viviendo en otro país, me ha apoyado semestre a semestre. A todos mis familiares que aportaron con su granito de arena para cumplir esta meta.

Francisco Javier Infante Castillo

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la vida por permitirme este logro, a mis padres, a mis hermanas igual que aportaron con su granito de arena, a mis amigos que siempre estuvieron en las buenas y malas, pendientes dándome sus palabras de aliento a lo largo de toda la carrera. Agradezco a la Universidad De las Fuerzas Armadas Espe y al departamento de ciencias de energía y mecánica con el conocimiento a lo largo de toda la carrera. Agradezco al Ing. Borys Culqui por su ayuda incondicional y desinteresada a la cual estimo bastante, por sus consejos y experiencia. A Don Car que me ha brindado su ayuda en los laboratorios a lo largo de la carrera. A todos mis compañeros de la carrera con quienes compartí tantas experiencias.

Francisco Javier Infante Castillo

INDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN.....	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO	v
INDICE DE CONTENIDOS.....	vi
RESUMEN	xvii
ABSTRACT	xviii
CAPÍTULO 1	1
1. GENERALIDADES.....	1
1.1. ANTECEDENTES.....	1
1.2. HIPÓTESIS	3
1.3. OBJETIVOS	3
1.3.1. Objetivo General.	3
1.3.2. Objetivos Específicos.....	3
1.4. ALCANCE	4
1.5. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	4
CAPÍTULO 2	6
2. ESTADO DE CONOCIMIENTO.....	6

2.1.	MATERIALES PARA MECANIZADO.....	6
2.1.1.	Aluminio.....	6
2.1.2.	Aleaciones de aluminio, Aluminio 7075.....	7
2.1.3.	Características del Aluminio Produx.....	7
2.1.4.	Velocidad de corte y avance para el aluminio Produx.....	11
2.1.5.	Aplicaciones del aluminio prodax.....	12
2.2.	FRESADO.....	13
2.2.1.	Factores que influyen en el mecanizado.....	14
2.2.2.	Operaciones de fresado.....	16
2.2.3.	Estudio de las herramientas de corte del fresado.....	18
2.2.4.	Normas de seguridad para el fresado.....	22
2.3.	PARÁMETROS DE MECANIZADO EN EL FRESADO.....	23
2.3.1.	Avance por diente (fz).....	24
2.3.2.	Velocidad Avance (Vf).....	24
2.3.3.	Velocidad de Corte (Vc).....	25
2.3.4.	Taza de remoción de material Q.....	25
2.3.5.	Potencia de corte.....	25
2.8.1.	Profundidad de corte.....	26
2.4.	MECANIZADO A ALTA VELOCIDAD (HSM).....	26
2.4.1.	Características del mecanizado a alta velocidad.....	28
2.5.	MECANIZADO CONVENCIONAL.....	30
2.5.1.	Características.....	31
2.5.2.	Estrategias CAM.....	31

2.6.	MECANIZADO TROCOIDAL	33
2.6.1.	Características de mecanizado trocoidal (estrategia adaptativa).....	35
2.6.2.	Estrategia adaptativa.	36
2.6.3.	Trayectoria Trocoidal.....	37
2.6.4.	Entradas de herramientas.	37
2.6.5.	Diferencias entre mecanizado adaptativo frente al mecanizado trocoidal.	39
2.7.	METODOLOGÍA TAGUCHI	40
2.7.1.	Ventajas y limitaciones del método Taguchi	43
2.7.2.	Aplicación del método Taguchi	43
CAPÍTULO III		45
3.	DESARROLLO DEL EXPERIMENTO	45
3.1.	EQUIPO DE TRABAJO.....	45
3.1.1.	Maquinaria.	45
3.1.2.	Equipo de medición de temperatura.....	46
3.2.	HERRAMIENTA DE CORTE	47
3.2.1.	Tipo de herramienta	47
3.3.	PIEZA DE TRABAJO	48
3.4.	PARÁMETROS DE CORTE	48
3.5.	METODOLOGÍA TAGUCHI	49
3.6.	EJEMPLO DE CÁLCULO.....	51
3.7.	ANÁLISIS DE POTENCIAS.....	53
3.8.	MODELO CAD	55

3.9.	ENSAYO CON LA ESTRATEGIA DE MECANIZADO CONVENCIONAL.....	56
3.9.1.	Descripción de la estrategia de mecanizado convencional.	56
3.9.2.	Trayectoria de mecanizado convencional	57
3.9.3.	Simulación CAM.....	60
3.10.	ENSAYO CON LA ESTRATEGIA DE MECANIZADO ADAPTATIVO	62
3.10.1.	Estrategia de mecanizado adaptativo (EMA).....	62
3.10.2.	Trayectoria de mecanizado adaptativo	62
3.10.3.	Simulación CAM.....	63
3.11.	MECANIZADO DE PROBETAS	66
3.12.	ANÁLISIS ANOVA.....	68
3.13.1.	Suma de cuadrados.....	68
3.13.2.	Varianza.	69
3.13.3.	Error de la varianza.	69
3.13.4.	Prueba F.....	69
3.13.5.	Prueba de hipótesis.....	69
3.13.6.	Ejemplo de cálculo.....	70
CAPITULO IV:		73
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	73
4.1.	RESULTADOS DEL EXPERIMENTO.....	73
4.2.	RESULTADO DE TIEMPO DE MECANIZADO POR ESTRATEGIA.....	74
4.2.1.	Estrategia de mecanizado convencional (EMC)	74
4.2.2.	Estrategia de mecanizado adaptativa (EMA)	76

4.2.3.	Comparación de tiempo de mecanizado de las estrategias (EMC -EMA).....	78
4.3.	RESULTADO DE TEMPERATURA POR ESTRATEGIA	81
4.2.1.	Mecanizado Convencional	81
4.2.2.	Mecanizado Adaptativo.....	82
4.2.3.	Comparación de temperatura de las estrategias (EMC -EMA).....	83
4.4.	RESULTADOS CON LA METODOLOGÍA ANOVA PARA EL TIEMPO.....	83
4.5.	RESULTADOS CON LA METODOLOGÍA ANOVA PARA LA TEMPERATURA	89
4.6.	RESULTADOS DE LAS ESTRATEGIAS	94
4.7.	ENSAYOS DE CONFIRMACIÓN.....	95
CAPITULO V:		96
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	96
5.1.	CONCLUSIONES	96
5.2.	RECOMENDACIONES	98
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Propiedades físicas del aluminio Prodax</i>	8
Tabla 2 <i>Propiedades mecánicas</i>	8
Tabla 3 <i>Velocidades y avances en planeado en aleaciones ferrosas y no ferrosas con HSS</i> ...11	11
Tabla 4 <i>Velocidades y avances slab milling en aleaciones ferrosas y no ferrosas con HSS</i> ..11	11
Tabla 5 <i>Velocidades y avances end milling en aleaciones ferrosas y no ferrosas con HSS</i>11	11
Tabla 6 <i>Aplicación del aluminio prodax</i>	12
Tabla 7 <i>Características generales operación de los materiales para herramientas de corte</i> ..19	19
Tabla 8 <i>Mecanizado a alta velocidad en función de la velocidad de corte</i>	28
Tabla 9 <i>Características del HSM</i>	29
Tabla 10 <i>Características del HSM y su aplicación</i>	29
Tabla 11 <i>Diferencias entre la estrategia convencional frente a la estrategia adaptativa</i>	39
Tabla 12 <i>Arreglo ortogonal</i>	44
Tabla 13 <i>Características técnicas</i>	45
Tabla 14 <i>Especificaciones técnicas del pirómetro</i>	46
Tabla 15 <i>Parámetros de corte del fabricante</i>	48
Tabla 16 <i>Parámetros de corte del experimento</i>	49
Tabla 17 <i>Material y herramienta de corte del experimento</i>	50
Tabla 18 <i>Parámetros y niveles del experimento</i>	50
Tabla 19 <i>Arreglo ortogonal L32(2¹, 4²)</i>	51
Tabla 20 <i>Consumo de potencia en el mecanizado convencional y adaptativo</i>	54
Tabla 21 <i>Área de corte</i>	55
Tabla 22 <i>Parámetros del mecanizado convencional</i>	56

Tabla 23 <i>Comparación de trayectorias en el mecanizado convencional</i>	58
Tabla 24 <i>Parámetros de la simulación</i>	62
Tabla 25 <i>Parámetros del mecanizado trocoidal</i>	62
Tabla 26 <i>Parámetros de simulación de MCA</i>	66
Tabla 27 <i>Parámetros de corte para el mecanizado</i>	67
Tabla 28 <i>Terminología Anova</i>	68
Tabla 29 <i>Datos del experimento</i>	73
Tabla 30 <i>Cuadro de análisis del error (EMC)</i>	75
Tabla 31 <i>Cuadro de análisis del error simulado (EMA)</i>	77
Tabla 32 <i>Porcentaje de reducción de tiempo de mecanizado</i>	78
Tabla 33 <i>Resumen del análisis de varianza para el tiempo</i>	84
Tabla 34 <i>Tabla de respuesta para las medias del tiempo</i>	85
Tabla 35 <i>Parámetros óptimos influyentes en el tiempo</i>	85
Tabla 36 <i>Valores predictivos y confirmación con la metodología Taguchi</i>	88
Tabla 37 <i>Resumen del análisis de varianza</i>	89
Tabla 38 <i>Tabla de respuesta para las medias de la temperatura</i>	90
Tabla 39 <i>Parámetros óptimos influyentes en la temperatura</i>	91
Tabla 40 <i>Valores predictivos y confirmación con la metodología Taguchi</i>	94
Tabla 41 <i>Resultados de estrategias</i>	95
Tabla 42 <i>Ensayos confirmatorios</i>	95

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1</i> Fuerza de corte F_z a diferentes velocidades de corte.....	9
<i>Figura 2 a)</i> Avance por diente vs fuerza b) Formas de viruta, continua y discontinua.....	10
<i>Figura 3</i> Curva esfuerzo deformación para distintos tipos de aluminio.....	10
<i>Figura 4</i> Operación de fresado	13
<i>Figura 5</i> Fresado HSM en aluminio Prodax	14
<i>Figura 6</i> Operación de perfilado.....	17
<i>Figura 7</i> Operación de ranurado	17
<i>Figura 8</i> Distintas operaciones de fresado.....	18
<i>Figura 9</i> Dureza de diversos materiales de corte.....	19
<i>Figura 10</i> Fresas periféricas	20
<i>Figura 11</i> Fresas frontales	20
<i>Figura 12</i> Fresas de acabado.....	21
<i>Figura 13</i> Nomenclatura de la fresa.....	21
<i>Figura 14</i> Nomenclatura del filo de la fresa	22
<i>Figura 15</i> Características de la fresa por el número de dientes	22
<i>Figura 16</i> Parámetros básicos.....	23
<i>Figura 17</i> Velocidad de avance, avance por diente	24
<i>Figura 18</i> Profundidad de corte axial y radial	26
<i>Figura 19</i> Temperatura de formación de la viruta vs Velocidad de corte	27
<i>Figura 20</i> Concentración de temperatura EMC.....	30
<i>Figura 21</i> Mecanizado convencional (traditional milling)	31
<i>Figura 22</i> Estrategia pocket, niveles de profundidades	32

Figura 23 a) Contour, b) Parallel, c) Radial, d) Horizontal, e) Spiral	33
Figura 24 Estudio de mecanizado trocoidal	34
Figura 25 Mecanizado trocoidal	34
Figura 26 Mecanizado adaptativo	35
Figura 27 Estrategia limpieza adaptativa	36
Figura 28 Trayectoria trocoidal	37
Figura 29 Ángulo de barrido de entrada (arco, 90° respectivamente).....	38
Figura 30 Radio de entrada de la herramienta horizontal y vertical.....	38
Figura 31 Radio de salida de la herramienta horizontal y vertical	38
Figura 32 Tipos de trayectorias de entradas a) penetración, b) zigzag c) perfil, d) hélice.....	39
Figura 33 Diferencia entre el área de desbaste entre el EMC y EMA	40
Figura 34 Método Taguchi	42
Figura 35 VMC 3016 Fadal.....	45
Figura 36 Pirómetro.....	46
Figura 37 Fresa de HSS de 4 dientes.....	47
Figura 38 pieza de trabajo	48
Figura 39 Velocidad de corte vs potencia	54
Figura 40 Comparación de potencias	55
Figura 41 Modelo CAD.....	56
Figura 42 Trayectorias de mecanizado.....	57
Figura 43 Trayectorias de mecanizado Follow periphery	58
Figura 44 Trayectoria A, B, C, D, E, F, G	59
Figura 45 Trayectoria vs tiempo de simulación	59

Figura 46 Trayectoria follow periphery	60
Figura 47 Selección del plano de la estrategia floor wall.....	60
Figura 48 Profundidades y ancho de corte de la estrategia convencional	61
Figura 49 Generación de trayectoria	61
Figura 50 Simulación de la estrategia floor wall.....	61
Figura 51 Trayectoria adaptativa.....	63
Figura 52 Trayectoria de mecanizado adaptativo.....	63
Figura 53 Selección de estrategia adaptive milling	64
Figura 54 Selección de plano de desbaste inferior y geometría	64
Figura 55 Selección del plano de la estrategia adaptativa.....	64
Figura 56 Ancho de corte de la estrategia adaptativa.....	65
Figura 57 Generación de la trayectoria	65
Figura 58 Simulación de EMA.....	65
Figura 59 Configuración en el mecanizado.....	66
Figura 60 Velocidad de avance vs tiempo en el mecanizado convencional.....	74
Figura 61 Velocidad de avance vs Temperatura en el mecanizado convencional	75
Figura 62 Velocidad de avance vs tiempo con estrategia adaptativa	76
Figura 63 Velocidad de avance vs Temperatura en el mecanizado adaptativo	77
Figura 64 Comparación de mecanizados tiempos reales, convencional vs adaptativo	79
Figura 65 Reducción de tiempo.....	80
Figura 66 Velocidad de corte vs Temperatura en el mecanizado convencional	81
Figura 67 Velocidad de corte vs Temperatura con estrategia adaptativo.....	82
Figura 68 Comparación de temperatura	83

Figura 69 Gráfica de distribución de probabilidad F crítico	84
Figura 70 Principales efectos de los factores respecto al tiempo	86
Figura 71 Interacción respecto al tiempo	86
Figura 72 Interacción respecto al tiempo	87
Figura 73 Gráfica de distribución de probabilidad F crítico	90
Figura 74 Principales efectos de los factores respecto a la temperatura	91
Figura 75 Interacción respecto a la temperatura.....	92
Figura 76 Interacción respecto a la temperatura.....	93
Figura 77 Ensayos confirmatorios y tiempo de ciclo	95

RESUMEN

La constante innovación en procesos de mecanizado, para reducir tiempos operativos con gran calidad en los productos, alargando la vida útil de la herramienta es de gran interés en la industria. Sin embargo, existe información limitada relacionado a los parámetros de mecanizado en aluminio 7075-T6 el cual tiene excelentes propiedades mecánicas y de costo accesible, por su aplicación en moldes y matrices frente a otros materiales. En el presente proyecto, se estudia la forma de mejorar los tiempos de mecanizado, a través de la comparación entre estrategias convencionales de desbaste y estrategias adaptativas que se encuentra ya en algunas versiones de software CAM. Los experimentos se realizaron en un centro de mecanizado de 4 ejes (VMC 3016 Fadal), con un control Fanuc 18iMB. Se empleó la metodología experimental Taguchi L32($2^1 4^2$) para la combinación de los parámetros de mecanizado y las estrategias de desbaste, por lo tanto, se realizaron 16 ensayos para cada estrategia. El mecanizado se realizó sin refrigerante. Los ensayos se realizaron con distintos parámetros de mecanizado en base a 4 niveles, conforme a la curva planteada por el Dr. Salomon para HSM, los ensayos están en el rango de 400 a 700 m/min, con avance por diente entre 0.05 a 0.2 mm/diente. Se analizó los tiempos de desbaste en las dos estrategias empleando un análisis estadístico ANOVA que determinó que la estrategia adaptive milling presenta un menor tiempo de desbaste frente a la estrategia convencional con una reducción del 82.3% el tiempo de desbaste entre ambas estrategias.

Palabras claves:

- **ESTRATEGIA ADATATIVA**
- **ESTRATEGIA CONVENCIONAL**
- **MECANIZADO A ALTA VELOCIDAD HSM**

ABSTRACT

The constant innovation in the processes of mechanized, to reduce the times of operation with big quality in the products, lengthening the useful life of the tool is of big interest in the industry. However, there is limited information on the parameters of machining in aluminum 7075-T6 which has excellent mechanical properties and affordable cost compared to other materials and is applied in molds and dies. In the present project, the way to improve the machining times has been studied, through the comparison between the strategies of game strategies and the adaptive strategies found in some versions of CAM software. The experiments were carried out in a 4-axis machining center (VMC 3016 fadal), with a Fanuc 18iMB control. The experimental methodology Taguchi $L_{32}(2^{14})$ was used for the combination of machining parameters and roughing strategies, therefore, 16 trials were carried out for each strategy. The machining was done without refrigerant. They were made with machining parameters with four cutting speeds according to the curve proposed by Dr. Salomon for HSM, the tests are in the range of 400 to 700 m/min, with advance per tooth between 0.05 to 0.2 mm / tooth. Analyze the analysis times in the two strategies that use an ANOVA statistical analysis that determined that the adaptive strategy has a shorter grinding time compared to a conventional pocket strategy with a 82.3% reduction in the grinding time between both strategies.

KEYWORDS:

- **ADATATIVE STRATEGY**
- **CONVENTIONAL STRATEGY**
- **HIGH SPEED MACHINING (HSM)**

CAPÍTULO 1

1. GENERALIDADES

1.1. Antecedentes

Entre las principales incógnitas en el mecanizado, es arrancar grandes cantidades de material, con buenos acabados superficiales, alargando la vida útil de la herramienta, al igual reducir tiempos de mecanizado para incrementar las ganancias del producto final.

Existen problemas en el proceso de arranque de viruta causado por tiempos muertos durante el mecanizado generado por trayectorias sin que desbaste material, imperfecciones superficiales ocasionada por alteraciones en los filos de las herramientas de corte, viruta soldada en el filo de la herramienta causado por velocidad de corte baja. Por lo que se requiere el estudio en los procesos de mecanizado.

La estrategia adaptativa es aquel que aprovecha los programas computacionales CAD, CAM, para desbastar grandes cantidades de material, empleando la altura de la herramienta con una gran profundidad axial, pero con una pequeña profundidad radial de corte, además usa trayectorias trocoidales para evitar que la herramienta llegue a fracturarse.

La estrategia adaptativa se emplea en la elaboración de piezas complejas, dadas por las variaciones específicas que hace una diferente pieza de otra. Se han elaborado algunos artículos científicos actualmente enfocados en el mecanizado de alabes de turbina. Un claro ejemplo nos presenta Mark Albert en el estudio “Mecanizado adaptativo mejora la productividad de un robot”, se indica a un robot usando el mecanizado adaptativo, para desbastar y pulir los alabes de una turbina de un motor de reacción. Se efectúa el archivo CAD y al igual que el mecanizado CAM de forma eficiente para lograr desbastar y pulir superficies complejas, garantizando un buen acabado superficial y asegurando las tolerancias superficiales. (Mark Albert, 2015),

De igual manera la estrategia adaptativa se ha empleado en la fabricación de repuestos de aeronaves, el ingeniero Claus Bremer en su estudio “mecanizado adaptativo para la fabricación y reparación eficiente de CFRP”, indica que la tecnología de control numérico computarizado no es suficiente para mecanizar geometrías complejas, y por ende la geometría real se debe capturar mediante escaneos y mediciones antes de aplicar un mecanizado adaptativo, en la fabricación de repuestos para aeronaves utilizando CFRP (plásticos reforzados con fibra de carbono). (Claus Bremer, 2012).

En el estudio de estrategia adaptativa elaborado por Changqing Liu “Un enfoque de mecanizado adaptativo basado en la inspección durante el proceso de los estados intermedios de mecanizado para piezas complejas a gran escala y paredes delgadas”, se indica que durante el proceso de mecanizado de piezas de paredes delgadas de grandes dimensiones para los aviones, es necesario ajustar las trayectorias de la herramienta con un enfoque de mecanizado adaptativo para corregir las deformaciones de la pieza, basado en la previa inspección de piezas estructurales, para un posterior mecanizado adaptativo y así garantizar la tolerancia dimensional y geométrica. (Changqing Liu, 2016)

En un estudio realizado por Abram Pelta de mecanizado trocoidal propone un ahorro de tiempo de mecanizado quitando la trayectoria recortada, para remplazarle con movimientos lineales de modo que se efectúe un movimiento rápido fuera de la pieza de trabajo. En el estudio analiza la fuerza de corte bajo 3 condiciones con velocidades de corte de (25, 50 m/min), avances por diente de (0.1, 0.2, 0.3 mm/diente) y profundidades de corte de (2, 5, 8 mm) generando un aumento del 40% en la componente F_y del 40% bajo las condiciones: Velocidad de corte de 50 m/min, avance por diente de 0.3 mm/diente, profundidad de 5 mm (Abram Pleta, 2016)

En la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE pretende innovar en un estudio de mecanizado a alta velocidad empleando el mecanizado adaptativo, por ende, la problemática se centra en estudiar en las distintas estrategias de mecanizado convencionales y adaptativas, empleando software CAD - CAM, porque con este análisis se quiere determinar si el mecanizado adaptativo reduce el tiempo en el proceso de desbaste con los parámetros de mecanizado más adecuados en el aluminio 7075 – T6 (prodax).

1.2. Hipótesis

El mecanizado adaptativo reduce el tiempo en el proceso de desbaste frente al mecanizado convencional, con las adecuadas variables del proceso de desbaste en el fresado, en el aluminio AA 7075-T6, mediante la obtención y análisis de datos experimentales en la máquina VMC 3016 FADAL.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General.

Experimentar las estrategias de mecanizado adaptativas en el fresado a alta velocidad en aluminio Prodax

1.3.2. Objetivos Específicos.

- Especificar las estrategias de mecanizado convencionales y adaptativas
- Definir los parámetros de corte y trayectorias de mecanizado en las estrategias adaptativas y convencionales, en la máquina VMC 3016 FADAL
- Modelar un diseño (CAD) y realizar pruebas de mecanizado (CAM), a ser aplicado al equipo de VMC 3016 FADAL.

- Ejecutar los ensayos de fresado a fin de obtener tiempos de mecanizado en operaciones con estrategias de mecanizado convencional y adaptativas.
- Tabular y analizar los resultados experimentales y de simulación.

1.4. Alcance

El proyecto experimentación de las estrategias de mecanizado adaptativas en el fresado a alta velocidad en la máquina VMC 3016 FADAL, se desarrollará utilizando un centro de mecanizado fresadora CNC marca FADAL VMC 3016, con control: Fanuc 18i MB, de 4 ejes con un área de trabajo de 30” en X, 16” en Y, 20” en Z, con velocidad del husillo de 75 – 10 000 RPM y una potencia de 15 HP.

Se usó el software CAD y CAM para realizar el diseño de la pieza a mecanizar en 3D, la generación de la trayectoria, generación del código G en ambas estrategias de mecanizado.

Para el mecanizado, los parámetros de corte, velocidad, avance, se seleccionarán según los recomendados por el fabricante y bibliografía adquirida. La profundidad de corte radial (A_e) en el mecanizado convencional será del 64% del diámetro de la herramienta mientras que en el mecanizado adaptativo se empleará una profundidad de corte con toda la altura de la herramienta y un ancho de corte (A_e) al 10% del diámetro de la herramienta. Las mediciones a realizar es el tiempo de simulación, tiempo real, realizados en el centro de mecanizado comparando el mecanizado convencional frente a las estrategias adaptativa a alta velocidad.

Finalmente se compararán los resultados obtenidos de la manera convencional con este nuevo modo de mecanizado para obtener reducción de tiempos de mecanizado.

1.5. Justificación e Importancia

Actualmente la mayoría de empresas que se dedican a la fabricación, buscan mejorar los procesos basados en acortar los tiempos, aumentar la vida útil de la herramienta para mejorar los

procesos de producción. Las piezas cada vez son más complejas, y para seguir más competitivos las empresas pretenden aprovechar al máximo las nuevas tecnologías. Dentro de la industria ecuatoriana el uso de máquinas de control numérico es utilizado en el sector privado, para reducir tiempos de mecanizado, en lotes de producción moderados, flexibles para cambiar la configuración de los productos.

El estudio teórico en CAD (Diseño asistido por computador) /CAM (Manufactura asistida por computador), sistemas flexibles y procesos de manufactura, se debe complementar con la aplicación práctica para la elaboración de productos de difícil maquinado para lograr una buena exactitud y tolerancia de los elementos mecánicos.

En este proyecto se estudia la estrategia óptima de mecanizado adaptativo en el proceso de fresado, comparándolo con el mecanizado convencional donde este proceso arranca el material en pequeñas cantidades frente al mecanizado adaptativo empleando toda la altura de la herramienta. Se empleará el material aluminio Produx, que es un material utilizado en moldes de inyección de plástico, matrices. Con el uso del mecanizado adaptativo se evitarán los recorridos que son vacíos, permitiendo obtener un mejoramiento de los tiempos de material removido, reduciendo el desgaste de la herramienta a diferencia del mecanizado convencional que existen trayectorias de la herramienta sin que esta esté trabajando.

El fresado adaptativo desbasta grandes cantidades de material aprovechando la altura de la herramienta debido a que se logra mantener constante la carga radial en la herramienta por ende se puede usar toda la altura logrando extender la vida útil, mientras se reduce el tiempo de ejecución en la máquina, produciendo una carga más ligera en la herramienta, reduciendo los costos de herramientas. Con este proyecto se comprobará si se puede mejorar el tiempo de mecanizado en un 40% más rápido frente al mecanizado convencional como expresa HSM autodesk 2018.

CAPÍTULO 2

2. ESTADO DE CONOCIMIENTO

2.1. Materiales para mecanizado

2.1.1. Aluminio.

El aluminio es uno de los elementos más comunes en la tierra después del oxígeno y del silicio. El aluminio es un metal que se puede maquinar con facilidad, además de poseer una elevada conductividad eléctrica y térmica, a bajas temperaturas no presenta una transición de dúctil a frágil.

De las propiedades físicas importantes del aluminio tiene una resistencia a la oxidación y corrosión además de poseer un comportamiento no magnético. Por su punto de fusión bajo, el aluminio no funciona bien a elevadas temperaturas (Askeland, 2004).

El aluminio posee una estructura cúbica centrada en las caras, la resistencia mecánica del aluminio se logra por acritud y aleación, pero estos procesos disminuyen en la resistencia de la corrosión del material, los principales componentes de aleación es el cobre, magnesio, silicio, manganeso y zinc. (Callister, 1995). Actualmente aleaciones de aluminio de otros metales como el magnesio y titanio suelen usarse en los transportes debido al ahorro de combustible.

El aluminio y sus aleaciones es ampliamente empleado en la industria se produce desde contenedores y empaques (papel aluminio y latas), edificios, aplicaciones eléctricas como conductor eléctrico económico, aplicaciones en el transporte (automóviles, aviones, autobuses, ferrocarriles, naves aeroespaciales). El avión Boeing 747 los componentes estructurales de soporte de carga el 82% es fabricado con aluminio, al igual que el Boeing 777 el 70%. (Kalpakjian S. , 2008).

2.1.2. Aleaciones de aluminio, Aluminio 7075.

Las aleaciones de aluminio se clasifican en aleaciones para forja y aleaciones para fundición, dependiendo de su método de fabricación. Las cuales las aleaciones para forja se les da forma por deformación plástica. Las aleaciones de aluminio tienen a mejorar su resistencia y su dureza, la propiedad de las aleaciones del aluminio varía según el tipo de aleante y del tipo de trato del material. (Askeland, 2004).

Las aleaciones de aluminio disponibles como productos forjados o en bruto que se dan en diferentes formas tenemos: laminado, extrusión, embutido, trefilado. Esta aleación en su gran mayoría se puede soldar, maquinar con facilidad. (Kalpakjian S. , 2008)

Las aleaciones forjadas dependiendo de su formación por deformación plástica presenta diferente micro estructura de las aleaciones fundidas. Los dos grupos de aleaciones de aluminio por forja son: aleaciones de aluminio no tratables térmicamente y las aleaciones de aluminio tratables térmicamente.

El aluminio 7075 es una típica aleación por forja, su micro estructura está constituida por una matriz de solución sólida de aluminio, la designación de 7xxx de zinc, es de resistencia moderada a muy elevada y térmicamente tratable. (Kalpakjian S. , 2008)

2.1.3. Características del Aluminio Prodax.

El componente principal del aluminio Prodax es el zinc, este aleante proporciona al aluminio un aumento en la dureza, resistencia, este material posee un tratamiento térmico T6 que se caracteriza por ser solubilizado y después envejecido para aumentar su resistencia.

El aluminio prodax es una aleación de alta resistencia, laminado en caliente, sometido a una operación de estiramiento en frío para el máximo alivio de tensiones. El aluminio prodax es de excelente mecanizado, de bajo peso, con alta conductividad térmica, alta resistencia, buena

estabilidad y resistente a la corrosión. El aluminio prodax es empleado en la industria de moldes y matrices. Entre las aplicaciones tenemos el moldeo por soplado, en vacío, de espuma, de inyección de termoplásticos, de goma además de placas contendedoras y de apoyo. En la tabla 1 se muestra las propiedades físicas del aluminio prodax. (Ivan Bohman, 2018).

Tabla 1

Propiedades físicas del aluminio Prodax

Propiedades Físicas		
	Unidades	
Densidad	kg/m ³	2830
	lbs/pulg ³	0.102
Módulo de elasticidad	N/mm ²	71500
	Psi	10,3 x 10 ⁶
Coefficiente de expansión térmica	20 °C a 100 °C	23 x 10 ⁻⁶
	68 °F a 212°F	12,8 x 10 ⁻⁶
Conductibilidad térmica	W/m °C	165
	Btu pulg/pie °F	1144
Calor específico	J/Kg °C	890
	Btu/lb °F	0.2

Fuente: (Ivan Bohman, 2018)

El aluminio prodax es de fácil maquinado, precio, es un buen conductor de la energía eléctrica y por su peso ligero que hace ideal para diversas aplicaciones las propiedades mecánicas se indica en la tabla 2.

Tabla 2

Propiedades mecánicas

Propiedades mecánicas		
Esfuerzo último de tensión	MPa	570
Dureza	HB	78
Límite de elasticidad	MPa	505
Resistencia última a la fractura	MPa	303
Módulo de elasticidad	GPa	10.4

Fuente: (ASM International, ASM Handbook, Properties and selection: Nonferrous alloys and special - purpose materials)

El estudio de R. Khettabi, efectúa una comparación entre diferentes aleaciones de aluminio, la cual aumenta la velocidad de corte identificando una disminución de la fuerza F_z , donde si bien las fuerzas de corte en aleaciones de aluminio son bajas, a elevadas velocidades de corte en el 7075-T6 disminuyen aún más en relación a otras aleaciones del aluminio (R. Khettabi, 2011) pero el avance determina el grosor de la viruta que es un factor importante en la fuerza de corte, como se indica en la figura 1 y 2 b)

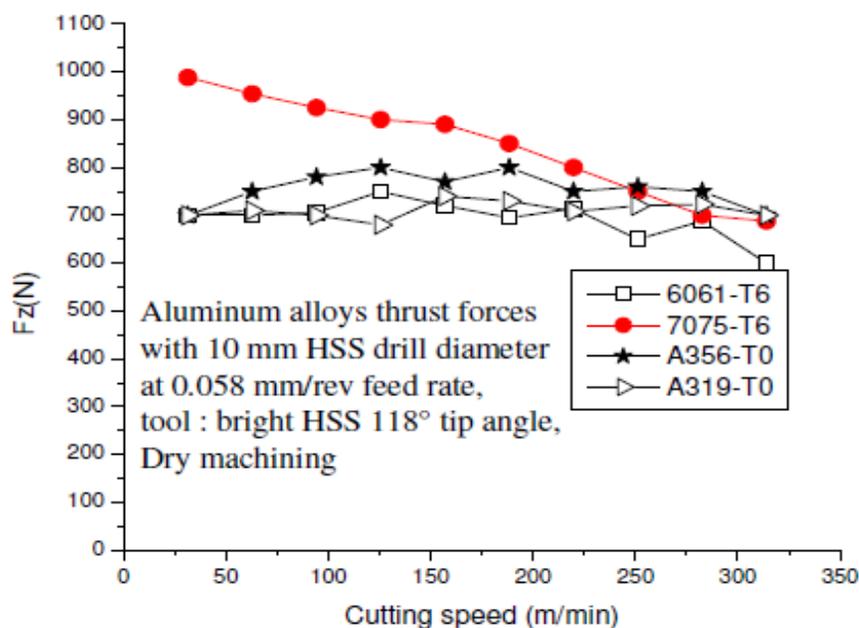


Figura 1 Fuerza de corte F_z a diferentes velocidades de corte

Fuente: (R. Khettabi, 2011)

Así mismo la fuerza de corte aumenta con la velocidad de alimentación a diferentes velocidades de corte con las aleaciones de aluminio probadas como se indica en la figura 2 a) donde el aluminio 7075 –T6 muestra un aumento lineal en relación al avance por revolución frente a la fuerza F_z

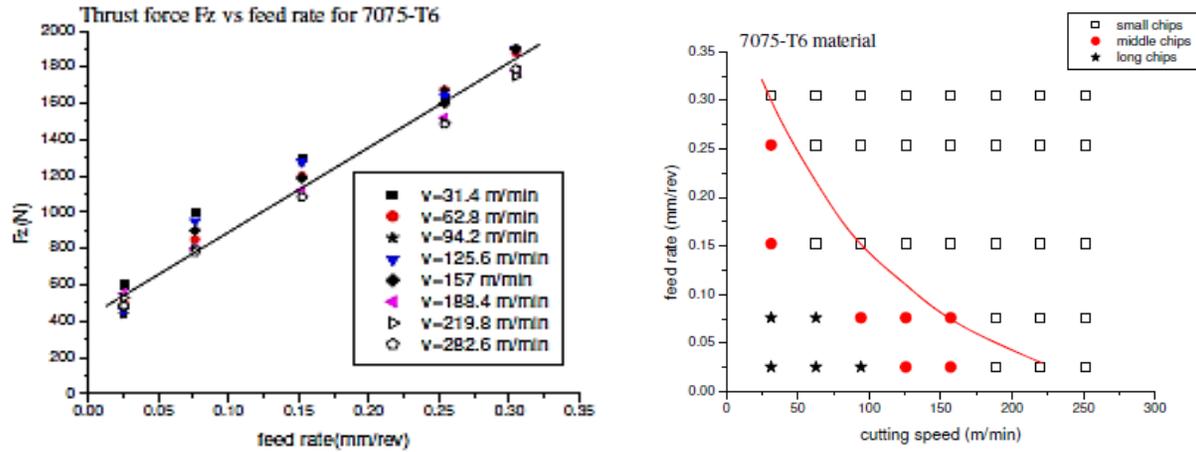


Figura 2 a) Avance por diente vs fuerza b) Formas de viruta, continua y discontinua.
Fuente: (R. Khettabi, 2011)

En este estudio enfatiza las diferentes formas de la viruta en el aluminio 7075 –T6, en la figura 2 se observa el límite entre la viruta continua y la discontinua. Donde a partir de velocidades de corte bajas y avances por revolución bajos nos encontraremos con viruta continua, este límite proporcionará una ayuda para determinar la velocidad de corte apropiado para este material. (R. Khettabi, 2011). La curva esfuerzo deformación para el material al 7075-T6, indica la figura 3.

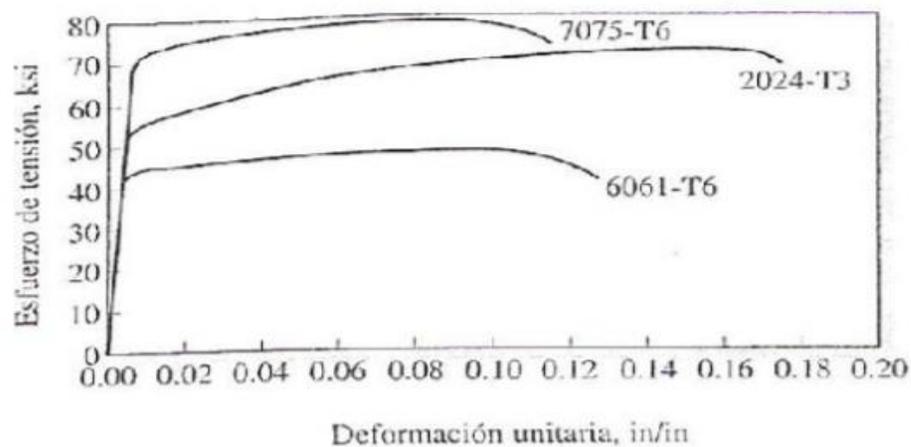


Figura 3 Curva esfuerzo deformación para distintos tipos de aluminio
Fuente: (Roy R Craig, 2003)

2.1.4. Velocidad de corte y avance para el aluminio Produx.

La velocidad de corte es un parámetro del mecanizado que afecta el tiempo de vida útil en la herramienta. Una velocidad de corte elevada puede ocasionar un desgaste del filo de la herramienta. Los parámetros de corte deben ser analizados minuciosamente para cada tipo de mecanizado y herramienta, en la tabla 3 indican parámetros adecuados en el proceso de planeado para el aluminio 7075, la tabla 4 y 5 indica parámetros adecuados en el proceso de desbaste y acabados.

Tabla 3

Velocidades y avances en planeado en aleaciones ferrosas y no ferrosas con HSS

Material	Dureza	Profundidad [mm]	Herramienta de acero rápido		
			Velocidad de corte [m/min]	Avance por diente [mm]	Material de la herramienta ISO (AISI)
Aluminio 7075	30-80 HB	1	365	0.25	S4, S2 (M2, M7)
		4	245	0.4	S4, S2 (M2, M7)
		8	200	0.5	S4, S2 (M2, M7)

Fuente: (ASM International, 1995)

Tabla 4

Velocidades y avances slab milling en aleaciones ferrosas y no ferrosas con HSS

Material	Dureza	Profundidad [mm]	Herramienta de acero rápido		
			Velocidad de corte [m/min]	Avance por diente [mm]	Material de la herramienta ISO (AISI)
Aluminio 7075	30-80 HB	1	365	0.3	S4, S2 (M2, M7)
		4	320	0.36	S4, S2 (M2, M7)
		8	260	0.4	S4, S2 (M2, M7)

Fuente: (ASM International, 1995)

Tabla 5

Velocidades y avances end milling en aleaciones ferrosas y no ferrosas con HSS

Material	Dureza	Profundidad de corte radial [mm]	Herramienta de acero rápido				Material de la herramienta ISO (AISI)	
			Velocidad de corte [m/min]	Avance mm/diente, respecto al diámetro de la herramienta (mm/diente)				
				10 mm	12 mm	18 mm		25–50 mm
Aluminio 7075	30-80 HB	0.5	245	0.075	0.102	0.13	0.18	S4, S5, S2 (M2, M3, M7)
		1.5	185	0.102	0.15	0.2	0.25	S4, S5, S2 (M2, M3, M7)
		Diam/2	150	0.075	0.102	0.15	0.20	S4, S5, S2 (M2, M3, M7)
		Diam/4	120	0.05	0.075	0.13	0.15	S4, S5, S2 (M2, M3, M7)

Fuente: (ASM International, 1995)

2.1.5. Aplicaciones del aluminio prodax.

El aluminio prodax es ideal para moldes de series que no sea expuesto a presiones altas o plásticos abrasivos, de igual manera es ideal para prototipos. Genera una disminución en el costo de la herramienta siendo ideal para las aplicaciones que se muestra en la tabla 6. (Ivan Bohman, 2018)

Tabla 6

Aplicación del aluminio prodax

Área de aplicación	Prototipo	Series Cortas	Series Medianas	Series largas
Moldes de soplado	X	X	X	X
Formado al vacío	X	X	X	X
Moldeado de espuma	X	X	X	X
Moldes	X	X	X	X
Moldes de inyección de termoplásticos	X	X	X	
Moldeo de goma	X	X		

Fuente: (Ivan Bohman, 2018)

2.2. Fresado

El fresado es una operación de arranque de viruta el cual emplea una herramienta rotativa multifilar llamada fresa. El material a desbastar se ubica en el banco de trabajo la cual tiene 3 a 5 grados de libertad, se mueve relativamente respecto a la fresa. La máquina que emplea este trabajo se llama fresadora.



Figura 4 Operación de fresado

Fuente: (Servicios Cohego, s.f.)

Según Groover el fresado es una operación de mecanizado donde el material está expuesto a una herramienta cilíndrica multifilar donde el eje de rotación de la herramienta es perpendicular a la dirección de avance. (Groover M. , 1997).

El fresado emplea movimientos programados en la pieza de trabajo, en la trayectoria que requiere el operador, actualmente el software de fresado ha incrementado las formas de superficie de la pieza de trabajo. (Sandvik, 2017). Entre las ventajas principales del presado son:

- ✓ Buen acabado y precisión.
- ✓ Apto para cualquier geometría.
- ✓ Flexibilidad.
- ✓ Emplea distintos materiales.



Figura 5 Fresado HSM en aluminio Prodadx

2.2.1. Factores que influyen en el mecanizado.

Dentro del proceso del mecanizado el operador de la máquina debe estar consciente de las variables que influyen en el proceso de mecanizado, entre los cuales tenemos las variables dependientes y variables independientes. (Kalpakjian S. , 2008). Entre las variables independientes esenciales tenemos las siguientes:

a) Material y recubrimientos de la herramienta

Los materiales de la herramienta de corte empleados en el mecanizado son: acero a alta velocidad (HSS), carburos, cerámicos. La selección del material de la herramienta debe la correcta en función del material que se desea mecanizar y al proceso de mecanizado.

b) Forma, acabado y filo de herramienta de corte

Cada herramienta de corte está diseñada para una operación específica y esta es influyente por su geometría en los procesos de mecanizado como también lo son los parámetros de corte.

c) Material y condiciones de la pieza de trabajo

La selección del material para la herramienta debe ser el adecuado según la aplicación de diseño o requerida. El material debe contener la composición y propiedades mecánicas establecidas.

d) Avance, velocidad y profundidad de corte

Para cada operación de mecanizado es vital la selección de los parámetros de mecanizado como son: avance por diente, profundidad de corte, velocidad de corte y trayectoria. Estos factores están interrelacionados y tienen afectación sobre la pieza de trabajo en la viruta, acabado, tiempo de operación.

e) Fluidos de corte

El fluido de corte además de refrigerar a la herramienta y al material de trabajo otorga menor desgaste en la herramienta de corte, por ende, su correcta elección crea una armonía entre la herramienta de corte y la pieza de trabajo, obteniendo un alargue en la herramienta de corte.

Entre las variables dependientes dependen del proceso que es producido por los cambios de las variables independientes entre las cuales tenemos:

f) Viruta

Los distintos tipos de viruta que se producen en el mecanizado es la continua (producto de un buen acabado superficial y con fuerzas estables de corte), discontinua (puede afectar el acabado superficial, deseable para facilitar la disposición de la viruta, fuerzas fluctuantes de corte), viruta de borde acumulado (Acabado deficiente, el borde acumulado puede proteger las superficies de la herramienta).

g) Fuerza de corte y energía de disipación durante el corte.

Durante el mecanizado se generan fuerzas de corte y consumo de energía, generados el contacto de la herramienta con el material a mecanizar, el cambio de estos parámetros de mecanizado, varían indirectamente las fuerzas de corte, pero el operador no controla estas fuerzas, solo los parámetros que los generan

h) Temperatura de la herramienta de corte, pieza y viruta

El contacto de la herramienta de corte con el material a mecanizar genera una transferencia de calor produciendo un incremento en la temperatura de la herramienta y el material, generando deformación en el material. La temperatura influye en la vida de la herramienta, además de daños térmicos en la pieza de trabajo.

i) Desgaste y fractura de la herramienta de corte

El desgaste de los filos de la herramienta de corte influye considerablemente en el acabado de la pieza y las dimensiones. Por el desgaste en la herramienta existe elevación de temperatura reduciendo su resistencia. Los filos deteriorados incrementan las fuerzas de corte y a su vez las deformaciones en la pieza. Los operadores no controlan el desgaste de la herramienta, pero lo pueden minimizar con los correctos parámetros de mecanizado y empleando fluidos de corte.

2.2.2. Operaciones de fresado.

Por la búsqueda de minimizar los tiempos de fabricación de piezas, ha generado al fresado como un mecanizado amplio para la fabricación, desde piezas pequeñas hasta altos lotes de producción, empleando distintos procedimientos.

El fresado emplea diversos tipos de materiales, al igual que diversas geometrías y herramientas de trabajo, siendo este un método que permite mecanizar con distintos parámetros de mecanizado y operaciones que beneficia al mecanizado en sus acabados y tolerancias finales. (Sandvik, 2017). La variedad de los procesos se puede identificar en la Figura 6, para la elaboración de canales, agujeros, superficies, entre otros.



Figura 6 Operación de perfilado

Fuente: (Sandvik, 2017)

Las distintas operaciones de fresado permiten configurar a la máquina con distintas herramientas, cada herramienta es específica para cada operación de mecanizado. Se indica en la figura 7, para una operación de perfilado se puede emplear plaquitas redondas o como en la figura 8, para la operación de ranuras se emplea fresas de metal duro o fresas con plaquitas

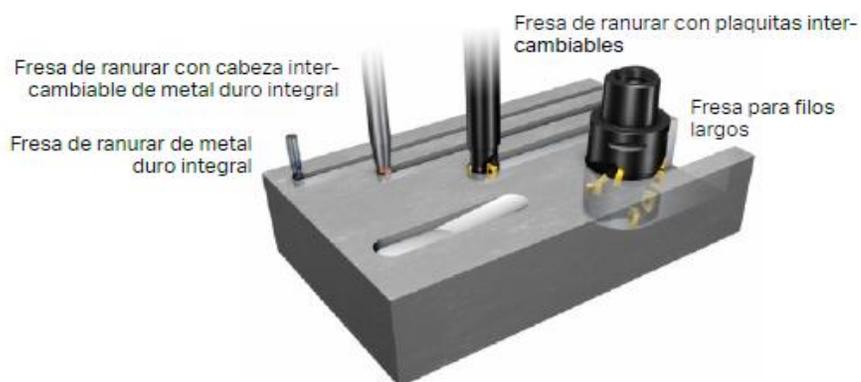


Figura 7 Operación de ranurado

Fuente: (Sandvik, 2017)

Los materiales de HSS al igual que plaquitas intercambiables de carburo permite la versatilidad del mecanizado además de ampliar la productividad a la hora de realizar piezas complejas y de gran acabado superficial en las tolerancias requeridas por el operador



Figura 8 Distintas operaciones de fresado
Fuente: (Sandvik, 2017)

2.2.3. Estudio de las herramientas de corte del fresado.

Una fresa está determinada por la operación a realizar, el diámetro, la forma, el material, los dientes y el modo de sujeción en la máquina.

Existe una gran variedad de fresas por su operación o material a utilizar. Se puede clasificar por su geometría en periféricas, frontales o de acabado. (Dormer, 2018)

2.2.3.1. Material de herramientas de corte.

El material que se utilizará en las herramientas de corte en una aplicación en particular, es un factor importante entre las operaciones de maquinado. La herramienta de corte se somete a rozamiento a lo largo del proceso de desbaste al igual que elevadas temperaturas, esfuerzos de contacto. Por ende, el material a utilizar en la herramienta debe mantener sus propiedades mecánicas de dureza, tenacidad, resistencia al impacto, resistencia al desgaste para que la herramienta no sufra deformaciones plásticas para que se pueda prolongar su vida útil y mantenga su filo. En la figura 9 se indica la dureza de diversos materiales para herramientas de corte. (Kalpakjian S. , 2008).

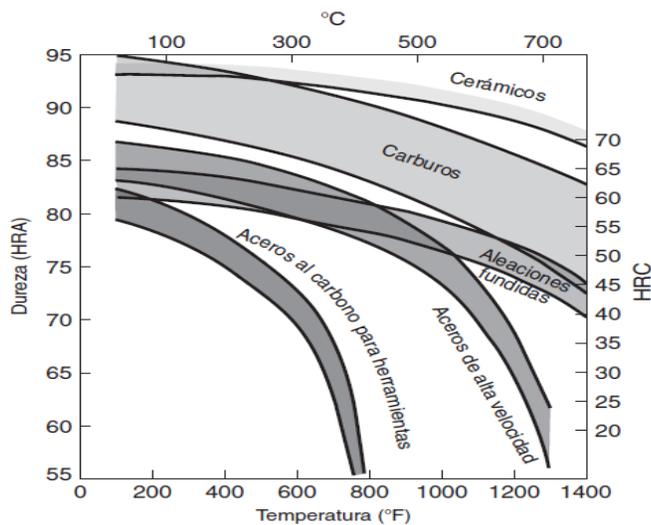


Figura 9 Dureza de diversos materiales de corte.

Fuente: (Kalpakjian, 2008)

Se debe conocer las propiedades de las herramientas de corte para una operación en particular en un material específico. En la tabla 7 se indica las características generales de los materiales para las herramientas de corte donde el acero de alta velocidad es más tenaz, resistente al impacto, pero de dureza en caliente limitada. (Kalpakjian, 2008).

Tabla 7

Características generales de operación de los materiales para herramientas de corte

Materiales de herramientas de corte	Características	Modos de desgaste o falla	Limitaciones
Aceros de alta velocidad (HSS)	Alta tenacidad, resistencia a la fractura, amplio intervalo de cortes de desbaste y acabado	Desgaste del flanco, craterización	Baja resistencia en caliente, capacidad limitada de endurecimiento, limitada resistencia al desgaste
Carburos no recubiertos	Alta dureza para un limpio intervalo de temperatura, tenacidad, resistencia al desgaste	Desgaste del flanco, craterización	No se puede usar a bajas velocidades debido al soldado en frío de las virutas y el microastillado

CONTIÚA



Carburos recubiertos	Mejor resistencia al desgaste que los carburos no recubiertos, mejores propiedades térmicas y de fricción	Desgaste del flanco, craterización	No se puede usar a bajas velocidades debido al soldado en frío de las virutas y el microastillado
Cerámicos	Alta dureza a temperaturas elevadas, alta resistencia al desgaste abrasivo	Muescado de línea de profundidad de corte, microastillado, fractura gruesa	Baja resistencia mecánica y baja resistencia a la fatiga termomecánica

Fuente: (Kalpakjian, 2008)

2.2.3.2. Tipos de fresas

Fresas periféricas

La característica principal es el plano de corte paralelo al eje de rotación de la herramienta. En la figura 11 se indica los tipos de fresas periféricas como: cilíndricas, circulares, de mango, angulares, generadoras, de perfil constante



Figura 10 Fresas periféricas

Fuente: (ESHAPEOKO, 2013)

Fresas Frontales

La característica principal es el plano de corte perpendicular a la herramienta, el montaje de estas herramientas es empleando una porta herramienta en la figura 11 se indica de izquierda a derecha varios tipos de fresas frontales: plato de planear, bicónica, ala de mosca.



Figura 11 Fresas frontales

Fuente: (ESHAPEOKO, 2013)

Fresas de acabado

Las fresas de acabado rotan sobre un eje vertical, pueden ser inclinadas respecto a la pieza de trabajo presentan características muy finas, con radios hasta 1mm. Los dientes están en la periferia de la fresa y la parte frontal. En la figura 12 se indica de izquierda a derecha varios tipos de fresas de acabado: con encaste, radiales, con radio en la esquina, mini fresas.



Figura 12 Fresas de acabado

Fuente: (ESHAPEOKO, 2013)

2.2.3.3. Geometría de la fresa

La geometría característica de la fresa se indica en la figura 13, siendo A) mango, B) ángulo de la hélice, C) labio, D) diámetro, E) longitud de corte, F) longitud total

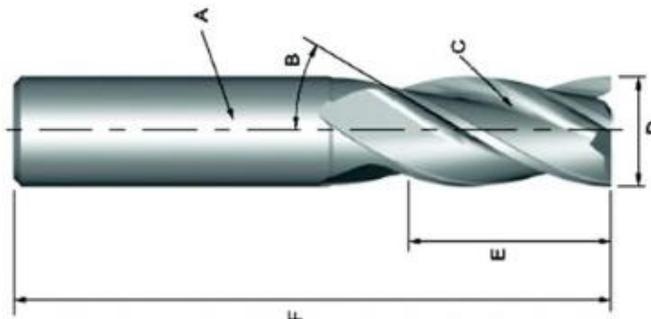


Figura 13 Nomenclatura de la fresa

Fuente: (Dormer, 2018)

La geometría del filo de la herramienta se indica en la figura 14 siendo 1) rebaje del fondo de la punta, 2) rebaje del ángulo primario, 3) rebaje del ángulo secundario, 4) punta del filo, 5) filo de corte, 6) ángulo de corte, 7) superficie de la tolerancia primaria, 8) superficie de la tolerancia secundaria, 9) cara inferior de corte.

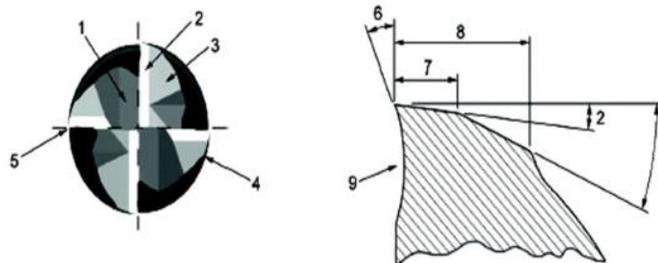


Figura 14 Nomenclatura del filo de la fresa

Fuente: (Dormer, 2018)

El número de dientes o labios debe ser determinado por el material, dimensiones de la pieza de trabajo al igual que las condiciones de fresado, en la figura 15 se indica como varía la fuerza y el tamaño de la viruta en función de los dientes de la fresa. En una fresa de 2 dientes se presenta un fácil manejo de la viruta, baja calidad de acabado superficial, baja rigidez por la pequeña área de la sección. En una fresa de 4 dientes se presenta una rigidez alta, mejor acabado superficial, empleada para contorno, fresado lateral, presenta pequeño espacio para la viruta.

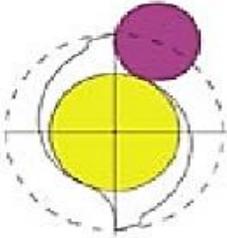
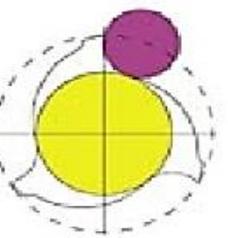
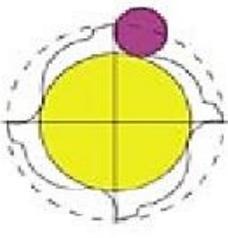
	2 Labios	3 Labios	4 Labios(o de varios labios)
			
Fuerza Flectora	Baja		Alta
Espacio para la viruta	Grande		Pequeño

Figura 15 Características de la fresa por el número de dientes

Fuente: (Dormer, 2018)

2.2.4. Normas de seguridad para el fresado

El operario está expuesto a riesgos al momento de utilizar la máquina, entre los cuales tenemos los riesgos de carácter mecánico, entre los cuales tenemos el riesgo de contacto, atrapamiento,

proyección de partículas al momento de efectuar el mecanizado, corte, impacto, aplastamiento, golpes contra objetos y caídas al mismo nivel. Lo cual el operario debe estar consciente de los riesgos al que está expuesto. La normativa de seguridad correspondiente es la UNE-EN 12417:2002 +A2:2009 a “Máquinas herramientas. Seguridad. Centros de mecanizado” y la normativa UNE-EN 13128:2002+A2:2009 correspondiente a “Máquinas herramienta. Seguridad. Fresadoras”.

Para el uso de la maquinaria es necesario emplear el equipo de protección personal que corresponde: mandil, gafas de protección, ropa de trabajo ajustada con las mangas recogidas, botas de seguridad para evitar resbalones al igual de caídas de objetos pesados.

La zona de trabajo debe estar limpio a la hora de empezar el mecanizado, la viruta de trabajo nunca se debe retirar con la mano, se debe emplear un cepillo o brocha. No se debe llevar anillos, relojes, bufandas o cualquier prenda que se pueda colgar.

2.3. Parámetros de mecanizado en el fresado

Los parámetros de corte en el fresado para el estudio son: Velocidad de corte, avance por diente, velocidad de avance, profundidad de pasada.

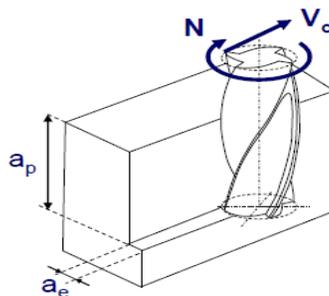


Figura 16 Parámetros básicos
Fuente: (Vasco, 2002)

En la figura 16 se muestra los parámetros básicos de las operaciones del fresado, como es la velocidad de corte (V_c), velocidad del husillo (N), profundidad axial (a_p), profundidad radial (a_e)

2.3.1. Avance por diente (f_z).

Se define el avance por diente a la distancia que recorre en el sentido y dirección de la velocidad de avance en el tiempo que un diente ha tardado en girar una vuelta completa.

$$f_z = \frac{V_f}{Z * N} \quad (\text{Ec. 1}) \quad (\text{Sandvik, 2017})$$

Donde:

f_z : Avance por diente (mm/diente)

Z: Número de dientes

N: velocidad del husillo, rpm (revoluciones por min)

2.3.2. Velocidad Avance (V_f).

Se define como la velocidad lineal del centro de la herramienta de mecanizado. Está dado por [mm/min], en la figura 17 se puede notar el avance por diente en el mecanizado.

$$V_f = f_z * Z * N \quad (\text{Ec. 2}) \quad (\text{Sandvik, 2017})$$

Donde:

V_f : Velocidad de avance (mm/min)

Z: Número de dientes

N: velocidad del husillo, rpm (revoluciones por min)

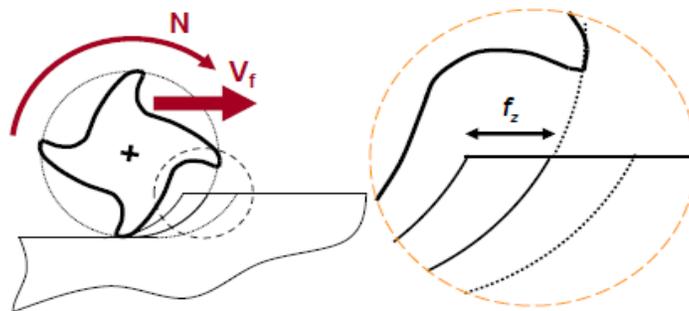


Figura 17 Velocidad de avance, avance por diente

Fuente: (Vasco, 2002)

2.3.3. Velocidad de Corte (Vc).

Se define como la velocidad tangencial de la periferia de la herramienta de corte, la velocidad de corte se expresa en pies por min o metros por min. Es un factor principal que influye en el tiempo de mecanizado. (Stive F Krar, 2002)

$$V_C = \frac{\pi * D * N}{1000} \quad (\text{Ec. 3}) \text{ (Sandvik, 2017)}$$

Donde: Vc: Velocidad de corte (m/min)

N: velocidad del husillo, rpm (revoluciones por min)

D: diámetro de la fresa (mm)

2.3.4. Taza de remoción de material Q.

La taza de remoción de material es expresada en centímetros cúbicos por minuto, sirve para obtener la potencia de corte de la máquina y está en función del ancho de corte, la pasada y el avance

$$Q = \frac{a_p * a_e * V_f}{1000} \quad (\text{Ec. 4}) \text{ (Sandvik, 2017)}$$

Donde: Q: Taza de remoción de material (m³/min)

ap: profundidad de corte axial (revoluciones por min)

ae: profundidad de corte radial (ancho de corte)(mm)

2.3.5. Potencia de corte.

Es la potencia necesaria que emplea la máquina que debe usar para ejecutar la acción de corte. Está expresada en función del ancho de corte, la profundidad de corte axial, la velocidad de avance y la fuerza específica de corte del material

$$PC = \frac{a_p * a_e * V_f * K_c}{60 * 10^6} [kW] \quad (\text{Ec. 5}) \text{ (Sandvik, 2017)}$$

Donde: Q : Taza de remoción de material (m^3/min)

a_p : profundidad de corte axial (revoluciones por min)

a_e : profundidad de corte radial (ancho de corte)(mm)

2.8.1. Profundidad de corte.

La profundidad de corte axial (a_p) es la cantidad profundidad que arranca el material de la pieza a mecanizar en una pasada de la herramienta, expresada en mm.

La profundidad de corte radial (a_e) es la anchura sobre la pieza a mecanizar que actúa el diámetro de la herramienta como se indica en la figura 18. (Sandvik, 2017). Estos valores dependen del mecanizado y la herramienta a utilizar, se los puede encontrar en catálogos de herramientas.

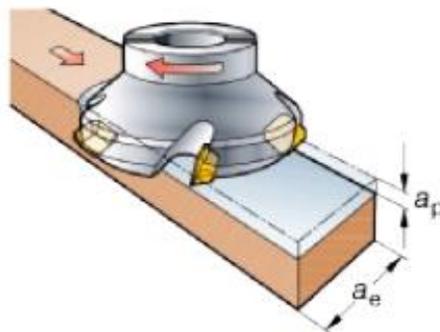


Figura 18 Profundidad de corte axial y radial

Fuente: (Sandvik, 2017)

2.4. Mecanizado a alta velocidad (HSM)

El mecanizado de alta velocidad emplea una tecnología de arranque de viruta donde se obtiene una pieza de forma precisa al retirar el material de varias capas. Este mecanizado ha ganado su espacio en la industria con los nuevos avances tecnológicos, el mecanizado de alta velocidad se ha convertido en un proceso rentable para la fabricación de piezas complejas, con una alta precisión.

EL HSM (High Speed Machining) emplea grandes velocidades en el husillo, grandes velocidades de avance otorgando gran calidad a la pieza. Pero varios autores consideran que la

utilización del mecanizado a alta velocidad (HSM) se debe usar a velocidades moderadas. Según Lucjan Przybylski en su artículo el mecanizado a alta velocidad no es solo alta velocidad de corte, al contrario que debe considerarse los procesos de todas las operaciones que involucren el HSM donde tienen una metodología y producción muy específico en el equipo. (Lucjan Przybylski, 2002).

El HSM es una tecnología moderna en comparación con el mecanizado convencional pretende aumentar la eficiencia, calidad de las piezas, precisión y disminuir los tiempos de mecanizado. La primera definición de HSM fue propuesta por el autor Carl Salomon en 1931, el asume el siguiente concepto, a una cierta velocidad de corte que es de 5 a 10 veces superior a la velocidad de corte convencional, la temperatura sobre el filo de la herramienta empieza a disminuir. (Guillermo Castro, 2008). En materiales no ferrosos como el aluminio y sus aleaciones se aprecia que defiende la temperatura a altas velocidades de mecanizado a comparación de materiales como el acero que a altas velocidades de mecanizado la temperatura es elevada sobre los 1200°C.

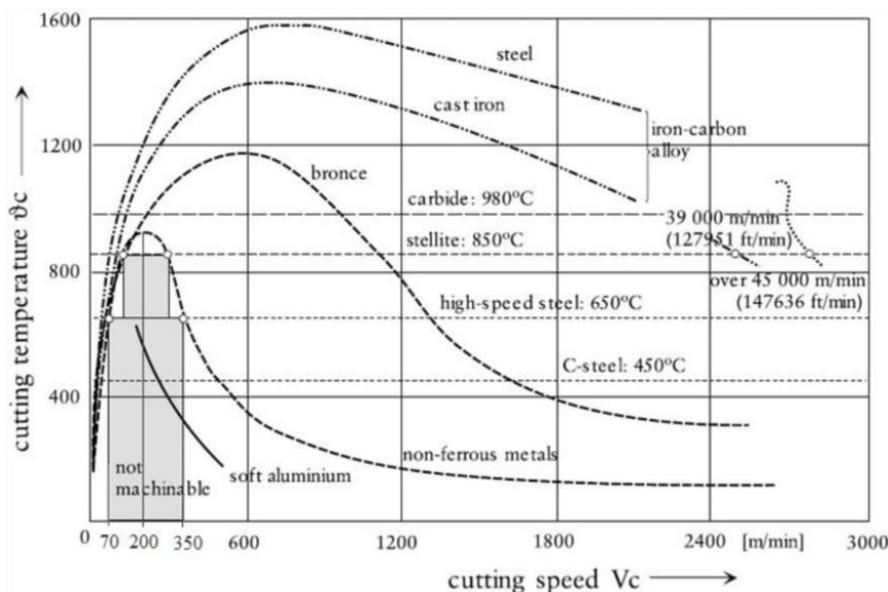


Figura 19 Temperatura de formación de la viruta vs Velocidad de corte
Fuente: (Krahmer, 2002)

Una definición de mecanizado a alta velocidad nos propone Andris Logins como un mecanizado a velocidades de corte y velocidades de alimentación considerablemente altas en comparación a los métodos convencionales. El HSM brinda alta tasa de eliminación de material, bajo tiempo de corte, precisión en piezas complejas. La alta velocidad de rotación impone nuevas restricciones en las trayectorias de la herramienta, las esquinas requieren desaceleración y acelerar para alcanzar de nuevo la velocidad máxima deseada. (Logins, 2014).

Autores como A, Douglas brinda una diferencia entre los tipos de mecanizado a alta velocidad como se indica en la tabla 8 en función de la velocidad de corte.

Tabla 8

Mecanizado a alta velocidad en función de la velocidad de corte

Tipo de Mecanizado	Abreviatura	Velocidad de corte (m/min)
Low speed machining	LSM	1 y 600
High speed machining	HSM	600 y 1800
Very High speed machining	VHSM	1800 y 18000
Ultra high speed machining	UHSM	18000 y 30000

Fuente: (A Douglas, 1995)

2.4.1. Características del mecanizado a alta velocidad.

Dentro de las características principales del mecanizado a alta velocidad que se requiere es la planificación cuidadosa de todas las operaciones de mecanizado, para efectuar una mejor orientación del ángulo de mecanizado en relación a la superficie, de igual manera el modo de ingreso de la herramienta con la velocidad y trayectoria adecuada. Una apreciación de las características del HSM nos presenta la tabla 9 nos indica la ponderación de las características siendo 5 el valor más alto

Tabla 9
Características del HSM

Característica	1	2	3	4	5
Disminución de las fuerzas de corte				X	
Precisión en los contornos					X
Mejor calidad superficial					X
Tolerancias dimensionales precisas					X
Reducción del tiempo de pulido				X	
Aumento de la vida útil de la herramienta				X	

Las ventajas que ofrece el mecanizado a alta velocidad son:

- ✓ Mayor calidad superficial y repetición
- ✓ Tolerancias dimensionales más precisas
- ✓ Reducción del tiempo de mecanizado
- ✓ Aumento de la vida útil de la herramienta
- ✓ Producción baja a media
- ✓ Geometrías complejas
- ✓ Mayor velocidad de corte
- ✓ Mecanizado de paredes delgadas

La tabla 10 que fue realizada por Schultz muestran las características del HSM respecto a las áreas de aplicación que estas tienen.

Tabla 10
Características del HSM y su aplicación

	Alta velocidad	Acabado superficial	Baja fuerza de corte	Transporte de calor por la viruta
Área de aplicación	Metales ligeros	Mecanizado de precisión	Mecanizado de piezas de paredes finas	Ausencia de la carga térmica en la pieza

CONTIÚA 

	Acero de hierro colado	Piezas complejas	Talleres herramientas y matrices	Ausencia de distorsión
Ejemplo	Aeronáutica	Mecánica fina	Aeronáutica, automóviles, aeroespacial	Piezas de precisión

Fuente: (Ibarz, 2010)

2.5. Mecanizado convencional

El mecanizado convencional por arranque de viruta considera dos tipos de operaciones el desbaste y el acabado. En el desbaste la herramienta realiza varias pasadas, e influye la velocidad de corte, el avance y la profundidad de pasada. En el acabado contempla altas velocidades de corte, con bajos avances y bajas profundidades de pasada. En la figura 20 se indica como la herramienta de corte presentará una concentración de temperatura en la pasada de corte.

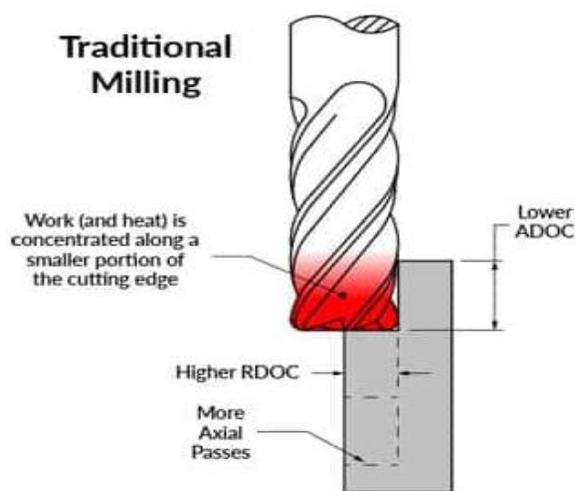


Figura 20 Concentración de temperatura EMC

Fuente: (Heavy Performance Company, 2017)

En el mecanizado convencional se requieren mayor número de pasadas, aumentando concentraciones de calor en la herramienta, incrementando la velocidad de desgaste de la herramienta debido a una mayor profundidad radial y una profundidad de pasada axial baja. El desgaste de la herramienta no es uniforme e incrementa el riesgo de fractura, generando un mal

acabado en la pieza de trabajo. En el mecanizado convencional requiere un ancho de corte elevado con bajas profundidades de corte.

2.5.1. Características

Las principales características del mecanizado convencional son:

- ✓ Desbaste en varios niveles Z, requiriendo un número considerable de pasadas
- ✓ Concentraciones de calor en la parte inferior de la herramienta
- ✓ Emplea grandes profundidades axiales realizando varias pasadas
- ✓ No se tiene una viruta constante
- ✓ Desgaste de la herramienta elevado
- ✓ Ancho de corte elevado



Figura 21 Mecanizado convencional (traditional milling)

Fuente: (Field Machining Services, 2018)

2.5.2. Estrategias CAM

2.5.2.1. Estrategia de desbaste

Pocket

Esta estrategia de desbaste emplea una serie de capas en la altura de la pieza a mecanizar, es adecuado para el mecanizado a alta velocidad, mantiene el fresado concurrente en cada operación.

Esta estrategia emplea entradas suaves como zigzag, hélice entre los niveles para evitar una penetración brusca en el material a mecanizar

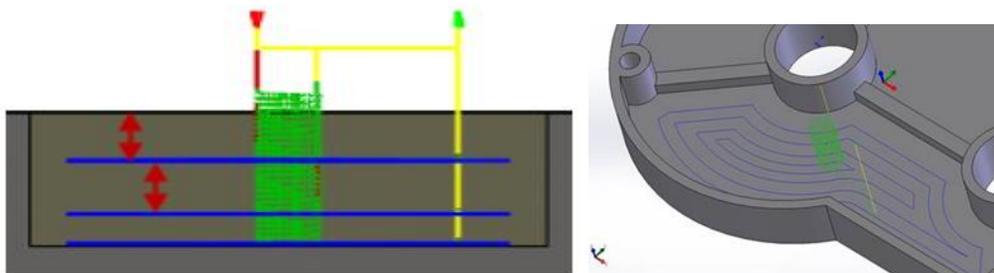


Figura 22 Estrategia pocket, niveles de profundidades
Fuente: (Autodesk HSM, 2019)

2.5.2.2. Estrategias de acabado

Contour. - Es una estrategia que crea rutas con alturas constantes en la pieza a mecanizar para dar pasadas de semi acabado y acabado en áreas verticales de una pieza. Con el uso de la estrategia contorno se puede emplear para pasadas de acabado o de semi acabado, La estrategia contorno ha especificado un ángulo de inclinación de 30° a 90° . Las rutas de corte se pueden suavizar en las esquinas donde tienen radios pequeños muy suavizados, se indica esta estrategia en la figura 23^a)

Parallel. - Es una estrategia de acabado bien usada por pasadas paralelas en el plano XY, es una estrategia que se emplea en áreas, se puede elegir el ángulo se puede indicar esta estrategia en la figura 23 b).

Radial. - La estrategia de mecanizado radial empieza en un punto central de la pieza de trabajo, esta estrategia cuenta con una opción para detenerse cerca del centro de las pasadas radiales, se puede ver en la figura 23 c).

Horizontal Clearing. - Esta estrategia detecta las superficies planas de la herramienta a mecanizar, crea trayectorias para desbastar estas áreas planas. En caso de presentarse áreas planas

verticales, la herramienta se desplaza más allá de las áreas planas para desbastar las aristas. Esta estrategia es adecuada para pasadas de acabado, se puede ver en la figura 23 d).

Spiral. - Esta estrategia crea trayectorias en espiral desde un punto central, es frecuentemente usado en piezas redondas empleando ángulos de contacto de herramienta hasta 40° , es una estrategia para pasadas de acabado, se indica en la figura 23 e).

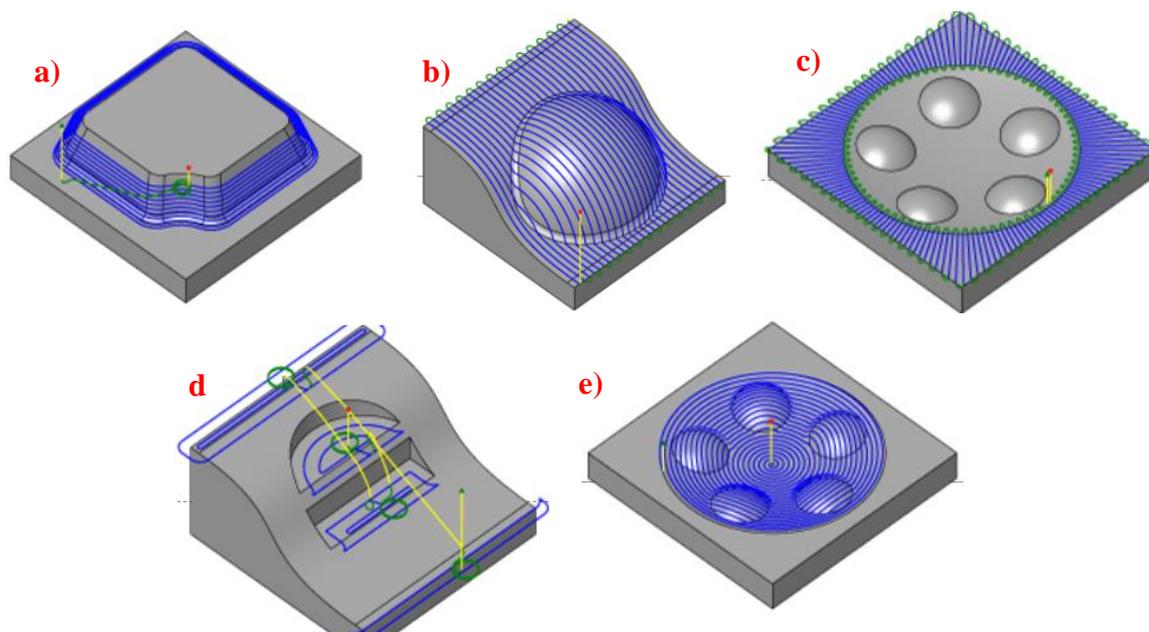


Figura 23 a) Contour, b) Parallel, c) Radial, d) Horizontal, e) Spiral

Fuente: (Autodesk HSM, 2019)

2.6. Mecanizado Trocoidal

El mecanizado trocoidal puede definirse como los movimientos circulares simultáneos sobre la pieza de trabajo hacia adelante como indica la figura 25. Siemens nos emplea en sus soluciones de software la estrategia adaptativa que lo efectúa con trayectorias trocoidales, para obtener una tasa de remoción de material hasta un 60%. Estas trayectorias trocoidales reduce los tiempos de operación e incrementa vida útil de la herramienta de corte. (Siemens NX, 2017).

En la figura 24 en un estudio de Abram Pleta menciona que la fuerza de corte en F_y aumenta en materiales de titanio con una velocidad de corte de 50 m/min, con un avance por diente de 0.3mm/diente y una profundidad de 5mm generando falla en la herramienta de corte como indica la figura 24. (Abram Pleta, 2016)

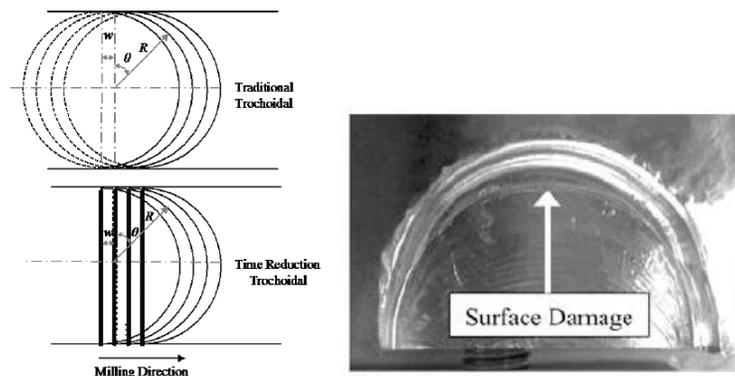


Figura 24 Estudio de mecanizado trocoidal

Fuente:(Abram Pleta, 2016)

EL mecanizado trocoidal emplea programas de mecanizado CAD, CAM así el programador controla las variables de mecanizado al igual que el ancho de corte requerido para esta estrategia, aprovechando la altura de la herramienta de corte con una gran profundidad de corte, pero con poca profundidad de corte radial.

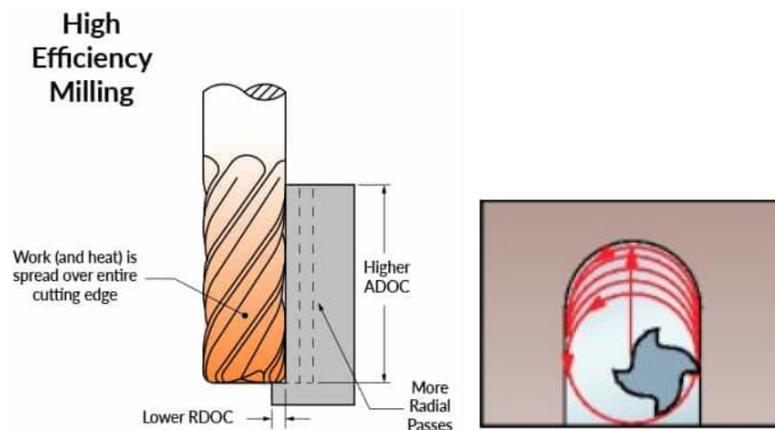


Figura 25 Mecanizado trocoidal

Fuente: (Heavy Performance Company, 2017)

El mecanizado trocoidal mantiene constante el espesor de la viruta al igual que los parámetros de mecanizado. Con un espesor de viruta constante durante el mecanizado se obtiene una reducción en las fuerzas de corte, permitiendo alcanzar altas velocidades como indica la figura 26.

Según Siemens NX, la estrategia adaptativa mejora la calidad de la pieza de trabajo mediante trayectorias trocoidales, además de generar desgaste constante en la herramienta, garantizando alargar su vida útil, obteniendo reducción en los costos de producción.



Figura 26 Mecanizado adaptativo
Fuente: (Field Machining Services, 2018)

2.6.1. Características de mecanizado trocoidal (estrategia adaptativa).

- ✓ Condiciones de corte constantes
- ✓ Incremento de la vida útil de la herramienta
- ✓ Viruta constante en todo el proceso de maquinado
- ✓ Profundidades de corte axiales elevadas
- ✓ Baja profundidad radial
- ✓ Menor carga térmica
- ✓ Evita cortes empleando todo el ancho de la herramienta
- ✓ El calor se extiende por toda la longitud de la herramienta
- ✓ Más pasadas radiales

2.6.2. Estrategia adaptativa.

La estrategia de mecanizado adaptativa ya se encuentra en varios softwares de mecanizado además puede alcanzar grandes velocidades de corte y avances con menor profundidad de corte radial en comparación con estrategias convencionales. Esta estrategia brinda un buen acabado además se adapta gradualmente con movimientos suaves a la forma de la pieza de trabajo, en comparación del mecanizado convencional. La estrategia adaptativa es una nueva forma inteligente de mecanizar debido a la realización de cortes profundos con una carga constante en la herramienta, reduciendo tiempos de mecanizado e incrementando la tasa de remoción del material. La estrategia adaptativa depende de muchos factores como: velocidad de avance, velocidad de corte, material, herramienta, pero el uso de programas de control numérico brinda mejorar resultados tanto de calidad como en productividad.

2.6.2.1. Adaptive Clearing

Esta estrategia limpia grandes cantidades de material utilizando capas en la altura de la pieza a mecanizar. Hace posible realizar grandes profundidades evitando roturas en la herramienta.

La limpieza adaptativa elimina el mecanizado convencional y cualquier movimiento brusco de modo a fin de reducir el tiempo de mecanizado. Garantiza una carga máxima de herramienta durante todo el ciclo de mecanizado. Es una estrategia eficaz para el mecanizado de núcleos por el uso de la forma del material original como indica la figura 27.

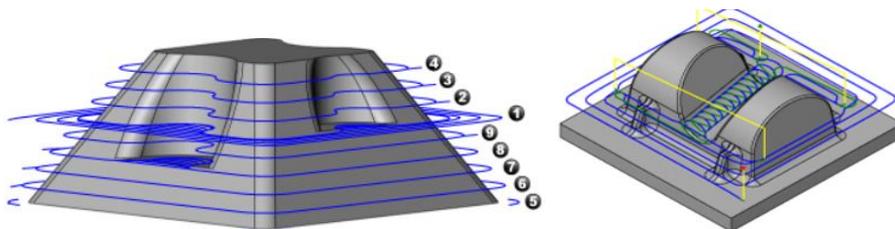


Figura 27 Estrategia limpieza adaptativa
Fuente: (Autodesk HSM, 2019)

2.6.3. Trayectoria Trocoidal

Los softwares de mecanizado ofrecen esta trayectoria para incrementar la tasa de remoción de material, empleando movimientos circulares hacia adelante como se indica en la figura 28. Según Sandvick especifica que el ancho de corte máximo debe ser el 20% del diámetro de la herramienta. (Sandvik, 2017)

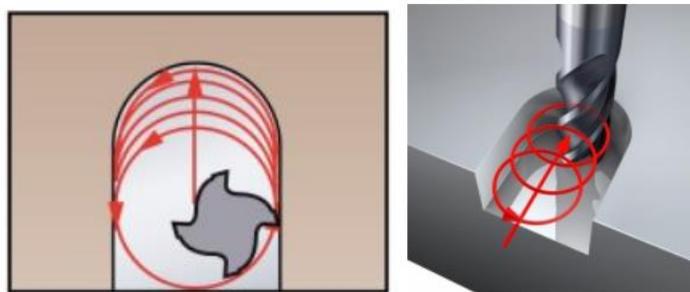


Figura 28 Trayectoria trocoidal

Fuente: (Sandvik, 2017)

2.6.4. Entradas de herramientas.

En cada estrategia de mecanizado la herramienta debe tener un modo de ingreso y salida de la herramienta de corte adecuados. La entrada a las piezas de trabajo especifica distintos ángulos, en la figura 29 se indica el barrido de arco de entrada y el barrido con ángulo de 90° . Los radios de entrada pueden ser especificados en el programa, de modo que al ingresar la herramienta no sufra colisiones con la pieza a mecanizar la figura 30 especifica el radio de entrada horizontal y vertical respectivamente. El radio de entrada vertical suaviza el movimiento de entrada de la herramienta al momento que ingresa a la trayectoria de mecanizado.

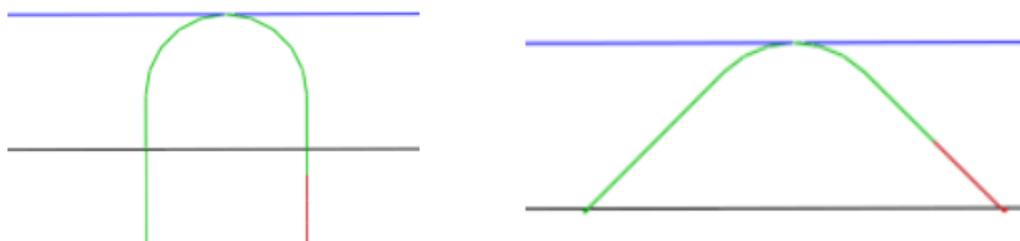


Figura 29 Ángulo de barrido de entrada (arco, 90° respectivamente)
Fuente: (Autodesk HSM, 2019)

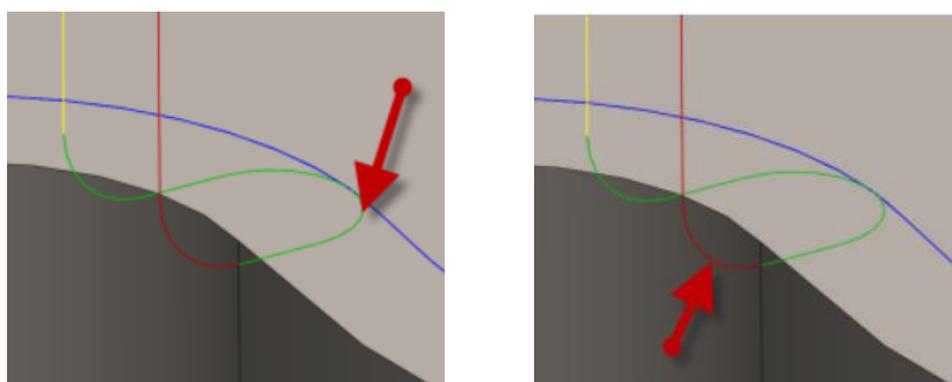


Figura 30 Radio de entrada de la herramienta horizontal y vertical
Fuente: (Autodesk HSM, 2019)

La figura 31 indican el radio de salida de la herramienta horizontal y vertical, el radio de salida implica un movimiento final de la trayectoria de mecanizado.

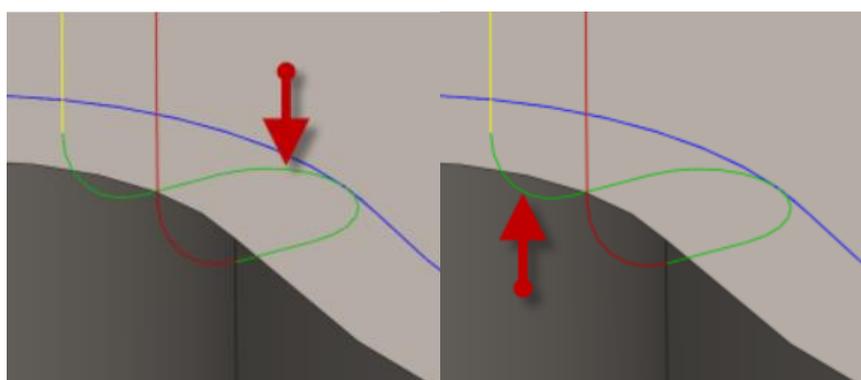


Figura 31 Radio de salida de la herramienta horizontal y vertical
Fuente: (Autodesk HSM, 2019)

2.6.3.1. Tipos de trayectorias de entradas de la herramienta

Penetración. - Este tipo de entrada especifica un ingreso directo rápido a la pieza a mecanizar.

Zigzag. - La entrada zigzag emplea movimientos suaves, pero con un ingreso rápido a la pieza de mecanizar

Perfil. -Es una trayectoria suave de la entrada de la herramienta de corte.

Hélice. -Es una trayectoria empleando movimientos circulares.

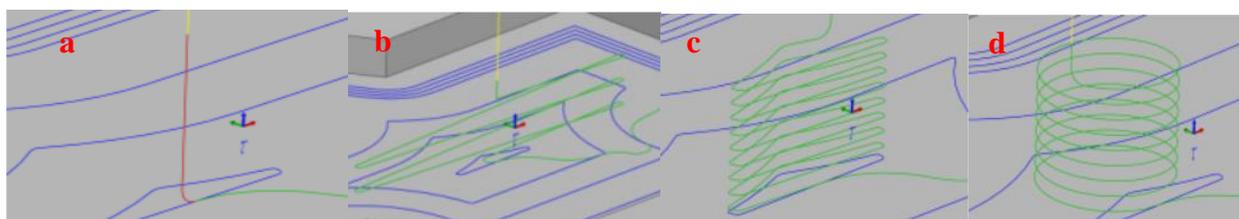


Figura 32 Tipos de trayectorias de entradas a) penetración, b) zigzag c) perfil, d) hélice

Fuente: (Autodesk HSM, 2019)

2.6.5. Diferencias entre mecanizado adaptativo frente al mecanizado trocoidal.

El mecanizado consiste en el corte del material a mecanizar mediante la herramienta multifilar llamada fresa. Entre las estrategias convencionales caracterizadas anteriormente frente a la estrategia adaptativa denotaremos diferencias en la tabla 11.

Tabla 11

Diferencias entre la estrategia convencional frente a la estrategia adaptativa

Parámetro	Estrategia convencional	Estrategia adaptativa
Estrategia de desbaste	Pocket	Adaptive milling
Profundidad de corte axial	Múltiples pasadas constantes	Altura de la herramienta
Profundidad de corte radial	Gran profundidad	Pequeñas pasadas radiales
Temperatura en la herramienta	Concentración de calor en la superficie de contacto de la herramienta	Condiciones de temperatura constantes en la herramienta
Viruta	No se tiene una viruta constante	Viruta constante en todo el proceso de maquinado
Desgaste de herramienta	Desgaste no uniforme	Desgaste constante a lo largo de la herramienta

CONTINUA →

Adaptabilidad a la pieza a mecanizar	Requiere de la estrategia de desbaste y estrategias de acabado	Adaptable a la forma de la pieza a mecanizar
Carga mecánica	No se tiene una carga constante en la herramienta	Carga constante en la herramienta

En la figura 33 podemos identificar la diferencia por la profundidad de corte axial (A_p) entre el mecanizado convencional frente al mecanizado trocoidal.

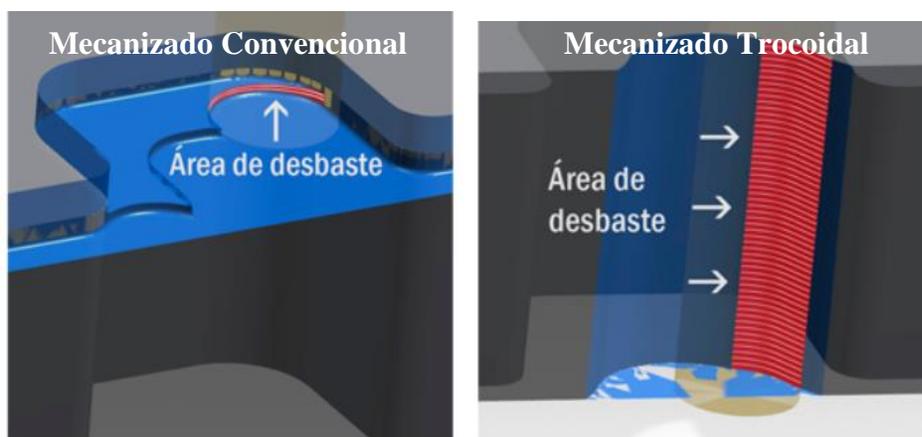


Figura 33 Diferencia entre el área de desbaste entre el EMC y EMA
Fuente: (Prismacim, 2019)

2.7. Metodología Taguchi

La metodología Taguchi fue en honor a su creador Genichi Taguchi, que fue un estadístico japonés la cual mejoró los productos de manufactura. La filosofía Taguchi se basa en 3 simples conceptos fundamentales:

1. La calidad debe estar diseñada en el producto final y no inspeccionarse en el producto.
2. La calidad se logra minimizando la desviación del objetivo, el producto debe estar diseñado para factores incontrolables
3. El costo debe medirse en función de la desviación estándar y las pérdidas deben medirse en función del sistema

La metodología propuesta por Genichi Taguchi la denominó ingeniería de la calidad y la dividió en ingeniería de calidad en línea e ingeniería de calidad fuera de línea. La ingeniería de calidad en línea se basa en actividades del área de manufactura, control y corrección de procesos. La ingeniería de calidad fuera de línea optimiza los procesos al principio en el diseño de los productos y procesos. El diseño debe ser tan robusto que sea inmune a factores de ruido que mediante las condiciones no se pueden controlar. (Ranjit k Roy, 2010).

El método Taguchi se ha empleado en el diseño de la calidad ha sido ampliamente utilizado en el diseño de calidad. la ingeniería y el diseño de parámetros juegan un papel importante en la ingeniería moderna. Además, el método de Taguchi desarrolló los procedimientos que aplicando arreglo de matrices ortogonales (OA) de experimentos para obtener el mejor modelo con una reducción del número de experimentos, minimizando así el tiempo y el costo de la experimentación. (Santaş, 2015).

La metodología por Taguchi es asegurar la optimización de procesos y productos con el fin de obtener productos robustos de alta calidad y bajo costo. La figura 34 indica los pasos de la metodología Taguchi.



Figura 34 Método Taguchi

- ✓ En la etapa del diseño del sistema se identifican los factores que determinan al producto, se determinan las características generales.
- ✓ En la etapa de diseño de parámetros, se identifica los niveles de trabajo de los factores de diseño, se busca determinar los niveles de factor que llevan al mejor rendimiento del proceso o producto, se experimentan, se confirman y se predicen los resultados del experimento.
- ✓ En la etapa de tolerancia se determina la confiabilidad de los mismos si se acepta el método y se consigue una buena exactitud.

Taguchi menciona a los factores en dos tipos controlables y no controlables (al ruido), son cosas que causa una característica de calidad desviarse del objetivo causando una pérdida de calidad. Los factores de ruido que actúa sobre un producto es el ruido externo o ambiente (humedad ambiental, polvo, errores de operación) y el ruido interno (variación del proceso mismo por la propia naturaleza o tecnologías). (Humberto Gutiérrez Pulido, 2012)

El arreglo ortogonal, es una herramienta ingenieril donde simplifica y elimina gran parte de los esfuerzos de diseño estadístico para posteriormente un análisis con el fin de evaluar los factores controlables. (Humberto Gutiérrez Pulido, 2012)

2.7.1. Ventajas y limitaciones del método Taguchi

Entre las ventajas más importantes del método Taguchi son las siguientes:

- ✓ Técnica efectiva antes de lanzar un producto o proceso
- ✓ Reducción del tiempo y costos de experimentos
- ✓ Diseño de robustez en producto
- ✓ Reducción de los costos de producción del producto
- ✓ Mejora la calidad del producto final.
- ✓ Medición de calidad en términos de desviación del objetivo

Entre las limitaciones que cuenta el método Taguchi es trabajar en grupo para abordar los problemas de mejora de calidad. (Ranjit k Roy, 2010)

2.7.2. Aplicación del método Taguchi

El método Taguchi es un enfoque de optimización, donde emplea un conjunto de arreglos ortogonales que trabajan de manera equilibrada para estudiar varios factores de diseño, con el objetivo de mejorar un proceso de producción. El estudio de varios factores de diseño de forma paralela ayuda a estimar los factores independientes de otros. El determinar el arreglo ortogonal adecuado en el experimento facilita el proceso de experimentación. (V. Dharam Singh, 2016)

- 1) Seleccione una característica de calidad de salida adecuada para ser optimizada
- 2) Determinar los parámetros de diseño que afectan al proceso y sus niveles correspondientes, identificando sus posibles interacciones
- 3) Seleccione las matrices ortogonales que mejor se asemejen al experimento

- 4) Realice los experimentos de la matriz completa
- 5) Ejecutar un análisis estadístico de los datos
- 6) Predecir el nivel óptimo de rendimiento del experimento, realizar un experimento de confirmación de resultados.

Se puede seleccionar el arreglo ortogonal más adecuado en el experimento acuerdo a la tabla 12

Tabla 12

Arreglo ortogonal

Diseño	Niveles				Diseño	Niveles			
	2	3	4	5		2	3	4	5
L4 (2^3)	2-3				L16 (4^5)			2-5	
L8 (2^7)	2-7				L25 (5^6)				2-6
L9 (3^4)		2-4			L27 (3^{13})		2-13		
L12 (2^{11})	2-11				L32 (2^{31})	2-31			
L16 (2^{15})	2-15								

Fuente: (Ranjit k Roy, 2010)

Un ejemplo de arreglo ortogonal L4 (2^3), donde L4 es el número de corridas, 2 el número de niveles y 3 es el número de factores.

CAPÍTULO III

3. DESARROLLO DEL EXPERIMENTO

3.1. Equipo de trabajo

3.1.1. Maquinaria.

El equipo a usar en el experimento será en el centro de control numérico VMC 3016 FADAL con un control Fanuc 18 iMB, en la tabla 13 se muestra las características técnicas del equipo mencionado, en la figura 35 se indica el equipo.

Tabla 13

Características técnicas

3016 Especificaciones	3016 Métrico
Table Size	750 mm x 406 mm
Cutting Feed Rate	.25-10,160 (15,240 at 150%) mm/min.
Rapid Feed Rate (X/Y/Z)	22.8 m/min. (X,Y) 17.7 m/min (Z)
Longitudinal (X Axis)	762mm
Cross (Y Axis)	406mm
Vertical (Z Axis)	508mm
Main Motor	15 HP*, 11.2 KW
Torque	220 Nm/300 Nm
Spindle Speed	10-10,000 rpm
Max. Tool Diameter	76mm
Max. Tool Length	381mm
Max. Tool Weight	6.8 kg

Fuente: (Fadal, 2003)



Figura 35 VMC 3016 Fadal

3.1.2. Equipo de medición de temperatura

El equipo de medición de temperatura será Infrared Temperature Meter S – Gun, las características técnicas del equipo de medición se indica en la tabla 14, en la figura 36 se ilustra el equipo.

Tabla 14

Especificaciones técnicas del pirómetro

Especificaciones técnicas del Pirómetro	
Rango de temperatura infrarrojo	-30 °C to 900 °C (-22 °F to 1652 °F)
Repetibilidad IR	± 0.5 % o ± 0.5 °C (± 1 °F)
Resolución de pantalla	0.1 °C / 0.1 °F
Respuesta espectral	8 μm to 14 μm
Temperatura de funcionamiento	0 °C to 50 °C (32 °F to 122 °F)
Humedad relativa	10 % to 90 % RH
Poder	2 AA
Tamaño mínimo de punto	1,9 mm

Fuente: (Fluke Corporation, 2006)



Figura 36 Pirómetro

3.2. Herramienta de corte

3.2.1. Tipo de herramienta

La herramienta a utilizar en el ensayo es una fresa de 25 mm diámetro de 4 dientes como se indica en la figura 37.

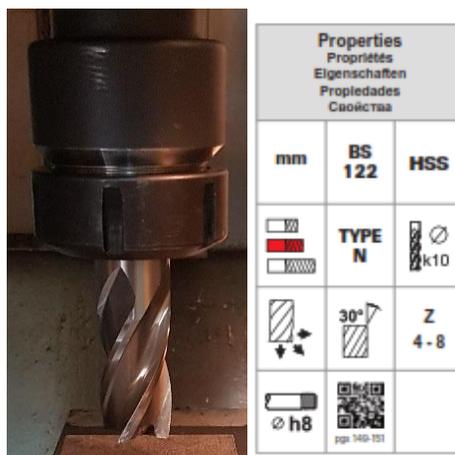


Figura 37 Fresa de HSS de 4 dientes
Fuente: (Catalogo Somta, 2018)

Esta fresa de HSS marca Somta, adquirida en el mercado nacional por Castillo Hermanos. En la tabla 15 se describen las características geométricas de la fresa.

Especificaciones	
Marca	Somta
Tipo de herramienta	Punta recta
Material	HSS
Ap	45 mm
L1	125 mm
D1	25 mm
Filos	4
D4	25

Fuente: (Catalogo Somta, 2018)

3.3. Pieza de trabajo

La pieza de trabajo para el experimento será de 70 x 70 x 20 mm de aluminio Produx como se indica en la figura 38.

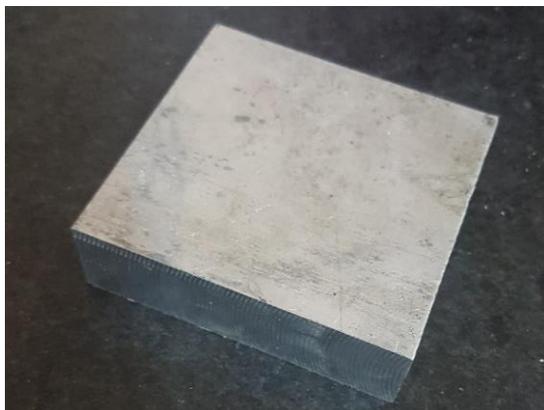


Figura 38 pieza de trabajo

3.4. Parámetros de corte

El fabricante recomienda parámetros para el mecanizado, en base al material a mecanizar como se indica en la tabla 16.

Tabla 15

Parámetros de corte del fabricante

Parámetros de corte del fabricante	
Revoluciones [mm^{-1}]	6000
Profundidad de corte axial perfilado a_p [mm]	0.1 – 37.5
Profundidad de corte radial a_e [mm]	1.25
Velocidad de avance [mm/min]	4800

Fuente: (Catalogo Somta, 2018)

La selección de las variables de mecanizado es muy importante ya que influye directamente, en el proceso, tiempo de mecanizado, acabado, vida útil de la herramienta. De acuerdo a las curvas del Dr. Salomon establece a una cierta velocidad de corte la temperatura empieza a disminuir, a partir de ello y a continuación del proyecto “Optimización de estrategias de mecanizado de alta

velocidad en la manufactura de superficies 3D” del Ing. Eduardo Vaca donde emplea avances por diente de 0.05 – 0.1 mm/diente y velocidades de corte de 360 a 420 m/min se han seleccionado los parámetros de mecanizado que se muestra en la tabla 17, que son usados tanto para la estrategia de mecanizado convencional (EMC) y la estrategia de mecanizado adaptativa (EMA).

Tabla 16

Parámetros de corte del experimento

Parámetros de mecanizado				
Velocidad de Corte [m/min]	400	500	600	700
Avance por diente [mm/diente]	0.05	0.1	0.15	0.2

3.5. Metodología Taguchi

La estrategia de calidad Taguchi en su diseño de experimentos se debe determinar todos los parámetros que rigen el experimento como se indica en la tabla 18 y la tabla 19. En este experimento se garantiza la combinación de todos los parámetros con los respectivos niveles, los factores que rigen el experimento son: velocidad de corte, avance por diente, profundidad de corte. El material a utilizar será el aluminio 7075 – 76 (prodax), la herramienta a utilizar será una fresa plana de 25 mm de diámetro de HSS.

Antes de elegir una matriz ortogonal para el experimento, es necesario conocer los grados totales de libertad (DOF), según esta metodología el número mínimo de experimentos debe ser mayor o igual a DOF. (Sunilkumar Panshetty, 2016)

✓ Número de parámetros (n_i) = 3

✓ Número de niveles (n_f) = 4

*Grados totales de libertad (DOF) = $(n_i - 1) * n_f$ (Sunilkumar Panshetty, 2016)*

$$DOF = (4 - 1) * 3 = 9$$

El número mínimo de experimentos = $DOF + 1 = 9 + 1 = 10$

El mínimo número de experimentos son 10.

Tabla 17

Material y herramienta de corte del experimento

Material	Aluminio 7075- T6 (prodax)
Herramienta	Fresa 25 mm de diámetro
Material de herramienta	HSS
Máquina	VCM 3016 Fadal

Tabla 18

Parámetros y niveles del experimento

Símbolo	Parámetros	Niveles			
		Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
A	Estrategia 1) Convencional 2) Adaptativa	1	2	-	-
B	Velocidad de corte [m/min]	400	500	600	700
C	Avance por diente [mm/diente]	0.05	0.10	0.15	0.2

Dentro de la metodología Taguchi, la experimentación cumple un rol vital para mejorar los procesos productivos en la industria manufacturera, para reducir los costos, reducir el tiempo de operación. Es importante identificar los factores que afectan y cuales no afectan en la fabricación, por ello es necesario que se varíen los factores dentro del diseño de experimentos, seguidamente de evaluar que factor tiene más impacto en la característica del producto. La selección del arreglo ortogonal (AO) facilita la realización del experimento, como se indica en la tabla 20, las distintas combinaciones del arreglo ortogonal. (Humberto Gutiérrez Pulido, 2012)

Empleando la metodología Taguchi se implementó un arreglo ortogonal $L_{32}(2^1, 4^2)$.

Tabla 19

Arreglo ortogonal $L_{32}(2^1, 4^2)$

Arreglo ortogonal							
Ensayo No	Experimento			Ensayo No	Experimento		
	A	B	C		A	B	C
1	1	1	1	17	2	1	1
2	1	1	2	18	2	1	2
3	1	1	3	19	2	1	3
4	1	1	4	20	2	1	4
5	1	2	1	21	2	2	1
6	1	2	2	22	2	2	2
7	1	2	3	23	2	2	3
8	1	2	4	24	2	2	4
9	1	3	1	25	2	3	1
10	1	3	2	26	2	3	2
11	1	3	3	27	2	3	3
12	1	3	4	28	2	3	4
13	1	4	1	29	2	4	1
14	1	4	2	30	2	4	2
15	1	4	3	31	2	4	3
16	1	4	4	32	2	4	4

3.6. Ejemplo de cálculo

Se realizará el cálculo de los valores necesarios para el desarrollo del mecanizado, como se indicó en el capítulo 2. Estos cálculos darán sustento en la programación del código G para luego dar lugar a la experimentación en el centro de mecanizado Fadal. En los siguientes cálculos obtendremos la tasa de remoción de material, las revoluciones, avance, potencia de corte.

Se calculará para una herramienta de HSS de diámetro de 25 mm de 4 filos, con un avance por diente de 0.05 mm/diente, con una velocidad de corte de 400 m/min y una energía específica del

material de 700 N/mm^2 . El ancho de corte para la estrategia adaptativa será al 10% del diámetro de la herramienta, para el mecanizado convencional será un ancho de corte del 64% del diámetro de la herramienta.

a) Cálculo de las revoluciones

$$Vc = \frac{\pi * D * N}{1000} \quad (\text{Ec. 3}) \quad (\text{Sandvik, 2017})$$

$$N = \frac{Vc * 1000}{\pi * D} \quad (\text{Ec. 3.1}) \quad (\text{Sandvik, 2017})$$

$$N = \frac{400 \text{ m/min} * 1000}{\pi * 25 \text{ mm}} = 5092.95 \text{ [rev/min]}$$

b) Cálculo de la velocidad de avance a partir de la (Ec. 2)

$$Vf = f_z * Z * n \text{ [mm/min]} \quad (\text{Ec. 2}) \quad (\text{Sandvik, 2017})$$

$$Vf = 0.05 * 4 * 5092.95 = 1018.59 \text{ [mm/min]}$$

c) Cálculo de la tasa de remoción del material a partir de la (Ec.4)

$$Q = \frac{a_p * a_e * Vf}{1000} \text{ [cm}^3\text{/min]}$$

Taza de remoción para el mecanizado convencional

Para el mecanizado convencional se usa con un ancho de corte del 64% (16 mm) y una pasada axial de 2.18 mm

$$Q = \frac{a_p * a_e * Vf}{1000} \text{ [cm}^3\text{/min]} \quad (\text{Ec. 4}) \quad (\text{Sandvik, 2017})$$

$$Q = \frac{2.18 * 16 * 1018.59}{1000} = 35.53 \text{ [cm}^3\text{/min]}$$

Taza de remoción para el mecanizado adaptativo

Para el mecanizado adaptativo se usa un ancho de corte del 10% (2.5mm) y una profundidad axial de 14 mm

$$Q = \frac{14 * 2.5 * 1018.59}{1000} = 35.63 [cm^3/min]$$

d) Cálculo de la potencia de corte.

$$PC = \frac{a_p * a_e * V_f * K_c}{60 * 10^6} [kW] \quad (Ec 5.) (Sandvik, 2017)$$

Para el mecanizado convencional obtenemos la potencia de corte.

$$PC = \frac{2.18 * 16 * 1018.59 * 700}{60 * 10^6} = 0.414 [kW]$$

Para el mecanizado adaptativo obtenemos la potencia de corte

$$PC = \frac{14 * 2.5 * 1018.59 * 700}{60 * 10^6} = 0.4159 [kW]$$

3.7. Análisis de potencias

Para comprar la estrategia de mecanizado convencional frente a la estrategia de mecanizado adaptativa, se debe conocer el proceso que desempeña cada una. El mecanizado adaptativo se enfoca en menores profundidad radias (A_e) con mayor profundidad de pasada (A_p) en comparación al mecanizado convencional mejor profundidad radial (A_e) con menor profundidad de pasada (A_p). Como se indica en la tabla 21, a partir del ejemplo de cálculo en la sección 3.6 se calculan las potencias de corte para una profundidad de pasada de 1 a 5 mm.

La recomendación que otorga Siemens NX empleando estrategia de mecanizado adaptativa son grandes profundidades de corte axiales de 2 a 3 veces el diámetro de la herramienta de corte, pero con pequeñas profundidades de corte radiales del 7% al 12% dependiendo del material de trabajo a mecanizar. A partir de ello se ha propuesto mecanizar con el 10% del diámetro de corte de la herramienta y una profundidad de corte axial de 14 mm. (Siemens NX, 2017).

Tabla 20

Consumo de potencia en el mecanizado convencional y adaptativo

Ensayo	PC Convencional [kW]					PC Adaptativo [kW]
	Ap 1mm	Ap 2 mm	Ap 3mm	Ap 4mm	Ap 5mm	Ap 14mm
A1B1C1	0.19	0.380	0.57	0.76	0.95	0.4159
A1B1C2	0.38	0.761	1.14	1.52	1.90	0.83
A1B1C3	0.57	1.14	1.71	2.28	2.85	1.25
A1B1C4	0.76	1.52	2.28	3.04	3.80	1.66

La figura 39 indica el incremento lineal de la potencia de corte a medida que incrementa la velocidad de corte, para la estrategia convencional desde 1mm hasta 5 mm de profundidad.

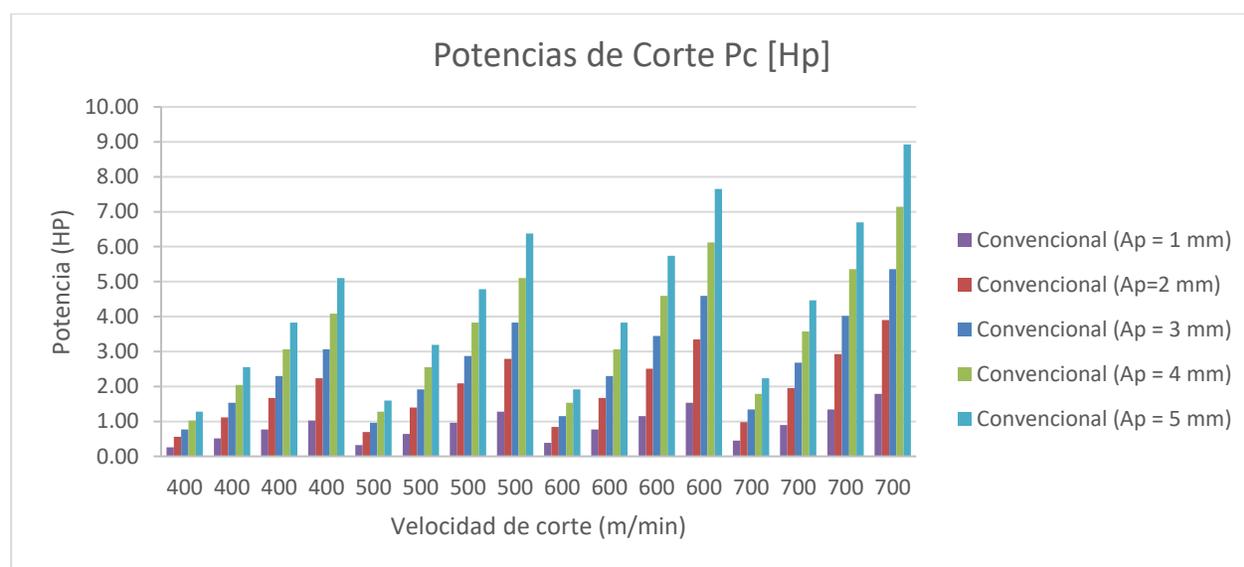


Figura 39 Velocidad de corte vs potencia

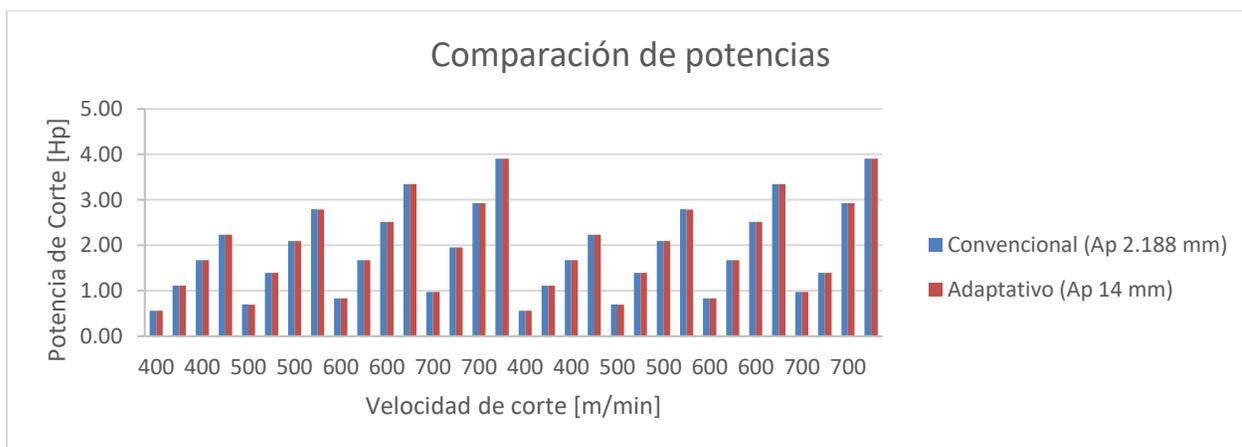
A partir de la tabla 21 se estimó la profundidad para la estrategia de mecanizado convencional mediante la interpolación, obteniendo el área de corte igual entre ambas estrategias como se indica en la tabla 22

Tabla 21*Área de corte*

	EMC	EMA
Ancho de corte Ae [mm]	16	2.5
Profundidad de corte Ap [mm]	2.188	14
Área de corte [mm ²]	35	35

A partir de un ancho de corte del 10% (2.5 mm) con una profundidad de pasada de 14mm en el mecanizado adaptativo, se logra comparar frente al mecanizado convencional con una profundidad de pasada de 2.188 mm y un ancho de corte del 64% (16 mm)

En la figura 40 se indica la comparación de potencias, con un comportamiento creciente a medida que incrementa la velocidad de corte siendo la barra de color rojo la estrategia mecanizado convencional y la barra de color azul la estrategia de mecanizado adaptativo, demostrando que las potencias son iguales para el desarrollo del experimento.

**Figura 40** Comparación de potencias

3.8. Modelo CAD

Se estableció para el experimento un modelo CAD para la estrategia de mecanizado convencional que será igual que el mecanizado trocoidal como se indica en la figura 41. El diseño

CAD se realizó de modo que se enfoque el mecanizado trocoidal con una ranura circular. Para ambos ensayos tendremos la misma cantidad de material removido.

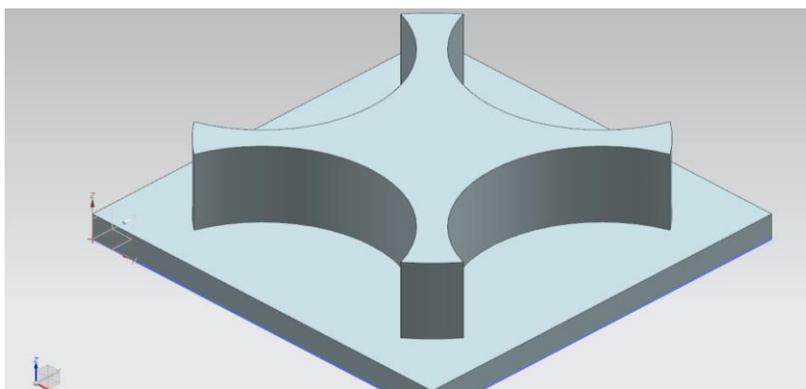


Figura 41 Modelo CAD

3.9. Ensayo con la estrategia de mecanizado convencional

3.9.1. Descripción de la estrategia de mecanizado convencional.

El estudio del mecanizado de desbaste convencional se basa en la utilización de varios parámetros propios del mecanizado, realizado varias pasadas en Z. Se toma en cuenta todos los parámetros (velocidad de corte, avance por filo, profundidad de corte) y la herramienta de HSS para el desarrollo del mecanizado. En la tabla 23 se indica los parámetros a usar en esta estrategia.

Tabla 22

Parámetros del mecanizado convencional

Parámetros de mecanizado convencional				
Profundidad axial A_p [mm]	2.18			
Profundidad radial A_e [mm]	16 (64%)			
V_c [m/min]	400	500	600	700
F_z [mm/diente]	0.05	0.10	0.15	0.20

3.9.2. Trayectoria de mecanizado convencional

Las trayectorias de mecanizado convencional que se encuentra en NX, indica los diferentes movimientos que se realiza en la pieza de trabajo, entre las trayectorias tenemos: follow part, follow periphery, profile, zig, zigzag, zig with contour, trochoidal. La figura 42 indica las trayectorias de mecanizado.

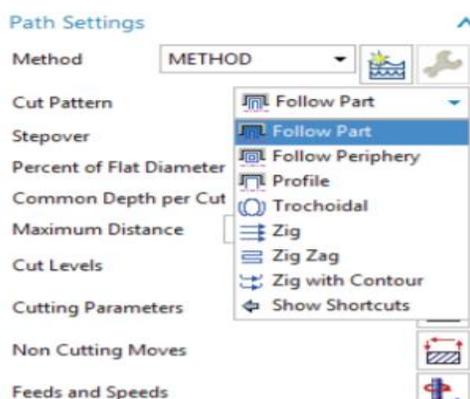


Figura 42 Trayectorias de mecanizado

Follow part: La herramienta realiza la trayectoria en función de la geometría de la pieza, si existen cavidades lo resuelve de manera óptima para eliminar el material.

Follow periphery: Esta trayectoria toma el perfil de la geometría de la pieza, donde corta el material gradualmente de afuera hacia adentro, con un valor stepover, esta trayectoria es ideal para cavidades, empleado en operaciones de desbaste. En la figura 43 se muestra una sección de la trayectoria.

Perfil: Esta trayectoria realiza un corte a lo largo del perfil de la geometría, es empleado en operaciones de acabado y semi acabado.

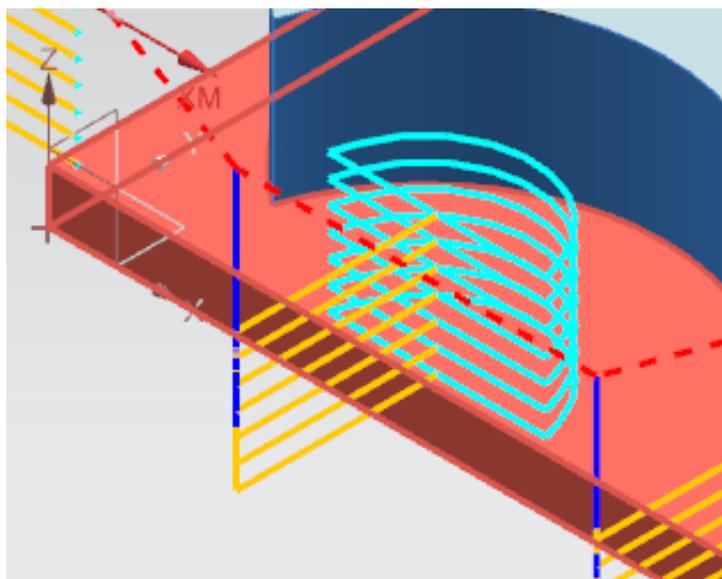


Figura 43 Trayectorias de mecanizado Follow periphery

Inicialmente se comparó las trayectorias en el modelo CAD y se obtuvo los resultados indicados en la tabla 24 con los mismos parámetros y condiciones de maquinado, En la figura 44 se indican las diferentes trayectorias.

Tabla 23

Comparación de trayectorias en el mecanizado convencional

Denominación	Trayectoria	Parámetros		No Pasadas radiales	Tiempo simulación [seg]
		Vc [m/min]	fz [mm/diente]		
A	Follow part	400	0.05	1	504
B	Follow Periphery	400	0.05	2	318
C	Profile	400	0.05	1	469
D	Trochoidal	400	0.05	2	726
E	Zig	400	0.05	1	1114
F	Zigzag	400	0.05	1	544
G	Zig with contiur	400	0.05	1	953

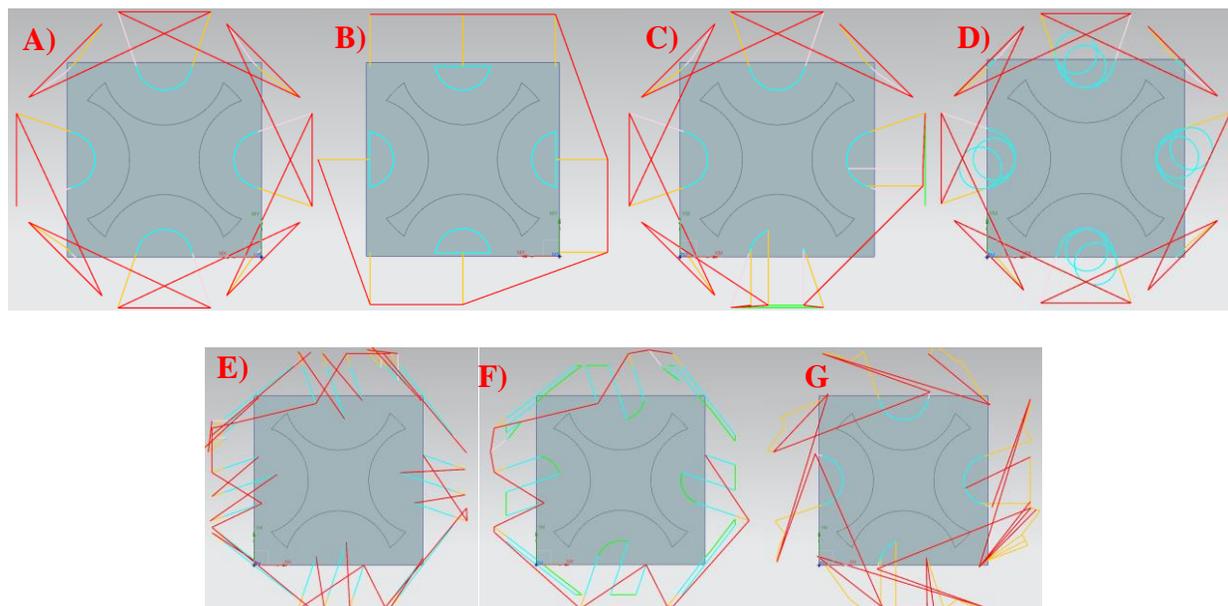


Figura 44 Trayectoria A, B, C, D, E, F, G

A partir de la tabla 24 y la figura 45 se ha seleccionado la trayectoria follow periphery por el menor tiempo de simulación, frente a las otras trayectorias, además que esta trayectoria realiza 2 pasadas radiales como indica la teoría de la estrategia convencional, con un ancho de corte del 64% y una profundidad de pasada de 2.188 mm. En la figura 46 se indica la trayectoria follow periphery usada en la estrategia de mecanizado convencional.

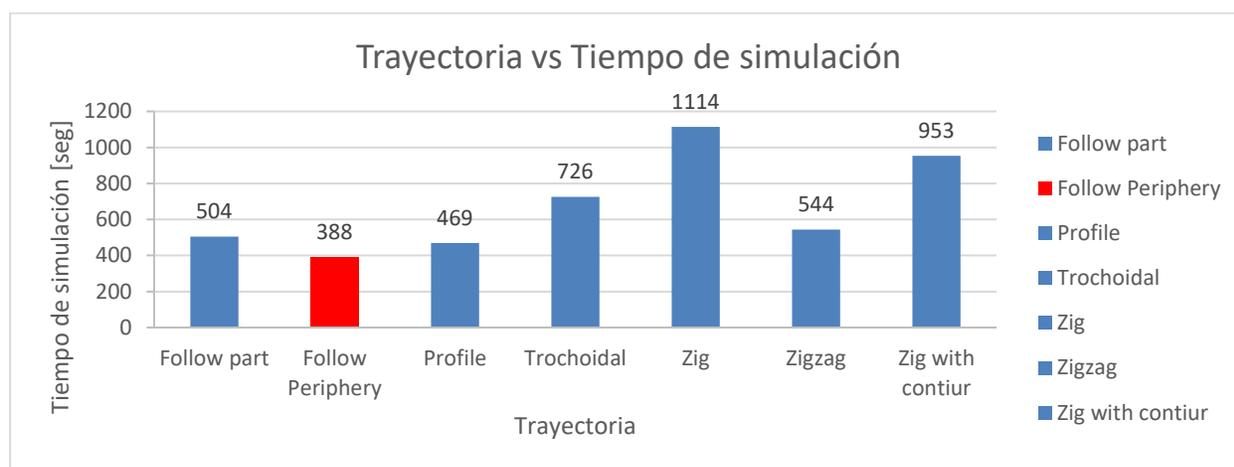


Figura 45 Trayectoria vs tiempo de simulación

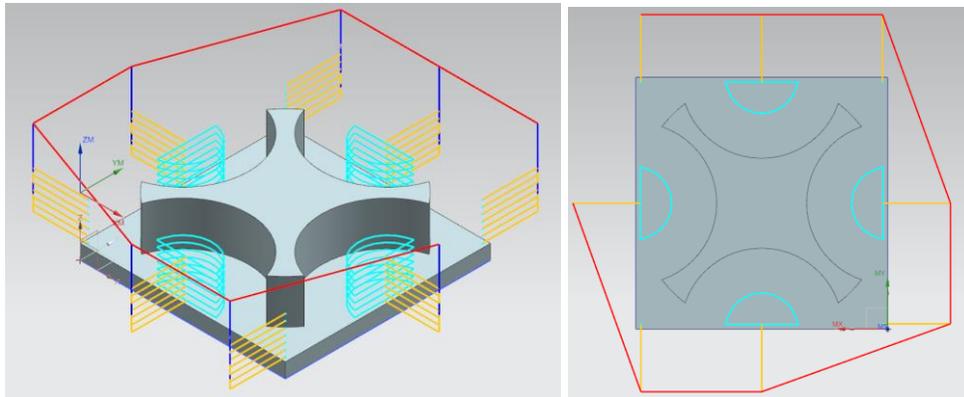


Figura 46 Trayectoria follow periphery

3.9.3. Simulación CAM.

Para realizar la simulación CAM se debe realizar una secuencia lógica de pasos antes del post procesado y la obtención del código G. Entre los pasos a seguir son:

- 1) Selección de la estrategia a mecanizar. Se usará la estrategia de desbaste floor wall
- 2) Colocación de las propiedades geométricas de la herramienta de corte al igual q los parámetros de mecanizado.
- 3) Se selecciona el plano donde se ejecutará la estrategia de desbaste como se indica en la figura 47

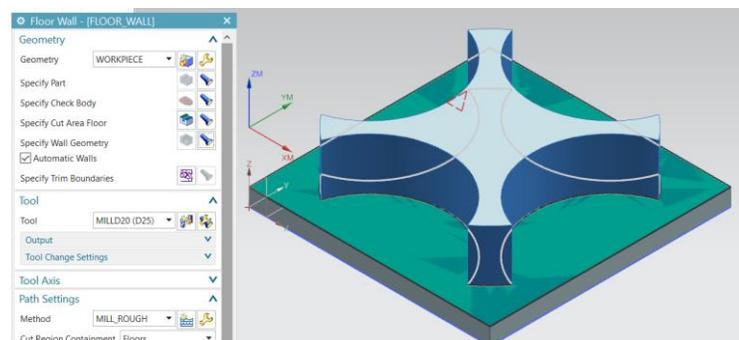


Figura 47 Selección del plano de la estrategia floor wall

- 4) Selección de las profundidades de pasada (Z.), ancho de corte al 64% del diámetro de la herramienta como indica la figura 48.

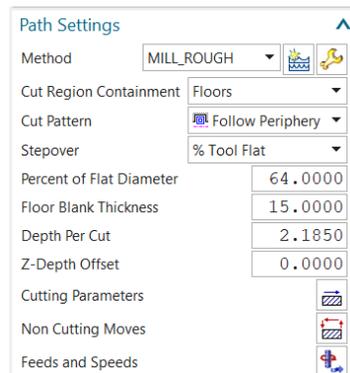


Figura 48 Profundidades y ancho de corte de la estrategia convencional

- 5) Generación de la trayectoria de mecanizado convencional como indica la figura 49.

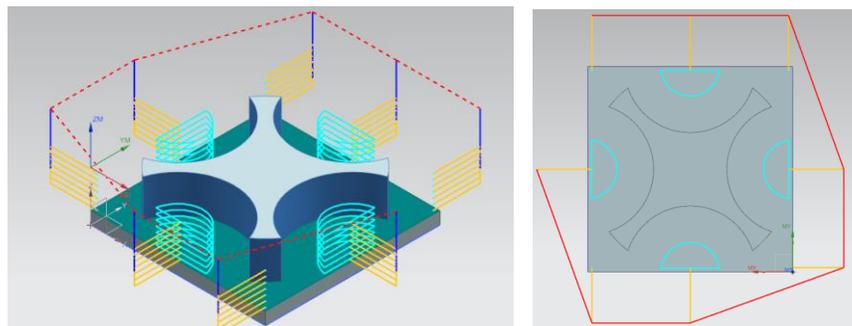


Figura 49 Generación de trayectoria

- 6) Simulación de la estrategia como indica la figura 50.

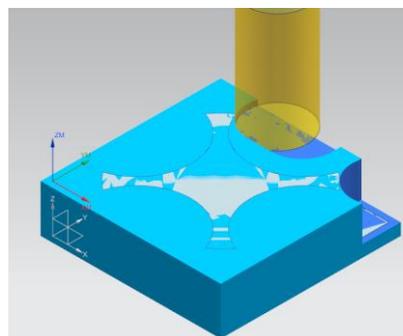


Figura 50 Simulación de la estrategia floor wall

- 7) Post procesado

En la tabla 20 se indica los parámetros que se utilizaron en la simulación

Tabla 24

Parámetros de la simulación

Parámetros de simulación	
Method	Mill Rough
Cut región containment	Floor
Cut pattern	Follow periphery
Step over (percent of flat diameter)	64
Floor blank thickness	15
Depth per cut	2.18
Stock	1 mm
Tool Overhang	45%
Cut direction	Climb cut

3.10. Ensayo con la estrategia de mecanizado adaptativo

3.10.1. Estrategia de mecanizado adaptativo (EMA)

La estrategia de mecanizado adaptativo emplea toda la altura de la herramienta, pero realizando varias pasadas radiales, para esta estrategia se empleará los mismos parámetros que en la estrategia de mecanizado convencional con el fin de comparar ambos procesos. Los parámetros que se usa en el mecanizado trocoidal se indica en la tabla 26.

Tabla 25

Parámetros del mecanizado trocoidal

Parámetros de mecanizado				
Profundidad axial A_p [mm]	14			
Profundidad radial A_e [mm]	2.5 (10%)			
V_c [m/min]	400	500	600	700
F_z [mm/diente]	0.05	0.10	0.15	0.20

3.10.2. Trayectoria de mecanizado adaptativo

La trayectoria de esta estrategia se adapta a la pieza a mecanizar en base a su geometría y lo realiza con movimientos suaves, generando trayectorias trocoidales. La estrategia adaptativa

detecta automáticamente la geometría de la pieza, generando la trayectoria ideal en función del stepover por el ancho de corte escogido. La figura 51 y 52 indica la trayectoria que genera la estrategia adaptativa (EMA).

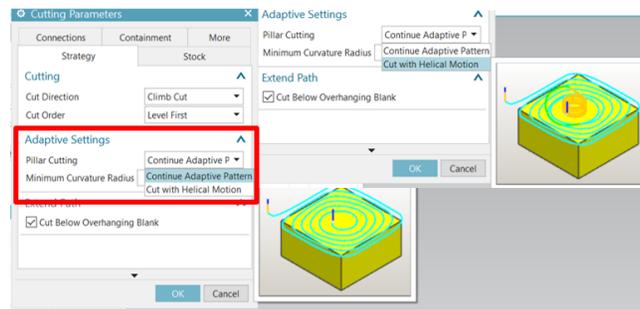


Figura 51 Trayectoria adaptativa

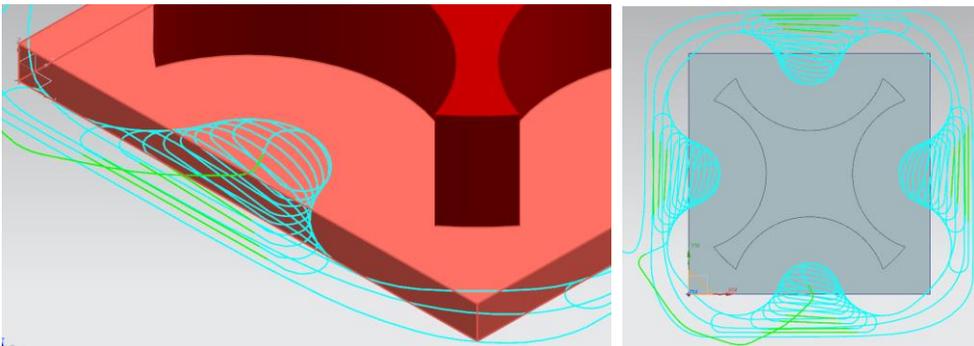


Figura 52 Trayectoria de mecanizado adaptativo

3.10.3. Simulación CAM

Para el desarrollo CAM de la estrategia de mecanizado adaptativo se debe realizar una secuencia lógica antes del post procesado en la generación del código G. Entre los pasos a seguir son:

- 1) Selección de la estrategia a mecanizar. En la figura 53 indica la selección de la estrategia.

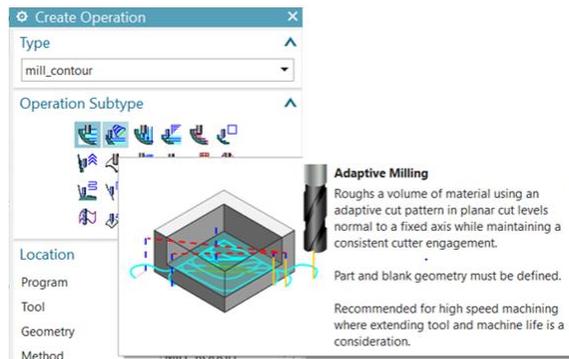


Figura 53 Selección de estrategia adaptive milling

- 2) Colocación de las propiedades geométricas de la herramienta de corte al igual q los parámetros de mecanizado
- 3) Se selecciona el plano donde se ejecutará la estrategia de desbaste adaptativa como indica la figura 54 y 55.

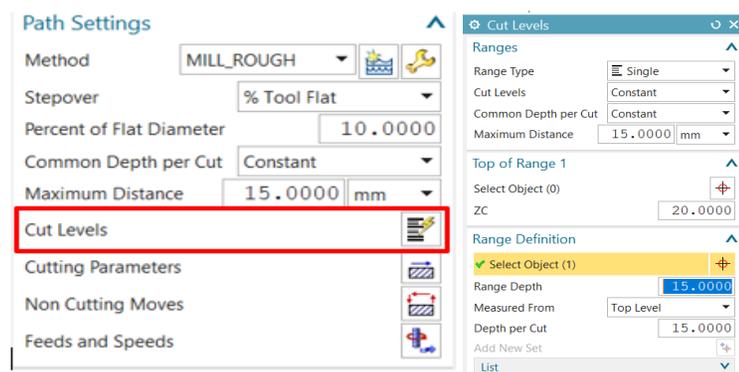


Figura 54 Selección de plano de desbaste inferior y geometría

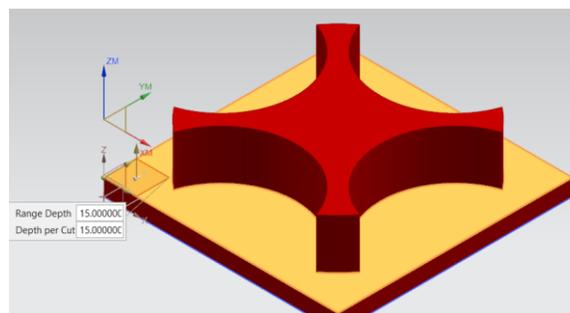


Figura 55 Selección del plano de la estrategia adaptativa

- 4) Selección de las profundidades radiales de la estrategia adaptativa como indica la figura 56.

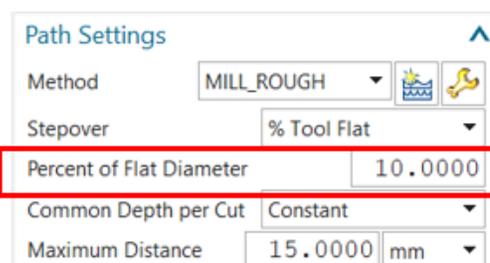


Figura 56 Ancho de corte de la estrategia adaptativa

- 5) Generación de la trayectoria como se indica en la figura 57.

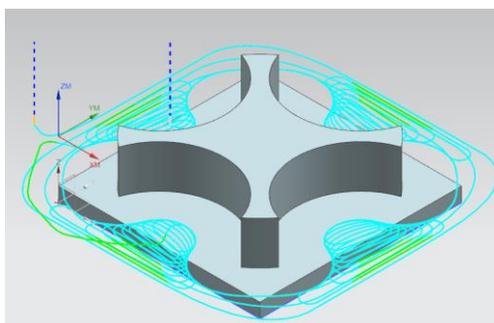


Figura 57 Generación de la trayectoria

- 6) Simulación de la estrategia de mecanizado adaptativa (EMA) como indica en la figura 58.

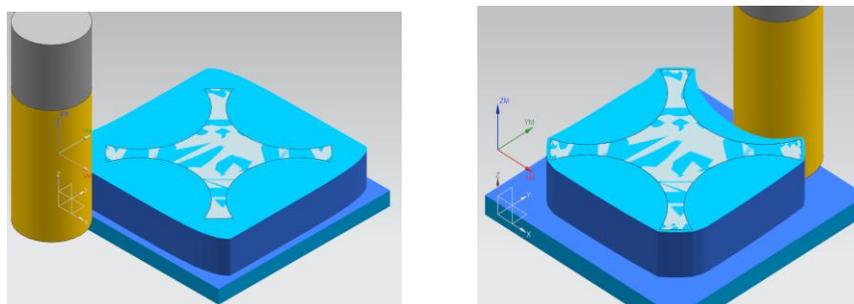


Figura 58 Simulación de EMA

- 7) Post procesado

En la tabla 27 se indica los parámetros empleados en la simulación de la estrategia de mecanizado adaptativa.

Tabla 26*Parámetros de simulación de MCA*

Parámetros de simulación	
Method	Mill Rough
Step over (percent of flat diameter)	10%
Common depth per cut	Constant
Maximum distance	14
Cut direction	Climb cut
Pillar cutting	Adaptive pattern
Stock	1 mm
Mínimum curvature radius	10% tool

3.11. Mecanizado de probetas

Para el desarrollo del experimento, se efectuaron el mecanizado de 32 probetas, con una pieza de trabajo de 70 mm de ancho, 70 mm de largo y 20 mm de espesor. En la tabla 28 se indica los parámetros de avances, revoluciones necesarias para realizar las 32 probetas a partir del ejemplo en la sección 3.6. En la figura 59 se indica la configuración en el equipo de trabajo.



Figura 59 Configuración en el mecanizado

Tabla 27
Parámetros de corte para el mecanizado

Codificación	Ensayo	Estrategia	Velocidad de corte V_c [m/mm]	Avance por diente f_z [mm/diente]	Velocidad del husillo N [rev/min]	Velocidad de avance V_f [mm/min]
C1	A1B1C1	1	400	0.05	5092.95	1018.59
C2	A1B1C2	1	400	0.1	5092.95	2037.18
C3	A1B1C3	1	400	0.15	5092.95	3055.77
C4	A1B1C4	1	400	0.2	5092.95	4074.36
C5	A1B2C1	1	500	0.05	6366.18	1273.24
C6	A1B2C2	1	500	0.1	6366.18	2546.47
C7	A1B2C3	1	500	0.15	6366.18	3819.71
C8	A1B2C4	1	500	0.2	6366.18	5092.95
C9	A1B3C1	1	600	0.05	7639.42	1527.88
C10	A1B3C2	1	600	0.1	7639.42	3055.77
C11	A1B3C3	1	600	0.15	7639.42	4583.65
C12	A1B3C4	1	600	0.2	7639.42	6111.54
C13	A1B4C1	1	700	0.05	8912.66	1782.53
C14	A1B4C2	1	500	0.1	6366.18	2546.47
C15	A1B4C3	1	700	0.15	8912.66	5347.59
C16	A1B4C4	1	700	0.2	8912.66	7130.12
AD1	A2B1C1	2	400	0.05	5092.95	1018.59
AD2	A2B1C2	2	400	0.1	5092.95	2037.18
AD3	A2B1C3	2	400	0.15	5092.95	3055.77
AD4	A2B1C4	2	400	0.2	5092.95	4074.36
AD5	A2B2C1	2	500	0.05	6366.18	1273.24
AD6	A2B2C2	2	500	0.1	6366.18	2546.47
AD7	A2B2C3	2	500	0.15	6366.18	3819.71
AD8	A2B2C4	2	500	0.2	6366.18	5092.95
AD9	A2B3C1	2	600	0.05	7639.42	1527.88
AD10	A2B3C2	2	600	0.1	7639.42	3055.77
AD11	A2B3C3	2	600	0.15	7639.42	4583.65
AD12	A2B3C4	2	600	0.2	7639.42	6111.54
AD13	A2B4C1	2	700	0.05	8912.66	1782.53
AD14	A2B4C2	2	700	0.1	8912.66	3565.06
AD15	A2B4C3	2	700	0.15	8912.66	5347.59
AD16	A2B4C4	2	700	0.2	8912.66	7130.12

3.12. Análisis ANOVA

El análisis estadístico ANOVA, es conocido como el análisis de varianza, sirve para determinar la variabilidad de los datos obteniéndose el nivel de confianza de los datos experimentales. El análisis de varianza establece si las medias poblacionales son iguales o diferentes. El anova permite calcular varianza, grados de libertad, suma de cuadrados, prueba F como se indica la terminología en la tabla 29. El propósito del ANOVA en este estudio es analizar estadísticamente si las hipótesis nulas y alternativas se rechazan lo son aceptadas respecto a los parámetros que interactúan en el proceso. (Ranjit k Roy, 2010).

Tabla 28
Terminología Anova

Terminología anova			
Símbolo	Denominación	Símbolo	Denominación
S	Suma de Cuadrados	T	Total de resultados
DOF	Grados de libertad	CF	Factor de corrección
E	Error (experimental)	V	Varianza
P	Porcentaje de influencia	F	Relación de varianza
N	Número de experimentos	S'	Suma pura de cuadrados
fT	Total de grados de libertad		

Fuente: (Ranjit k Roy, 2010)

3.13.1. Suma de cuadrados.

La suma de cuadrados es la desviación experimental de la media de los datos. (Ranjit k Roy, 2010)

$$S_T = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\frac{1}{n}\right) \left[\sum_{i=1}^n y_i \right]^2 \quad (EC 6.) \text{ (Ranjit k Roy, 2010)}$$

$$ST = S - CF$$

3.13.2. Varianza.

La varianza en términos estadísticos es la medida de dispersión en función de la variabilidad de los datos respecto a la media poblacional.

$$Va = \frac{Sa}{DF} \quad (EC 7) \text{ (Ranjit k Roy, 2010)}$$

3.13.3. Error de la varianza.

El error de la varianza está expresado en términos de la suma de cuadrados del error para los grados de libertad del error.

$$Ve = \frac{Se}{DOF_{error}} \quad (EC 8) \text{ (Ranjit k Roy, 2010)}$$

3.13.4. Prueba F

Denominada como la prueba Fisher en la que sigue la distribución F. Es la relación entre la varianza (V) y el error (e). La prueba F se realiza mediante la comprobación del valor calculado en las tablas F con un nivel de significancia del 5%. Si el parámetro F es mayor al de la tabla es considerado significativo si es menor es considerado agrupado

$$F = \frac{Va}{Ve} \quad (EC 9) \text{ (Ranjit k Roy, 2010)}$$

3.13.5. Prueba de hipótesis

Examina dos hipótesis respecto a la población, se puede aceptar o rechazar la hipótesis dependiendo del experimento a demostrar. Empleando la tabla F se verificará si se cumple o se rechaza cada hipótesis en el experimento.

Hipótesis nula. - Es aquella hipótesis donde el investigador trata de rechazar. Determina que los parámetros de una muestra cumplan con el rango de la investigación de muestra. Suele ser una afirmación inicial basada en análisis estudiados.

Hipótesis alternativa. - Es la hipótesis donde el investigador piensa que es cierto o se espera probar que es cierto.

3.13.6. Ejemplo de cálculo.

Los ejemplos de cálculo se realizarán con la temperatura

Cálculo de los grados de libertad

- Grados de libertad totales

$$DOF_{total} = n - 1 = 32 - 1 = 31$$

- Grados de libertad de factores (Vc, Fz, estrategia)

$$DOF_1 = n_{niveles} - 1 = 4 - 1 = 3 \text{ (para Vc, fz)}$$

$$DOF_2 = n_{niveles} - 1 = 2 - 1 = 1 \text{ (para estrategia)}$$

- Grados de libertad del error

$$DOF_e = DOF_{total} - (DOF_1 + DOF_2) = 31 - ((2 * 3) + 1) = 24$$

Suma de cuadrados

$$S_T = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\frac{1}{n}\right) \left[\sum_{i=1}^n y_i\right]^2$$

$$\sum_{i=1}^n y_i^2 = (390^2 + 285^2 + 240^2 + 224^2 + 358^2 + 282^2 + \dots + 44^2 + 35^2) = 1282404$$

$$CF = \left(\frac{1}{n}\right) \left[\sum_{i=1}^n y_i\right]^2 = \frac{(390 + 285 + 240 + 224 + 358 + 282 + \dots + 44 + 35)^2}{32} = 945312.5$$

$$ST = 1282404 - 945312.5 = 337092$$

Cálculo de Varianza

L= número de niveles, n= número de ensayos para ese factor del nivel

$$SA = \sum_{k=1}^L \left(\frac{1}{n}\right) \left[\sum_{i=1}^n (Ak_i)\right]^2 - C.F$$

Para el nivel 1 del factor (Estrategia)

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^L \left(\frac{1}{n}\right) \left[\sum_{i=1}^n (Ak_i)\right]^2 \\ &= \frac{390 + 285 + 240 + 224 + 358 + 282 + 227 + 211 + 325 + 245 + 213 + 199 + 305 + 234 + 210 + 198}{16} \\ &= 1074332.3 \end{aligned}$$

Para el nivel 2 del factor (Estrategia)

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^L \left(\frac{1}{n}\right) \left[\sum_{i=1}^n (Ak_i)\right]^2 \\ &= \frac{223 + 104 + 70 + 53 + 165 + 85 + 57 + 45 + 135 + 71 + 49 + 39 + 117 + 62 + 44 + 35}{16} \\ &= 114582.25 \end{aligned}$$

$$SA_{(estrategia)} = (1074332.3 + 114582.25) - 945312.5 = 243602$$

$$SA_{(Vc)} = 10940.25 ; SA_{fz} = 77671$$

$$VA_{(estrategia)} = \frac{SA}{DF} = \frac{243602}{1} = 243602$$

$$VA_{(Vc)} = 3646.75$$

$$VC_{(fz)} = 25890.16$$

Cálculo de la suma de cuadrados del error

$$Se = ST - (SA + SB + SC)$$

$$Se = 337092 - (243602 + 3646.75 + 25890.16) = 4879$$

Error de la varianza

$$Ve = \frac{Se}{24} = \frac{4879}{24} = 203.28$$

Prueba F

$$VF_{(estrategia)} = \frac{Va}{Ve}$$

$$VF = \frac{243602}{203.28} = 1198.34$$

$$VF_{(vc)} = 17.93;$$

$$VF_{(fz)} = 127.36$$

CAPITULO IV:

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Resultados del experimento

Al aplicar la metodología Taguchi en un arreglo ortogonal L32 por la combinación de los parámetros y los niveles que influyen en el fresado. En la tabla 30 se indican datos obtenidos del tiempo real de maquinado en el equipo VMC 3016 Fadal y la temperatura a la cual alcanzó la herramienta de corte identificada con el Pirómetro (Infrared temperatura meter)

Tabla 29

Datos del experimento

Ensayo	Parámetros	Tiempo simulación [seg]	Tiempo real [seg]	Temp Herramienta [°C]	Rebaba	Longitud [mm]
C1	A2B1C1	318	390	72	Si	13.4
C2	A2B1C2	275	285	68	Si	10.1
C3	A2B1C3	237	240	47	Si	7.3
C4	A2B1C4	218	224	44	Si	5.1
C5	A2B2C1	343	358	57	Si	13.1
C6	A2B2C2	252	282	55	Si	8.2
C7	A2B2C3	222	227	49	Si	4.3
C8	A2B2C4	207	211	51	Si	7.6
C9	A2B3C1	313	325	48	Si	7.2
C10	A2B3C2	237	245	54	Si	4.2
C11	A2B3C3	212	213	44	Si	3.2
C12	A2B3C4	200	199	47	Si	2.6
C13	A2B4C1	291	305	43	Si	8.4
C14	A2B4C2	227	234	45	Si	5.1
C15	A2B4C3	205	210	39	Si	4.5
C16	A2B4C4	194	198	42	Si	3.7
AD1	A1B1C1	198	223	43	No	-
AD2	A1B1C2	99	104	44	No	-
AD3	A1B1C3	66	70	43	No	-
AD4	A1B1C4	50	53	45	No	-
AD5	A1B2C1	158	165	48	No	-
AD6	A1B2C2	79	85	50	No	-
AD7	A1B2C3	53	57	51	No	-
AD8	A1B2C4	40	45	48	No	-
AD9	A1B3C1	132	135	47	No	-

CONTIÚA 

AD10	A1B3C2	66	71	51	No	-
AD11	A1B3C3	44	49	48	No	-
AD12	A1B3C4	33	39	45	No	-
AD13	A1B4C1	113	117	41	Si	6.1
AD14	A1B4C2	57	62	39	Si	4.3
AD15	A1B4C3	38	44	40	Si	3.6
AD16	A1B4C4	28	35	36	Si	2.4

4.2. Resultado de tiempo de mecanizado por estrategia

4.2.1. Estrategia de mecanizado convencional (EMC)

Para la estrategia de mecanizado convencional se empleó una gráfica de línea para interpretar los resultados experimentales. En la figura 60 indica el comportamiento del tiempo respecto a la velocidad de corte de 400 m/min. La curva tiene un comportamiento decreciente, con un R^2 de 1 obteniendo un ajuste perfecto con un polinomio de 3er grado.

$$y = -5.1667x^3 + 61x^2 - 251.83x + 586$$

$$R^2 = 1$$

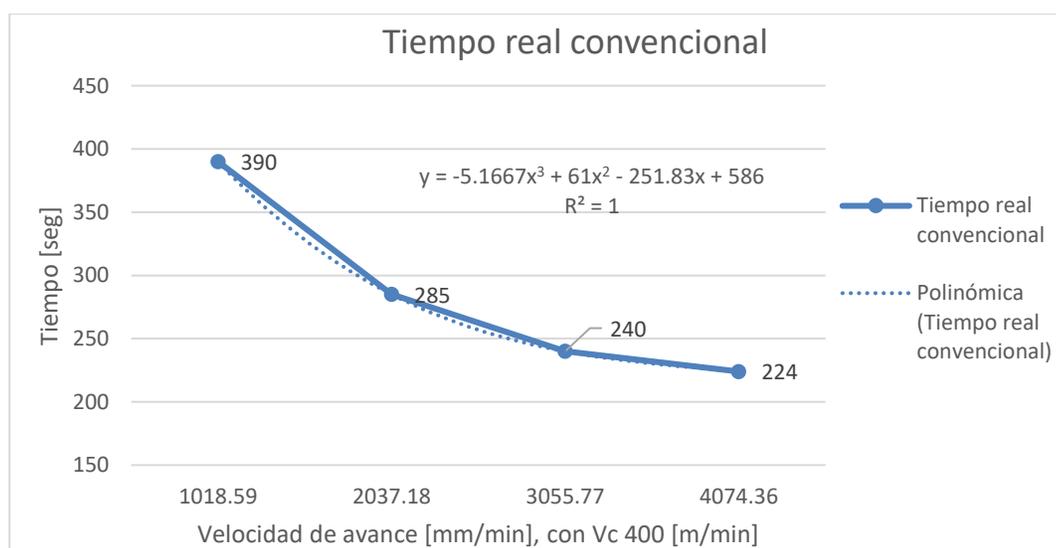
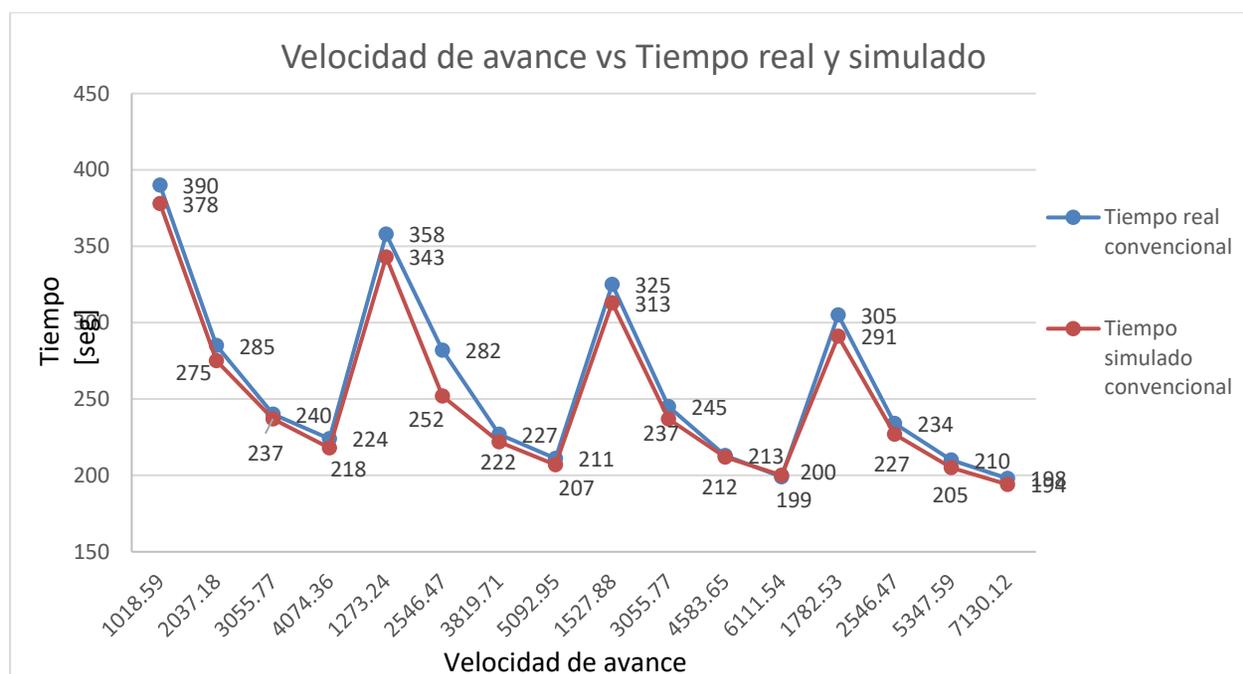


Figura 60 Velocidad de avance vs tiempo en el mecanizado convencional

Tabla 30*Cuadro de análisis del error (EMC)*

Ensayo	Parámetros	Tiempo Real [seg]	Tiempo Simulado [seg]	% Error
C1	A2B1C1	390	318	22.64
C2	A2B1C2	285	275	3.64
C3	A2B1C3	240	237	1.27
C4	A2B1C4	224	218	2.75
C5	A2B2C1	358	343	4.37
C6	A2B2C2	282	252	11.90
C7	A2B2C3	227	222	2.25
C8	A2B2C4	211	207	1.93
C9	A2B3C1	325	313	3.83
C10	A2B3C2	245	237	3.38
C11	A2B3C3	213	212	0.47
C12	A2B3C4	199	200	0.50
C13	A2B4C1	305	291	4.81
C14	A2B4C2	234	227	3.08
C15	A2B4C3	210	205	2.44
C16	A2B4C4	198	194	2.06

**Figura 61** Velocidad de avance vs Temperatura en el mecanizado convencional

En la figura 61 se indica el comportamiento del tiempo en el mecanizado convencional real y simulado, con una forma de dientes de sierra en forma decreciente, a medida que incrementa la velocidad de corte y la velocidad de avance, tiende a disminuir el tiempo de maquinado. En la tabla 31 se indica el error del tiempo real y el tiempo simulado, esta variación de error de tiempo real y simulado se debe al tiempo de no operación de la herramienta, en ir desde el cero de máquina hasta el cero de pieza. A medida que el avance va incrementándose el tiempo de no operación tiende a disminuir como indica el porcentaje de error decreciendo desde 22.64% hasta 2.75% con la misma velocidad de corte de 400 m/min, pero velocidad de avance diferente.

4.2.2. Estrategia de mecanizado adaptativa (EMA)

Para la estrategia adaptativa se empleó un gráfico de línea para interpretar los resultados experimentales. En la figura 62, indica el comportamiento del tiempo real con una velocidad de corte de 400 m/min, donde a medida que la velocidad de avance aumenta en conjunto a la velocidad de corte, desciende el tiempo con un polinomio de 3er grado con un R^2 de 1, obteniendo un ajuste perfecto a la línea de tendencia.

$$y = -11.333x^3 + 110.5x^2 - 371.17x + 495$$

$$R^2 = 1$$

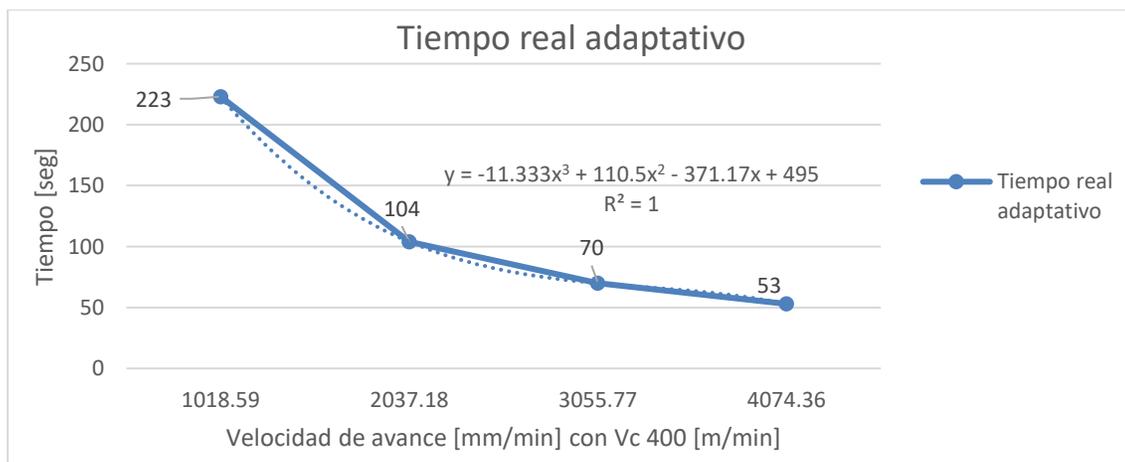
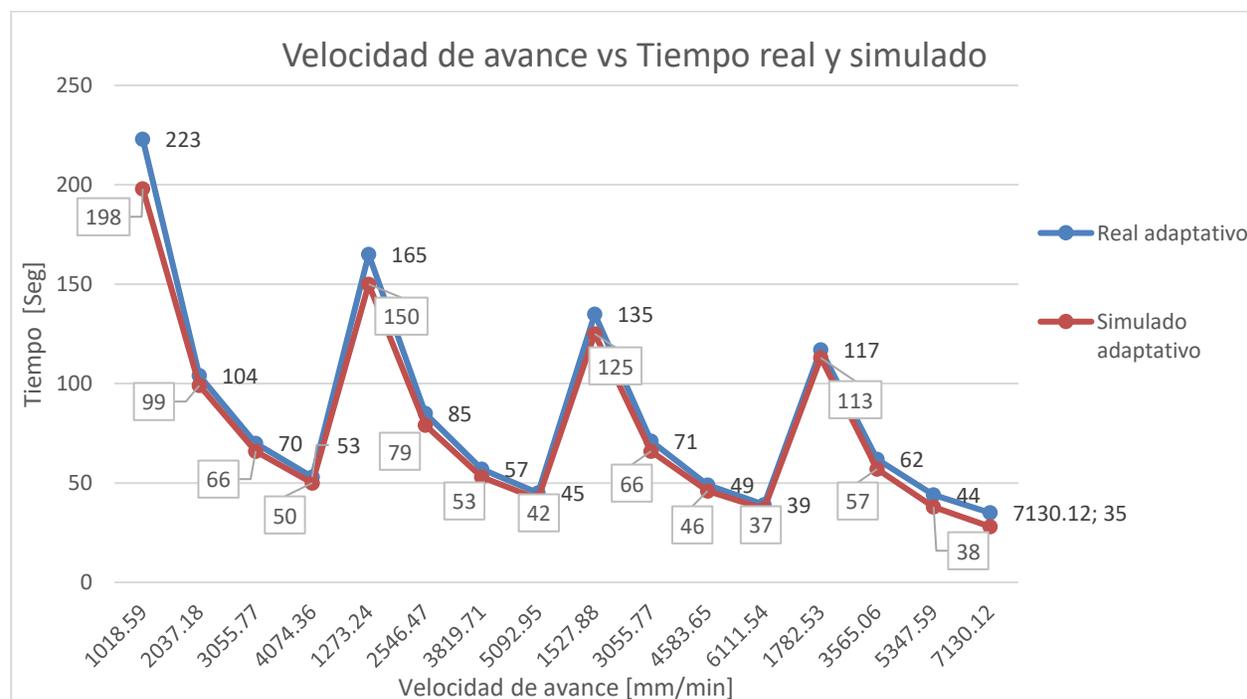


Figura 62 Velocidad de avance vs tiempo con estrategia adaptativa

Tabla 31

Cuadro de análisis del error simulado (EMA)

Ensayo	Parámetros	Tiempo Real [seg]	Tiempo Simulado [seg]	% Error
AD1	A1B1C1	223	198	12.63
AD2	A1B1C2	104	99	5.05
AD3	A1B1C3	70	66	6.06
AD4	A1B1C4	53	50	6.00
AD5	A1B2C1	165	150	10.00
AD6	A1B2C2	85	79	7.59
AD7	A1B2C3	57	53	7.55
AD8	A1B2C4	45	42	7.14
AD9	A1B3C1	135	125	8.00
AD10	A1B3C2	71	66	7.58
AD11	A1B3C3	49	46	6.52
AD12	A1B3C4	39	37	5.41
AD13	A1B4C1	117	109	7.34
AD14	A1B4C2	62	58	6.90
AD15	A1B4C3	44	43	2.33
AD16	A1B4C4	35	34	2.94

**Figura 63** Velocidad de avance vs Temperatura en el mecanizado adaptativo

En la figura 63 se indica el comportamiento del tiempo real y el tiempo de simulación empleando estrategia adaptativa, donde tiene un comportamiento de diente de sierra de manera decreciente. A medida que la velocidad de corte y el avance incrementa, el tiempo de maquinado disminuye. En la tabla 32 se indica el error del tiempo real y el tiempo simulado, donde existe una disminución en el porcentaje de error desde 12.63% hasta el 6.00% con la misma velocidad de corte (400 m/min) pero con diferente velocidad de avance. La disminución del error es debido al tiempo de no operación de la herramienta en ir desde cero de máquina hasta el cero de pieza, conforme incrementa la velocidad de avance, el porcentaje de error disminuye.

4.2.3. Comparación de tiempo de mecanizado de las estrategias (EMC -EMA)

Al comparar las gráficas entre la estrategia de mecanizado convencional frente a la estrategia de mecanizado adaptativa como se indica en la figura 64. Se aprecia claramente como es menor el tiempo real de mecanizado de la estrategia adaptativa. Presentan ambos mecanizados un comportamiento decreciente en forma de diente de sierra. Con un tiempo máximo de mecanizado de 390 segundos y un tiempo mínimo de 199 segundos del mecanizado convencional frente a un tiempo máximo de 223 segundos y un tiempo mínimo de 39 segundos en la estrategia adaptativa.

Tabla 32

Porcentaje de reducción de tiempo de mecanizado

Ensayo	T (EMC) [seg]	T (EMA) [seg]	Reducción de tiempo [seg]	% reducción
A1B1C1 - A2B1C1	390	223	167	42.8
A1B1C2 - A2B1C2	285	104	181	63.5
A1B1C3 - A2B1C3	240	70	170	70.8
A1B1C4 - A2B1C4	224	53	171	76.3
A1B2C1 - A2B2C1	358	165	193	53.9
A1B2C2 - A2B2C2	282	85	197	69.9
A1B2C3 - A2B2C3	227	57	170	74.9

CONTIÚA 

A1B2C4 - A2B2C4	211	45	166	78.7
A1B3C1 - A2B3C1	325	135	190	58.5
A1B3C2 - A2B3C2	245	71	174	71.0
A1B3C3 - A2B3C3	213	49	164	77.0
A1B3C4 - A2B3C4	199	39	160	80.4
A1B4C1 - A2B4C1	305	117	188	61.6
A1B4C2 - A2B4C2	234	62	172	73.5
A1B4C3 - A2B4C3	210	44	166	79.0
A1B4C4 - A2B4C4	198	35	163	82.3

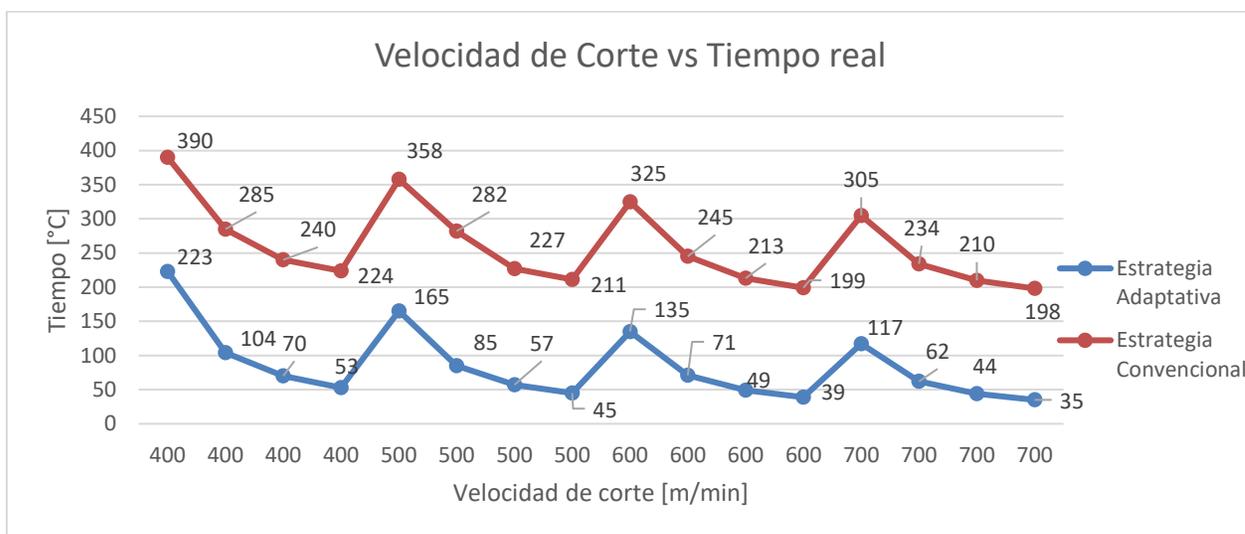


Figura 64 Comparación de mecanizados tiempos reales, convencional vs adaptativo

En la figura 65 se diferencia entre ambas estrategias con un gráfico de barras donde la estrategia de mecanizado convencional presente mayor tiempo de operación frente a la estrategia de mecanizado adaptativa. Se puede observar el patrón en el cambio de velocidades de corte en forma decreciente el tiempo de mecanizado entre ambas estrategias, se indica la reducción del tiempo entre ambas estrategias, con tiempos reales y tiempos de simulación. En la tabla 33 se indica el porcentaje de reducción del tiempo de mecanizado entre ambas estrategias con un máximo de

reducción de tiempo de 82.3% con una velocidad de corte de 700 m/min y un avance por diente de 0.2 mm/diente. Un mínimo de reducción de tiempo de 42.8% con una velocidad de corte de 400 m/min y un avance por diente de 0.05 mm/diente.

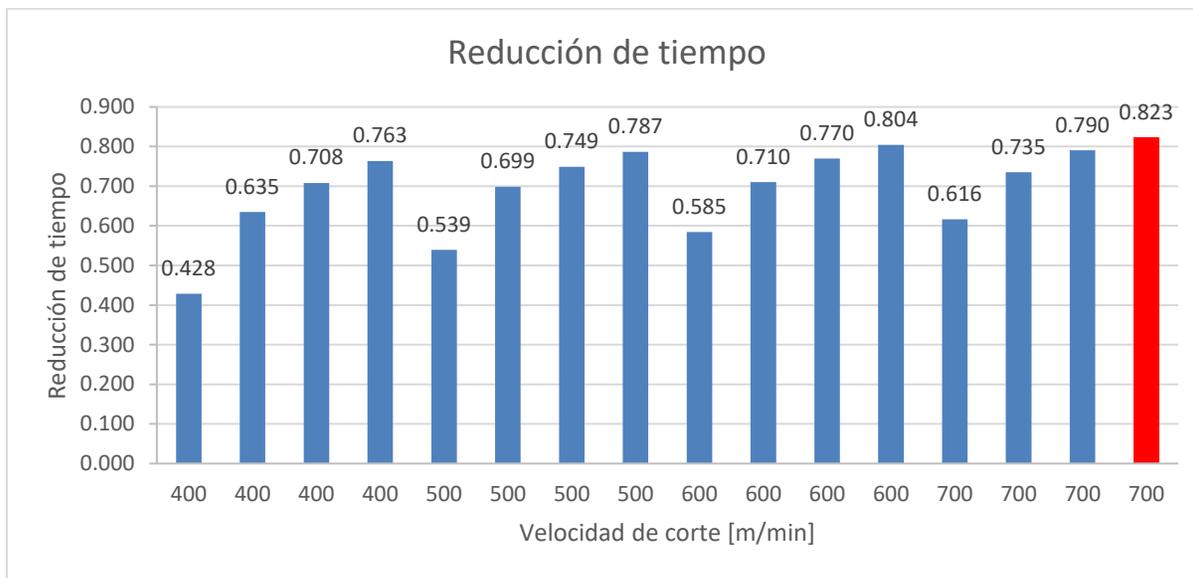


Figura 65 Reducción de tiempo

A partir de la tabla 33 y figura 65 la gráfica presenta una tendencia creciente a medida que incrementa el avance por diente y la velocidad de corte. Analizando por la velocidad de corte se incrementa desde 42.8% hasta 76.3% con una velocidad de corte constante de 400 m/min, de igual manera se presenta el mismo comportamiento de 53.9% hasta 78.7% con una velocidad de corte constante de 500 m/min, empleando una velocidad de corte constante de 600 m/min presenta una reducción de 58.5% hasta un 80.4%. Se tiene un porcentaje de reducción máximo con una velocidad de corte constante de 700 m/min de 61.6% hasta 82.3%.

4.3. Resultado de temperatura por estrategia

4.2.1. Mecanizado Convencional

A partir de los resultados obtenidos en la experimentación se empleó una gráfica de línea como indica la figura 66 en EMC, donde a medida que se incrementa la velocidad de corte, tiende a disminuir la temperatura en la herramienta con una temperatura máxima de 72°C con una velocidad de corte de 400 m/min en un avance por diente de 0.05 mm/diente y una temperatura mínima de 41°C. La curva presenta una ecuación de 4to grado en forma decreciente con un R^2 de 0.8069 obteniendo un buen ajuste de la línea de tendencia. La herramienta enfría por medio de una transferencia de calor por convección siendo el aire el medio de enfriamiento

$$y = 0.0091x^4 - 0.3442x^3 + 4.4326x^2 - 23.207x + 92.332$$

$$R^2 = 0.7711$$

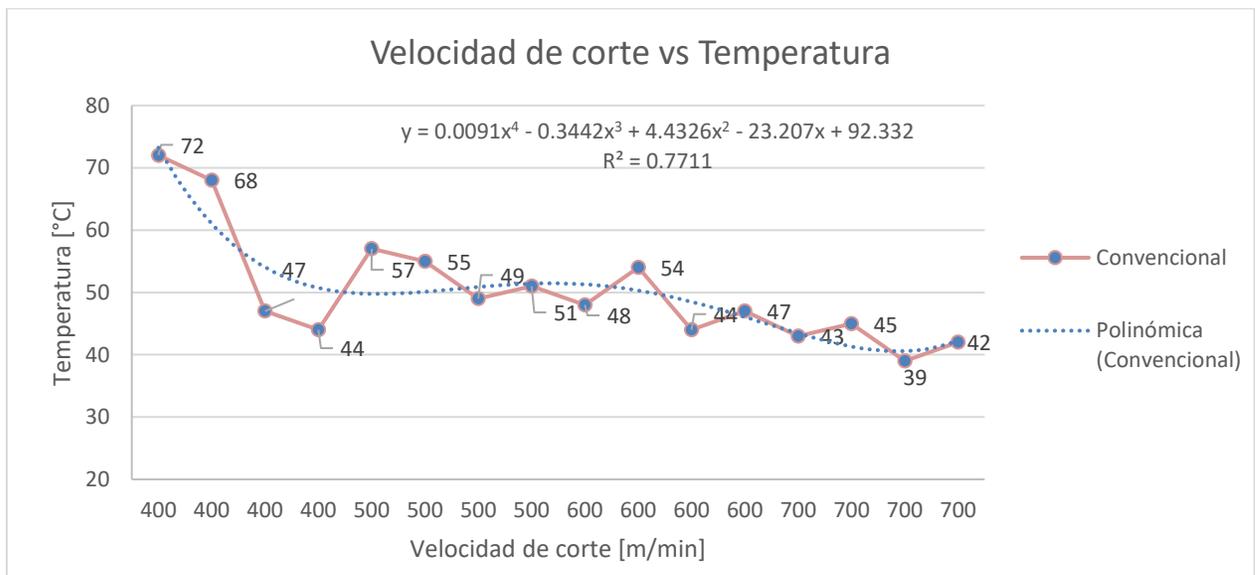


Figura 66 Velocidad de corte vs Temperatura en el mecanizado convencional

4.2.2. Mecanizado Adaptativo.

Para el análisis de la temperatura en el mecanizado adaptativo se empleó una gráfica de línea como indica la figura 67. La curva presenta una ecuación de 3er grado en forma decreciente con un R^2 de 0.8467 obteniendo un buen ajuste de la línea de tendencia.

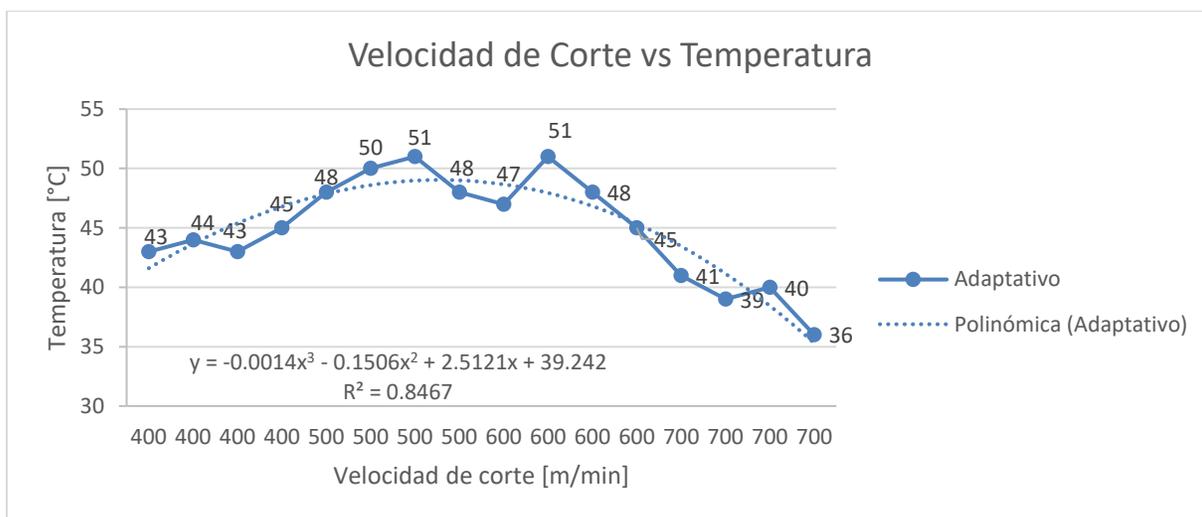


Figura 67 Velocidad de corte vs Temperatura con estrategia adaptativo

En la figura se puede apreciar que mientras incrementa la velocidad de corte hasta los 500 m/min y tiende a descender como explican las curvas del Dr. Salomon, es decir, si incrementamos la velocidad de corte esta tenderá a disminuir hasta volverse constante. En la gráfica la línea de tendencia es expresada mediante una ecuación polinómica de tercer grado con una temperatura máxima de 51°C y una mínima de 38 °C con una velocidad de corte de 600 m/min. La herramienta enfría por medio de una transferencia de calor por convección siendo el aire el medio de enfriamiento

La ecuación polinómica de tercer grado es la siguiente:

$$y = -0.0014x^3 - 0.1506x^2 + 2.5121x + 39.242$$

$$R^2 = 0.8467$$

4.2.3. Comparación de temperatura de las estrategias (EMC -EMA)

Al comparar entre EMC frente al EMA como se indica en la figura 68. La estrategia adaptativa presenta un mejor comportamiento, decrece la temperatura a medida que aumenta la velocidad de corte. La temperatura es constante a lo largo de la herramienta generando un aumento en la vida útil de la herramienta. Frente al mecanizado convencional donde la temperatura presenta un comportamiento irregular decreciente, pero a mayores velocidades de corte tiende a disminuir

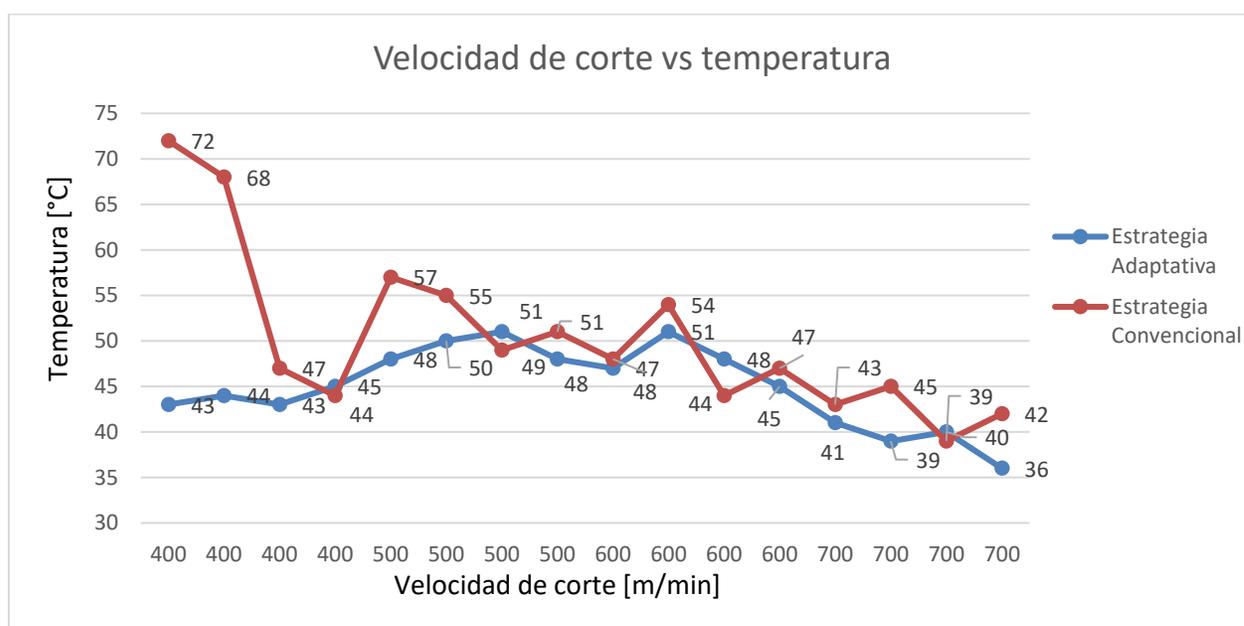


Figura 68 Comparación de temperatura

4.4. Resultados con la metodología Anova para el tiempo

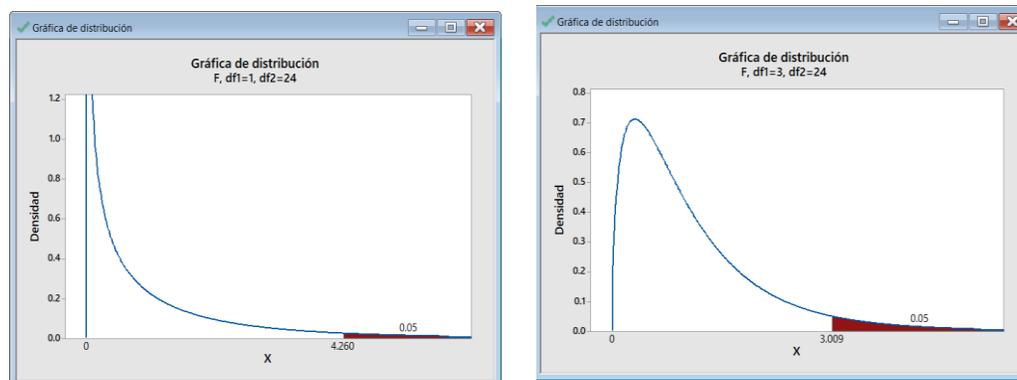
Respecto al tiempo de mecanizado empleando la metodología Anova se determinaron los parámetros más influyentes para este experimento, los valores de F ayudarán para aceptar o rechazar las hipótesis nulas en la tabla 34 podremos verificar el valor de F en conjunto a los valores de F en la tabla de Fisher que se indica en la figura 69.

Tabla 33

Resumen del análisis de varianza para el tiempo

Análisis de varianza						
	Fuente	DOF	S	V	F	P
A	Estrategia	1	243602	243602	1198.35	0.00
B	Vc [m/min]	3	10940	3646.75	17.94	0.00
C	Fz [mm/diente]	3	77671	25890.16	127.36	0.00
	Error	24	4879	203		
	Total	31	337092			

A partir de la tabla 34 se define si en los resultados existen diferencia estadística. El F estadístico con una confianza al 95% para la estrategia (A) es: $F_A(0.05:1:24) = 1198.35$, para la velocidad de corte (B) es: $F_B(0.05:3:24) = 17.94$, para el avance por diente (C) es: $F_C(0.05:3:34) = 127.36$; estos son mayores a los valores tabulados en las tablas Fisher (F) de 4.26 para la estrategia (A), 3.009 para la velocidad de corte y avance por diente (B y C), por ende se rechaza la hipótesis nula donde las medias de la población son iguales y aceptamos la hipótesis alternativa donde las medias son distintas. Entonces existe una diferencia estadística significativa, en los tratamientos es menor que el error máximo que estamos permitiendo $P < 0.05$. Con los valores de P obtenidos en la tabla 34 significa que los resultados son fiables cumpliendo estadísticamente. En el anexo A1 se indica la tabla de errores respecto al valor P (A Douglas, 1995)

**Figura 69** Gráfica de distribución de probabilidad F crítico

En la tabla 35 nos permite identificar los factores que fueron más influyentes en el experimento, desde el más influyente hasta el menos influyente siendo la estrategia adaptativa el parámetro más influyente dentro de la comparación de mecanizados, y siendo la velocidad de corte el parámetro que menos variación estadística presenta.

Tabla 34

Tabla de respuesta para las medias del tiempo

Nivel	Estrategia	Vc [m/min]	Fz [mm/diente]
1	259.13	198.63	252.25
2	84.63	178.75	171.00
3		159.50	138.75
4		150.63	125.50
Delta	174.50	48	126.75
Clasificación	1	3	2

$$\Delta = \text{Valor máx} - \text{Valor mín} = 259.13 - 84.63 = 174.50 \text{ seg}$$

Los parámetros más influyentes que se considera para la temperatura se indica en la figura 69, siendo el la velocidad de corte el parámetro más influyente en el mecanizado. Los parámetros óptimos para tener la temperatura mínima son:

Tabla 35

Parámetros óptimos influyentes en el tiempo

Parámetros óptimos	
Estrategia	Adaptativa
Velocidad de corte [m/min]	700
Avance por diente [mm/diente]	0.2
Ancho de corte (10%) [mm]	2.5
Profundidad de corte [mm]	14

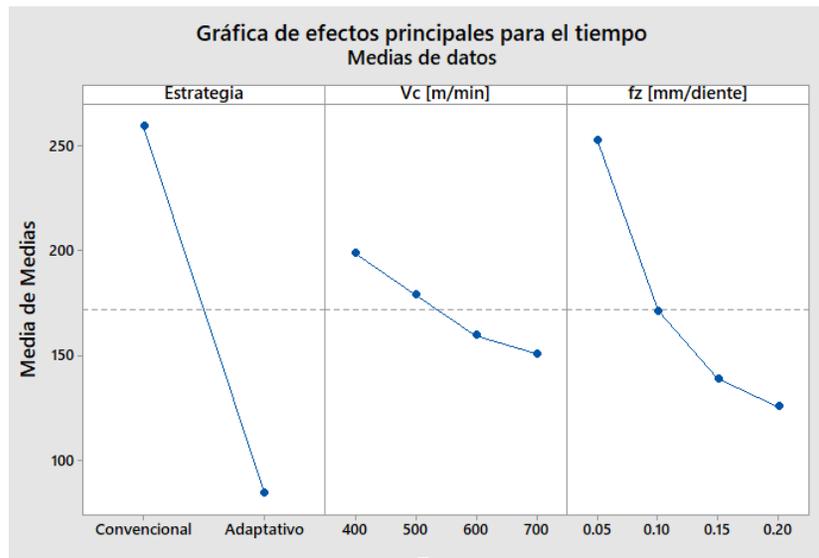


Figura 70 Principales efectos de los factores respecto al tiempo

En la figura 70 se compara la interacción de las medias respecto al tiempo, para la estrategia tiene un comportamiento lineal decreciente, respecto a la velocidad de corte tiene un comportamiento decreciente con una pendiente no tan pronunciada, respecto al avance por diente presenta un comportamiento decreciente más pronunciado respecto a la velocidad de corte.

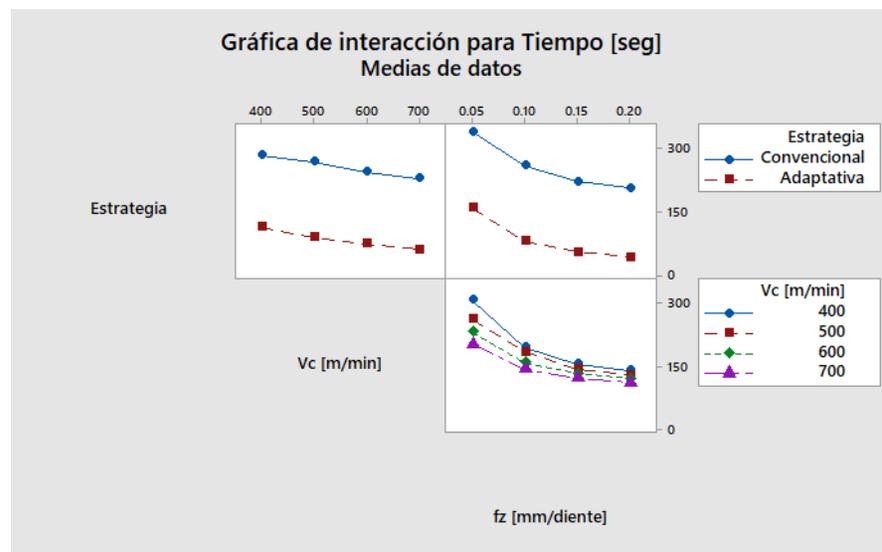


Figura 71 Interacción respecto al tiempo

En la figura 71 se indica la interacción respecto al tiempo por las medias de datos, comparando las estrategias presentan un comportamiento lineal decreciente, pero respecto al avance por diente tienen un comportamiento decreciente cuadrático, en la figura 71 se indica el cambio en la superficie de las estrategias y la velocidad de corte respecto al tiempo real de maquinado.

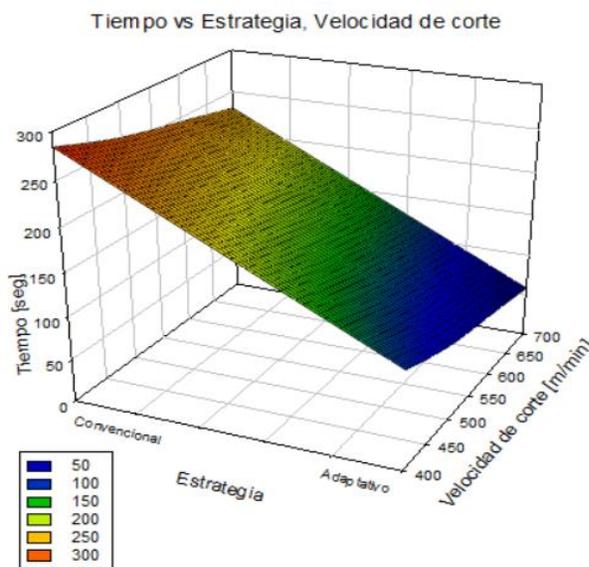


Figura 72 Interacción respecto al tiempo

La ecuación de regresión del tiempo servirá para relacionar el parámetro de respuesta siendo este el tiempo, respecto a los parámetros del modelo experimental.

$$\text{Tiempo [seg]} = 626.5 - 0.1089 Vc - 825 fz - 174.5 \text{ Estrategia} \quad (EC 11)$$

$$\text{Tiempo [seg]} = 626.5 - 0.1089 (700) - 825 (0.2) - 174.5 (2) = 36.27$$

Intervalo de confianza

La metodología Taguchi finaliza con la representación de los valores con un parámetro estadístico dentro de un rango, el cual es probable que caiga en un nivel de confianza. Donde CI es

el intervalo de confianza, Ve es la varianza del error encontrado en la tabla 25 $Ve = 203$, n_{eff} es el número efectivo de repeticiones, F es el factor al 95% de confiabilidad, α es la significancia, f_e son los grados de libertad del error, T_{dof} es el total de factores de grados de libertad, R es el número de repeticiones para la confirmación de los experimentos.

$$CI = \sqrt{F_{\alpha,1,f_e} Ve \left[\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{R} \right]} \quad (EC 12)$$

$$F_{0.05,1,24} = 4.226, Ve = 203, R = 3, T_{tof} = 3 + 3 + 1 = 7$$

$$N_{eff} = \frac{N}{1 + T_{dof}} \quad (EC 13)$$

$$N_{eff} = \frac{N}{1 + T_{dof}} = \frac{32}{1 + 7} = 4$$

$$CI = \sqrt{F_{\alpha,1,f_e} Ve \left[\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{R} \right]} = \sqrt{(4.226) * 203 * \left[\frac{1}{4} + \frac{1}{3} \right]} = \pm 22.37$$

El promedio óptimo de tiempo con un intervalo de confianza 95% es:

$$[T_{opt} - CI_{Tiempo}] < Time_{exp} < [T_{opt} + CI_{Tiempo}] \quad (EC 14)$$

$$[35 - 22.37] < Time_{exp} < [35 + 22.37]$$

$$12.63 < Time_{exp} < 57.37$$

Tabla 36

Valores predictivos y confirmación con la metodología Taguchi

Nivel	Método Taguchi		
Tiempo[seg]	Exp	Pred	Error (%)
A ₂ B ₄ C ₄ (óptimo)	35	36.27	3.50
A ₁ B ₂ C ₁ (Random)	358	356.3	0.477
A ₁ B ₃ C ₁ (Random)	325	345.41	5.91

4.5. Resultados con la metodología Anova para la temperatura

Con la metodología anova podemos determinar cuáles son los parámetros más influyentes en la temperatura y en el tiempo de mecanizado. Empleando las fórmulas que se encuentran en el capítulo anterior conoceremos la varianza, el factor F.

En la tabla 38 podemos notar los valores F que nos servirá para aceptar o rechazar la hipótesis nula para verificar el factor más influyente para la temperatura, con este análisis anova podemos determinar que la velocidad de corte es el parámetro influyente seguido por la estrategia de mecanizado.

Tabla 37

Resumen del análisis de varianza

Análisis de varianza						
	Fuente	DOF	S	V	F	P
A	Estrategia	1	215.281	215.28	6.08	0.021
B	Vc [m/min]	3	684.6	228.20	6.45	0.002
C	Fz [mm/diente]	3	404.6	134.86	3.81	0.023
	Error	24	849.3	35.39		
	Total	31	2153.7			

A partir de la tabla 38 se define si en los resultados existen diferencia estadística. El F estadístico con una confianza al 95% para la estrategia (A) es: $F_A(0.05:1:24) = 6.08$ para la velocidad de corte (B) es: $F_A(0.05:3:24) = 6.45$, para el avance por diente (C) es: $F_A(0.05:3:34) = 3.81$; estos son mayores a los valores tabulados en las tablas Fisher (F) de 4.26 para la estrategia (A), para la velocidad de corte y avance por diente (B y C) un valor de 3.009, por ende se rechaza la hipótesis nula donde las medias de la población son iguales y aceptamos la hipótesis alternativa donde las medias son distintas. Entonces existe una diferencia estadística significativa, en los tratamientos es

menor que el error máximo que estamos permitiendo $P < 0.05$. Con los valores obtenidos en la tabla 38 estudio es fiable, cumpliendo estadísticamente. En el anexo A1 indica los errores frecuentes del valor P (Arias, 2017)

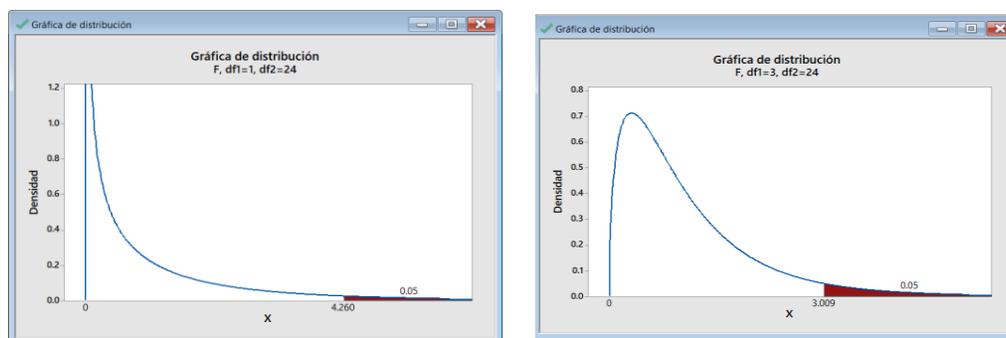


Figura 73 Gráfica de distribución de probabilidad F crítico

En la tabla 39 nos permite identificar los factores que fueron más influyentes en el experimento, desde el más influyente hasta el menos influyente siendo la velocidad de corte el parámetro más influyente, y siendo la estrategia el parámetro que menos variación estadística presenta.

Tabla 38

Tabla de respuesta para las medias de la temperatura

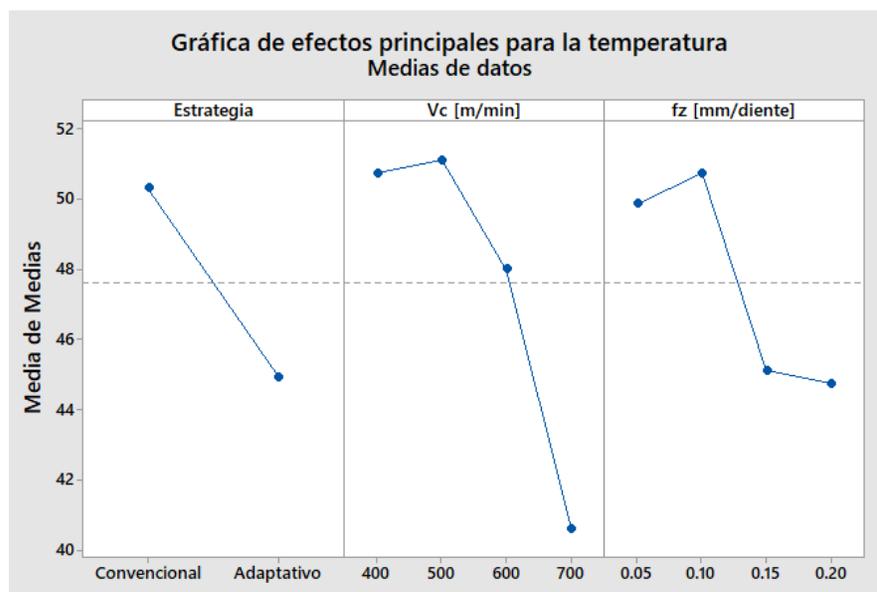
Nivel	Estrategia	Vc [m/min]	Fz [mm/diente]
1	49.19	50.75	49.88
2	44	50.13	50.13
3		46.38	44.63
4		39.13	41.75
Delta	5.19	11.63	8.38
Clasificación	3	1	2

$$\Delta = \text{Valor máx} - \text{Valor mín} = 50.75 - 39.13 = 11.63^{\circ}\text{C}$$

Los parámetros más influyentes que se considera para la temperatura se indica en la figura 74, siendo el la velocidad de corte el parámetro más influyente en el mecanizado. Los parámetros óptimos para tener la temperatura mínima se indica en la tabla 40.

Tabla 39*Parámetros óptimos influyentes en la temperatura*

Parámetros óptimos	
Estrategia	Adaptativa
Velocidad de corte [m/min]	700
Avance por diente [mm/diente]	0.2
Ancho de corte (10%) [mm]	2.5
Profundidad de corte [mm]	14

**Figura 74** Principales efectos de los factores respecto a la temperatura

En la figura 75 se compara la interacción de las medias respecto a la temperatura. Para la estrategia presentan un comportamiento lineal decreciente, respecto a la velocidad de corte existe una pendiente creciente de una velocidad de corte de 400 a 500 m/min, pero con un comportamiento decreciente con una velocidad de corte entre 500 y 700 m/min, siendo de 600 a 700 m/min una pendiente decreciente más pronunciada donde a velocidades de corte altas la temperatura disminuye drásticamente. Respecto al avance por diente, existe un aumento hasta un avance por

diente de 0.1 mm/diente, pero decrece drásticamente hasta 0.15 mm/diente y se vuelve menos pronunciado a un avance de 0.2 mm/diente.

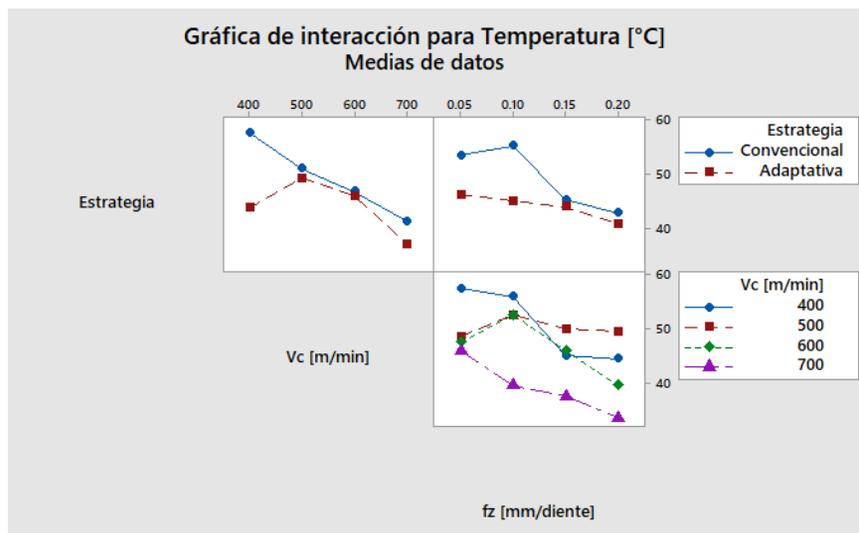


Figura 75 Interacción respecto a la temperatura

En la figura 75 se indica la gráfica de la interacción de temperatura respecto a las medias de los datos respecto a la estrategia convencional presenta un comportamiento lineal decreciente frente a la estrategia adaptativa respecto a la velocidad de corte, pero respecto al avance por diente presenta la estrategia adaptativa un comportamiento lineal decreciente. En la figura 76 se indica los cambios de superficie respecto a las estrategias y las velocidades de corte para la temperatura de la herramienta.

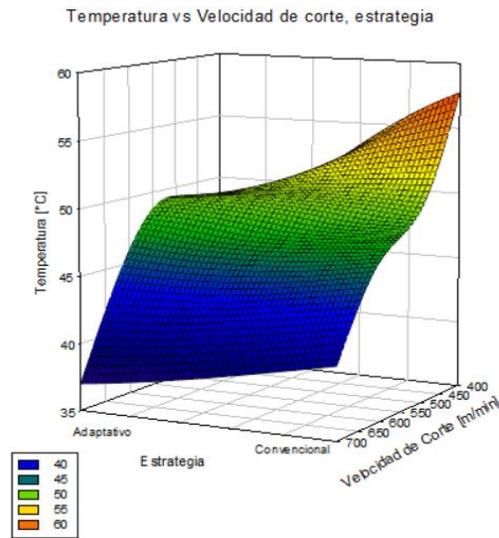


Figura 76 Interacción respecto a la temperatura

La ecuación de regresión de temperatura servirá para relacionar el parámetro de respuesta siendo este la temperatura, respecto a los parámetros del modelo experimental.

$$Temperatura [^{\circ}C] = 79.36 - 5.38 Estrategia - 0.03350 Vc - 42Fz \quad (EC 15)$$

$$T_{pred}[^{\circ}C] = 79.36 - 5.38(2) - 0.033350(700) - 42(0.2) = 36.75$$

Intervalo de confianza

La metodología Taguchi finaliza con la representación de los valores con un parámetro estadístico dentro de un rango, el cual es probable que caiga en un nivel de confianza. Donde CI es el intervalo de confianza, V_e es la varianza del error encontrado en la tabla 25 $V_e = 35.458$, n_{eff} es el número efectivo de repeticiones, F es el factor al 95% de confiabilidad, α es la significancia, f_e son los grados de libertad del error, T_{dof} es el total de factores de grados de libertad, R es el número de repeticiones para la confirmación de los experimentos.

$$CI = \sqrt{F_{\alpha,1,f_e} V_e \left[\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{R} \right]} \quad (EC 16)$$

$$F_{0.05,1,24} = 4.226, Ve = 35.458, R = 3, T_{tof} = 3 + 3 + 1 = 7$$

$$N_{eff} = \frac{N}{1 + T_{dof}} \quad (EC 17)$$

$$N_{eff} = \frac{N}{1 + T_{dof}} = \frac{32}{1 + 7} = 4$$

$$CI = \sqrt{F_{\alpha,1,fe} Ve \left[\frac{1}{nef} + \frac{1}{R} \right]} = \sqrt{(4.226) * 35.458 * \left[\frac{1}{4} + \frac{1}{3} \right]} = \pm 9.349$$

El promedio óptimo de temperatura con un intervalo de confianza 95% es:

$$[T_{opt} - CI_{Temp}] < Temp_{exp} < [T_{opt} + CI_{Temp}] \quad (EC 18)$$

$$[36 - 9.349] < Temp_{exp} < [36 + 9.349]$$

$$26.651 < Temp_{exp} < 45.349$$

Tabla 40

Valores predictivos y confirmación con la metodología Taguchi

Método Taguchi			
Temperatura[°C]	Exp	Pred	Error (%)
A ₂ B ₄ C ₄ (óptimo)	36	36.75	2.04
A ₁ B ₂ C ₁ (Random)	57	55.13	3.39
A ₂ B ₁ C ₄ (Random)	45	46.80	3.84

4.6. Resultados de las estrategias

En base a los resultados óptimos por la metodología Taguchi y anova se compara en la tabla 42 los resultados para el tiempo de operación como para la temperatura de la herramienta de corte, con una reducción máxima de tiempo de 82.3% y una reducción de temperatura de 9.52% comparando entre la estrategia convencional y la estrategia adaptativa

Tabla 41*Resultados de estrategias*

	Parámetros	Estrategia		% Reducción
		Convencional	Adaptativa	
Tiempo [seg]	A ₂ B ₄ C ₄	198	36	82.3
Temperatura [°C]	A ₂ B ₄ C ₄	42	38	9.52

4.7. Ensayos de confirmación

A partir de los parámetros óptimos encontrados en la tabla 36 y 40 se realizaron 3 ensayos de confirmación a partir de la metodología Taguchi, en la tabla 42 se indican los resultados obtenidos en los ensayos confirmatorios por lo que se encuentran dentro del rango del intervalo de confianza obtenido en la ecuación 14 y 18, corroborando así la validez del estudio respecto al tiempo de mecanizado y temperatura de la herramienta de corte, en la figura 77 se indican los ensayos realizados y el tiempo de confirmación.

Tabla 42*Ensayos confirmatorios*

Ensayos	Parámetros			Resultados	
	Estrategia	Vc [m/min]	Fz [mm/diente]	Tiempo [seg]	Temperatura [°C]
1	Adaptativa	700	0.2	34	39
2	Adaptativa	700	0.2	34	37
3	Adaptativa	700	0.2	35	36

**Figura 77** Ensayos confirmatorios y tiempo de ciclo

CAPITULO V:

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- La trayectoria en las estrategias de mecanizado, es un parámetro que influye en el mecanizado para obtener menores tiempos de operación, donde se determinó que la estrategia de mecanizado adaptativa con un tiempo de 35 segundos con los parámetros A₂ B₄ C₄, es óptima frente a la estrategia de mecanizado convencional con un tiempo de 163 segundos empleando los parámetros A₁ B₄ C₄. La estrategia de mecanizado adaptativa reduce el tiempo de mecanizado en 42.8% con los parámetros mecanizados mínimos de velocidad de corte de 400 m/min con un avance por diente de 0.05 mm/diente, y un tiempo de reducción máximo del 82.3% con una velocidad de corte de 700 m/min y un avance por diente de 0.2 mm/diente.
- A partir de los parámetros óptimos encontrados por la metodología Taguchi A₂ B₄ C₄ para la temperatura el parámetro más influyente es la velocidad de corte, se determinó para la estrategia convencional una temperatura mínima de 42°C, para la estrategia adaptativa una temperatura mínima de 38°C con un porcentaje de reducción de temperatura de 9.52% entre ambas estrategias.
- En los ensayos obtenidos la estrategia de mecanizado adaptativa presenta un mejor acabado sin dejar material en la pieza de trabajo, sin dejar la herramienta de corte embotada, con una viruta delgada y constante frente a la estrategia adaptativa que dejó la herramienta embotada y quemaduras en la herramienta de corte, material sobrante en la pieza de trabajo y con una viruta irregular y quemada en ciertas ocasiones.

- Se presenta una optimización en los parámetros de mecanizado empleando una herramienta HSS de marca Somta del mercado ecuatoriano ya que el fabricante recomienda una profundidad radial de 1.25 mm y un avance de 4800 mm/min, pero en este estudio empleando la estrategia de mecanizado adaptativa, se mejoró los parámetros de la herramienta de corte a 2.5 mm incrementándose un 50%, además de un aumento en el avance a 7130.12 mm/min incrementándose 32.67% en la velocidad de avance, la estrategia adaptativa no presentó rebaba o quemaduras en la herramienta de corte durante los ensayos.
- De acuerdo a los análisis estadísticos, con los datos obtenidos en la tabla 30 de temperatura y tiempo real y a partir de la tabla 34 y 38 del análisis estadístico Anova, establece valores de $P < 0.05$ significando que es improbable que los datos se deban al azar, además representa que el estudio es fiable. Es probable obtener valores semejantes al realizar el experimento bajo los mismos parámetros de estudio.
- Por la ecuación de regresión (EC 11) se obtuvo en parámetro $A_2 B_4 C_4$ un error de 3.50% además en un parámetro aleatorio $A_1 B_2 C_1$ un error del 0.477% en base al tiempo experimental y el tiempo de predicción de la ecuación. Para la temperatura por medio de la combinación de los parámetros $A_2 B_4 C_4$ un error del 2.04% y en un valor aleatorio $A_2 B_1 C_4$ un error 3.84% en base a la ecuación matemática (EC 15) siendo ambas ecuaciones una buena aproximación matemática del diseño de experimentos frente a la realidad.
- Por medio de la metodología Taguchi se obtuvieron los parámetros óptimos tanto para el tiempo de mecanizado como para la temperatura de herramienta de corte con la combinación de los parámetros $A_2 B_4 C_4$: estrategia de mecanizado adaptativa (EMA) con una velocidad de corte de 700 m/min, con un avance por diente de 0.02 mm/diente. Con

esta combinación se obtuvo los menores tiempos de operación y menores temperatura en la herramienta, con un comportamiento decrecientes como indica las figuras 70 y 74, al igual que las curvas del Dr. Salomon donde a medida que la velocidad de corte aumenta, la temperatura desciende.

5.2. Recomendaciones

- Revisar las entradas de la herramienta de corte tanto en la simulación CAM y en el equipo realizando un dry drum para la hora de realizar el maquinado evitar posibles choques de la herramienta de corte con la pieza de trabajo además para evitar daños en el husillo.
- Seguir las normas de seguridad y normas de laboratorio para evitar riesgos en el operario para garantizar la seguridad y garantizando el correcto funcionamiento del equipo.
- El mecanizado en seco es amigable para el ambiente, pero es común en la industria usar refrigerante durante el proceso. Es viable realizar un estudio de la estrategia de mecanizado adaptativo con el uso de refrigerante y así determinar la calidad superficial.
- Evaluar el desgaste que sufre la herramienta en intervalos de tiempos de maquinado y así determinar la vida útil de la herramienta de corte y como es el comportamiento frente a la geometría de la herramienta.
- Efectuar otro diseño experimental en la estrategia de mecanizado adaptativa variando la profundidad radial con 4 niveles, para analizar la rugosidad superficial que genera esta estrategia para operaciones de acabado en aluminio 7076-T6 para así comparar estadísticamente que factor es más influyente en la rugosidad superficial.
- La herramienta de corte empleada en este trabajo fue de HSS, de fácil adquisición en el mercado nacional brindando excelentes resultados durante los ensayos, pero al finalizar

terminó la herramienta desgastada en los filos y en partes quemada empleando la estrategia convencional, por ende, se recomienda realizar un estudio presentando diferentes velocidades de corte empleando la estrategia adaptativa siendo el desgaste de la herramienta la variable de calidad.

- Elaborar un estudio con la estrategia de mecanizado adaptativa con mayores velocidades de corte y mayores avances analizando la rugosidad en pasadas de acabado con un arreglo ortogonal L32 o L27 de 3 niveles o 4 niveles para analizar el acabado superficial con esta estrategia.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A Douglas, S. M. (1995). High speed machining: An approach to process analysis . *Journal of Materials Processing Technology*, 82-87.
- Askeland, D. R. (2004). *Ciencia e Ingeniería de los materiales* . México : Thomson.
- ASM International. (1995). *ASM Handbook Volumen 16, Machining*. ASM.
- Autodesk HSM. (2019). *Autodesk knowledge network* . Obtenido de <https://knowledge.autodesk.com/es/>
- Callister. (1995). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. En W. D. Callister. México: Reverté.
- Catalogo Somta. (2018). *Somta Catalogue*. Group Germany.
- Changqing Liu. (29 de Octubre de 2016). An adaptive machining approach based on in-process inspection of interim machining states for large-scaled and thin-walled complex parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Obtenido de <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-016-9647-4>
- Claus Bremer. (2012). Adaptive machining for efficient manufacture and repair of CFRP components. *Elsevier*, 1.
- Dormer. (2018). *Catálogo Dormer*.
- Eshapeoko, O. (Noviembre de 2013). *EUDI Escola Universitaria de diseño industrial*. Obtenido de <https://obradoiroeshapeoko.wordpress.com/2013/11/10/tipos-de-fresas/>
- Fadal. (2003). *Maintenance Manual* .
- Field Machining Services. (2018). *Portable Milling*. Obtenido de <https://www.integratechnologies.com/portable-milling/>

- Fluke Corporation. (2006). *Infrared Thermometer data sheet*. Fluke Corporation.
- Groover, M. (1997). *Fundamentos de Manufactura Moderna - Materiales, Procesos y Sistemas*. México DF: Pearson.
- Guillermo Castro. (2008). *Mecanizado a alta velocidad*.
- Heavy Performance Company. (11 de 08 de 2017). *Introduction to High Efficiency Milling*.
Obtenido de <https://www.harveyperformance.com/in-the-loupe/intro-high-efficiency-milling/>
- Humberto Gutiérrez Pulido. (2012). *Análisis y diseño de experimentos*. México: McGraw Hill.
- Ibarz, M. A. (2010). Contribución al desarrollo del proceso de selección de mecanizado de alta velocidad basado en parámetros tecnológicos y de productividad. *Universidad de Girona*, 34.
- Ivan Bohman. (2018). *Ivan Mohman*. Obtenido de <http://www.ivanbohman.com.ec/wp-content/uploads/2016/02/prodax.pdf>
- Kalpakjian, S. (2008). *Manufactura, Ingeniería y tecnología*. México: Prentice Hall.
- Keiser, C. A. (1994). *Materiales y procesos de manufactura para ingenieros*. Hispanoamericana.
- Krahmer, D. M. (2002). El mecanizado de alta velocidad (MAV). *ReserchGate*, 1.
- Logins, A. (2014). The Influence of High-Speed Milling Strategies on 3D Surface Roughness Parameters. *Elsevier, ScienceDirect*, 1254.
- Lucjan Przybylski, B. S. (2002). High speed machining (HSM) - The effective way of modern cutting . *Research Gate*, 72, 73.
- Mark Albert. (2015). El mecanizado adaptativo mejora la productividad de un robot. *Modern Machine shop*.
- Martin, C. B. (1999). *Principio de ingeniería de la manufactura*. Cecsá.

- Prismacim. (2019). *Prismacim*. Obtenido de <https://prismacim.com/mecanizado-trocoidal-vs-mecanizado-tradicional/>
- R. Khettabi, V. S. (2011). Machining and Machinability of Aluminum Alloys. *Aluminium Alloys, Theory and Applications*.
- Ranjit k Roy. (2010). *A primer on the method Taguchi*. United States of America: SME, Society of Manufacturing Engineers.
- Santaş, G. (2015). Optimisation of cutting parameters during the face milling of AA5083-H111 with coated and uncoated inserts using Taguchi method. *Research Gate* , 2.
- Sandvik. (2017). *Formación manual Tecnología de mecanizado de metal*. Suecia.
- Schey, J. A. (2001). *Procesos de manufactura* . Mc Graw Hill.
- Servicios Cohego, S. (s.f.). *Servicios Cohego*. Obtenido de <http://servicioscohego.com.mx/fresado/>
- Siemens NX. (11 de 2017). *Machining News* . Obtenido de <http://www.machiningnews.com/2017/11/siemens-latest-version-of-nx-expands-toolset-for-digitalizing-the-machine-shop/>
- Stive F Krar, A. F. (2002). *Tecnología de las máquinas y herramientas* . México: Alfaomega.
- Sunilkumar Panshetty, P. V. (2016). Optimization of Process Parameters in Milling. *IJSTE - International Journal of Science Technology & Engineering*, 4.
- Timings, R. (s.f.). *Tecnología de la fabricación - Tratamiento térmico, procesos y máquinas herramientas 2do tomo*. Alfaomega.
- V. Dharam Singh. (2016). Experimental investigation of surface roughness on Al alloy by HSM using Taguchi method. *ResearchGate*, 23.
- Vasco, U. d. (2002). *Mecanizado por arranque de viruta: Fresado*.



Quito, 15 de abril del 2019

Señor Ingeniero
 Ángelo Villavicencio Poveda.
DIRECTOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

De mis consideraciones

Mediante el presente me permito comunicar a usted, que el Proyecto de tesis presentado por el señor Francisco Javier Infante Castillo cuyo tema es: "Experimentación de las estrategias de mecanizado adaptativas en el fresado a alta velocidad en aluminio Prodax"; es de interés para TechDesign, por lo que se brindará el auspicio, para la ejecución del proyecto en mención empleando el Software Nx Cam Express 12, el cual permitirá demostrar y comparar las facilidades que el software brinda al sector manufacturero del país.

Particular que pongo en su conocimiento para los fines consiguientes.

Atentamente,



TechDesign
 Sda 50-15 y Gatazo
 Telf: 3303027 - 0998019575

Ing. Andrés Freile. Msc

TechDesign

ESPE UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS	
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA	
Fecha:	Hora:
15-04-19	9:18
No. Trámite:	Recibido por:
Observación:	Disposición:

MF

Ing. Ángelo Villavicencio Poveda
 DIRECTOR CIME

