

# Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente

Reconocimiento de validez oficial de estudios de nivel superior según acuerdo secretarial 15018, publicado en el Diario Oficial de la Federación del 29 de noviembre de 1976.

## Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales

MAESTRÍA EN INGENIERÍA Y GESTIÓN DE LA CALIDAD

MODALIDAD INVESTIGACIÓN



**MEJORA DEL PROCESO DE CORTE POR ARRANQUE DE VIRUTA EN MÁQUINAS-HERRAMIENTA DEL LABORATORIO DE INGENIERÍA MECÁNICA DEL ITESO A TRAVÉS DE LA METODOLOGÍA DEL CICLO DE DEMING**

Tesis para obtener el grado de

**Maestro en Ingeniería y Gestión de la Calidad**

Presenta: Ing. Jordán Araujo Briseño

Asesor: Dr. David M. Ochoa González

Tlaquepaque, Jalisco. 14 de mayo de 2023

Esta página ha sido dejada intencionalmente en blanco.

# ÍNDICE

<b>PORTADA.....</b>	<b>1</b>
<b>ÍNDICE.....</b>	<b>3</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS.....</b>	<b>7</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>9</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>10</b>
<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>11</b>

## **1 FUNDAMENTACIÓN DEL TRABAJO**

1.1 Descripción de la problemática percibida que justifica la investigación. ....	12
1.2 Análisis del contexto y escenario del objeto de estudio.....	15
1.2.1 Entorno del objeto de estudio. ....	19
1.2.2 Descripción del escenario que se planea investigar .....	26
1.2.3 Validación de las condiciones del escenario .....	35
1.2.3.1 Identificación de los actores .....	36
1.2.3.2 Sostenibilidad del proyecto.....	36
1.2.3.3 Tiempo requerido.....	37
1.3 Objetivos de la investigación .....	38
1.3.1 Objetivos particulares.....	38
1.4 Relevancia y pertenencia del trabajo.....	39

## 2 MARCO CONCEPTUAL DE REFERENCIA

2.1	Estado de la cuestión – Ciclo de vida de los materiales.....	41
2.1.1	Consumo eléctrico como entrada al producto. ....	44
2.1.2	Emisiones por consumo de energía eléctrica por máquinas-herramienta .....	45
2.1.3	Energía interna de los materiales.....	48
2.2	Conceptos y enfoques teóricos relacionados.....	49
2.2.1	Consumo específico de energía y tasa de remoción de material .....	49
2.2.2	Tasa de producción para el proceso de corte.....	58
2.2.3	Rugosidad superficial como parámetro de calidad.....	59

## 3 MARCO METODOLÓGICO DE REFERENCIA

3.1	Definición preliminar de metodología, selección de herramientas y cronograma.....	65
3.2	Etapa de planeación.....	72
3.2.1	Mapa del proceso y tiempos.....	72
3.2.2	Arboles CTQ y CTC de indicadores clave.....	75
3.2.3	SIPOC del proceso.....	77
3.2.4	Análisis de referencia (Primera hipótesis) .....	79
3.2.5	Matriz del marco lógico del problema.....	79
3.2.6	Mapa de problemática.....	83
3.2.7	Diagrama Ishikawa.....	85
3.2.8	Metas de información.....	87

3.3	Identificación, descripción y cuantificación de métricas iniciales .....	94
3.3.1	Plan de colección de datos.....	94
3.3.2	Medición de consumo de energía diaria.....	96
3.3.3	Análisis gauge R&R para la rugosidad.....	105
3.3.4	Colección de datos de rugosidad superficial.....	113
3.3.5	Análisis de capacidad del proceso de corte para la rugosidad.....	117
3.3.6	Descripción del análisis: Correlación e interpretación de la información .....	122
3.3.6.1	Análisis de regresión.....	122
3.3.6.2	Prueba t de dos muestras(acero P20 y aluminio).....	134
3.3.7	Diseño de experimentos.....	136
3.3.7.1	Diseño factorial completo.....	138
3.3.7.2	Efectos principales y de interacción.....	139
3.3.7.3	Desarrollo del diseño factorial.....	140
<b>4</b>	<b>ESTRATEGIA DE LA INVESTIGACIÓN</b>	
4.1	Justificación de la estrategia de investigación.....	163
4.1.1	Consideraciones costo/beneficio de la estrategia .....	164
4.2	Herramientas e instrumentos.....	168
4.3	Etapas del proceso de aplicación / investigación .....	170
4.3.1	Cronograma de trabajo.....	171
4.3.2	Imprevistos.....	173

<b>5</b>	<b>EXPOSICIÓN DE HALLAZGOS</b>	
5.1	Etapa de verificar.....	174
5.1.1	Organización de la información obtenida .....	175
5.1.1.1	Hallazgos para las propiedades de la pieza de trabajo y parámetros de corte....	175
5.1.1.2	Hallazgos para la medición de la rugosidad superficial incorrecta.....	179
5.2	Etapa de actuar.....	181
5.2.1	Acciones correctivas para los hallazgos encontrados.....	182
5.2.2	Impacto de la estrategia en el objeto de estudio.....	186
5.2.2.1	Impacto en el sistema de medición.....	186
5.2.2.2	Impacto en la capacidad y productividad del proceso.....	192
<b>6</b>	<b>DISCUSIÓN FINAL</b>	
6.1	Consecuencias de la aplicación de la estrategia.....	198
6.2	Aspectos de mejora para intervenciones subsecuentes.....	201
6.3	Relevancia y trascendencia disciplinaria del caso.....	201
<b>7</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	203

## LISTA DE SÍMBOLOS

$E_{car}$	Toneladas de emisiones de dióxido de carbono equivalente por mega watt hora (TCO <sub>2e</sub> /MWh)
$E$	Consumo de energía directa por la máquina-herramienta (MWh)
$eCO_2$	Intensidad de dióxido de carbono por watt-hora (TCO <sub>2e</sub> )
$H$	Dureza Brinell del Material de la pieza de trabajo (N/mm <sup>2</sup> )
$n$	Velocidad de rotación de herramental de corte (rev/min)
$V_c$	Velocidad de corte (m/min)
$\delta$	Distancia entre centros de herramienta de corte y pieza de trabajo (mm)
$TRM$	Tasa de remoción de material (mm <sup>3</sup> /s)
$R_z$	Profundidad media de la rugosidad ( $\mu$ m)
$R_a$	Rugosidad superficial promedio ( $\mu$ m)
$N$	Cantidad de insertos o filos del herramental de corte
$a_e$	Ancho del corte (mm)
$F_N$	Velocidad de avance por inserto del herramental de corte (mm/inserto)
$a_p$	Profundidad de corte (mm)
$V_f$	Velocidad de avance del herramental de corte (mm/min)
$D$	Diámetro del herramental de corte (mm)
$CE_e$	Consumo específico de energía (J/mm <sup>3</sup> )
$P$	Potencia promedio total por el proceso de maquinado (W)
$P_m$	Potencia promedio por corte de la máquina-herramienta (W)
$P_a$	Potencia promedio por avance del herramental de corte (W)
$P_u$	Potencia promedio por rotación de herramental de corte (W)
$P_s$	Potencia promedio por corte de aire (W)

$P_c$	Potencia promedio durante corte de pieza (W)
V	Diferencia de potencial (V)
A	Intensidad de Corriente (A)
$E_c$	Energía específica del corte (J)
$Y_s$	Variable de respuesta del diseño experimental (adimensional)
CNC	Control numérico computacional (adimensional)
E1	Periodo instantáneo de encendido de rotación y avance de herramental (s)
E2	Periodo de corte sobre la pieza de trabajo (s)
E3	Periodo instantáneo de apagado de rotación y avance de herramental (s)
$T_p$	Tasa de producción (unidades maquinadas/día)
OEE	Disponibilidad de la máquina-herramienta diaria (hrs)
DOE	Diseño de experimentos
$T_c$	Tiempo por estado “corte de pieza” (min)
$T_d$	Tiempo por estado “desplazamiento de herramental” (min)
$T_m$	Tiempo por medición de la pieza (min)
$T_a$	Tiempo por cambio de pieza (min)
VMR	Volumen medio removido ( $\text{mm}^3$ )

## ABSTRACT

Currently in Mexico, 82.9% of primary electricity generation comes from conventional technologies (Energía, 2018) that are mostly made up of generation plants that use hydrocarbons and fossil fuels as their primary source to produce electrical energy. This group includes technologies such as combined cycle and thermoelectric plants that use coal and natural gas as sources of energy production, being these responsible for the number one factor in greenhouse gas emissions in our country. An important consumer of this energy is the manufacturing industry, particularly metalworking. In it, machining processes such as cutting, milling, boring, turning, grinding, welding, among others, are used, without the user or manufacturer having much knowledge of whether these types of processes are energy efficient according to the specific task at hand. perform by machine. This research work aims to investigate and analyze the input variables that influence "excessive energy consumption" and the relationship that this has with the final finish of the cut on the machined part as a quality parameter, particularly for control machines. computer numerical (CNC) and milling machines that are two of the most used in the metal-mechanic manufacturing industry. The work methodology used was through the Deming cycle with the objective of implementing continuous improvement solutions in the process, one of these solutions was the realization of a  $2^3$  factorial design, whose objective is to optimize the input variables (cutting parameters) that impact on the output responses "energy consumption" (E) and level of "surface roughness" (Ra) possible left on the machined part as a product specification limit.

**Keyword:** Factorial design, Computer numerical control, Specific energy consumption, Average surface roughness.

## RESUMEN

Actualmente en México, la generación eléctrica primaria en un 82.9% proviene de tecnologías convencionales (Energía, 2018) que se componen en su mayoría por plantas de generación que utilizan como fuente primaria hidrocarburos y combustibles fósiles para la producción de energía eléctrica. Este grupo incluye tecnologías tales como plantas de ciclo combinado y termoeléctricas que utilizan carbón y gas natural como fuentes de producción de energía, siendo estos responsables del factor número uno en emisiones de gases de efecto invernadero en nuestro país. Un importante consumidor de esta energía es la industria manufacturera, en particular la metalmecánica. En ella se utilizan procesos de maquinado tales como cortado, fresado, barrenado, torneado, rectificado, aplicación de soldadura entre otros, sin que el usuario o fabricante tenga mucho conocimiento de si este tipo de procesos son energéticamente eficientes de acuerdo con la tarea específica a realizar por la máquina. Este trabajo de investigación pretende investigar y analizar las variables de entrada que influyen en un “consumo de energía excesivo” y la relación que este tiene con el terminado final del corte sobre la pieza maquinada como parámetro de calidad, esto particularmente para las máquinas fresadoras por control numérico computacional (CNC) y manuales que son ampliamente utilizadas en la industria de la manufactura metalmecánica. La metodología de trabajo utilizada fue a través del ciclo de Deming con el objetivo de implementar soluciones de mejora continua en el proceso, una de estas soluciones, fue la realización de un diseño factorial  $2^3$ , cuyo objetivo es el optimizar las variables de entrada (parámetros de corte) que impactan en las respuestas de salida “consumo de energía” (E) y nivel de “rugosidad superficial” (Ra) posible dejada sobre la pieza maquinada como límite de especificación de producto.

**Palabras clave:** Diseño factorial, Control numérico computacional, Consumo específico de energía, Rugosidad superficial promedio.

## **AGRADECIMIENTOS**

*A mi madre, Lilia, que, con su amor y apoyo infinitos, logre la culminación de este trabajo.*

*A mis tutores, David y Francisco, quienes entregaron su experiencia, conocimiento y continua retroalimentación para el desarrollo adecuado de este proyecto.*

# 1 FUNDAMENTACIÓN DEL TRABAJO

## 1.1 Descripción de la problemática percibida que justifica la investigación.

Serope Kalpakjian (2002) indica que *“en el sentido moderno, la manufactura involucra la fabricación de productos a partir de materias primas mediante varios procesos maquinarias y operaciones, a través de un plan bien organizado para cada actividad requerida”*.

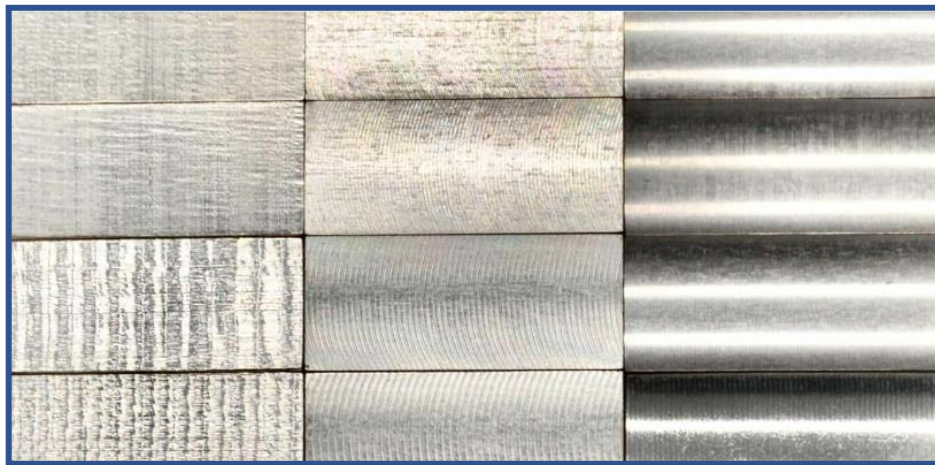
La energía requerida por una máquina-herramienta dentro de la industria de la manufactura es un concepto que no siempre se planea o se toma en cuenta dentro de la evaluación de los procesos industriales. Aún en menor grado es el impacto ambiental derivado de los subproductos que se emiten a la atmosfera y/o de la explotación de recursos naturales requeridos para la generación de esta energía.

Esta puede ser requerida en sus diferentes formas física, eléctrica, mecánica, aire comprimido, hidráulica, química entre otros, donde el fin último requerido es el transformar uno o más materiales en sus propiedades físicas como parte dentro de un proceso productivo que influya directamente al producto final al que esta pieza vaya a formar parte.

El consumo energético debe ser uno de los factores financieros a tomar en cuenta dentro de la contabilidad de una empresa de manufactura, como afirma Chryssolouris: *“El sector manufacturero ha sido históricamente uno de los mayores consumidores de energía, por tanto, la eficiencia energética se ha convertido en un factor muy significativo, especialmente en los países que no son independientes de la energía. Además, la energía es un factor de coste cada vez más importante debido a su precio al alza”*.

Sin embargo, la mayoría de las veces, para procesos de producción en serie no se establece la relación existente entre el consumo energético en relación con la cantidad de piezas que podamos fabricar (que pasen por esa etapa de transformación propiamente) y mucho menos en relación con la calidad real obtenida de dicho proceso para la cadena de valor de toda la línea de producción.

Por otro lado, la rugosidad superficial final dejada sobre una pieza que fue cortada o barrenada, es claramente un elemento que interesa a la industria de la transformación como parámetro de calidad de nuestros procesos. Sin embargo, no se han encontrado estudios que relacionen la variación en el consumo energético por parte de las máquinas-herramienta que lo realizan tengan un impacto real en la productividad, es decir, producir más piezas en menor tiempo con menor consumo energético y conservando el mismo nivel de calidad.



**Figura 1** – Muestras microscópicas de diferentes huellas de rugosidad superficial dejada en metales por operaciones de corte CNC. (Xometry, 2022).

Timothy Gutowski (2006), en sus estudios afirma que *“la característica más importante de un proceso es su tasa de producción. Esto se debe a que la energía eléctrica específica a menudo está dominada por las características de soporte del equipo en lugar del mecanismo físico real del proceso, esto sugiere dos importantes estrategias para el rediseño de procesos de manufactura para minimizar el uso de la energía”*.

A menudo se tiene la concepción que las características de calidad finales que se esperan de un proceso de maquinado, tales como la rugosidad final obtenida en la pieza maquinada, dependen únicamente del estado de vida del herramental de corte y de las propiedades de la pieza de trabajo, características que sin duda alguna se relacionan, pero esto sin comparar si se puede obtener una mejor calidad en este optimizando su desempeño relativo al consumo energético y los beneficios obtenidos por ello.

En este trabajo de investigación se realizó la optimización del consumo eléctrico por medio del concepto de consumo específico de energía “ $CE_e$ ” manteniendo un nivel máximo de rugosidad superficial promedio “ $R_a$ ” dejada sobre la pieza maquinada de acuerdo a la especificación del material como requerimiento de calidad para los procesos de corte de 2 distintos metales (acero P20 y Aluminio) en las máquinas-herramienta CNC Hass VF-1 y Fresadora Aries X6325A del laboratorio de ingeniería mecánica del ITESO, operaciones de corte, máquinas-herramienta y tipos de material comúnmente utilizados en la industria metalmeccánica.

Lo anterior con el objetivo de mejorar el proceso de corte disminuyendo el consumo energético, el impacto ambiental derivado de este consumo y el desperdicio por piezas que no

cumplan con un valor máximo de rugosidad superficial comúnmente requerido como parámetro de calidad para dicho proceso.

## 1.2 Análisis del contexto y escenario del objeto de estudio

En febrero de 2021, una tormenta invernal histórica de aguanieve y nieve intensa azotó el estado americano de Texas, uno de los principales productores de gas natural, tanto para su país como para México.

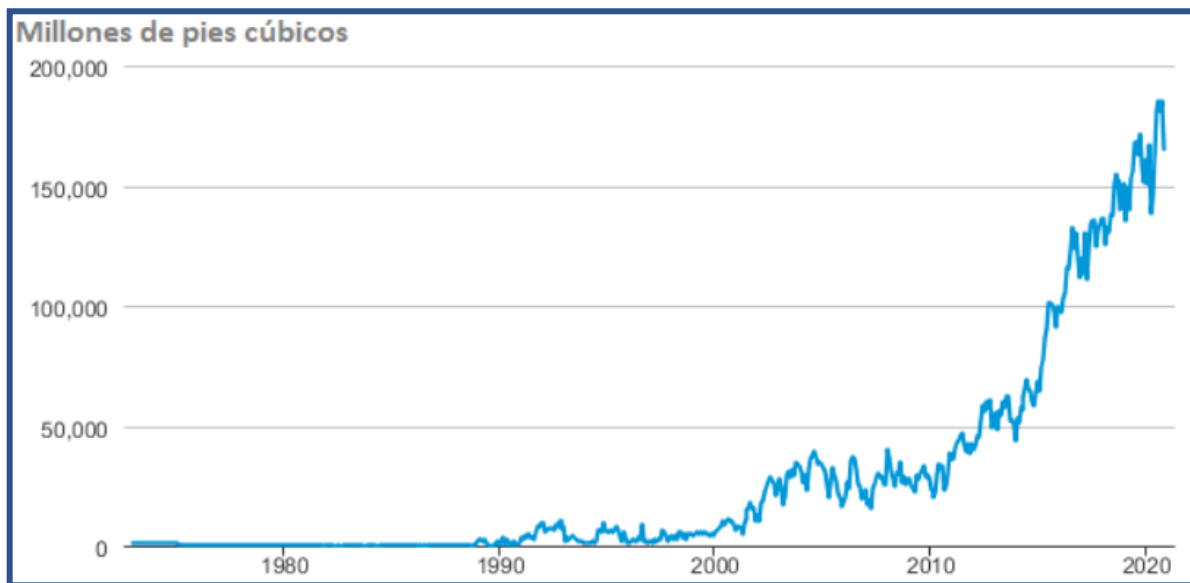
Este combustible actualmente es utilizado para generar alrededor del 60% de la energía eléctrica en México, a su vez, Estados Unidos es el principal exportador de este hidrocarburo a México (News, 2021) esta tormenta generó inconvenientes en la producción y exportación de este gas, ya que se presentaron congelamientos en las instalaciones que no se encontraban preparadas para una tormenta de este tipo, siendo el estado de Texas un estado donde las temperaturas ambientales son altas la mayor parte del año y no se tienen instalaciones adecuadas para estas temperaturas.



**Figura 2** – Operaciones de producción de gas natural cesaron completamente. (EIA, 2021).

Esto, en conjunto con un incremento en la demanda de generación eléctrica causado por este inusual temporal de frío, derivó finalmente en la falta de suministro de este importante hidrocarburo a centrales eléctricas de generación en la zona norte de México.

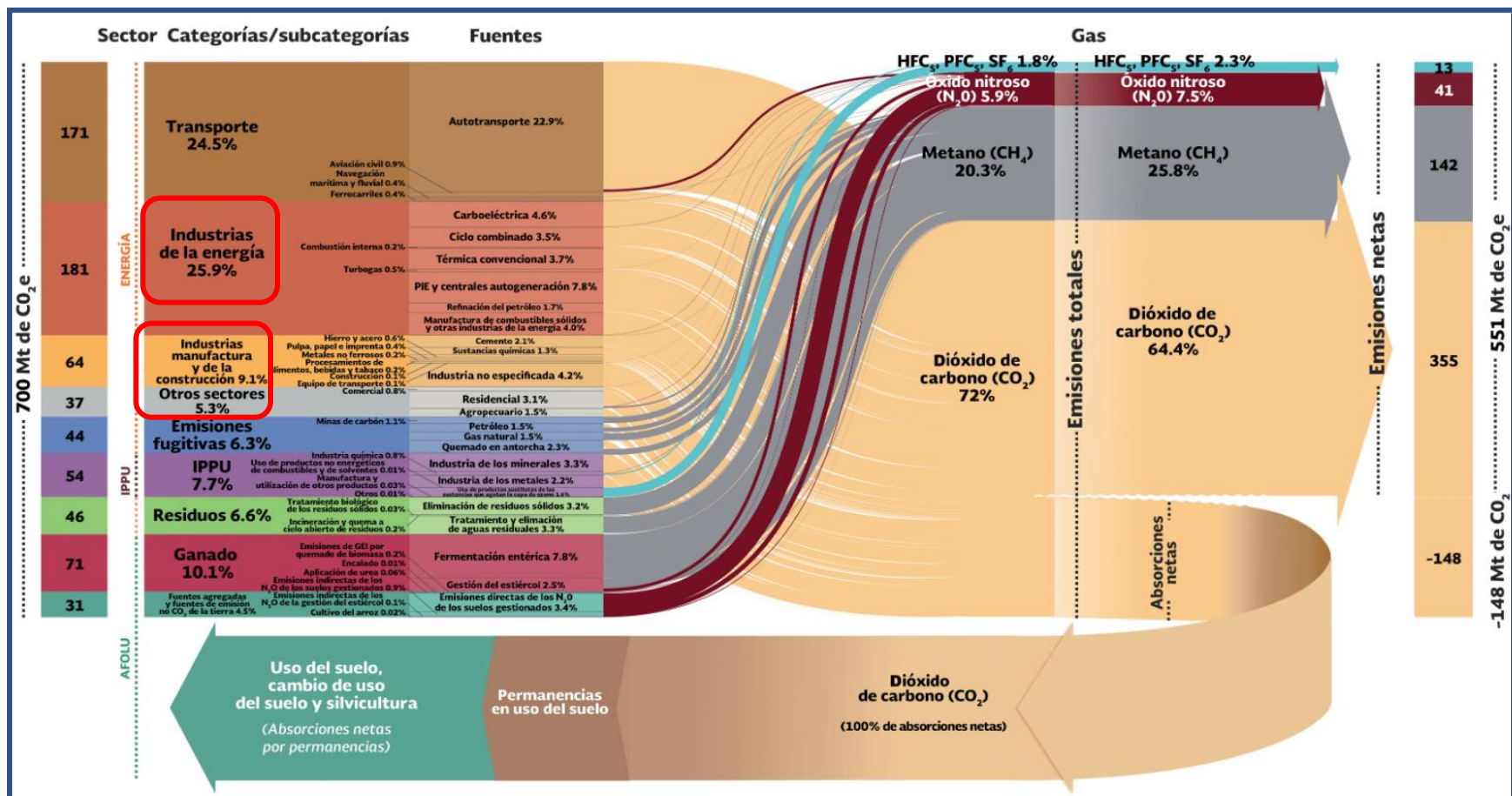
En esa zona, la energía es generada a partir de este gas como principal fuente primaria suscitándose múltiples interrupciones del servicio que duraron varias horas y se registraron en diversas localidades en el país.



**Figura 3** – Exportaciones mensuales de gas natural de EE.UU. a México por ducto en millones de pies cúbicos por la Administración de Información energética. (EIA, 2021).

Estas interrupciones, afectaron a más de 2,400 plantas de la industria manufacturera, metalmecánica y maquiladoras, causando pérdidas por alrededor de US\$2,700 millones.

Dado que la mayor parte de la generación de electricidad a nivel mundial aún hoy en día se basa en el uso de combustibles fósiles, representa una cuarta parte de las emisiones por gases de efecto invernadero (GEI's) global de CO<sub>2</sub>, “*de acuerdo con el panel intergubernamental en cambio climático (IPCC), estas emisiones debe reducirse en aproximadamente el 25% hasta 2030 y es necesario llegar a cero netos en 2070 para alcanzar el objetivo climático de 2 °C*” (Berend Denkena, 2020).



**Figura 4** – Gráfico de Sankey que muestra los porcentajes de emisión de CO<sub>2</sub> en México por actividad económica, la industria de la energía corresponde a la principal fuente de emisión. (Climatico, 2018)

Como podemos observar por el gráfico anterior, el conjunto de la emisión por parte de la industria de la generación de energía y la industria de la manufactura y construcción (industrias que generan las emisiones derivadas de la energía utilizada para la operación del proceso que nos interesa) suman un total de 245 Mt de CO<sub>2</sub>e (millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente), durante el año 2015 para México, esto representa el 35% del total de gases emitidos a la atmosfera en nuestro país, es decir una tercera parte de la emisión de GEI's totales.

Esto nos lleva a tener una mayor concientización y comprensión de la dependencia energética que tiene México en cuestión de generación y consumo eléctrico, así también como la responsabilidad de hacer más eficiente nuestros procesos productivos donde las máquinas-herramientas utilizadas son en su mayoría los principales demandantes de energía en la industria y como hemos visto hasta ahora, también los principales emisores de GEI's utilizando prácticas que sabemos, muchas de las veces son más enfocadas hacia una mejora en el desempeño de los procesos sin tomar en cuenta el impacto social relativo a nuestro medio ambiente.

### **1.2.1 Entorno del objeto de estudio.**

El conjunto de los antecedentes mencionados anteriormente nos indica que no es suficiente con mejorar nuestros procesos productivos en cuanto a la productividad y niveles de calidad únicamente, si no que debemos de hacerlo con un sentido de responsabilidad social y tomar en cuenta también el impacto energético y consecuentemente ambiental que estas mejoras deben de representar.

En México más del 80% de la generación de energía eléctrica proviene de tecnologías de generación convencionales, tales como la quema de combustibles fósiles. A su vez, el sector

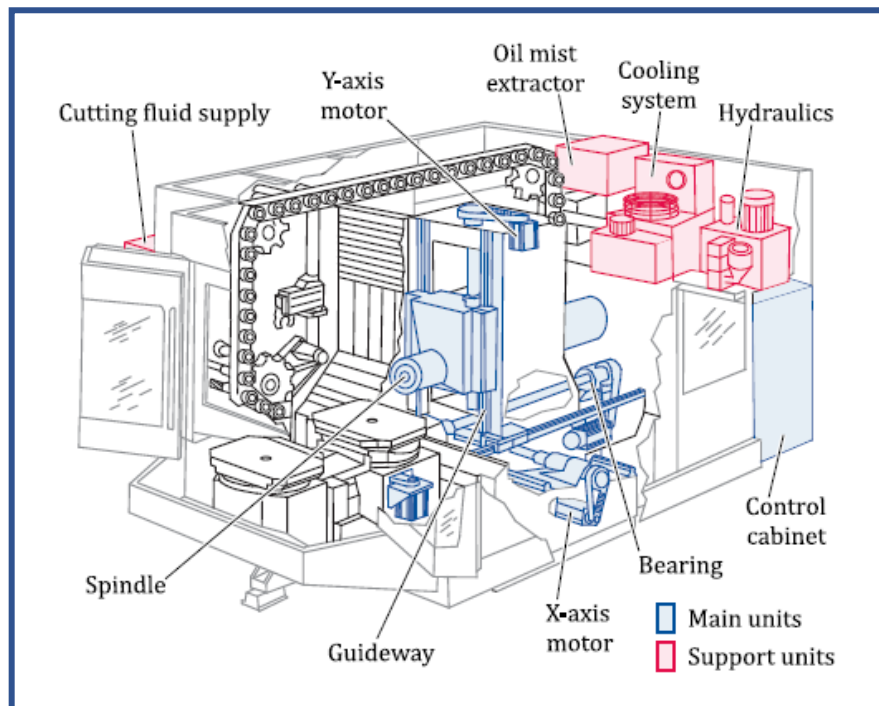
industrial fue en 2017 el segundo mayor sector económico del país consumidor de energía eléctrica, por detrás del transporte (Secretaría de Energía, 2017).

Dentro de este sector industrial, las empresas del sector manufacturero metalmeccánico (hierro y acero) son las industrias más afectadas ya que son las que más demandan este tipo de energía, y tienen problemas de altos costes de facturación eléctrica.

	2016	2017	Variación porcentual (%) 2017/2016	Estructura porcentual 2017
<b>Total</b>	<b>1,680.74</b>	<b>1,876.65</b>	<b>11.66</b>	100.00
Otras ramas	773.94	977.37	26.24	52.20
Industria básica del hierro y el acero	242.74	248.05	2.19	13.22
Fabricación de cemento y productos a base de cemento en plantas integradas	183.56	175.34	-4.48	9.34
Industria química	105.60	109.52	3.71	5.84
Minería de minerales metálicos y no metálicos, excepto petróleo y gas	66.40	71.30	7.37	3.80
Pemex Petroquímica	66.12	58.95	-10.84	3.14
Fabricación de pulpa, papel y cartón	59.41	56.22	-5.37	3.00
Fabricación de vidrio y productos de vidrio	64.33	51.15	-20.49	2.73
Elaboración de azúcares	38.21	48.81	27.75	2.60
Elaboración de cerveza	23.04	24.29	5.46	1.29
Fabricación de automóviles y camiones	17.39	17.28	-0.66	0.92
Construcción	13.96	13.18	-5.59	0.70
Elaboración de refrescos, hielo y otras bebidas no alcohólicas, y purificación y embotellado de agua	10.87	11.05	1.65	0.59
Fabricación de productos de hule	11.25	10.43	-7.30	0.56
Fabricación de fertilizantes	1.30	0.91	-29.96	0.05
Elaboración de productos de tabaco	0.61	0.60	-2.47	0.03

**Figura 5** – Consumo de energía en México para el sector industrial en Penta Joules durante 2016 y 2017. (Secretaría de Energía, 2017).

Los procesos de manufactura de estos sectores usan maquinaria que involucra rotación de motores eléctricos, movimiento de partes móviles mecánicas e hidráulicas como engranajes, poleas y pistones y/o elementos en movimiento que están en contacto de fricción directo continuamente y necesitan muchas veces de servomecanismos y elementos electrónicos para generar torques y pares puntuales que afectan aún más el consumo y calidad de la energía. Estos mecanismos involucran un continuo consumo eléctrico al tener que iniciar y detener una y otra vez las operaciones de estos automatismos dentro de las máquinas que las utilizan a como lo requieran para cumplir con la precisión de la operación.



**Figura 6** – Estructura interna típica de una máquina cortadora por control numérico (Berend Denkena, 2020)

Existe actualmente un estándar internacional (norma ISO) que define y estandariza la evaluación ambiental de las máquinas herramientas y ejemplifican una metodología de diseño para

la etapa de uso de estas máquinas, esta es ISO 14955. En ella se define eficiencia como la relación cuantitativa entre el desempeño de salida ya sea como servicio, bienes o productos creados y la energía requerida para ello, sin embargo, los impactos relevantes que no se relacionan con la energía suministrada a las máquinas herramientas están fuera del alcance de esta norma y se requiere hacer estudios posteriores para determinar y cuantificar la energía necesaria “adicional” en este tipo de máquinas para lograr las tareas u operaciones requeridas.

Esta norma, define los métodos que establecen un proceso para integrar aspectos de eficiencia energética en el diseño de estas máquinas, *“la evaluación de la eficiencia energética implica la cuantificación de los recursos utilizados, es decir, la energía suministrada y el trabajo obtenido”* (International Organization for Standardization, 2017).

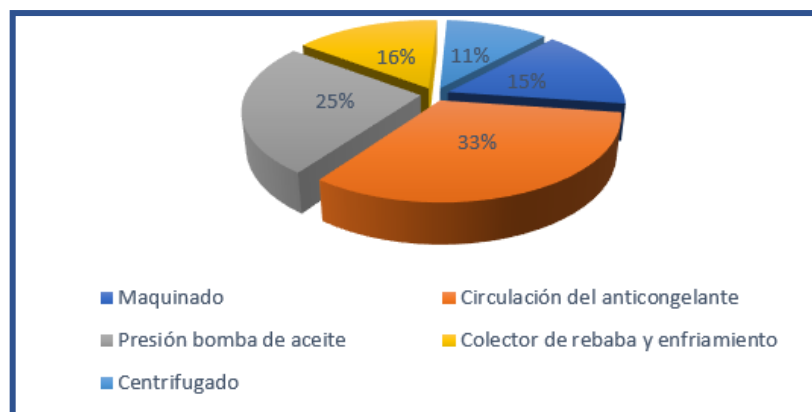
En procesos de fabricación, el impacto de huella ambiental derivada de la utilización de estas máquinas y los procesos de manufactura que engloban su uso se define por tres factores importantes:

1. Las emisiones de CO<sub>2</sub> al utilizar combustibles fósiles para la producción de energía eléctrica utilizada por estas máquinas.
2. Las emisiones generadas debido al consumo excesivo de esta energía durante estados de espera o transitorios de estas máquinas y/o durante una operación de mecanizado, es decir, energía que no está siendo aprovechada en trabajo útil para llegar al estado final que se desea en la pieza.

3. El impacto y emisiones asociadas con la producción en sí, así como el manejo de los materiales, su eliminación, reciclaje y logística de distribución.

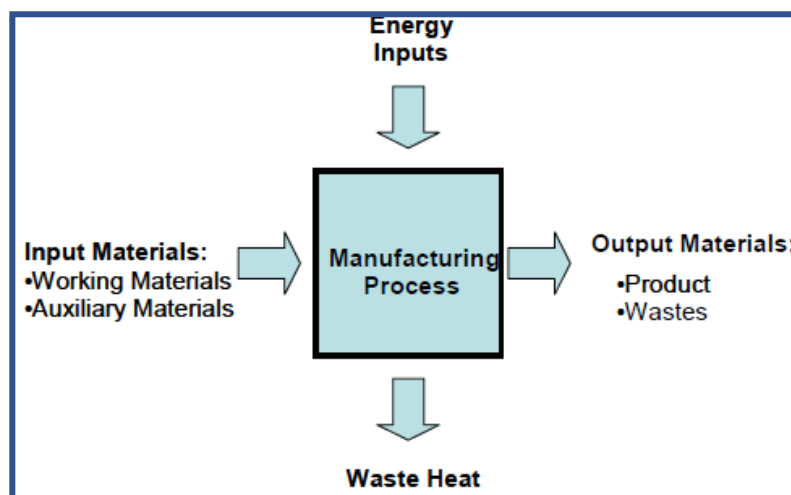
En este contexto, H. Alswat (2021) afirma que *“Para una fabricación sostenible, los requisitos energéticos de los procesos de mecanizado deben minimizarse para reducir la carga medioambiental del consumo de energía en fabricación, desde un punto de vista ecológico, el consumo eléctrico de las máquinas herramientas es el factor principal en el mecanizado”*.

Además del consumo de energía eléctrica por una máquina-herramienta, otros factores a considerar son aquellos que suponen otro tipo de forma de energía, y las subsecuentes conversiones de energía que suceden dentro de la máquina, cuando un motor a pasos recibe los pulsos de energía eléctrica por ejemplo, este actuará de modo que convertirá la energía eléctrica a mecánica para accionar con precisión algún otro mecanismo, para ejecutar estos accionamientos normalmente se requiere de una electrónica de potencia interna al sistema que también tiene su propio consumo eléctrico.



*Figura 7 – Requerimientos eléctricos comunes en procesos de manufactura por elementos de máquinas CNC (Elaboración propia)*

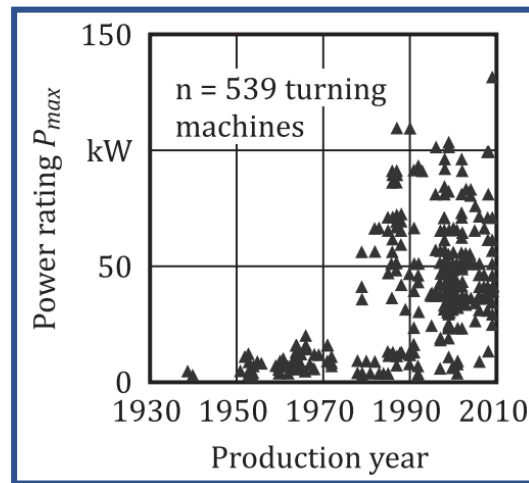
De acuerdo con los trabajos realizados por Gutowski, menciona que “*Los procesos de manufactura están hechos de etapas, las cuales para situaciones de alta demanda de producción son usualmente automatizadas*” (Timothy Gutowski, 2006). Sin embargo, conforme automatizamos más nuestros procesos de manufactura, estos incluyen cada vez más sistemas y componentes o herramientas que a pesar de formar parte integral de la máquina herramienta para su funcionamiento, son los que demandan más energía eléctrica en sus diferentes formas: mecánica, eléctrica, térmica, hidráulica, etc., sin embargo aportan solo una pequeña fracción de esa energía al proceso propio de mecanizado, mientras que la mayoría es desechada o inutilizada y son consideradas como pérdidas en el proceso que se pierde en calor.



**Figura 8** – Entradas y salidas en procesos de manufactura (Timothy Gutowski, 2006).

En manufactura, los procesos de maquinado que contribuyen directamente a la huella de carbono son las relacionadas con la utilización de la energía por las máquinas que realizan estos procesos de maquinado y es llamada “energía de consumo directa”. Mientras que el consumo eléctrico derivado de la producción, reciclado y disposición de los consumibles durante el maquinado son llamados energía de consumo indirecta, la suma de la energía eléctrica de consumo

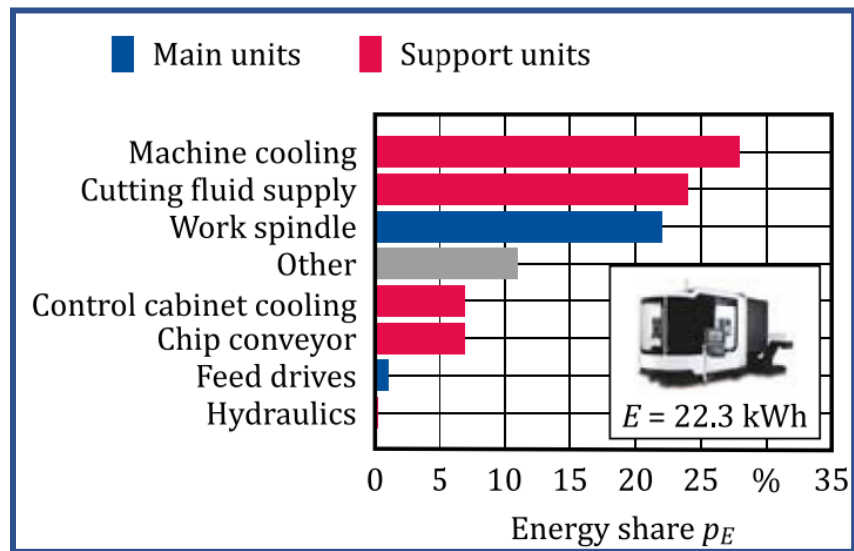
tanto directa como indirecta son de suma importancia para evaluar la energía total de un proceso y la energía específica necesaria únicamente para la realización de la tarea de maquinado, a esta energía la llamamos “consumo específico de energía”.



**Figura 9** – Comparación de potencia eléctrica máxima demandada por máquinas fresadoras desde 1930 a 2010. (Berend Denkena, 2020)

En las últimas décadas, la demanda de potencia eléctrica en las máquinas-herramienta ha ido en aumento considerablemente debido al incremento en subsistemas y electrónica de potencia que están más enfocados en dar mayor exactitud en el proceso de maquinado, pero no en el consumo energético resultante de este.

La distribución del consumo eléctrico a través de estos subsistemas es variable, sin embargo, para aquellos sistemas considerados principales para que la tarea de maquinado se realice es menor que la suma de los consumos eléctricos por los sistemas secundarios en la operación de la máquina-herramienta.



**Figura 10** – Distribución de consumo eléctrico entre las unidades principales y de secundarias o de soporte de una máquina fresadora horizontal Deckel Maho DMC 80H. (Berend Denkena, 2020)

### 1.2.2 Descripción del escenario que se planea investigar

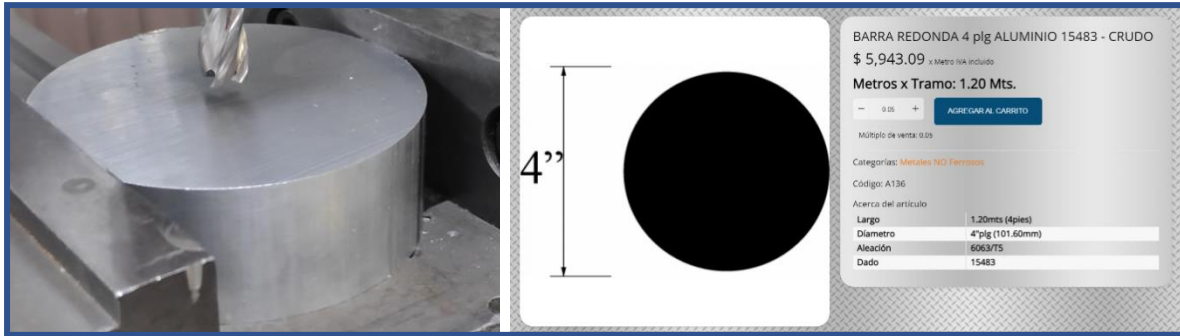
El escenario que se investigó es el proceso de corte por arranque de viruta de piezas de metal, particularmente de acero P20 y el aluminio en dos de las máquinas más utilizadas en la industria metalmeccánica que son la fresadora manual Aries modelo X6325A y una fresadora CNC Hass modelo VF-1. El escenario planteado está enfocado en investigar uno de los procesos más comunes realizados en la industria metalmeccánica que es el corte o desbaste por remoción de material orientado a dejar un nivel de rugosidad superficial promedio máxima esperada conforme a especificación como parámetro de calidad. El proceso busca ejemplificar corridas de producción a nivel industrial de manera que podamos obtener un desempeño real del proceso acorde a lo que sucede en la industria.

Actualmente en el laboratorio del ITESO se realiza esta operación de maquinado de forma didáctica para los alumnos que cursan las materias de Procesos de manufactura. En estas materias se busca concientizar la relación de dichos procesos con la eficiencia de estos. Dicho proceso se realiza en ambas máquinas-herramienta.

Este es uno de los procesos de mecanizado más frecuentemente utilizado sobre todo para el diseño mecánico de superficies. En el laboratorio se realiza dicha operación comúnmente con aluminio, sin embargo, existe un interés en analizar el proceso para el acero P20, por su importancia en la industria de la fabricación de moldes de plástico. Sin embargo, en general se ha observado que para este material, el nivel de rugosidad dejada sobre la pieza es mayor al aluminio donde se obtienen resultados más estables de nivel de rugosidad dejado por la operación de corte.

Actualmente no se tiene una comparativa de en qué máquina-herramienta es más eficiente este proceso de corte desde el punto de vista energético conservando el nivel de calidad esperado en cuanto a la rugosidad dejada sobre la pieza. Es importante mencionar que, tanto para el aluminio como para el acero, se espera diferentes niveles de rugosidad dejada sobre la pieza (especificación superior 0.6 y 0.9 respectivamente) después del corte debido a la diferencia de las propiedades mecánicas de dichos materiales los cuales se detallan a continuación.

La siguiente imagen muestran las dimensiones y propiedades mecánicas del tramo en aluminio.



**Figura 11 y 12**– Pieza/barra de aluminio 6063 crudo y sus dimensiones mecánicas (ACEMAQ S.A., 2021).

Para el aluminio, las dimensiones de los tramos a mecanizar son de 4” de diámetro (101.6 mm) y 2” de altura (50.8 mm), la conversión del precio del tramo a la pieza mecanizada es de \$ 252.00 MXN por pieza.

Especificaciones mecánicas Aluminio 6063 TS	
<b>Material</b>	Aluminio
<b>Diámetro del tramo</b>	4" (101.60mm)
<b>Modulo de Young</b>	68.3 GPa (9,910 ksi)
<b>Resistencia a la tracción</b>	145–186 Mpa
<b>Elongación al quiebre</b>	18-33%
<b>Temperatura de fusión</b>	615 °C
<b>Densidad</b>	2.69 g/cm3
<b>Dureza Brinell</b>	65

**Tabla 1** – Especificaciones mecánicas del aluminio 6063 (Elaboración propia)

6063 es la aleación más común utilizada para la extrusión de aluminio. Permite que se formen formas complejas con superficies muy suaves aptas para el anodizado y, por lo tanto, es popular para aplicaciones arquitectónicas visibles, como marcos de ventanas, marcos de puertas, techos y

marcos de letreros. El nivel de rugosidad superficial esperado dejado sobre la marca del corte debe ser menor a 0.6  $\mu\text{m}$  (micrómetros).

El acero P20 es utilizado principalmente para la elaboración de moldes y componentes para la fundición de Zinc, piezas para maquinaria y construcción generales (como engranes, poleas etc.) provee buen índice de pulido y texturizado final. La siguiente es una imagen de dicha pieza, dimensiones y propiedades mecánicas:



**Figura 13** – Pieza de acero P20 mostrando el corte al centro de la pieza dejada por el proceso de maquinado. (Elaboración propia)

Especificaciones mecánicas Acero P20	
Material	Acero
Diámetro del tramo	3.5" (88.9 mm)
Modulo de Young	190-210 GPa (27,557-30,457 ksi)
Resistencia a la tracción	900 Mpa
Elongación al quiebre	20%
Temperatura de fusión	770 °C
Densidad	7.85 g/cm <sup>3</sup>
Dureza Brinell	300

**Tabla 2** – Especificaciones mecánicas del acero P20. (Elaboración propia)

El nivel de rugosidad superficial esperado para este tipo de aleación de acero debe ser menor a  $0.9 \mu\text{m}$  de acuerdo con especificación. A pesar de que el acero presenta una rugosidad superficial mayor que la del aluminio se ha observado por experiencia que en algunos cortes se obtiene una rugosidad mucho menor al valor de 0.9, incluso acercándose a los valores del aluminio, situación por la cual también se realiza dicho proceso con este material.

Para la medición de la  $R_a$ , se utiliza un rugosímetro de punta diamante digital, la medición se realiza colocando el medidor sobre la superficie cortada para medir el nivel de rugosidad una vez que la punta de diamante baja hasta esta superficie.

Dado que estamos hablando de la rugosidad superficial (también llamada rugosidad superficial promedio), esta medición se realiza un total de 3 veces, en 3 puntos distintos a lo largo del corte, y se realiza el cálculo del promedio de estas 3 medidas como la medida final de rugosidad dejada sobre la pieza. La medición se realiza justo después de que la pieza ha terminado de ser cortada por la máquina-herramienta por parte del operador, quien presiona el equipo encima de la pieza cortada y espera a que el rugosímetro tome la lectura.

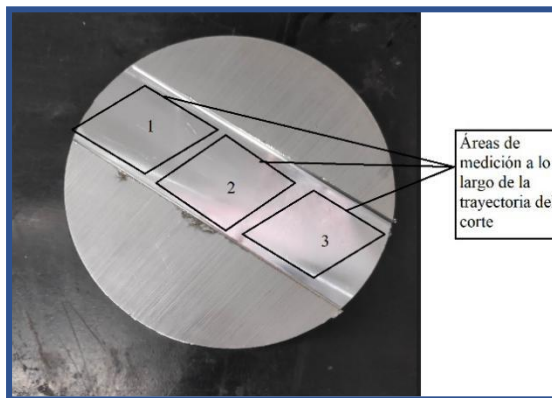
A continuación, se muestran el instrumento de medición y sus características.



*Figuras 14 y 15 – Izquierda fotografía realizando las mediciones en las piezas por parte del operador, derecha, Rugosímetro digital Phase 2 SRG-1000 con el que se realiza la medición de este parámetro de calidad. (Elaboración propia).*

Rugosímetro RSG-1000 Phase 2	
<b>Parametro de rugosidad</b>	Ra (ISO) - Rz (DIN)
<b>Rango de medición</b>	Ra: 0.05 - 10.0 μm / Rz: 0.1-50 μm
<b>Largo del cortador</b>	0.0009in. , 0.03in., 0.09in.
<b>Filtro</b>	Analogico RC
<b>Precisión</b>	Conforme ISO clase 3
<b>Tipo de trazador</b>	Diamante, radio 10m +/- 2.5 μm
<b>Longitud del trazador</b>	0.23in (6 mm)

*Tabla 3 – Especificaciones rugosímetro Phase 2 SRG-1000 (Elaboración propia).*



*Figura 16 – Delimitación de áreas de toma de muestra de rugosidad superficial sobre la pieza mecanizada (Elaboración propia).*

La finalidad de realizar este estudio para dos máquinas diferentes, así como dos tipos de material diferente es para poder diferenciar las ventajas y desventajas que se puede tener de dicho proceso con una u otra combinación, a nivel industrial, es decir, a niveles de producción en serie, esto desde el punto de vista energético y de desempeño del proceso conservando y/o mejorando incluso la calidad esperada.

Estas máquinas-herramienta realizan operaciones de barrenado, desbaste de material y/o cortes con formas específicas a la pieza de trabajo, así como mejorar el terminado de la pieza (nivel de rugosidad superficial) si se requiere.

Generalmente en los talleres industriales, este tipo de máquinas se encuentran dentro de las cadenas de producción en la parte de laminado o preformado de metales, y son muy utilizadas previas a otros procesos de producción como doblado, armado, soldadura, etc. Actualmente estas máquinas se encuentran en el taller de ingeniería mecánica en el ITESO y son utilizadas por los alumnos para realizar prácticas de corte, desbaste y barrenado en diferentes tipos de materiales y herramientas de corte.

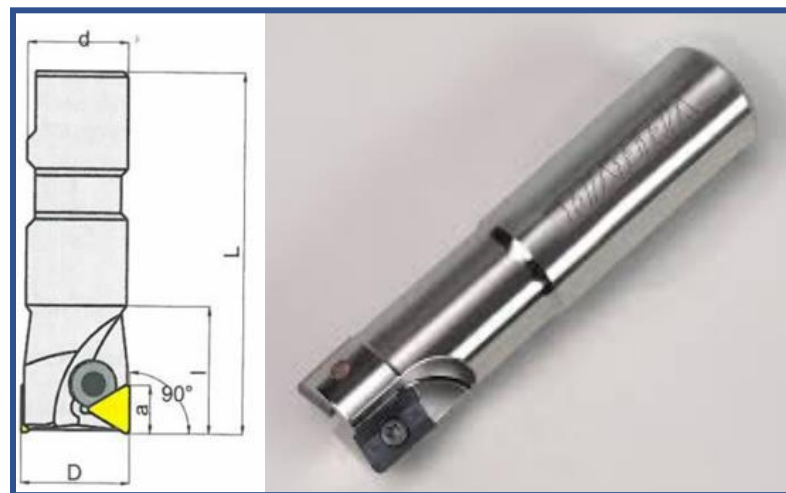


**Figura 17** – *Fresadora manual Aries X6325A del laboratorio de ingeniería mecánica del ITESO (Elaboración propia).*



**Figura 18** – CNC Hass VF-1 principal del laboratorio de ingeniería mecánica del ITESO  
(Elaboración propia).

El herramental de corte utilizado es una broca/cortador modelo TP-90, específicamente el modelo TPG-D1.25-W.75-3.2-2-3, con dos insertos y 3 dientes, modelo que es intercambiable para ambas maquinas. A continuación, se muestran imágenes y características del herramental de corte utilizado.



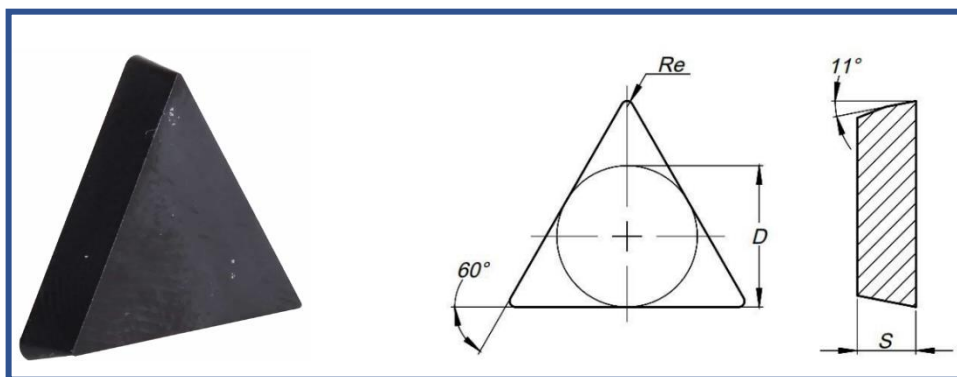
**Figura 19** – Herramental broca/cortador (husillo) y especificaciones (Elaboración propia)

Especificaciones Herramental de corte	
Diametro (D)	1-1/4"
OAL (L)	3-1/4"
Largo (l)	6063/TS
Estilo de Shank	Weldon
Tamaño de Shank	3/4
a	21/32
Numero de insertos	2
Estilo de inserto	TPU/TPG/TPC-322

**Tabla 4** – Herramental broca/cortador (husillo) dimensiones y especificaciones

(Elaboración propia)

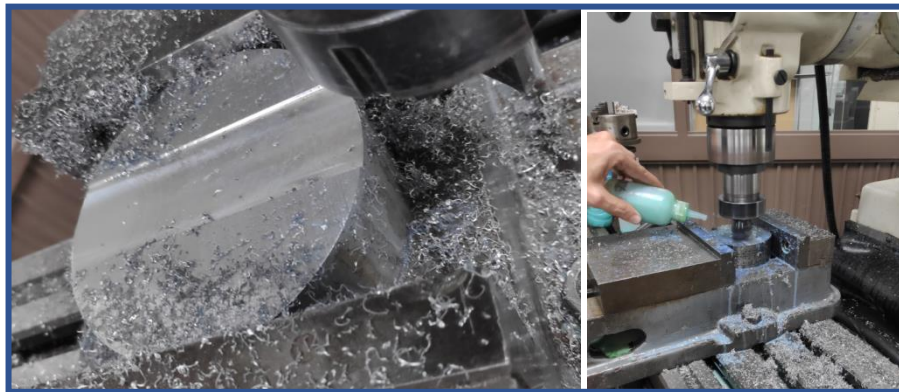
Los insertos utilizados en el proceso son modelo TPUN 322 triangulares para torneado regular, con recubrimiento de CVD de carburo grado PH5125, a continuación, se muestran sus propiedades:



**Figura 20** – Insertos TPUN 322 (Elaboración propia)

Insertos TPUN 322	
Ángulo de inserto incluido	60.00
Diametro del circulo inscrito (D)	3/8"
Espesor (S)	1/8"
Geometría	TPUN
Grado	PH5125
Material	Carburo
Peso	25 gr
Peso	25 gr

*Tabla 5 – Especificaciones insertos TPUN 322 (Elaboración propia)*



*Figura 21 y 22 – Fresadora manual realizando la operación de corte sobre la pieza (Elaboración propia).*

### 1.2.3 Validación de las condiciones del escenario

Siendo el escenario de investigación, el consumo específico de energía y rugosidad superficial para procesos de corte de material en las máquinas-herramienta (Fresadora manual y CNC principal) del laboratorio de ingeniería mecánica del ITESO, es importante tener en cuenta y hacer mención sobre las condiciones en las que la fase experimental de la investigación se llevara a cabo.

### 1.2.3.1 Identificación de los actores

Los principales actores para la realización de la fase experimental y de investigación de este trabajo son los siguientes:

- **Dr. David M. Ochoa González**, Coordinador de la carrera de Ingeniería Mecánica del ITESO.
- **MIC. Francisco J. Robles García**, Profesor en la maestría de ingeniería y gestión de la calidad para la asignatura de “Diseño de Experimentos y Optimización” del ITESO.
- **Ing. Jordán Araujo Briseño**, Estudiante de la maestría en ingeniería y gestión de la calidad del ITESO.

### 1.2.3.2 Sostenibilidad del proyecto

Este trabajo de investigación se considera viable y sostenible ya que se estudió la disponibilidad previamente de las máquinas-herramienta a utilizar, actualmente estas máquinas se encuentran en el taller con disponibilidad fuera de hora de clase de manera que se tiene la libertad de trabajar en ellas y poder modificar los parámetros del proceso de corte previamente a cada operación con el fin de poder estudiar estas y analizar su influencia en el consumo específico de energía y la rugosidad superficial dejada sobre la pieza maquinada.

Los beneficios que se obtendrán a largo plazo de la realización de este proyecto son mayores a los costos totales de la compra de materiales y equipo, así como de la ejecución requerido para el desarrollo de este.

La importancia en la necesidad en realizar este proyecto no solo es particular al indicador económico debidos a ahorros de facturación eléctrica si no principalmente por la relevancia del aporte científico de obtener los datos de consumo de energía de la situación actual (datos que no se tienen actualmente para este proceso) y estudiarlos con el enfoque de impacto en calidad y de responsabilidad social asociados, situación tal, que no se han encontrado investigaciones recientes en nuestro país donde se estudien estos datos con el mencionado enfoque en este tipo de máquinas.

Así, este proyecto busca aportar herramientas y metodologías para generar una base estadística que permita determinar las mejores condiciones de configuración de la maquina obteniendo el mayor ahorro energético con el mejor terminado de rugosidad de la pieza.

Actualmente se tiene acceso por parte del ITESO del software necesario para ejecutar el análisis y la mejora del proceso, de manera que no se necesitó de esfuerzos económicos adicionales particulares con relación a la renta/compra de software para la ejecución del proyecto.

### **1.2.3.3 Tiempo requerido**

El tiempo considerado para la realización de este proyecto de investigación fue de 4 semestres, suficientes para la ejecución de la toma de línea base (medición de datos), análisis de la información obtenida y la ejecución de la mejora en cuanto a las pruebas experimentales del proceso, su optimización, control y generación de conclusiones sobre el objeto de estudio.

### 1.3 Objetivos de la investigación

El objetivo principal de esta investigación es el mejorar el proceso de corte comúnmente realizado en este tipo de máquinas-herramienta en la industria metalmeccánica, disminuyendo costos por el consumo de energía eléctrica debida a este y a su vez con ello, disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas de este consumo de energía. Como objetivos secundarios, se desea mejorar el desempeño del proceso al aumentar la capacidad de producción de este sin disminuir el nivel de calidad deseado.

#### 1.3.1 Objetivos particulares

Los siguientes son los 3 objetivos particulares de este trabajo de investigación:

- **Disminuir el consumo eléctrico de la operación de maquinado** - Con el fin de disminuir costos de facturación eléctrica y el impacto ambiental como parte de los requerimientos de gestión de sustentabilidad que a menudo son necesarios cumplir en el sector, trasladando el proceso a niveles de producción industrial.
- **Aumentar el desempeño del proceso** - Basado en la cantidad de piezas posibles a procesar en un determinado periodo de tiempo al trasladar dicho proceso a niveles de producción industrial.
- **Aumentar el índice de capacidad del proceso** - basado en la disminución de la cantidad de producto no conforme a especificación de rugosidad superficial promedio dejada sobre las piezas maquinadas.

#### **1.4 Relevancia y pertenencia del trabajo**

La relevancia que tiene la realización de esta investigación parte desde la perspectiva que no se han encontrado publicaciones sobre investigaciones recientes en México que traten sobre la mejora en la calidad de procesos de corte sin incrementar los costos que esto genera particularmente en el impacto energético y medioambiental que acarrea la utilización en serie de este tipo de máquinas.

Por ejemplo, existen estudios que se han enfocado en la mejora de los parámetros de entrada programables en estas máquinas para optimizar el proceso de corte y controlar los niveles de rugosidad final, pero sin considerar el impacto ambiental a nivel global que involucra el consumo energético necesario para toda la cadena de suministro del producto final ni los costos de facturación eléctrica que se derivan de estos “altos consumos energéticos” que en su mayoría de las veces no aportan valor real al proceso de corte ni al nivel de calidad esperado del proceso.

Si existiesen estudios internos con este enfoque, probablemente se mantengan de forma privada dentro de los departamentos de ingeniería de este tipo de empresas, pero esta información y análisis esta fuera del dominio público frecuentemente, esta sería la principal justificación para la realización de esta investigación. Además, el hecho de que actualmente no se encuentre con registro de una línea base de cual partir para dicho proceso remarca la importancia de la obtención de estos datos iniciales.

La siguiente tabla, muestra el acta constitutiva del proyecto de investigación.

Información general del proyecto				
Nombre del proyecto	MEJORA DEL PROCESO DE CORTE POR ARRANQUE DE VIRUTA EN MÁQUINAS-HERRAMIENTA DEL LABORATORIO DE INGENIERÍA MECÁNICA DEL ITESO A TRAVÉS DE LA METODOLOGÍA DEL CICLO DE DEMING			
Departamento encargado	Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales ITESO			
Sub-departamento	Laboratorio de Ingeniería Mecánica del ITESO			
Localización	Tlaquepaque Jalisco, México			
Área encargada	UAB: Diseño Mecánico y Manufactura Industrial			
Función encargada	Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales ITESO			
Proceso implicado	Proceso de corte por arranque de viruta en máquinas-herramienta CNC y fresadora manual del laboratorio de Ingeniería Mecánica del ITESO			
Inicio del proyecto	Enero de 2021			
Finalización del proyecto	Mayo de 2023			
Estimación de aprobación	Mayo de 2023			
Descripción del problema y objetivos del proyecto				
Descripción de la problemática	<p><b>Consumo energético / Facturación eléctrica específica del proceso excesiv(a)</b> - Ya que no aporta beneficio a la calidad del proceso de corte.</p> <p><b>Desempeño actual del proceso de corte ineficiente</b> - Tiempo del proceso demasiado largo para cumplir takt time esperado.</p> <p><b>Nivel sigma del proceso bajo</b> - Altos niveles de desperdicio por producto no conforme a especificación para el nivel de rugosidad superficial esperada dejada sobre la pieza cortada.</p>			
Situación futura / Objetivos del proyecto	<p>•Mejorar el consumo específico de energía del proceso, con el fin de <b>disminuir</b> costos de facturación eléctrica y el impacto ambiental derivado de este como parte de los requerimientos de gestión de sustentabilidad esperados.</p> <p>•Mejorar el desempeño del proceso - Basado en <b>aumentar</b> la cantidad de piezas posibles a procesar en un determinado periodo de tiempo.</p> <p>•Mejorar los niveles de desperdicio - Por producto no conforme por especificación basado en <b>disminuir</b> la cantidad de defectos por millón de oportunidades con el cumplimiento de los límites de especificación máximo de rugosidad promedio superficial dejada sobre las piezas maquinadas.</p>			
Justificación del proyecto	La relevancia que tiene la realización de esta investigación parte desde la perspectiva que no se han encontrado publicaciones sobre investigaciones recientes en México que traten sobre la mejora en la calidad de este proceso en particular sin incrementar los costos que esto genera particularmente en el impacto energético y con ello el medioambiental que acarrea en la ejecución de estos procesos en este tipo de máquinas.			
Meta / Métricas	<p>N - Cantidad de insertos del herramienta de corte</p> <p>n - Velocidad de rotación del herramienta de corte (rev/min)</p> <p>Fz - Velocidad de avance por diente del herramienta de corte (mm/z)</p> <p>ae - Profundidad del corte en su eje radial (mm)</p> <p>ap - Profundidad del corte en su eje axial (mm)</p> <p>Vf - Velocidad de avance del herramienta de corte (mm/min)</p> <p><b>Material de la pieza de trabajo</b> (AL / Acero P20)</p> <p>D - Diámetro de la pieza de trabajo (mm)</p> <p>d - Diámetro del herramienta de corte (mm)</p> <p><b>Material de los insertos de corte</b> (Carburo)</p>	<p>CE - Consumo específico de energía (J/mm<sup>3</sup>)</p> <p>E - Consumo de energía total diario por el proceso (KWh)</p> <p><b>Facturación eléctrica anual por el proceso</b> (\$ MXN)</p> <p>Ra - Rugosidad superficial dejada sobre la pieza (µm)</p> <p>Ecar - Emisión de gases de efecto invernadero (KgCO<sub>2</sub>e)</p> <p>TP - Taza de producción (Pzas/día)</p> <p>DPMO'S Defectos por millón de oportunidades</p>		
Actores principales del proyecto y esfuerzos financieros				
Patrocinador del proyecto	Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Occidente			
Gerente del Proyecto	Ing. Jordán Araujo Briseño			
Miembros del equipo del Proyecto	Dr. David Manuel Ochoa González / Ing. Jordán Araujo Briseño / M.C. Francisco Javier Robles Garcia			
Asesores del proyecto	Dr. David Manuel Ochoa González / M.C. Francisco Javier Robles Garcia			
Esfuerzos Financieros	Compra de equipo de medición y material requerido			
Resultados esperados del proyecto y entregables				
Resultados cualitativos alcanzados	Optimización del proceso de corte en las maquinasherramienta del laboratorio de ingeniería mecánica del ITESO disminuyendo el consumo de energía, mejorando el desempeño del proceso y manteniendo el nivel de calidad esperado			
Especificaciones de "KPI's"	Valor antes	Valor despues	Dirección	Cambio (%)
KPI "1"	<b>Reducción en la facturación anual eléctrica anual derivada del proceso de corte (\$/año)</b>			
Valores	\$8,243	\$6,595 o menos	Reducir	20%
KPI "2"	<b>Reducción en la emisión anual de gases de efecto invernadero por consumo de energía derivado del proceso de corte (KgCO<sub>2</sub>e/año)</b>			
Valores	2,000	1,600 o menos	Reducir	20%
KPI "3"	<b>Aumento del desempeño del proceso al aumentar la tasa de producción diaria (Pzas/día)</b>			
Valores	Demanda diaria ≈ 209	Demanda diaria 270	Aumentar	30%
KPI "4"	<b>Reducción de la cantidad de desperdicio (PPMO's no conforme a especificación) de rugosidad superficial promedio en las piezas maquinadas</b>			
Valores	19,064 PPMO's	15,251 PPMO'S	Reducir	20%

Tabla 6 – Acta constitutiva del proyecto (Elaboración propia).

## 2 MARCO CONCEPTUAL DE REFERENCIA

### 2.1 Estado de la cuestión - Ciclo de vida de los materiales.

Dado que el fin principal de las máquinas-herramienta analizadas en este trabajo es el mecanizado de materia prima que finalmente formaran parte de un producto final, es importante analizar el consumo energético que existe en torno a este producto final y no solo el que parte de las operaciones de manufactura que lo definen.

Ashby, indica que *“el análisis de consumo energético sobre algún producto material tiene muchos factores a tener en cuenta, no únicamente bajo la premisa de contabilizar la energía requerida para su manufactura del producto final, sino que debemos de verlo desde un contexto global y general, es decir, durante todo el ciclo de vida del producto”* (Ashby F, 2009).

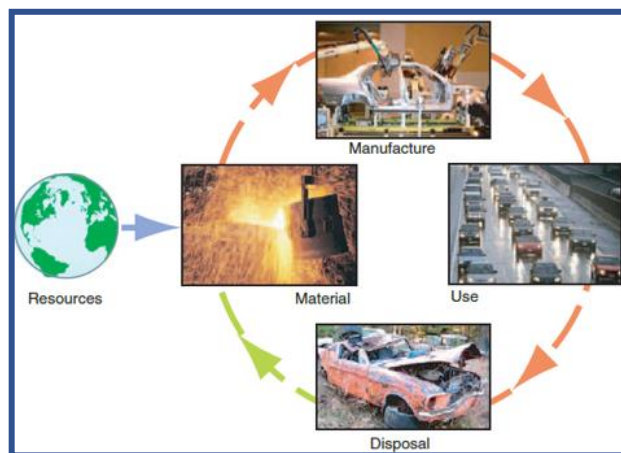
El autor afirma que *“Los materiales en la ingeniería tienen un ciclo de vida. Son creados a partir de minerales y materia prima. Son manufacturados en productos que finalmente son distribuidos y utilizados, como nosotros, los productos tienen una vida finita”* (Ashby F, 2009).

De esta forma, Ashby propone contabilizar el uso de energía desde el punto donde se deben recolectar y transportar materiales como materia prima necesaria para comenzar con su manufactura, hasta el punto donde la vida útil del producto final llega a su fin, y es necesario pensar en su disposición final y pensar en si esto último también requerirá de algún tipo de energía para realizarlo.

Así, todo producto y materiales primarios para su producción tienen un ciclo de vida. Para poder fabricar una botella de plástico, por ejemplo, necesitas de la materia prima pellet preformado, que

proviene de recursos naturales como el petróleo. Crear este material con las características necesarias para utilizarlo posteriormente como materia prima en una fábrica de botellas (que sería el producto final), requiere de energía en diversas formas, térmica, eléctrica, mecánica etc. Posterior a esto requiere de transportación para su distribución, la cual es impulsada por otra forma de energía interna química que pasa a ser mecánica en la combustión de la gasolina que utilizan los automóviles para su distribución.

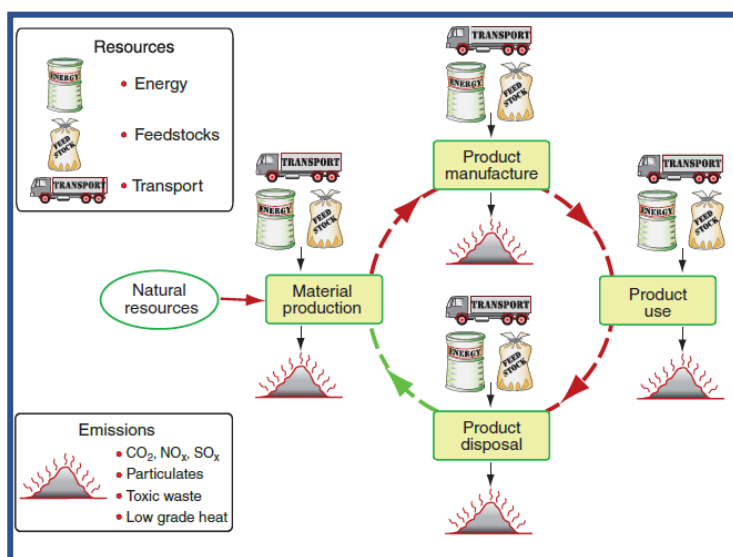
Todos estos procesos son solo para la fabricación de la materia prima del producto final que son las botellas de plástico en este caso, las cuales formaran parte de otro proceso similar para que esta finalmente llegue al consumidor. El uso y disposición final de esta materia prima requiere finalmente de nuevos procesos que requieren de energía en diferentes formas para poder controlar el desecho y/o reciclaje de estos.



**Figura 23** – Representación gráfica del ciclo de vida de los recursos materiales para la fabricación de un producto (Ashby F, 2009).

Observando desde este marco de referencia, lo que conlleva en materia de consumo energético la manufactura de cualquier materia prima y/o producto final, podemos definir las entradas del producto como toda la energía necesaria involucrada en el ciclo de vida de los materiales y productos y como salidas, todo aquello (incluyendo energía en distintas formas) que salga de la obtención de materiales, de la manufactura del producto, de su uso y disposición final que no sea aprovechable o se considere desperdicio.

Por ejemplo, energía en forma de calor a partir de un proceso de barrenado, material sobrante de un proceso de torneado o cortado en alguna pieza de aluminio que no puede reutilizarse y por supuesto, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI's) derivado tanto de la generación eléctrica necesaria para operar las máquinas utilizadas en la manufactura como por la misma energía consumida por el uso del producto final (si aplicase). Con esto en mente, podemos considerar el siguiente diagrama:



**Figura 24** – Representación gráfica del ciclo de vida de un producto y la generación de emisiones en cada momento de su fabricación (Ashby F, 2009).

Como podemos observar de la imagen anterior, de cualquiera de los cuatro procesos principales del ciclo de vida de los productos y/o materiales, existe tanto un ingreso de recursos en forma de energía, materia prima y transporte llámense “entradas” y se tienen las emisiones en sus diferentes formas, calor, partículas, pero principalmente los gases de efecto invernadero CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono), SO<sub>2</sub> (Oxido de sulfuro) y NO<sub>2</sub> (nitrógeno), los cuales son los principales gases responsables del incremento de temperatura global y los costos adicionales que conlleva su adecuado manejo.

Dentro de esta variedad de emisiones, no todas tienen el mismo impacto en cuanto a lo que refiere como consumo energético, los GEI's tienen un impacto diferente al medio ambiente al que tiene por ejemplo un mal manejo de residuos sobrantes de una planta de generación de papel, como la madera no utilizada etc., las principales emisiones que se deben tomar en cuenta y que impactan directamente al calentamiento global son por CO<sub>2</sub>.

### **2.1.1 Consumo eléctrico como entrada al producto.**

Este trabajo se basará particularmente en solo uno de esos recursos de entrada al producto, el cual es la forma más eficiente de energía que estas máquinas manejan, la energía eléctrica.

En cualquiera de estos procesos dentro del ciclo de vida de un producto, existe consumo invariablemente de energía eléctrica, desde la maquinaria necesaria para la extracción de los minerales necesarios con los que el producto final estará fabricado (cobre, aluminio, plástico, acero), hasta el momento de su utilización por el usuario final si es que aplicase, ejemplo una lavadora, un ordenador, un calentador eléctrico etc.

Existen productos, que durante su etapa de uso no requieren de consumo eléctrico, como una botella de agua, o unos zapatos, por los cuales, solo se considera hasta la etapa de obtención de la materia prima y su manufactura. También, como anteriormente se ha mencionado, es importante referenciar el final de la vida del producto, en el cual el desperdicio de este tipo de productos no siempre es sencillo. Muchas veces, es necesario para sus procesos de reciclaje, la utilización de la energía eléctrica para poder realizar un reciclaje adecuado en diversos productos y materiales.

### 2.1.2 Emisiones por consumo de energía eléctrica en máquinas-herramienta

Como bien se mencionó al inicio, las emisiones de GEI's por el consumo de energía eléctrica de estas máquinas, son consideradas un factor importante a tener en cuenta en la aportación total hacia el cambio climático.

Alswat (2021) indica que el aporte de gases de efecto invernadero por consumo de energía eléctrica en máquinas herramienta en procesos de manufactura, puede ser calculado como:

$$E_{car} = E \times eCO_2 \quad (1)$$

Donde:

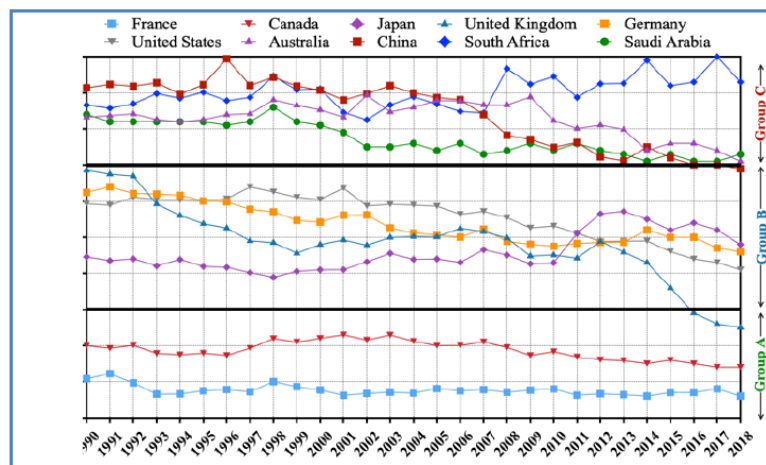
- $E_{car}$ , se mide en TCO<sub>2e</sub>/MWh (Toneladas de dióxido de carbono equivalente por mega watt hora).
- $eCO_2$ , es un valor que relaciona la intensidad de dióxido de carbono por watt-hora generado el cual es particularmente diferente entre países debido a las diferentes tecnologías de

generación y eficiencias en procesos y/o tecnologías de generación de energía, sus unidades son TCO<sub>2e</sub> (Toneladas de dióxido de carbono equivalente).

- **E**, es el consumo de energía eléctrica directa por la máquina-herramienta sus unidades son MWh (Mega watt hora).

De acuerdo con la Comisión Reguladora de Energía (CRE) y el Registro Nacional de Emisiones (RNE) emitido por la secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), el factor de intensidad del sistema eléctrico nacional en México durante 2020 fue de 0.494 tCO<sub>2e</sub>/MWh (toneladas de CO<sub>2</sub> equivalentes por cada mega watt hora) ( Naturales S. d., 2020).

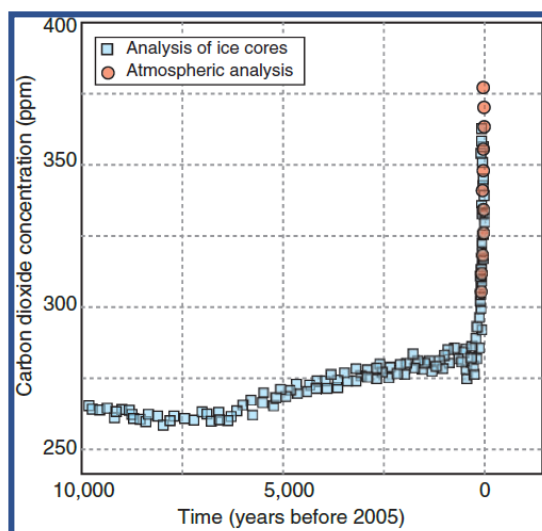
Estos valores, en comparación con otros países, con mayores regiones industriales, son alarmantes, poniendo en la lupa que la eficiencia en la generación eléctrica en México es baja, y las emisiones derivadas de esta son relativamente altas comparando con otras naciones.



**Figura 25** – Intensidad de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) por generación eléctrica en diferentes países desde 1990 a 2014 (H. Alswat, 2021).

De la imagen anterior, dividida en 3 grupos principales, en el grupo A, se tienen países donde la intensidad de carbono no es mayor a  $0.29 \text{ KgCO}_2 / \text{KWh}$ , en el grupo B se encuentran entre  $0.30 - 0.69 \text{ KgCO}_2 / \text{KWh}$  y para el grupo C por arriba de  $0.7 \text{ KgCO}_2 / \text{KWh}$ , los países dentro del grupo B (Reino Unido, Estados Unidos, Alemania y Japón), son países con un mayor sector económico manufacturero que México, sin embargo, nuestro país se encontraría dentro de este grupo de intensidad de dióxido de carbono por generación de energía eléctrica con un valor de  $0.49 \text{ KgCO}_2 / \text{KWh}$  generado. (Transparency, 2020)

La concentración atmosférica global de  $\text{CO}_2$ , se ha incrementado alarmantemente a partir del inicio de la revolución industrial, y ahora se encuentra en sus niveles más altos, principalmente han ocurrido entre 1950 al día presente, esto indica que invariablemente la industria de la manufactura es el responsable principal en el incremento de  $\text{CO}_2$ .



**Figura 26** – Concentración atmosférica de  $\text{CO}_2$  en los últimos 10,000 años. (Ashby F, 2009).

### 2.1.3 Energía interna de los materiales.

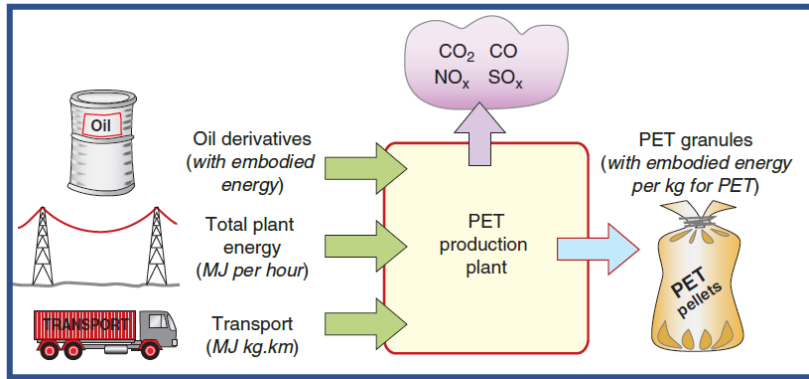
Anteriormente vimos cómo influye la energía eléctrica en consumo general de energía para la producción de los materiales y/o productos en la industria, sin embargo, los distintos materiales de los que puede estar compuesto cualquier producto final, están formados por minerales que llevan en si también procesos de extracción y producción, así como preformado para su posterior utilización como se mencionó en el capítulo anterior.

Estos materiales pueden ser cobre, aluminio, acero, plata (comúnmente utilizados en la industria electrónica por sus propiedades de conductividad eléctrica y en semiconductores), Durante estos procesos, se utilizó energía específica en su forma eléctrica, térmica o química en la extracción, en el preformado y en la transportación para poder producir la materia prima que posteriormente servirá a otra industria de la manufactura, englobando la energía requerida para la extracción y producción de estos minerales, ha sido nombrado en la bibliografía como “energía interna de los materiales”<sup>1</sup>.

Esta energía interna contabiliza toda la energía empleada en estos procesos por lo que un mineral que posteriormente formara parte un producto inicialmente tuvo que pasar por todos estos procesos para llegar al punto final de utilización con el cliente. A continuación, siguiendo con el ejemplo presentado por Ashby (2009), se muestra una imagen ilustrativa de la energía interna que conlleva producir un saco de pellets ya preformado el cual es un derivado del petróleo.

---

<sup>1</sup> Embodied energy of materials (Ashby F, 2009)



**Figura 27** – Concentración de energía requerida “energía interna” para producir un saco de Pellets y su emisión de gases. (Ashby F, 2009).

## 2.2 Conceptos y enfoques teóricos relacionados.

Conociendo entonces el marco referencial en el que se engloba el impacto ambiental derivado del ciclo total de vida de los materiales, podemos enfocarnos en el impacto atribuible a su transformación en los procesos productivos en la industria, particularmente al consumo específico de energía requerido por la maquinaria encargada de esta transformación y específica para la operación de corte de material.

### 2.2.1 Consumo específico de energía y tasa de remoción de material

El  $CE_e$  es un indicador de la eficiencia energética de una máquina-herramienta, entre menor sea su valor mayor será la eficiencia energética que se está teniendo para el proceso de corte (remoción/desbaste de material) sobre la pieza de trabajo, sus unidades son  $J/mm^3$  (Joules por milímetros cúbicos). La siguiente ecuación nos permite determinar el  $CE_e$  a través de la energía requerida por la máquina-herramienta.

$$CE_e = \frac{P_c}{TRM} \quad (2)$$

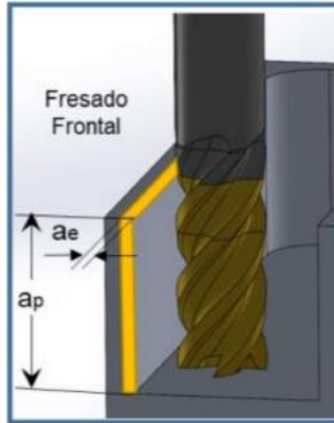
Donde:

- **P<sub>c</sub>**, es la demanda total de potencia promedio de la máquina herramienta durante el tiempo que el herramental está haciendo el corte sobre la pieza medida en w (watts) y esta es representada a partir del arranque de la operación asignada o programada a la máquina hasta el apagado de todos sus sistemas y subsistemas después de finalizar la operación de maquinado.
- **TRM**, es un indicador de la velocidad con que la maquina removerá volumen de material de la pieza en mm<sup>3</sup>/s (milímetros cúbicos por segundo). Esta relación podemos obtenerla a partir de:

$$TRM = \frac{V_f a_p a_e}{60} \quad (3)$$

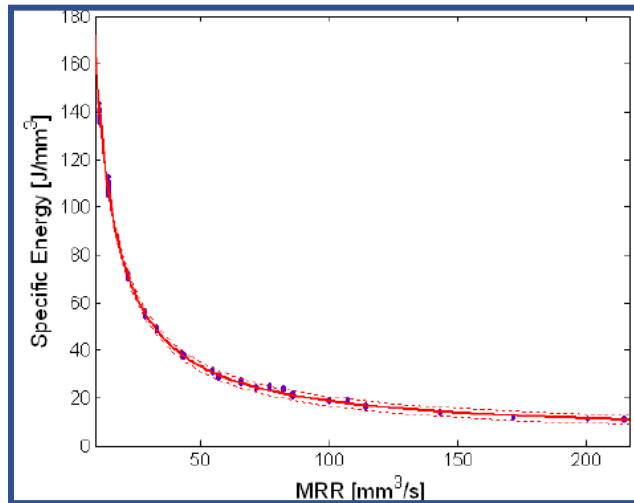
Donde:

- **V<sub>f</sub>**, equivale a la velocidad de avance del herramental de corte en mm/seg (milímetros por segundo) y representa el ritmo por unidad de tiempo con el que la herramienta de corte (husillo o broca) avanza su trayectoria hacia y sobre la pieza realizando la remoción de material sobre esta.
- **a<sub>p</sub>**, representa la profundidad de corte con respecto a su eje axial en mm (milímetros)
- **a<sub>e</sub>**, representa la profundidad de corte con respecto a su eje radial en mm.



**Figura 28** – Representación gráfica de la operación de fresado frontal sobre la pieza de trabajo respecto la profundidad del corte en sus ejes radial y axial. (Molina, Contreras, 2021).

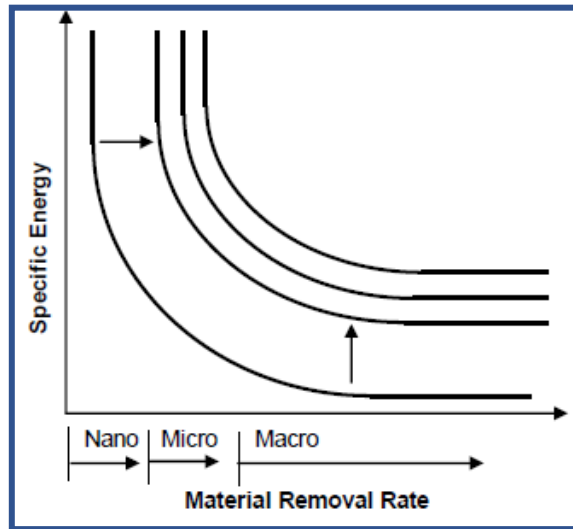
En un artículo más reciente, Diaz y un grupo de investigadores (Diaz, y otros, 2010) muestran en sus estudios como el  $CE_c$  por una máquina herramienta que realiza la operación de corte disminuye conforme la TRM aumenta en el tiempo, sin embargo, esta relación dependerá adicionalmente del tipo de material del que está hecho esta herramienta, pero en mayor medida, del tiempo que le toma en mecanizar la pieza, siendo así que a mayor TRM (es decir menor tiempo para procesar la pieza) el  $CE_c$  es menor y viceversa.



**Figura 29** – Relación entre la TRM y el  $CE_e$  para una máquina-herramienta dada en operación de corte frontal. (Diaz, y otros, 2010).

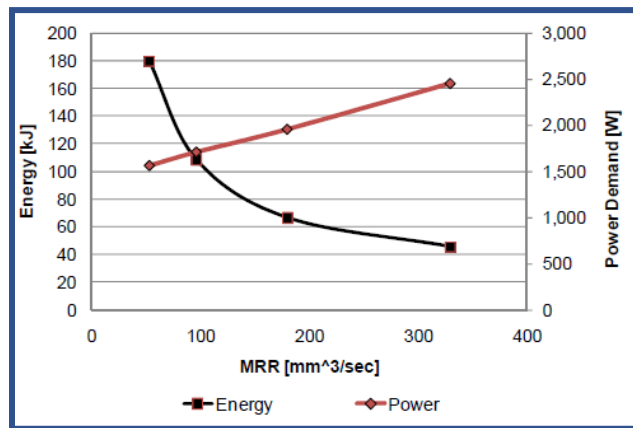
La energía suministrada a la máquina será directamente proporcional a la TRM, máquinas con mayor capacidad de proceso pueden procesar más material, pero a su vez requerirán de mayor suministro de energía para mantener altos rangos de remoción de material.

En la siguiente imagen observamos cómo los diferentes tipos de maquinado (niveles nano, micro y macro) se obtienen distintos niveles de  $CE_e$ , cuando se tienen comúnmente centros de maquinado a nivel macro se observan  $CE_e$ 's menores por mayores TRM's sin embargo por otra parte este tipo de maquinado requiere de demandas de potencia en estado de espera más elevados que los otros tipos de maquinado debido a equipo periférico en continuo funcionamiento.



**Figura 30** – Gráfica de C<sub>Ee</sub> vs TRM (Diaz, y otros, 2010).

“La TRM optima puede ser determinada utilizando parámetros de proceso estándar basados en el material de la pieza de trabajo y una apropiada herramienta de corte para la creación de la característica del corte” (Diaz, y otros, 2010).

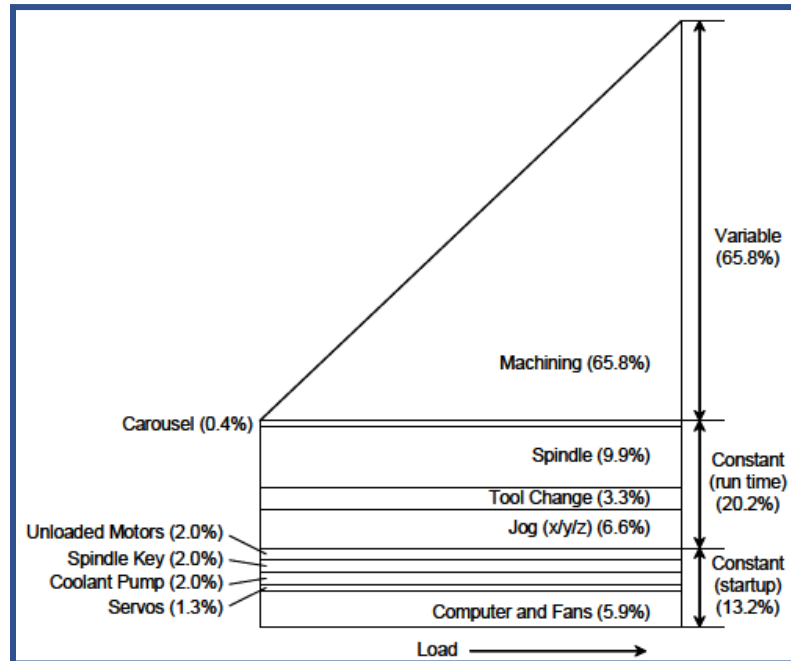


**Figura 31** – Gráfico que relaciona la energía específica y demanda de potencia en función de la TRM (Diaz, y otros, 2010).

Como podemos observar de la gráfica anterior, (Diaz, y otros, 2010), nos muestra resultados de la experimentación en operaciones de corte con ciertas condiciones de profundidad y ancho de estos. Se observa que a medida que la TRM aumenta, el  $CE_e$  disminuye y la potencia demandada promedio para el proceso aumenta, encontrar un punto de equilibrio entre la demanda de potencia requerida por la máquina y el  $CE_e$  del proceso es el propósito de la obtención de un TRM apropiado.

La demanda de potencia y el consumo energético que hemos visto hasta ahora, son solo atribuibles al momento en que la máquina-herramienta está realizando la operación de corte, pero esto se le deben añadir otros consumos derivados de subsistemas, compuestos por computadoras, bombas, mecanismos, sistemas hidráulicos y motores de diferentes tipos según sea el caso de la máquina que se encuentran actuando en todo momento y no solo mientras la máquina está trabajando sobre la pieza realizando el corte, estos sistemas son comúnmente llamados sistemas de soporte.

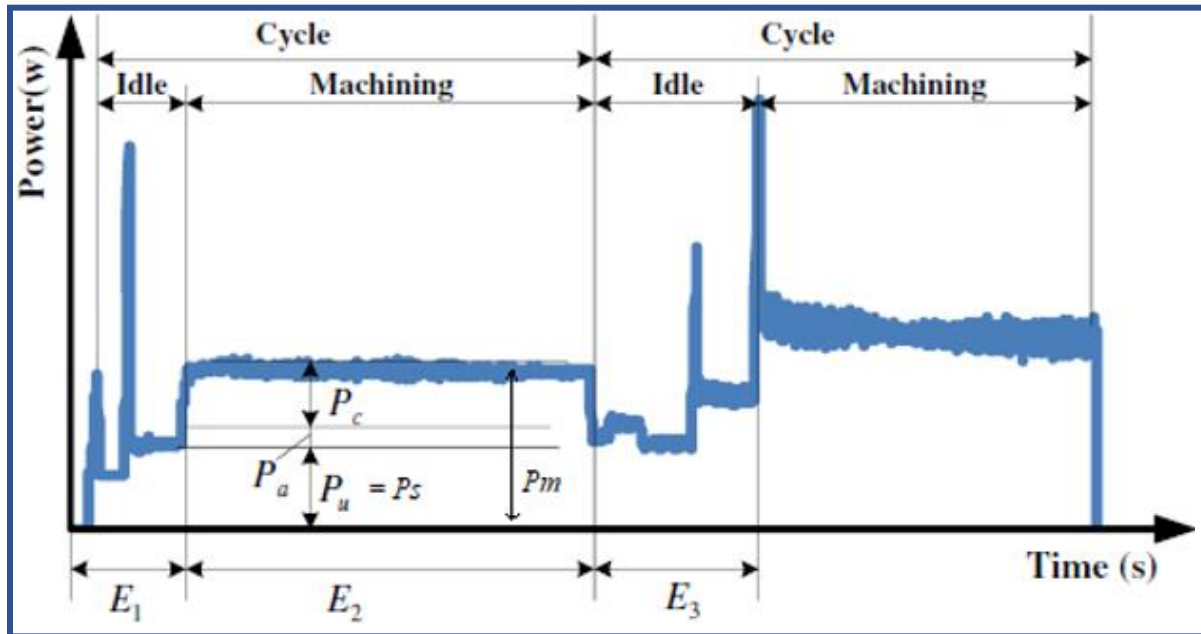
Es aquí donde en el proceso de manufactura se debe de tomar en cuenta el concepto de consumo específico de energía, ya que para una máquina-herramienta existen diferentes fuentes de “carga” para la energía consumida durante el tiempo del proceso completo de maquinado, no solo la que es debida al momento del corte o mecanizado de la pieza, si no a las propias de los diferentes momentos durante toda la operación a realizar.



**Figura 32** – Diagrama energético con porcentajes del total de energía utilizada por cada elemento de una máquina-herramienta como función de la tasa de remoción de material. (Timothy Gutowski, 2006).

Para determinar el CEE total derivado de una cierta operación de corte en este tipo de máquinas es necesario conocer los diferentes momentos durante el proceso en el que la potencia eléctrica requerida por la máquina-herramienta es demandada en mayor o menor medida, además de conocer cuáles son los puntos donde esta demanda cambia durante el tiempo que dure la operación.

A continuación, se muestra una imagen donde observamos el perfil de potencia en un proceso de corte para una fresadora CNC común.



*Figura 33 – Perfil de potencia de un proceso de maquinado en una fresadora CNC (Qiulian Wang, 2014).*

De la imagen anterior podemos observar, como el tiempo está dividido en 3 sectores, “E1”, representa el sector de demanda de potencia donde el herramental de corte enciende y comienza a avanzar hacia la pieza a maquinar, podemos observar un pico de energía que representa la demanda instantánea por el encendido del giro del herramental, posteriormente para “E2” vemos la demanda durante la que el herramental está realizando el corte sobre la pieza, es en esta demanda donde podemos observar la “potencia máxima promedio” ( $P_m$ ), requerida por la maquina mientras realiza el corte sobre la pieza de trabajo. Por último, tenemos a “E3”, momento de la demanda donde el herramental termina de realizar el corte sobre la pieza sin embargo sigue avanzando una cierta distancia hasta llegar a su punto final donde la herramienta se detendrá y apagará.

Podemos entonces identificar cada una de las potencias demandadas en base a que parte del proceso refieren cada una, de acuerdo a la imagen, “ $P_u$ ” es la potencia debido al encendido de

rotación del herramienta, “ $P_a$ ” aquella potencia debida al avance del carro completo del herramienta dirigiéndose a la pieza a maquinar, la suma de ambas definen a “ $P_s$ ” que será entonces la potencia demandada por la máquina que no depende directamente de la operación como tal de corte sobre la pieza maquinada sino de todos los procesos secundarios necesarios y requeridos para completar la operación.

Por último, tenemos a “ $P_c$ ” que como podemos observar en el gráfico es la potencia específica debido al paso del herramienta de corte sobre la pieza que está siendo maquinada es decir por la remoción del material. Podemos entonces definir un cálculo total de la potencia demandada por la máquina-herramienta durante toda la operación de corte con el parámetro “ $P_m$ ” como muestra la gráfica y equivale a:

$$P_m = (P_u + P_a) + P_c = P_s + P_c \quad (4)$$

Otras definiciones de eficiencia energética dentro del contexto de las máquinas herramientas y la fabricación, pueden ser dadas en ciclos por total de energía suministrada o piezas trabajadas por energía utilizada.

Partiendo del concepto de piezas trabajadas, así como tiempo utilizado para realizar la operación requerida, es donde podemos obtener una mejor concepción de la importancia en la eficiencia energética en este proceso, específicamente en tornos o fresadoras, donde su objetivo es cortado, perforado o rectificado de material, la TRM es una de las variables más requeridas a ser controlada ya que se sabe que el consumo de energía esta principalmente relacionado con el tiempo

que le tome a la máquina procesar una pieza y por ende con su **tasa de producción** para dicho proceso. Este tiempo dependerá entonces, de todos los factores que vimos con anterioridad.

### 2.2.2 Tasa de producción para el proceso de corte

La tasa de producción de una máquina herramienta dentro del contexto de la industria de la manufactura se entiende como la cantidad de piezas que se puedan manufacturar en cierto periodo de tiempo por dicha máquina. Por ejemplo, si para cierto proceso de corte se tiene una disponibilidad de utilización de la máquina-herramienta total de 16 horas continuas en una jornada laboral, la tasa de producción será la cantidad de piezas que la maquina pueda cortar en una hora por el total de las 16 horas continuas de disponibilidad de la máquina.

$$TP = \left( \frac{\text{Piezas}}{\text{hora}} \right) \times \text{horas de disponibilidad máquina} - \text{herramienta} \quad (5)$$

A menor tasa de producción la contribución de la máquina-herramienta es menor en la producción. Sin embargo, se observa frecuentemente en la práctica que estas máquinas demandan una cantidad considerable de energía en momentos diferentes a los que aporta trabajo útil a la pieza a manufacturar, por ejemplo, al arrancar el proceso y la maquina se encuentre en estado de “warm-up” o la debida a mantener la máquina en posición lista o “stand-by” para realizar la operación mientras se está acomodando manualmente la pieza a maquinar, y por supuesto en momentos transitorios, aquellos donde el cuerpo principal de la herramienta (si se tratase de una fresadora de corte vertical por ejemplo), ejecuta el proceso productivo y se aproxima a las posiciones de corte en la pieza, es en estos estados de relativa “baja tasa de producción” donde la máquina realmente

no está aportando energía real a la operación propia del mecanizado pero si está consumiendo energía.

En la investigación de Chryssolouris afirma que *“una configuración de línea específica puede ser más eficiente por una serie de razones, incluida la capacidad de una mejor programación para reducir los tiempos de inactividad o la inclusión de máquinas capaces de cambiar al modo ecológico o apagarse cuando no están en funcionamiento”*. Estos serían factores importantes a tener en cuenta para cualquier análisis de consumo eléctrico en una línea de producción.

En concordancia con la TRM, se encontrará íntimamente ligado el concepto que mencionamos con anterioridad de tasa de producción, ya que cuando los índices de remoción de material en la máquina herramienta son altos, los rangos de TP medida en partes manufacturadas y/o mecanizadas por unidad de tiempo también aumentarían exponencialmente obteniendo así una productividad mayor a menores costos energéticos.

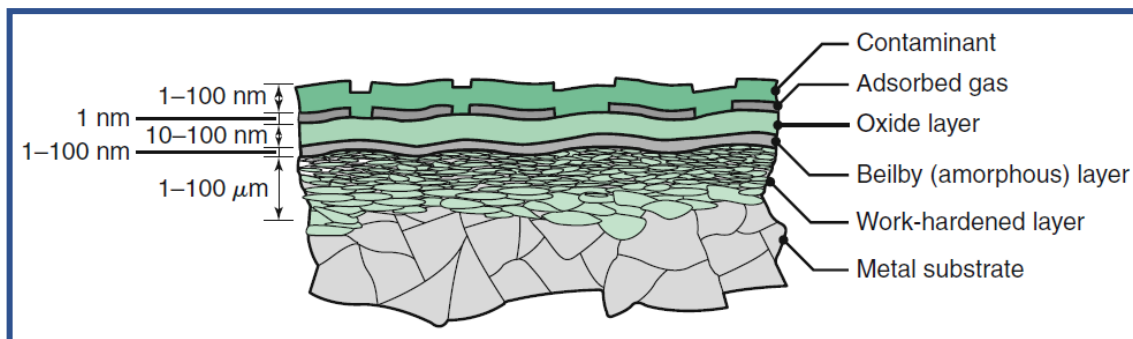
### **2.2.3 Rugosidad superficial como parámetro de calidad**

La rugosidad de un material es sin duda una variable deseable a ser controlada siempre, no solo como una manera de calificar un proceso de corte al ser el resultado final sobre una pieza de trabajo si no que cada vez se demanda un mejor terminado (menor nivel de rugosidad superficial final “R<sub>a</sub>”) en las superficies de las piezas maquinadas por parte de los clientes finales como medida de los niveles de calidad en los procesos productivos de una empresa de transformación.

El material de la pieza de trabajo es una característica importante a tomar en cuenta para evaluar la rugosidad, así como la forma física del instrumental de corte y el estado previo en que este se

encuentra (adicionalmente de las características que ya hemos descrito anteriormente como la velocidad de avance y profundidad del corte) actualmente se tienen definidos herramientas para cada material que se desee cortar/desbastar y esto dependerá fundamentalmente de la aleación de ambas piezas tanto de la pieza de trabajo como del herramienta de corte.

La siguiente imagen muestra una ilustración esquemática de la superficie de un metal cualquiera. El grosor de las diferentes capas mostradas, dependerán tanto de las condiciones del proceso y el desarrollo de este.



**Figura 34** – Ilustración de la sección transversal a nivel microscópico de la superficie de un metal. (E. Rabinowicz and B. Bhushan., 2010).

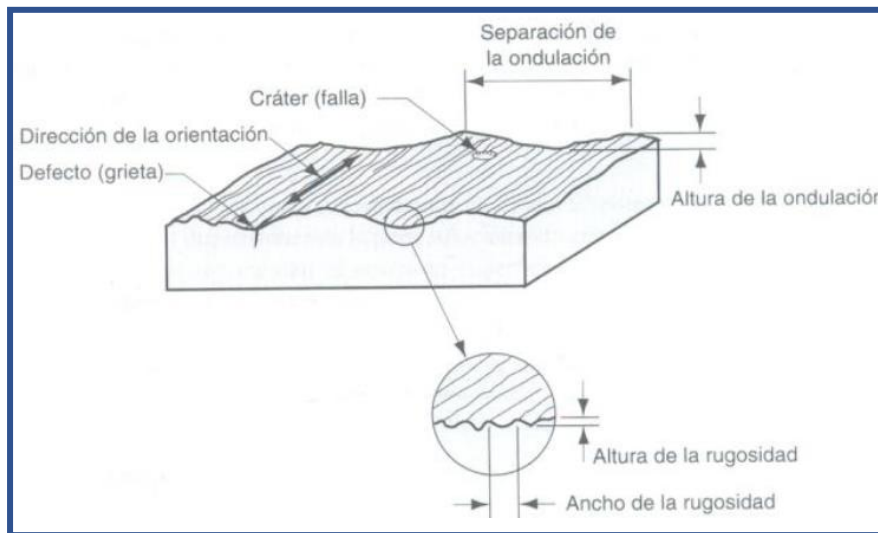
En los metales, se tienen diferentes tipos de capas desde el centro de una pieza hasta su superficie, ya que un proceso de manufactura como el corte de una pieza hacen que esta capa superficial se endurezca y tienda a oxidarse. El nivel de oxido dependerá de la composición química del metal, y la aleación de este. Los aceros inoxidable forman una capa protectora de cromo a la oxidación (pasivación) que evita esta oxidación.

La relación que existe entre la superficie de la pieza que paso por un proceso de corte entre las propiedades del sustrato, es lo que conocemos como rugosidad superficial  $R_a$ . Estas pueden variar

enormemente, entre diferentes metales de acuerdo con la aleación de la pieza de trabajo a la forma en que se realizó la operación de corte (parámetros generales), a las propiedades y estado o “tiempo de vida” del herramental de corte entre otros.

De acuerdo con (ASME B46.1) “la topografía superficial es la representación tridimensional de las irregularidades geométricas de las superficies” estas están descritas en función de las características espaciales de:

- Rugosidad
- Ondulación
- Errores de forma



**Figura 35** – Imagen de la superficie que muestra las propiedades que forman la rugosidad en un material. (González Coneo y otros., 2011).

Debido a las distintas características que puede presentar una superficie en un punto a nivel microscópico a otro punto por un proceso de corte, la rugosidad se debe de medir como un valor

absoluto de su desviación promedio a este valor se le denomina rugosidad promedio y que para fines de este trabajo llamaremos rugosidad superficial promedio “ $R_a$ ”.

$$R_a = \int_0^{L_m} \frac{y}{L_m} dx \quad (6)$$

Donde:

- $y$ , es la desviación vertical de la pieza de corte con respecto a la superficie nominal en in (pulgadas) de la pieza a maquinar
- $L_m$ , es la distancia especificada sobre la cual se miden las desviaciones.

En general, el valor de rugosidad se puede medir de tres maneras distintas:

El valor de la media aritmética de la rugosidad superficial ( $R_a$ ) que se basa en la ilustración esquemática de una superficie áspera y se define como:

$$R_a = \frac{a+b+c+d+\dots+n}{n} \quad (7)$$

Donde todas las ordenadas,  $a, b, c, \dots$ , son valores absolutos, y  $n$  es la cantidad de mediciones.  $R_a$  mide la media aritmética de las desviaciones de los picos respecto la altura de superficie, a mayor cantidad de mediciones se tiene mayor exactitud en la medición.

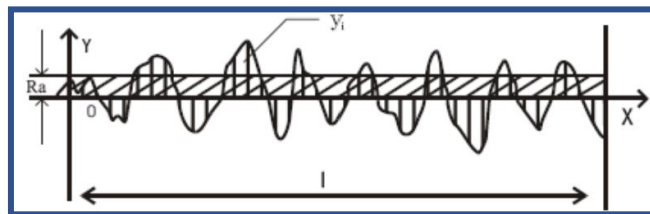
Otra forma de medir la rugosidad es a partir del parámetro “R<sub>Z</sub>”, donde lo que se mide es la altura promedio de la suma de 5 picos máximos y el promedio de la suma de 5 valles máximos dentro de la longitud de la prueba

$$R_Z = \frac{\sum_{i=1}^5 y_i + \sum_{i=1}^5 y_v}{5} \quad (8)$$

La raíz promedio de los cuadrados “R<sub>q</sub>” se define por la raíz del promedio de los cuadrados de todas las ordenadas.

$$R_q = \sqrt{\frac{a^2 + b^2 + c^2 + d^2 + \dots + n^2}{n}} \quad (9)$$

La siguiente imagen muestra la representación de medición entre la zona neutra (valor detectado como la base de la superficie y los picos y valles según sea el caso del valor medido).



**Figura 36** – Representación gráfica del promedio de las mediciones de las desviaciones con respecto al origen. (PCE ibérica, 2011).

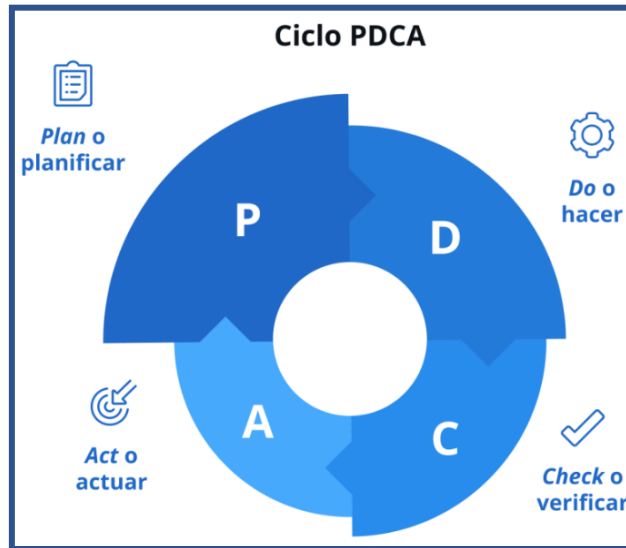
Un alto nivel de rugosidad en un proceso de corte para un material que no se encuentre dentro de la especificación de un cliente es frecuentemente relacionado a una mala calidad del proceso. Los niveles de rugosidad alta dan lugar a fallas en un producto ya sea en su ensamble o si este formara parte de un producto terminado, por ende, las condiciones que lleven a un valor máximo de rugosidad superficial requerido, conllevan a costos innecesarios por retrabajos, paros de línea y aumento de desperdicio al no tener producto conforme a especificación para estos procesos.

### **3 MARCO METODOLÓGICO DE REFERENCIA**

En base a lo observado en la problemática descrita y el proceso que se desea investigar, así como los factores que intervienen en este, se propone utilizar como metodología de investigación una herramienta de mejora continua, que nos permita evaluar constantemente el proceso y que la gestión de dicho proceso tienda a estandarizar cada una de las actividades requeridas para que este se ejecute.

#### **3.1 Definición preliminar de metodología, selección de las herramientas y el cronograma.**

La metodología de PDCA (plan, do, check and act por sus siglas en inglés) o el ciclo de Deming (como también se le conoce) es una metodología utilizada en ingeniería de calidad que consta de 4 pasos, que permiten ejecutar continuamente el proceso con el objetivo de evaluar el nivel de calidad. Dado que este proceso de corte es comúnmente una acción rutinaria que se repite continuamente (proceso cíclico) a nivel industrial, el analizar los datos, verificarlos, y actuar en consecuencia (mejorar el proceso en base al área de oportunidad identificada) y volver a repetir dicho ciclo con la misma finalidad, permite ~~erá~~ mantener la mejora y al mismo tiempo controlarla (realizar cambios si son necesarios).



*Figura 37 – Ciclo PDCA. (Sydle, 2021)*

La etapa de “**planear**” consiste en establecer las metas y objetivos que se planean conseguir en base a metas alcanzables para el proceso que se quiere intervenir, aquí también deben definirse las técnicas y los indicadores donde estas metas tendrán impacto. Algunas de las actividades que se desarrollan en esta etapa de la metodología son:

- Recabar datos de interés que permitan evaluar el proceso de estudio
- Identificar las metas que se quieren lograr y establecer los métricos que permitan medir si se ha logrado el objetivo.
- Especificar un cronograma y un plan de seguimiento con la serie de herramientas que permitirán ejecutar las acciones planeadas.
- Identificar las causas que hacen que la problemática se presente, así como todos los posibles factores que haga que estas causas se presenten de forma continua.

En la etapa de **“hacer”** se pone en práctica las acciones planificadas anteriormente y se ejecutan los cambios necesarios en el proceso de manera que puedas registrar los resultados que en un primer momento se establecieron con la orientación a las metas de la organización y del cliente.

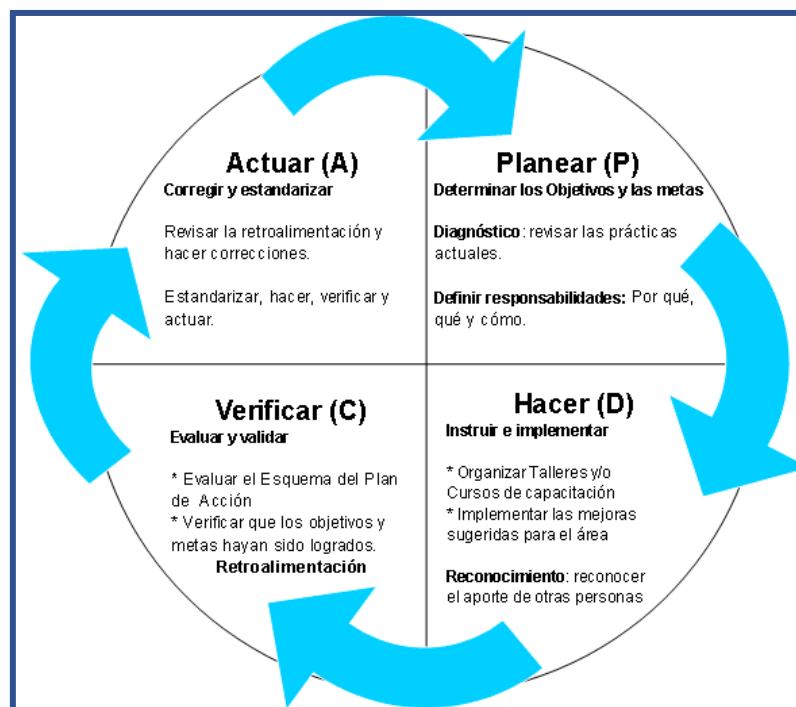
Realizar pruebas para identificar si las soluciones propuestas de la problemática a abordar son las adecuadas para que podamos comprobar en posteriores etapas si la diferencia en el proceso anterior y posterior son determinantes para indicar que dicha problemática fue abordada adecuadamente.

Para la etapa de **“verificar”**, debemos de constatar que lo que se **“ha hecho”** se esté haciendo de manera correcta y de forma cíclica, es en este punto donde podríamos identificar diferencias entre lo que en un principio se planeó y se terminó haciendo, ya que se verifica que las metas se han cumplido correctamente o si se encontraron factores adicionales que serán necesarios evaluar para corregir y/o lograr la meta objetivo-propuesta en un inicio. La verificación es el proceso de control para que la mejora se mantenga en el tiempo, para ello es necesario documentar la información recabada y los resultados y conclusiones obtenidas de las acciones realizadas en la etapa de **“hacer”**.

Por último, la etapa **“actuar”** es la etapa donde debemos de recopilar lo que se aprendió de la metodología hasta ahora, y de los resultados obtenidos. También es la etapa donde se ajustan los mecanismos que permitieron que la mejora alcanzara la meta y si es necesario comparar dichas mejoras con otros casos de éxito y/o trasladar la metodología a otras áreas donde se observe problemáticas similares. La estandarización forma parte de esta etapa de manera requerida así

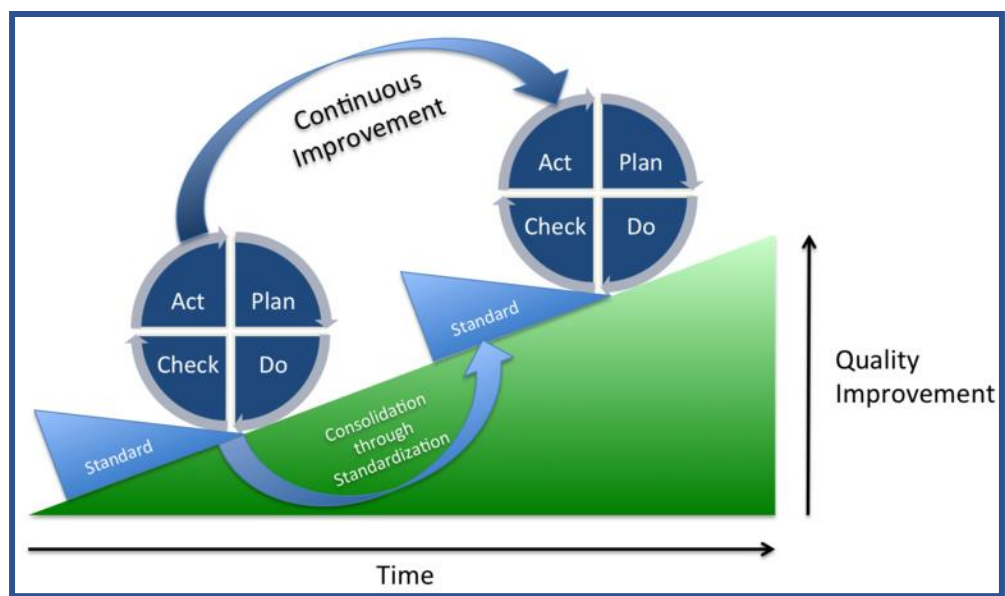
también como el compartir la información necesaria a las personas involucradas en el proceso para que se ejecute una mejora continua para el proceso en cuestión.

La siguiente imagen muestra la relación entre las diferentes actividades que plantea el ciclo de Deming con cada una de las etapas de dicho ciclo, es importante tener en cuenta que la finalidad de utilizar dicha metodología es establecer una mejora en el proceso de corte por arranque de viruta que resulte en un proceso estandarizado para la industria metalmecánica y evitar las malas prácticas (factores) que no aporten beneficio a dicho proceso.



*Figura 38 – Ciclo PDCA con la identificación de acciones a realizar por etapa. (producción, 2015)*

Deming menciona que, “la repetición en una acción correctiva, hace que cada vez más se acerque a la solución de una problemática, con cada repetición es más probable que te acerques a la solución buscada, incluso cuando no se tiene la información exacta o precisa de lo que se requiere al inicio de un proyecto”, es aquí donde una hipótesis de trabajo se puede establecer y en base a ello comenzar el paso de “planeación” identificando cada una de las herramientas de calidad que nos permitirán dar solución a la problemática.



**Figura 39** – esquemático que explica la mejora en calidad por iteración en el ciclo de Deming.

(Wikipedia, 2023)

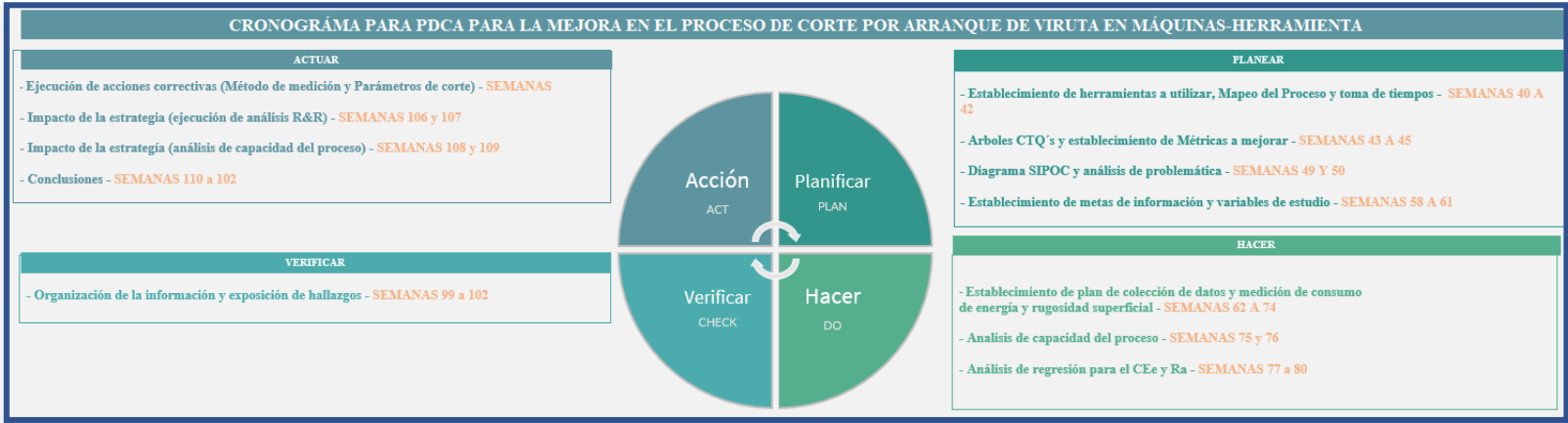
Para la problemática que queremos resolver, debemos inicialmente obtener los datos necesarios para establecer una línea base del proceso actual, después por medio de herramientas de búsqueda y solución de problemas, identificar las causas que impacten directamente a nuestra problemática de consumo de energía y rugosidad superficial.

En la siguiente tabla, se define las diferentes herramientas a utilizar de acuerdo con la metodología PDCA para dar solución a la problemática presentada.

<b>METODOLOGÍA PDCA Y HERRAMIENTAS REQUERIDAS</b>		
<b>Etapa del ciclo de Deming</b>	<b>Herramienta a utilizar</b>	<b>Descripción de la herramienta</b>
<b>Planear</b>	Arbol CTQ's y CTC	Arbol de relación de las métricas requeridas en el proceso y su relación con los indicadores principales
	SIPOC	Herramienta que nos permite conocer desde el inicio hasta el final del proceso la relación entre proveedores, entradas, el proceso, salidas y clientes
	Diagrama de Gantt del proyecto	Herramienta para planear el conjunto de actividades a desarrollar para el proyecto a lo largo del tiempo
<b>Hacer</b>	Mapa del proceso	Mapeo del proceso que permita establecer cada una de las etapas de este
	Diagrama de ishikawa	Diagrama donde se clasifican los modos de falla potenciales (entradas del proceso) en base a la problemática principal (salida del proceso)
	Validación sistema medición (R&R)	Estudio específico del sistema de medición que permite identificar si la variación en la salida del proceso se debe al método de medición del proceso
	Cpk y Ppk inicial	Análisis inicial del nivel de capacidad que tiene el proceso para producir de acuerdo a especificación del cliente
	Plan de recolección de datos	Herramienta para abordar la recolección inicial de los datos que permita generar una línea base
	Prueba de normalidad de datos recolectados	Prueba estadística que indica si los datos recolectados persiguen una distribución normal
	Gráfica de dispersión	Gráfico que nos muestra la relación causa - efecto entre dos variables y permite verificar si la hipótesis planteada es correcta
	Gráfica de cajas	Gráfico que nos permite representar los datos medidos a través de sus cuartiles
	Análisis de regresión	Análisis que permite generar un modelo matemático que relacione las X's con las Y's
	Diseño de experimentos (DOE)	Técnica estadística que permite identificar y cuantificar las causas de un efecto dentro de un estudio experimental
<b>Verificar</b>	Prueba piloto	Prueba experimental que compruebe los resultados obtenidos en el DOE
	Cpk y Ppk final	Análisis final del nivel de capacidad que tiene el proceso para producir de acuerdo a especificación del cliente
<b>Actuar</b>	Checklist / Manual	herramienta Poka-yoke con la finalidad de siempre seguir el proceso de medición adecuado y de acuerdo a lo establecido en este documento y verificar que cada acción se realice correctamente
	Gráficas de control en base a nuevos límites de control	Herramienta estadística que permite controlar la mejora en base a nuevos límites obtenidos con esta misma

*Tabla 7 – Clasificación de las herramientas que se requerirán de acuerdo con las etapas del ciclo PDCA. (Elaboración propia).*

A continuación, se muestra el cronograma de trabajo para cada una de las etapas y la planeación de la ejecución de cada una de estas en el tiempo:



**Figura 40** – Plan/cronograma de actividades aplicando la metodología PDCA para el proceso de corte (Elaboración propia)

### 3.2 Etapa de planeación

Como lo indica la teoría del ciclo de Deming, la etapa de planeación para este proyecto de investigación será el analizar lo que se requiere resolver o mejorar, explicando las practicas actuales y el proceso de manera específica, los requerimientos tanto del cliente como del proceso en sí y el objetivo de este en cuanto a las métricas esperadas. De esta manera podremos definir que tanto requerimos mejorar dichas métricas, así podremos abordar las herramientas de calidad a utilizar correctamente para analizar el proceso y realizar la mejora (etapa de hacer).

#### 3.2.1 Mapa del proceso y tiempos

Primero es necesario identificar las diferentes etapas del proceso para cada máquina, se realiza un diagrama de proceso para cada una de manera que podamos identificar cada operación y la manera en que influye en el tiempo total del proceso para cada operación, es decir, en el periodo de tiempo que toma realizar una operación de corte para cada material y en cada máquina-herramienta.

TIEMPOS PARA EL PROCESO DE CORTE					
TIPO DE TIEMPO MEDIDO		Simbolo de variable	TIEMPOS MEDIDOS		
			1	2	3
Tiempo por Limpieza inicial del área de trabajo	N/A		2	1.5	2.2
Tiempo por montaje del herramental de core		N/A	1.2	1.4	1.3
Tiempo Configuración de parametros en máquina			1.9	1.8	1.6
Tiempo en montar la pieza a maquinar		Ta	0.33	0.3	0.32
Inicio de operación de maquinado	Tiempo desplazamiento de herramental a pieza	Td	0.15	0.16	0.16
Tiempo en realizar la medicion de Ra	Tiempo por corte de pieza	Tc	Varia dependiendo pieza		
		Tm	1.7	1.7	1.6

**Tabla 8** – Toma de tiempos para etapas del proceso de corte (Elaboración propia).

De la toma de tiempos realizada a 3 operadores distintos,  $T_a$  representa el tiempo en montar la pieza a maquinar en la máquina-herramienta,  $T_d$  es el tiempo debido al desplazamiento del herramental hacia la pieza,  $T_c$  es el tiempo durante el cual el herramental está realizando el corte sobre la pieza y  $T_m$  es el tiempo que le toma al operador realizar la medición de rugosidad.

Actualmente el proceso tiene 6 etapas principales, las 3 primeras etapas se basan en el acondicionamiento del área de trabajo y limpieza, así como de la programación de la máquina-herramienta. Las 3 etapas consiguientes se basan en el momento en que la máquina está realizando el corte sobre la pieza. Se tomaron tiempos específicos 3 veces con la finalidad de medir dichas etapas, los resultados se muestran a continuación al igual que el diagrama del proceso involucrado.

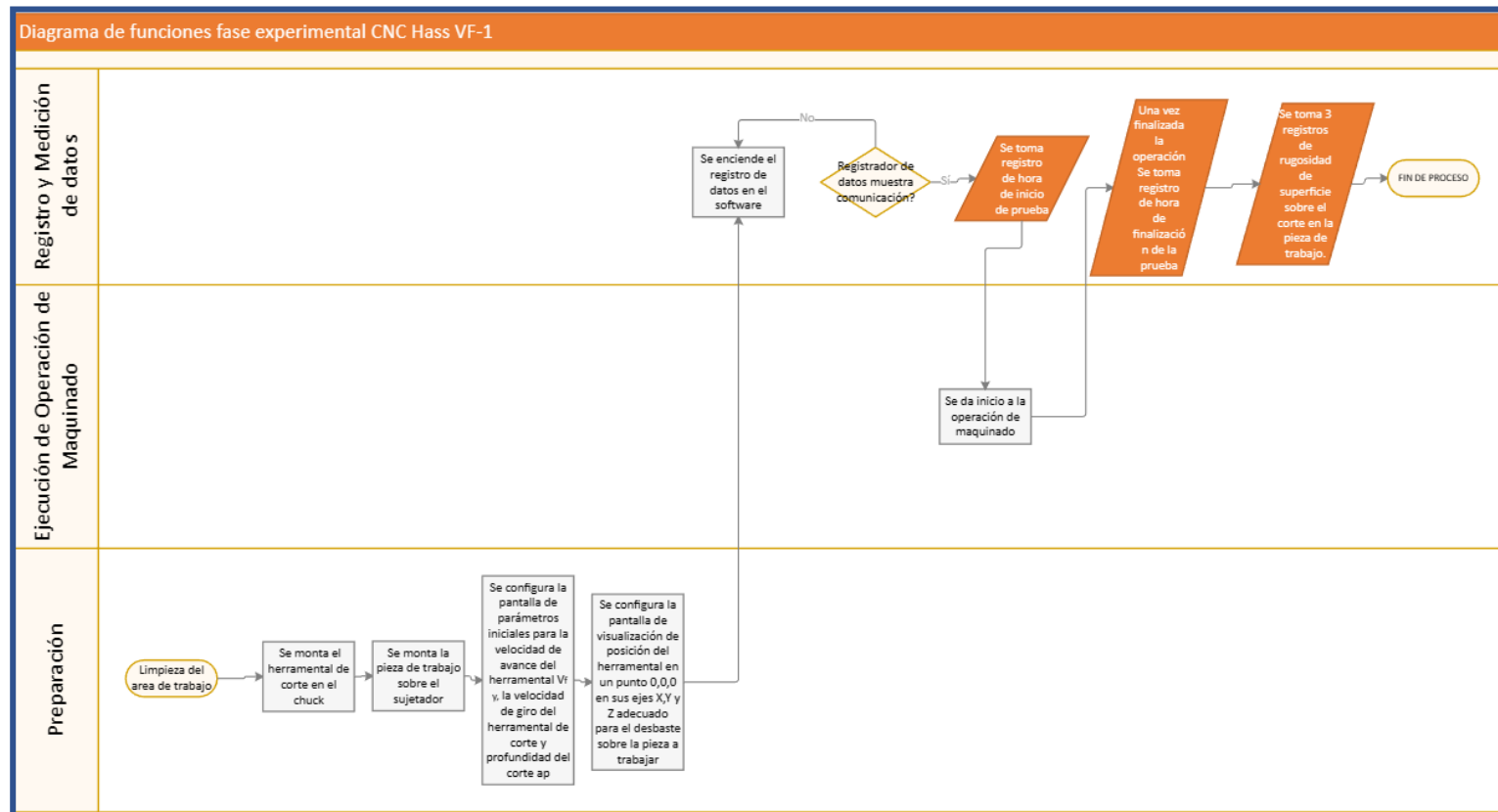
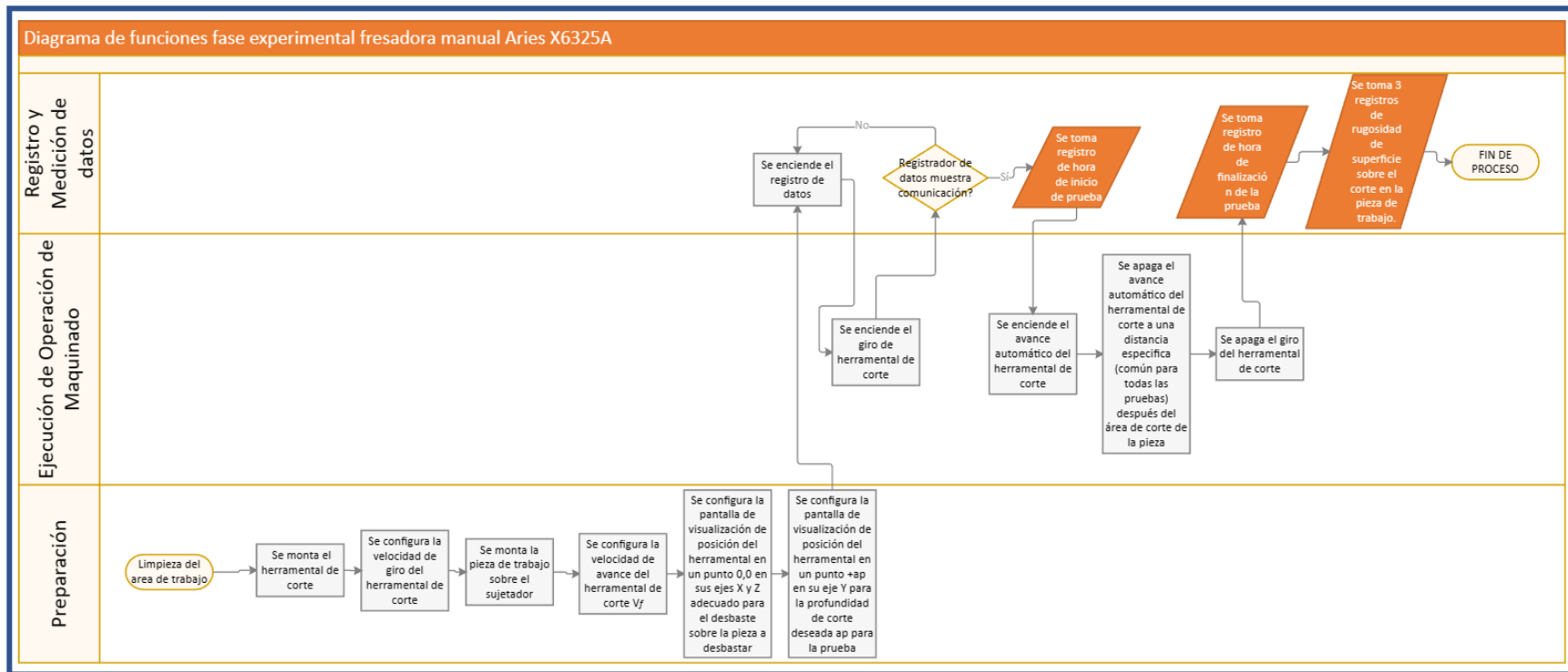


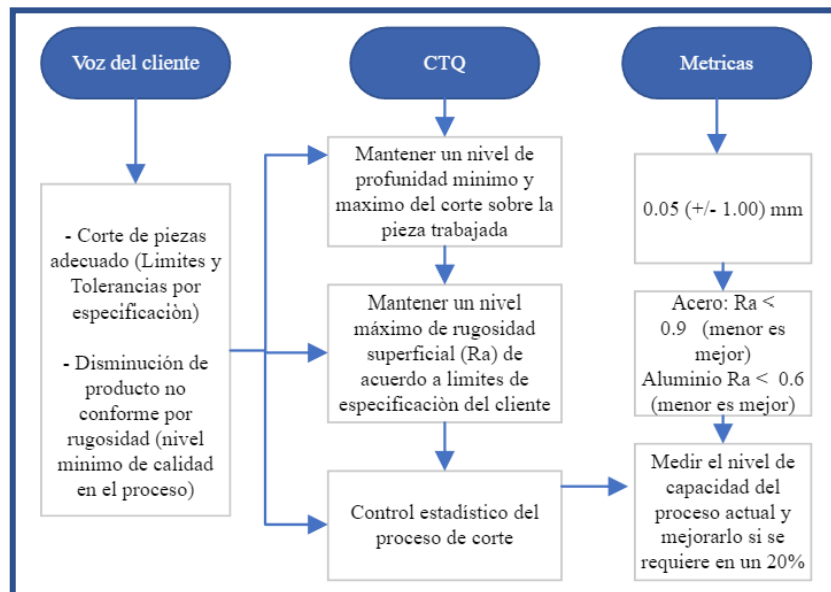
Figura 41 – Diagrama del proceso de corte para CNC Hass VF-1. (Elaboración propia)



**Figura 42** – Diagrama del proceso de aplicación de fresadora manual Aries X6325A. (Elaboración propia)

### 3.2.2 Árboles CTQ y CTC de indicadores clave

Para identificar aquellos factores críticos para relacionan lo que se espera del proceso comúnmente por parte de los clientes, que, para este caso, es la industria metalmecánica, así como los métricos e indicadores que lo relacionan, se desarrolla el siguiente árbol CTQ (critical to quality) en el que podemos relacionar la voz del cliente y el impacto en los indicadores requeridos por este:

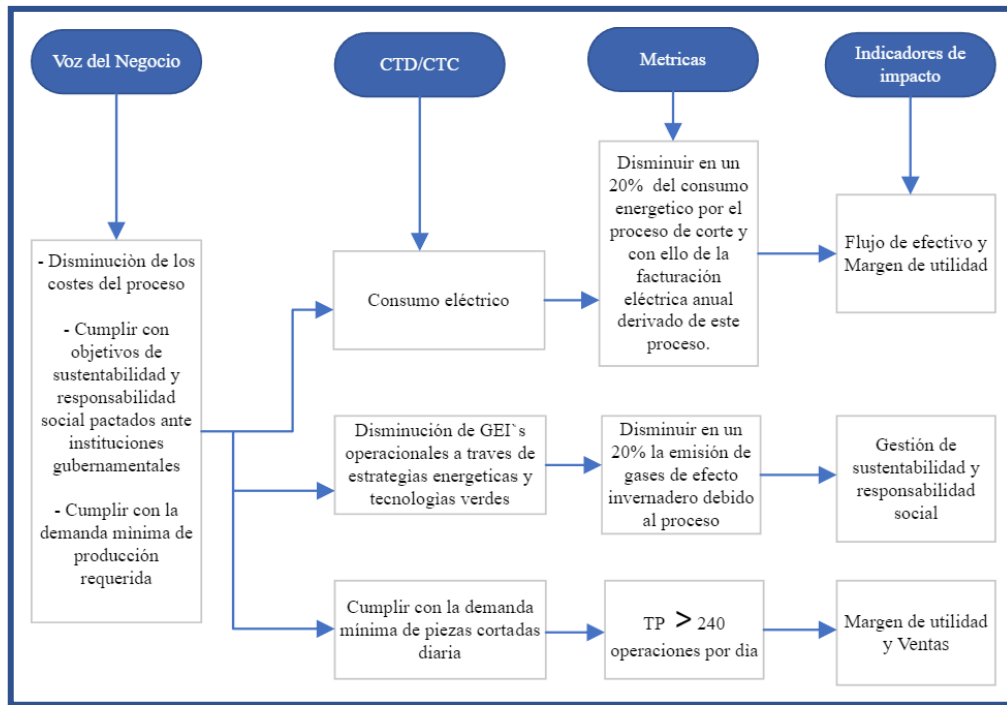


**Figura 43** – Voz del cliente para los métricos de las características de calidad críticas  
(Elaboración propia)

El consumo energético específico debido a operaciones de corte en la industria metalmecánica no es un parámetro que se tome en cuenta en los reportes de costos para las finanzas de la operación, siempre y cuando estas máquinas cumplan su función y operen con la capacidad de producción deseada y la máquina-herramienta no se encuentre detenida en ningún momento durante la jornada de producción.

Sin embargo, aún más allá del consumo energético que este proceso puede representar, siendo la operación de corte o desbaste de material uno de las operaciones de maquinado más utilizadas en la industria metalmecánica, está el factor de cuando este consumo se considera “excesivo” o que no está siendo aportado directamente a la operación de corte sobre la pieza a maquinar, esto sin duda recae en tiempos por operación excesivos además de costos adicionales por energía que no está siendo aprovechada realmente en tiempo de proceso y por ende pasa a ser tiempo sin valor agregado para el cliente final.

En el siguiente árbol de métricos se muestra la voz del negocio, donde se incluyen las métricas importantes a tomar en cuenta que impactan directamente al negocio y a los objetivos estratégicos de este, estos métricos son críticos para mantener los costos del proceso y el margen de utilidad deseado en base a la cantidad mínima de piezas que deben ser manufacturadas / cortadas diariamente. Por otro lado, el cumplimiento de normativas medioambientales que involucran las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI's) generadas por dicho proceso, son requerimientos ambientales que se deben cumplir ante instituciones gubernamentales y ambientales, es por ello que el impacto del consumo eléctrico derivado de dicho proceso es la métrica a tener en cuenta para mejorar y controlar.



**Figura 44** – *Voz del negocio para los métricos críticos de entrega y de cumplimiento.*  
(Elaboración propia)

Más adelante usaremos las métricas mostradas para establecer las variables que influyen en el proceso.

### 3.2.3 SIPOC del proceso

De igual manera, para poder identificar las entradas y las salidas de nuestro proceso de corte que influirán en las métricas observadas anteriormente, se realizó un diagrama SIPOC (proveedores, entradas, proceso, salidas, clientes).

El diagrama SIPOC nos ayuda a visualizar el flujo de inicio a fin del proceso de corte actualmente en el laboratorio además de identificar la cadena de valor que engloba a este.



**Figura 45** – Diagrama SIPOC para el proceso de corte por arranque de viruta en CNC y Fresadora. (Elaboración propia)

Observamos que en la columna proveedores tenemos principalmente la materia prima necesaria para que el proceso se realice, como lo son agua, aceite para refrigerante y la pieza a maquinar, como entradas del proceso tenemos las características de la pieza a maquinar y los parámetros del corte sobre la máquina-herramienta. Posterior al proceso tenemos como resultado las variables implicadas en la mejora del proceso como lo son la pieza cortada de acuerdo con especificación en conjunto con el consumo de energía derivado de este y el tiempo que tomo realizar la operación.

### 3.2.4 Análisis de referencia (primera hipótesis)

Dado que esta investigación tiene un enfoque científico, con el fin de analizar el comportamiento de consumo de energía y rugosidad superficial dejada sobre la pieza en operaciones de corte en las máquinas-herramienta mencionadas con anterioridad, nuestra hipótesis de trabajo inicial fue:

- $H_0$  : ¿Se puede optimizar el consumo de energía sin incrementar la rugosidad superficial media dejada sobre las piezas de trabajo en base a la optimización de los parámetros de la tasa de remoción de remoción de material?
  
- $H_1$ : ¿No se puede optimizar el consumo de energía sin incrementar la rugosidad superficial media dejada sobre las piezas de trabajo en base a la optimización de los parámetros de la tasa de remoción de remoción de material?

### 3.2.5 Matriz de marco lógico del problema

Como hemos visto hasta ahora, la problemática principal es el consumo excesivo de energía (energía no aprovechable) en trabajo que aporte como tal al proceso de maquinado de la pieza. Para poder tener una mejor concepción de la situación de estudio, realizamos las siguientes preguntas para enmarcar de mejor manera la problemática percibida:

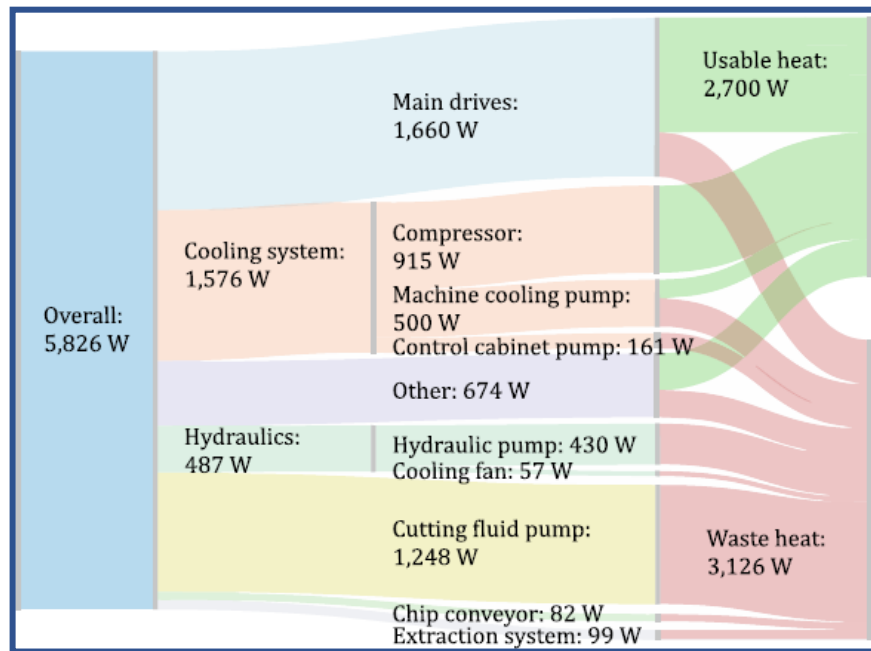
*¿Cuál es la problemática principal?*, identificamos como problema principal el consumo eléctrico en las máquinas-herramienta que no aporta trabajo aprovechable al proceso de corte en cuanto a la calidad y/o productividad de este, es decir, del consumo total que estas máquinas generalmente requieren para poder realizar una tarea con ciertos parámetros configurados previamente por el usuario, se sabe que solo una porción menor es la que realmente aporta al

trabajo de remoción de material en la pieza a procesar (operación de cortado) y que el consumo eléctrico que no está relacionado directamente con la función de trabajo directo a la pieza a mecanizar para ciertos estados de operación, como el proceso de preparación para puesta en marcha u otros estados transitorios toman la mayor parte del consumo eléctrico total para realizar esta tarea.

Una máquina de control numérico por computador (CNC) y otras máquinas frecuentemente utilizadas en la industria de la manufactura como tornos o fresadoras que también son accionadas a través de parámetros por computador se conforman por diferentes subsistemas necesarios para realizar y complementar correctamente la operación principal.

Cada uno de estos subsistemas, conllevan a un consumo de potencia eléctrica dependiendo de las operaciones a realizar, por ejemplo, la operación de corte ya sea transversal o longitudinal de una pieza geométrica requiere de mecanismos hidráulicos y de servomotores, así como de electrónica para realizar las tareas referentes al corte preciso requerido, sin mencionar la integración de los sistemas de refrigeración y del fluido de este a través de bombas hidráulicas.

Además, están los subsistemas que se encargan de mantener el ambiente dentro de la cámara adecuados al proceso a realizar, como sensores para el mantenimiento de la temperatura, y remoción de la niebla producida por el calor que emana del contacto directo entre el husillo y la pieza mecanizada o remoción del material de desecho (rebaba).



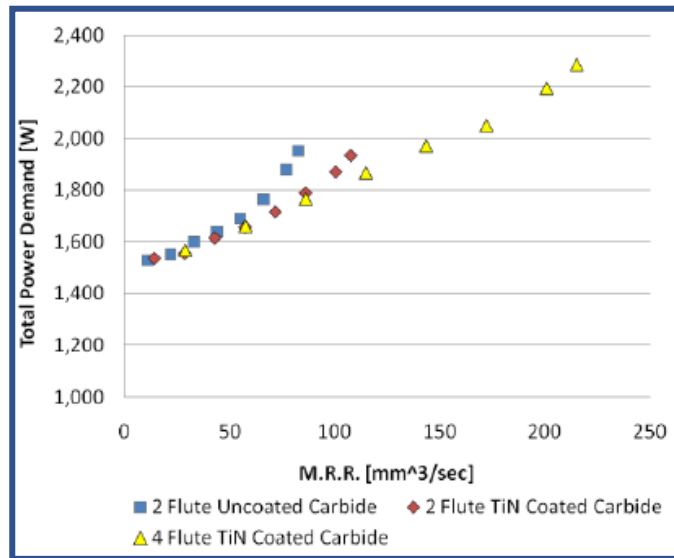
**Figura 46** – Demanda de potencia eléctrica promedio de un torno tipo EMAG VLC 100

(Berend Denkena, 2020)

*¿Por qué se da esta problemática?*, de acuerdo a las investigaciones realizadas creemos que la problemática del consumo excesivo de energía en estas máquinas está focalizada en los parámetros de diseño específico de estos subsistemas de soporte, por una parte sabemos que cada uno de estos subsistemas son necesarios para el funcionamiento de la máquina herramienta, sobre todo cuando hablamos de una máquina CNC, sin embargo, se han encontrado áreas de oportunidad de mejora en ciertas características donde la acción del operador puede influir, como modos de espera demasiado largos durante el tiempo que estas máquinas se preparan para realizar una operación, parámetros de entrada no optimizados o herramienta de corte en mal estado.

Sin embargo, el factor más importante es el tiempo en el que a la máquina le toma realizar una operación, se ha observado, por los trabajos de (Díaz, y otros, 2010) que mientras menor sea el

tiempo que la máquina herramienta invierte en una operación de corte o el desbaste de una pieza, menor es el consumo eléctrico total para esa operación.



**Figura 47** – Gráfica donde se relaciona la demanda de potencia respecto la TRM para 3 diferentes tipos de herramental de corte (Diaz, y otros, 2010).

Existen muchas variables a tomar en cuenta para definir el tiempo total que le tome a la máquina realizar la operación deseada, desde las diferentes características propias de la pieza de trabajo como geometría, material, propiedades mecánicas y dimensiones de la pieza a mecanizar, como las que respectan a variables de entrada que el mismo usuario puede cambiar tales como tipo de corte, ángulo de ataque de la herramienta o fresa respecto a la pieza y desgaste de esta al momento del corte respecto a la pieza, características del husillo de la máquina, etc.

Pero para conceptos de este estudio, estudiamos los parámetros de entrada en los que el operador tiene normalmente algún poder de decisión tales como la variación de TRM que depende

directamente de la velocidad de avance en el corte, profundidad del corte, así como el tipo de material de la pieza de trabajo.

Otros factores importantes tomados en cuenta son los que engloban directamente al ambiente en piso de producción, muchas de ellas serán pertinentes a los factores de ruido o no controlables para el diseño experimental pero que fueron parte de nuestro análisis de problemática.

*¿Qué efectos tiene esta problemática?* Como se hemos visto hasta ahora, son muchos los factores que desencadena el cada vez mayor consumo de energía eléctrica para satisfacer las necesidades de la industria los principales los enlistamos a continuación:

Aceleración de los índices de producción de las industrias sin concientización real de las afectaciones a nuestro entorno debido a las enormes proporciones de consumo energético requerido solo para la producción de un producto terminado y los recursos naturales requeridos para la producción de esta energía, hasta que este llega con el usuario final.

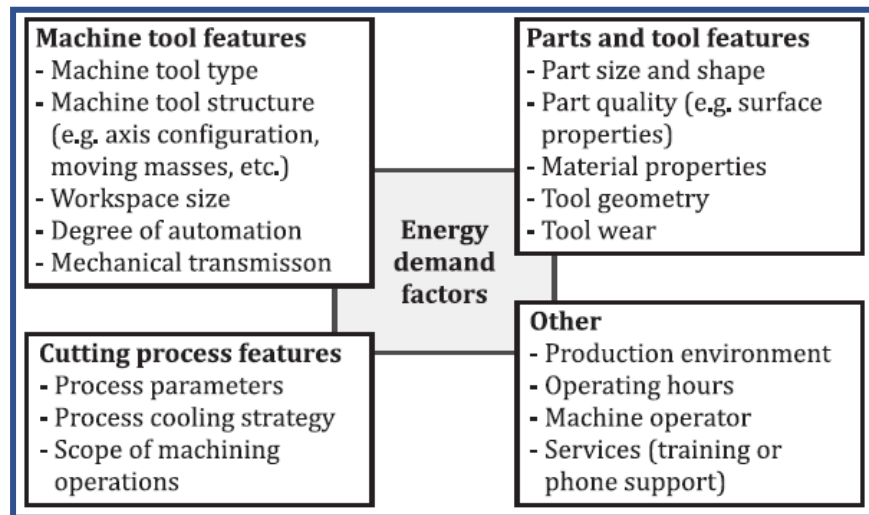
El rezago y falta de compromiso directo en acuerdos ambientales que no pueden cumplirse debido a los altos índices de GEI's por el incremento de producción de energía eléctrica. Finalizando en la completa destrucción de hábitats naturales como una consecuencia directa de este aumento.

### **3.2.6 Mapa de problemática**

También están aquellos factores directamente relacionados con la planeación como la adquisición comercial de estas máquinas donde es común que no se tenga una concientización respecto a su

consumo eléctrico durante su compra, ya que los costos de inversión son comúnmente comparados con periodos cortos de recuperación gracias a altos índices de productividad de estas máquinas, pero a costos muy altos de energía eléctrica.

Para organizar las diferentes problemáticas que se puede tener específicamente las relacionadas al consumo eléctrico excesivo en el proceso de corte, energía que no se aprovecha en trabajo útil, podemos definir un mapa de relación de problemáticas que no solo se vinculen a las condiciones propias de la máquina-herramienta y materiales de trabajo si no también aquellas en las acciones que realice el ser humano (operador del proceso) y que de igual forma pueda influir en el consumo energético del proceso.



**Figura 48** – Factores en la demanda de energía comunes a operaciones de maquinado (Berend Denkena, 2020).

De acuerdo con la tabla anterior, definimos particularmente para las herramientas, para la máquina para el proceso y para factores diferentes que pueden tener que ver con el ambiente de

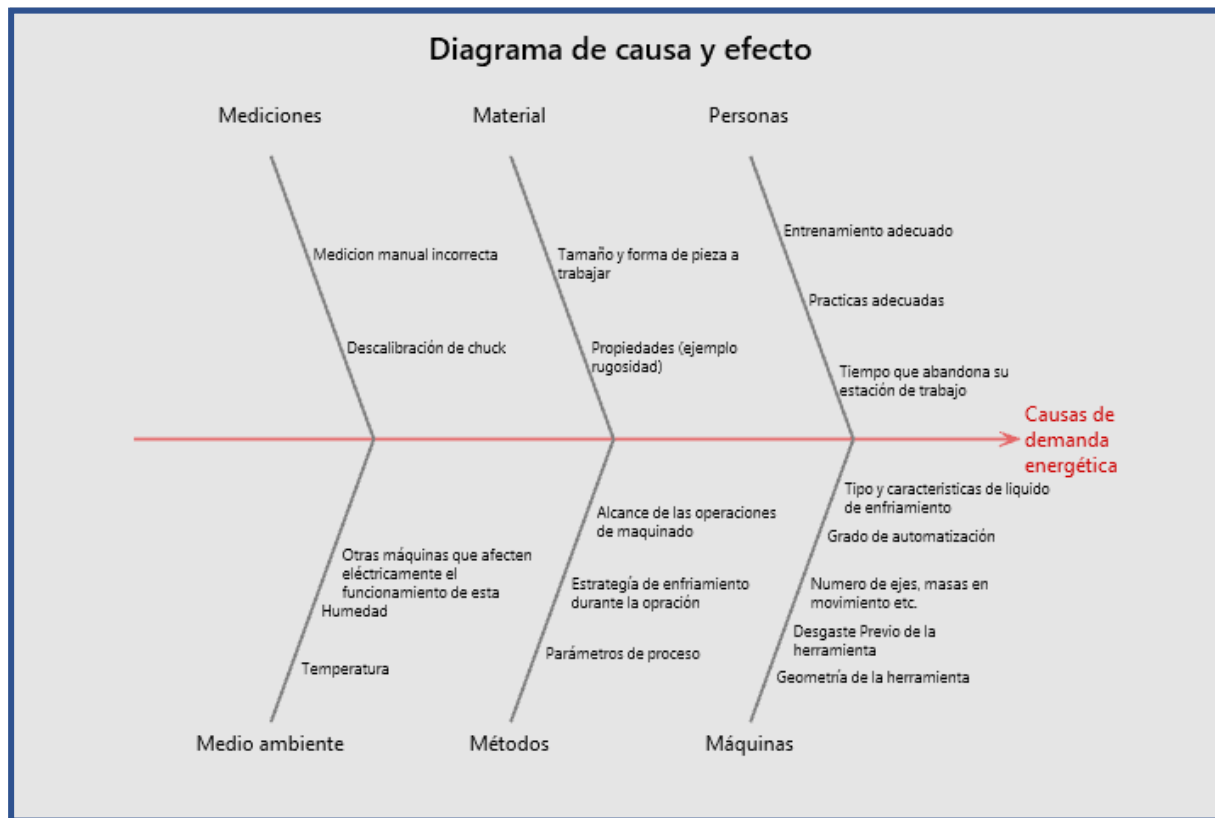
producción, entrenamiento y operador de la máquina. Así tenemos una mejor percepción al momento de realizar las operaciones en la fase de experimentación y visualizar donde pueden estar los cambios en las variables particularmente.

### **3.2.7 Diagrama Ishikawa**

Teniendo como base los factores que mayormente demandan energía en las máquinas herramienta de mecanizado por arranque de viruta y con ello los efectos que ello produce, podemos realizar un diagrama de Ishikawa que nos ayude a identificar las problemáticas principales

Berend Denkena (2020) nos indica que *“los factores principales de influencia en la demanda energética de las máquinas herramienta se pueden dividir en 6 principales categorías: Herramental de la máquina, medición, material de la pieza de trabajo, método de producción y control, ambiente de la producción y operador de la máquina herramienta”*.

Partiendo de esa misma dinámica de clasificación, podemos ordenar estos factores dentro del siguiente diagrama de causa-efecto:



**Figura 49** – Diagrama causa-efecto de demanda energética en máquinas herramienta.

(Elaboración propia)

Podemos concluir con base a al análisis de problemática, que se tiene una serie causas distintas para nuestro efecto principal “demanda energética”, las más importantes en las que nos enfocaremos en mejorar en este trabajo de investigación serán:

- Propiedades de la pieza de trabajo (es decir el tipo de material de la pieza a maquinar)
- Parámetros de entrada de corte del proceso
- Medición manual de la rugosidad incorrecta

### **3.2.8 Metas de información**

Habiendo obtenido las causas principales que provocan un consumo excesivo de energía que no se aprovecha al proceso de corte, nos enfocamos entonces en plantear nuestras metas de información que interactúan con dichas causas.

Nuestras metas de información dado que los objetivos de esta investigación es mejorar la facturación eléctrica y con ello la emisión de GEI's, esto al menos manteniendo el nivel de rugosidad superficial de la pieza, así como mejorar la tasa de producción (desempeño del proceso) diaria, necesitamos describir cada una de las variables de entrada identificadas con anterioridad que afectan nuestros indicadores clave a mejorar. Para ello realizamos una matriz de relación X-Y que se muestra a continuación

Matriz X-Y para los indicadores de desempeño clave						
Análisis de X			Análisis de Y			
Variable Identificada	Actual	Oportunidad	Símbolo	Descripción	Unidades	Oportunidad
Medición manual incorrecta de rugosidad superficial	Actualmente no se mide la variación en la medición de rugosidad	Optimizar el proceso al reducir la variación en la Ra por medición manual incorrecta	<b>FE</b>	Facturación eléctrica anual debida al proceso	\$	Disminución de un 25% en la facturación eléctrica
Parámetros programados de corte incorrectos para el proceso	Varios (ver tabla 2)	Optimizar el proceso al aplicar los parámetros de corte mas adecuados para los resultados deseados	<b>Ecar</b>	Emisión de GEI's anual debida al proceso	KgCO2e	Disminución de un 25% en la emisión de GEI's
Propiedades del material adecuado para el proceso (Acero P20 / Aluminio)	Actualmente el proceso se realiza con aluminio y se tiene un estimado muestral de 0.5 como rugosidad promedio dejada sobre las piezas, sin embargo se desearia cambiar al acero P20 por su bajo costo	Optimizar el proceso eligiendo el material de la pieza de trabajo mas adecuada para dicho proceso	<b>Ra</b>	Rugosidad superficial promedio aritmetica dejada sobre la pieza	µm	Disminuir o mantener al menos la rugosidad superficial dejada actualmente
			<b>TP</b>	Tasa de producción por día	Unidades/día	Incremento en un 30% de desempeño (takt time = 390 piezas diarias)
			<b>DPMO's</b>	Defectos por millon de oportunidades	DPMO's	Disminuir la cantidad de piezas no conformes en un 25%

**Tabla 9** – Matriz X-Y en base a las variables identificados como problemática para los indicadores de desempeño clave. (Elaboración propia)

Para describir los parámetros programados de corte, también se realiza una tabla de relación X-Y, de manera que podamos identificar fácilmente la relación de estos con los parámetros de salida del corte, donde estos últimos tienen un impacto en nuestros indicadores de desempeño.

Matriz X-Y para los parámetros de corte									
Análisis de X					Análisis de Y				
Símbolo	Parámetro de entrada	Unidades	Actual	Oportunidad	Símbolo	Parámetro de salida	Unidades	Actual	Oportunidad
n	Velocidad de rotación de herramienta de corte	rev/min	1,320	No existe oportunidad ya que este parámetro es fijo para las recomendaciones del proceso	<b>P<sub>c</sub></b>	Potencia eléctrica promedio demandada por la máquina-herramienta durante periodo de corte	W	No se ha medido	Existe oportunidad en cada uno de los parámetros de salidas ya que todos son dependientes de parámetros de entrada que pueden optimizarse
N	Cantidad de filos en herramienta de corte	n/a	2	No existe oportunidad ya que este parámetro es fijo para las recomendaciones del proceso	<b>TRM</b>	Tasa de remoción de material de la operación	mm <sup>3</sup> /seg	No se ha medido	
F <sub>N</sub>	Avance por inserto/filo del herramienta de corte	mm/N	0.016	Puede existir oportunidad dependiendo de una mejora en la velocidad de avance del herramienta	<b>CEe</b>	Consumo específico de energía de la operación	J/mm <sup>3</sup>	No se ha medido	
a <sub>r</sub>	Profundidad del corte (eje radial)	mm	31.5	No existe oportunidad ya que la profundidad de corte en su eje radial (ancho del corte), es un parámetro específico deseado para el proceso	<b>J</b>	Joules / operación	J	No se ha medido	
a <sub>p</sub>	Profundidad del corte (eje axial)	mm	0.05	Puede existir oportunidad dependiendo si existe un mejor valor de este parámetro que nos de una mejor respuesta	<b>E</b>	Consumo eléctrico / operación	kWh	No se ha medido	
V <sub>f</sub>	Velocidad de avance del herramienta de corte	mm/min	42.24	Puede existir oportunidad dependiendo si existe un mejor valor de este parámetro que nos de una mejor respuesta					
D	Diámetro del herramienta de corte	mm	31.5	Al igual que la profundidad de corte radial, son mutuamente dependientes y fijos de acuerdo a la necesidad del corte por lo cual no existe oportunidad de mejora en este parámetro					
d	Diámetro de la pieza de trabajo	mm	101.6	No existe oportunidad de mejora ya que las dimensiones físicas de las piezas son fijadas por el cliente					
n/a	Material de la pieza de trabajo	n/a	AL	Puede existir oportunidad ya que lo que se busca es identificar el mejor material de estos dos para optimizar el proceso de corte					
V <sub>r</sub>	Volumen total de material removido por operación	mm <sup>3</sup>	320	Puede existir oportunidad si se considera que al aumentarlo o disminuirlo podemos optimizar el proceso					

**Tabla 10** – Matriz X-Y para los parámetros de entrada del proceso de corte y los parámetros de salida a los que impactan. (Elaboración propia)

El  $CE_e$ , como se mencionó anteriormente, relaciona la energía real consumida en función de la TRM, sin embargo, la TRM depende directamente de 3 factores a tomar en cuenta:

- $a_p$  – profundidad a la que la herramienta de corte penetra en la pieza a cortar en su eje vertical (axial).
- $a_e$  – ancho del corte, que para este caso es igual al diámetro del herramental, ya que es el ancho total que tomará la huella del corte sobre la pieza de trabajo.
- $V_f$  – velocidad de avance del herramental de corte hacia la trayectoria programada

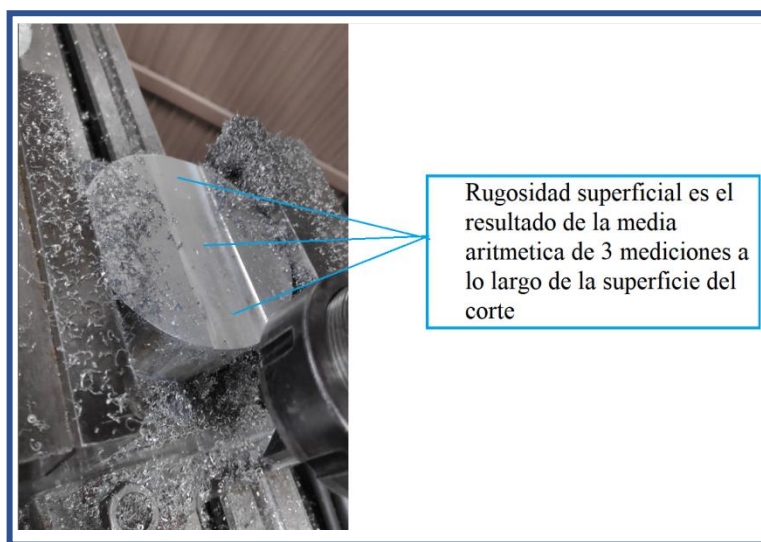
Para calcular la velocidad de avance del herramental ( $V_f$ ) a ser programada previo a cada ejecución de maquinado, necesitamos conocer tres factores importantes dependientes de la herramienta de corte y que son fundamentales para que el proceso se lleve satisfactoriamente para cada prueba. Estos tres factores son:

- El número de insertos que lleva el herramental de corte o husillo ( $N$ )
- La velocidad de rotación del herramental de corte o husillo ( $n$ ) en rpm (revoluciones por minuto)
- La velocidad constante por inserto del herramental ( $F_N$ ) en mm/z (milímetros por inserto)

De manera que:

$$V_f = n \times N \times F_N \quad (10)$$

Por su parte, la rugosidad superficial dejada sobre la pieza por el corte es un valor independiente que se mide directamente a través del promedio aritmético de 3 medidas realizadas aleatoriamente a lo largo de la huella del corte para cada corrida experimental como lo indica la ecuación (4).



**Figura 50** – Fotografía de una pieza con el corte donde se indica las áreas donde se toma la medida de la rugosidad superficial y con ello se obtiene la media aritmética de rugosidad dejada sobre la pieza. (Elaboración propia)

A continuación, se enlista y clasifican el total de las diferentes variables mencionadas con anterioridad con las que se trabajara en la fase experimental:

- **Variables Independientes:** Son aquellas variables que no dependen matemáticamente de otras y que no podemos cambiar por la naturaleza del estudio.
  - Dimensiones y propiedades físicas del herramental de corte, diámetro del herramental (d)
  - Máquinas-herramienta seleccionadas (fresadora o CNC)
  - Numero de insertos del herramental de corte (N)

- Velocidad de rotación del herramienta de corte ( $n$ )
- Avance del herramienta de corte por inserto ( $F_N$ )
- Profundidad radial del corte sobre la pieza de trabajo ( $a_e$ )
- Demanda de potencia promedio de corte ( $P_c$ )
- Nivel de rugosidad superficial dejada sobre la pieza de trabajo ( $R_a$ )
- Precio por kilowatt-hora a nivel estatal para industria ( $T_{ar\$}$ )
  
- **Variables dependientes:** Son las variables que si dependen de otras matemáticamente
  - Tasa de remoción de material (TRM)
  - Consumo específico de energía ( $CE_e$ )
  - Consumo eléctrico por operación ( $E_e$ )
  - Emisión de gases de efecto invernadero ( $E_{car}$ )
  - Volumen medio de material removido por operación (VMR)
  - Energía demandada por operación (J)
  
- **Variables de control:** Son las variables para analizar que podemos modificar para cambiar las características de respuesta del proceso de corte.
  - Velocidad de avance del herramienta de corte ( $V_f$ )
  - Profundidad axial del corte sobre la pieza de trabajo ( $a_p$ )
  - Material de las piezas de trabajo a maquinar (aluminio y acero P20)

- **VARIABLES INTERVINIENTES:**

- Tiempo disponible de la máquina-herramienta en horas al día (OEE)
- Tiempo de desplazamiento del herramental hacia la pieza a cortar ( $T_d$ )
- Tiempo que toma al operador realizar la medición de rugosidad ( $T_m$ )
- Tiempo que le toma al operador realizar el cambio de pieza ( $T_a$ )

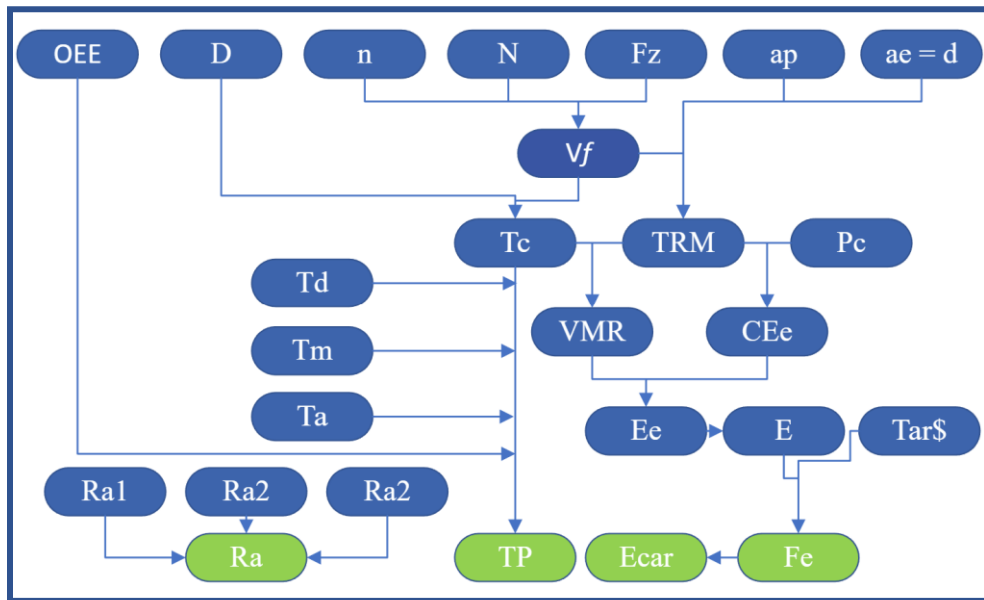
No se tomaron en cuenta otras variables que puedan influir, como el mantenimiento previo de estas máquinas, el ambiente de trabajo como la temperatura previa de operación del entorno de trabajo, la distribución de estas máquinas dentro del laboratorio o las tareas previas ejecutadas en las máquinas a las realizadas para este estudio.

- **Sujeto de estudio:**

- El proceso de corte por arranque de viruta en máquinas-herramienta CNC Hass VF-1 y fresadora Aries X6325A manual del laboratorio de ingeniería mecánica del ITESO.

- **Objeto de estudio:**

- La emisión de GEI's (Ecar) debida al consumo eléctrico total de la máquina-herramienta.
- La facturación eléctrica anual ( $F_e$ ) derivada de la demanda de energía por este proceso
- La rugosidad superficial media dejada sobre la pieza maquinada ( $R_a$ )
- La tasa de producción por día del proceso ( $T_p$ )
- Las partes defectuosas por millón de oportunidades y nivel sigma del proceso (PPMO's)



**Figura 51** – Declaración de las variables anteriormente mencionadas y la relación entre ellas.  
(Elaboración propia).

De acuerdo con el diagrama anterior, podemos observar las diferentes variables antes descritas y su dependencia e interrelación entre ellas.

### 3.3 Identificación, descripción y cuantificación de métricas iniciales

Para investigar los parámetros que influyen en el proceso de corte, fue necesario ~~debemos~~ obtener los datos de una línea base del desempeño del proceso para nuestras variables de interés, es decir, obtener el consumo de energía diario (E) y la rugosidad superficial ( $R_a$ ) dejada sobre la pieza maquinada en el estado actual del proceso.

#### 3.3.1 Plan de colección de datos

El realizar un plan de colección de datos nos ayuda a asegurarnos que la finalidad de esta esté alineada con el objetivo que deseamos investigar, preguntándonos el cómo, el que y el dónde de

la obtención de estos. La siguiente tabla engloba el plan de colección de datos para las variables previamente explicadas.

Plan de colección de datos		
Objetivo	Recolectar una muestra de datos del proceso de corte para medir su desempeño y consumo energético	
Plan		
Unidades de análisis	¿Cuáles son las unidades de análisis?	Piezas a cortar en acero P20 y aluminio
	¿Dónde se encuentran?	En el proceso de corte por arranque de viruta
Método	¿Cómo se van a recolectar los datos?	En automático por la herramientas de medición de energía y medición manual de Rugosidad
	¿Cómo se van a preparar para su análisis?	Matriz de datos para posterior análisis de capacidad del proceso
Elementos del plan		
Variable(s) a medir	Potencia eléctrica debida al momento de corte del material ( $P_c$ ) y rugosidad superficial ( $R_a$ ) dejada sobre la pieza	
Instrumentos a utilizar	Rugosímetro SRG-1000 y Analizador de energía True Meter	
Recursos	Dos inspectores, 2 horas por máquina-herramienta, 1 hora por material	
Muestra	Todas las piezas maquinadas durante 3 horas para cada máquina-herramienta y cada material	

**Tabla 11** – Declaración de las variables anteriormente mencionadas y la relación entre ellas.

(Elaboración propia)

Los siguientes valores de parámetros, corresponden a los valores establecidos como estándar para el corte deseado en el estado actual del proceso en ambas máquinas-herramienta y ambos materiales:

$V_f$  = velocidad de avance del herramental de corte = 42.24 mm/min

$a_p$  = Profundidad de corte en su eje axial = 0.05 mm

**Material de la pieza de trabajo = AL**

Mientras que para los parámetros que, aunque pueden ser configurables también previamente para estas máquinas-herramienta, no pueden ser los mismos en ambas, por ejemplo, la fresadora manual y la máquina CNC no tienen un mismo rango de velocidad de rotación de herramental de

corte ( $n$ ), es por ello que para este tipo de parámetros, sus valores se utilizan fijos en ambas máquinas para los fines del estudio, con el propósito de establecer las mismas condiciones y hacer una comparativa final en los resultados de ambas máquinas, estos parámetros :

$$N = \text{número de filos por inserto} = 2$$

$$n = 1,320 \text{ rev/min}$$

$$F_N = 0.016 \text{ mm/z}$$

$$ae = 31.5 \text{ mm}$$

$$\text{OEE} = 16 \text{ hrs}$$

$$\mathbf{Td} = 0.16 \text{ min}$$

$$\mathbf{Tm} = 1.7 \text{ min}$$

$$\mathbf{Ta} = 0.33 \text{ min}$$

Los valores de  $T_d$ ,  $T_m$  y  $T_a$ , son los tiempos que toma al herramental llegar a la pieza y comenzar a cortarla desde el arranque de la operación, el tiempo que le toma al operador realizar una medición y el tiempo que le toma al operador sujetar la siguiente pieza en la cama de la máquina-herramienta en minutos. Tanto  $T_m$  y  $T_a$  son datos de tiempo promediados en el proceso, mientras que  $T_d$  está configurado en la operación de la máquina-herramienta como el menor posible por cuestión de seguridad.

### **3.3.2 Medición de consumo de energía diaria**

Dado que hasta ahora no se había obtenido datos históricos del  $CE_e$  del proceso y es la primera vez que se obtienen estos datos para su estudio, se procede a la adquisición de un analizador de

parámetros eléctricos marca “True Meter” para el laboratorio de ingeniería mecánica del ITESO, el cual obtiene lecturas de dicha demanda de energía durante el proceso de corte de la pieza.

Este medidor de energía tiene aplicaciones para medir energía real, reactiva y aparente, factor de potencia y distorsión armónica total, tiene la posibilidad de medir voltajes y corrientes instantáneos y frecuencia, así como el total de energía de consumo. Puede ser conectado a circuitos monofásicos, monofásicos a 220V y trifásicos. Tiene una interfaz directa a través de cable de comunicación RS-485 modbus a PC para registrar y guardar las mediciones en tiempo real. Su precisión de medición es de 0.5%.



*Figura 52 – Equipo de medición trifásico de voltaje, corriente y potencia real marca “true meter” (True meter, 2021).*

ESPECIFICACIONES TECNICAS ANALIZADOR DE ENERGÍA TRUE METER	
Frecuencia de medición	45-65 Hz
Rango de Medición	L-L 0-600 VAC
Rango de transformadores de potencial	L-N 10-300 VAC
Rango de medición de corriente	0 - 5 A
Rango de transformadores de corriente	1:1 a 1000:1
Precisión	1% (YHD 5%) a escala completa
Alimentación eléctrica	100-277 VAC
Frecuencia de Alimentación	50-60 Hz
Potencia Máxima	2w
Salidas digitales	2
Canales de medición	1F2H, 1F3H, 3F3H, 3F4H

**Tabla 12** – Especificaciones técnicas del equipo de medición True meter. (Elaboración propia).

La toma de lecturas que realiza el medidor tiene un periodo de 0.7 segundos, o lo que es lo mismo, una frecuencia de 1.25 lecturas por segundo. El analizador requiere de ser conectado en las máquinas-herramienta a su sistema de potencia previamente además requiere de transformadores de corriente específicos para transformar los niveles de corriente a niveles que puedan ser aceptados por el analizador.

Se utilizaron transformadores de corriente marca Sifam Tinsley serie Omega 10A. Estos son transformadores de corriente que ofrecen medición de corrientes sin la necesidad de interconectar el conductor al que se le desea medir su corriente activa. Se utilizaron 3 transformadores de corriente en conjunto con el medidor True meter ya que el medidor de energía requiere de la disminución de sus valores de carga a valores adecuados para que pueda censarlos adecuadamente. Estos transformadores de corriente tienen una relación en el primario desde 30A hasta 6000A y en el secundario de 1 a 5 Amperes. Su clase de precisión es de 0.2s a 0.5s.

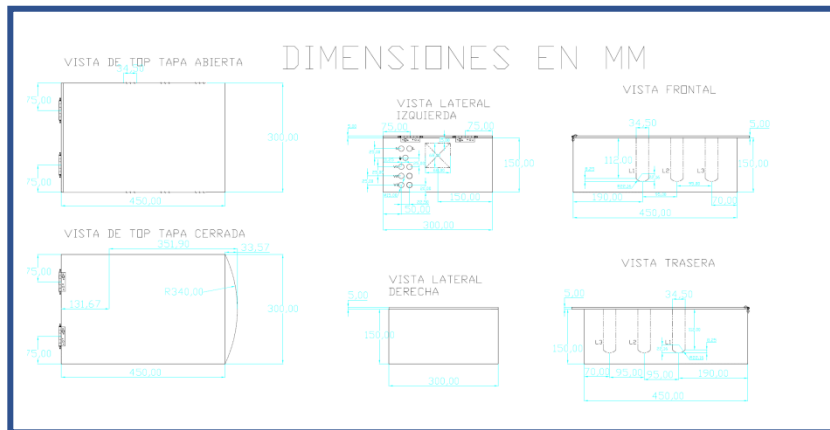


**Figura 53** – Transformadores de corriente Sifam Tinsley Omega 10A (Sifam Tinsley, 2021).

ESPECIFICACIONES TECNICAS TRANSFORMADORES DE CORRIENTE	
Corriente Primaria	30A hasta 6000A
Corriente Secundaria	1A o 5A
Clase de precisión	0.2,0.2s,0.5,0.5s & 1
Frecuencia de operación	50Hz o 60Hz
Factor limitador de sobrecorriente	FS5, FS10, FS15

**Tabla 13** – Especificaciones técnicas de los transformadores de corriente. (Elaboración propia).

Para poder transportar adecuadamente el analizador de energía junto con los transformadores y el cableado requerido se construyó una caja de acrílico adecuada para su almacenamiento y transportación.



*Figura 54 – Diseño y dimensiones de la caja contenedora de transportación. (Elaboración propia).*



*Figura 55 – A la izquierda, Equipo de cómputo conectado al analizador en su caja de almacenamiento y transportación fabricada especialmente para este propósito, a la derecha conexiones eléctricas con los transformadores de corriente en la parte posterior de máquina CNC. (Elaboración propia)*

El analizador requiere de los siguientes materiales para su protección y correcto funcionamiento:

- **Fusibles de protección para las tres líneas de corriente** hacia la entrada a los transformadores de corriente como protección del equipo de medición True meter en caso de cortocircuito.



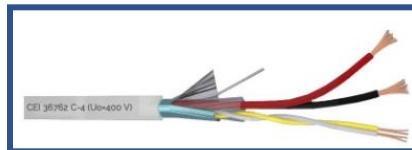
**Figura 56** – Fusible tipo americano de 10 amperes y porta fusible. (Elaboración propia)

- **Conductores calibre 14 AWG** para la alimentación de los transformadores de corriente y la alimentación del equipo de medición.



**Figura 57** – Cable eléctrico THWN-14 AWG. (Elaboración propia)

- **Cable modbus RS-485**, necesario para el envío de datos de lectura de datos censados a la PC y su almacenamiento de estos.



**Figura 58** - Cable de transmisión de datos tipo MODBUS RS-485. (Elaboración propia)

Para calcular E, únicamente por el periodo en que la máquina está realizando el corte sobre la pieza, calculamos el valor promedio del conjunto de lecturas de potencia almacenadas únicamente durante dicho periodo (es decir en el momento de  $P_c$ ), con esta potencia promedio para ese intervalo y de acuerdo a nuestros parámetros utilizados, calculamos también la TRM del proceso, y con ello, como explicamos con anterioridad la relación de la TRM y la potencia promedio,

podemos obtener el  $CE_e$  total de cada corte de acuerdo con la ecuación (1) y de ahí el consumo de energía diario por el proceso. La siguiente lista de pasos muestra un ejemplo de cálculo de medición de E para una operación específica.

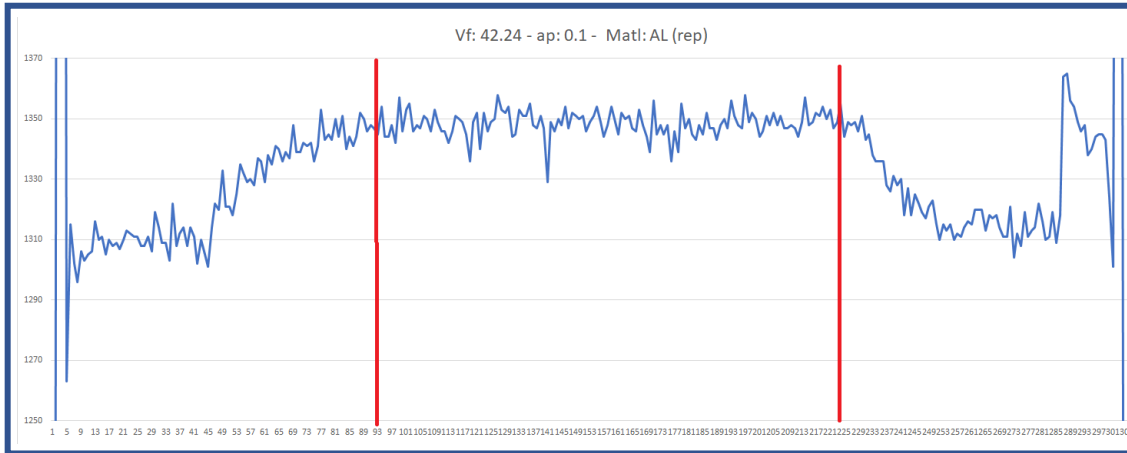
1. Se obtiene el conjunto de datos para el corte guardados por el analizador, la siguiente tabla muestra este conjunto de datos para un corte en aluminio con la profundidad axial de corte  $a_p = 0.05$  mm, profundidad radial de corte  $a_e = 31.50$  mm, velocidad de avance de corte  $V_f = 42.24$  mm/seg en maquina CNC Hass VF-1.

Lista de lecturas de potencia real (w) para el proceso de corte con $V_f = 42.24$ - $a_p = 0.1$ - Material = aluminio en CNC Hass VF-1											
506.7	1308	1325	1345	1347	1344	1344	1343	1347	1336	1315	1364
1513	1311	1335	1343	1351	1345	1348	1348	1348	1336	1320	1365
1846	1306	1332	1350	1350	1353	1354	1345	1347	1328	1320	1356
1914	1319	1329	1344	1346	1351	1350	1352	1344	1326	1320	1354
1263	1314	1330	1351	1353	1351	1345	1347	1349	1331	1313	1349
1315	1309	1328	1340	1349	1355	1352	1347	1357	1328	1318	1346
1302	1309	1337	1344	1346	1348	1350	1343	1348	1330	1317	1348
1296	1303	1336	1341	1346	1347	1351	1348	1349	1318	1318	1338
1306	1322	1329	1344	1342	1351	1347	1350	1352	1327	1314	1340
1303	1308	1338	1352	1346	1347	1346	1347	1351	1318	1311	1344
1305	1312	1335	1350	1351	1329	1353	1356	1354	1325	1311	1345
1306	1314	1341	1346	1350	1349	1348	1351	1350	1322	1321	1345
1316	1308	1340	1348	1349	1346	1344	1348	1353	1319	1304	1343
1310	1314	1336	1347	1345	1350	1339	1347	1347	1317	1312	1324
1311	1311	1339	1345	1336	1348	1356	1358	1349	1321	1308	1301
1305	1302	1337	1354	1349	1354	1345	1349	1355	1323	1319	1645
1310	1310	1348	1344	1352	1347	1348	1352	1344	1315	1311	1794
1308	1305	1339	1344	1340	1352	1345	1350	1349	1310	1313	1245
1309	1301	1339	1348	1352	1351	1348	1344	1348	1315	1314	506
1307	1314	1342	1342	1346	1350	1336	1346	1349	1313	1322	
1310	1322	1341	1357	1349	1351	1346	1351	1346	1315	1316	
1313	1320	1342	1346	1350	1346	1339	1348	1351	1310	1310	
1312	1333	1336	1353	1358	1349	1355	1352	1343	1312	1311	
1311	1321	1341	1355	1353	1351	1347	1348	1345	1311	1319	
1311	1321	1353	1346	1352	1354	1350	1351	1338	1314	1309	
1308	1318	1343	1348	1354	1349	1345	1347	1336	1316	1318	

*Tabla 14 – Lista de lecturas para proceso de corte específico de ejemplo. (Elaboración propia).*

2. Se procede a graficar todas las lecturas y se identifica el punto de inicio y fin del periodo en que se realiza el corte sobre la pieza, dicho periodo se identifica porque es aquel en que la

potencia se estabiliza ya que los demás periodos corresponden a otros momentos del proceso donde las demandas de energía son debidas al avance o rotación del herramienta.



Lista de lecturas de potencia real (w) para el proceso de corte con Vf = 42.24 - ap = 0.1 - Material = aluminio en CNC Hass VF-1											
506.7	1308	1325	1345	1347	1344	1344	1343	1347	1336	1315	1364
1513	1311	1335	1343	1351	1345	1348	1348	1348	1336	1320	1365
1846	1306	1332	1350	1350	1353	1354	1345	1347	1328	1320	1356
1914	1319	1329	1344	1346	1351	1350	1352	1344	1326	1320	1354
1263	1314	1330	1351	1353	1351	1345	1347	1349	1331	1313	1349
1315	1309	1328	1340	1349	1355	1352	1347	1357	1328	1318	1346
1302	1309	1337	1344	1346	1348	1350	1343	1348	1330	1317	1348
1296	1303	1336	1341	1346	1347	1351	1348	1349	1318	1318	1338
1306	1322	1329	1344	1342	1351	1347	1350	1352	1327	1314	1340
1303	1308	1338	1352	1346	1347	1346	1347	1351	1318	1311	1344
1305	1312	1335	1350	1351	1329	1353	1356	1354	1325	1311	1345
1306	1314	1341	1346	1350	1349	1348	1351	1350	1322	1321	1345
1316	1308	1340	1348	1349	1346	1344	1348	1353	1319	1304	1343
1310	1314	1336	1347	1345	1350	1339	1347	1347	1317	1312	1324
1311	1311	1339	1345	1336	1348	1356	1358	1349	1321	1308	1301
1305	1302	1337	1354	1349	1354	1345	1349	1355	1323	1319	1645
1310	1310	1348	1344	1352	1347	1348	1352	1344	1315	1311	1794
1308	1305	1339	1344	1340	1352	1345	1350	1349	1310	1313	1245
1309	1301	1339	1348	1352	1351	1348	1344	1348	1315	1314	506
1307	1314	1342	1342	1346	1350	1336	1346	1349	1313	1322	
1310	1322	1341	1357	1349	1351	1346	1351	1346	1315	1316	
1313	1320	1342	1346	1350	1346	1339	1348	1351	1310	1310	
1312	1333	1336	1353	1358	1349	1355	1352	1343	1312	1311	
1311	1321	1341	1355	1353	1351	1347	1348	1345	1311	1319	
1311	1321	1353	1346	1352	1354	1350	1351	1338	1314	1309	
1308	1318	1343	1348	1354	1349	1345	1347	1336	1316	1318	

**Tabla 15** – Gráfica y tabla donde se Identifica el periodo de corte Pc. (Elaboración propia)

- Se procede a obtener el promedio de potencia de este periodo y se calcula la TRM de acuerdo con la ecuación (2).

Promedio de las lecturas de  $P_c = 1348.6 \text{ w}$

$$TRM = \frac{ae \times ap \times Vf}{60} = \frac{31.5 \times 0.05 \times 42.24}{60} = 1.109 \text{ mm}^3/\text{seg}$$

4. Se procede a calcular el  $CE_e$  de acuerdo con la ecuación 2.

$$CE_e = \frac{P_c}{TRM} = \frac{1348.6}{1.109} = 1216.05 \text{ J/mm}^3$$

5. Calculamos el  $T_c$  de acuerdo con:

$$T_c = \frac{D}{Vf} = \frac{101.6}{42.24} = 2.40 \text{ s}$$

6. Calculamos el VMR (volumen medio removido) de acuerdo con:

$$VMR = TRM \times (T_c \times 60) = 1.109 \times (2.40 \times 60) = 160.36 \text{ mm}^3$$

7. Continuamos con calcular el  $E_e$  (consumo de energía por operación) de la siguiente manera:

$$E_e = CE_e \times VMR = 1,216.05 \times 160.36 = 195,005 \text{ J}$$

8. Calculamos el  $T_t$  con:

$$T_t = T_c + T_d + T_m + T_a = 2.4 + 0.16 + 1.7 + 0.33 = 4.59 \text{ min}$$

9. Procedemos a calcular la tasa de producción  $TP$  de la siguiente manera:

$$TP = \frac{60}{Tt} \times OEE = \left(\frac{60}{4.59}\right) \times 16 = \mathbf{209 \text{ Piezas diarias}}$$

10. Por último, convertimos a consumo de energía diaria debida a la operación:

$$E = \left(\frac{E_e}{3,600,000}\right) \times TP = \left(\frac{195,005}{3,600,000}\right) \times 209 = \mathbf{11.32 \text{ KWh/día}}$$

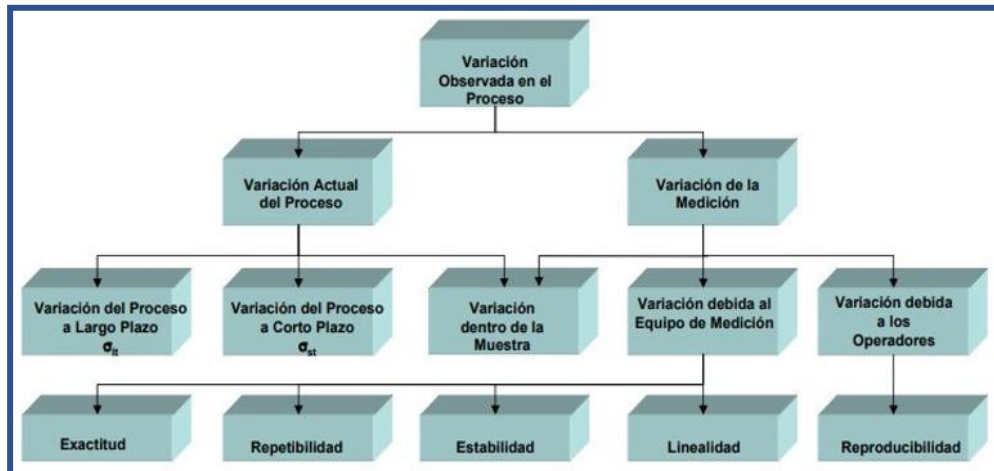
Procedemos entonces a obtener datos de  $P_c$  para una muestra representativa del proceso en CNC y fresadora manual con estos mismos niveles de parámetros de corte, y calculamos como se mostró anteriormente la  $E$  para cada muestra. Se ejecuta el corte para 32 piezas, en aluminio. El analizador de energía obtiene las lecturas de potencia para cada muestra, se filtran todas las lecturas para solo contabilizar aquellas que corresponden al momento del corte sobre la pieza para cada una y calculamos el consumo de energía  $E$  como se mostró en los pasos anteriores.

### 3.3.3 Análisis gauge R&R para la rugosidad

Antes de tomar nuestra muestra para establecer la línea base referente a la rugosidad superficial, es necesario validar el sistema de medición que se tiene para esta característica. Debemos de validar el sistema de medición que se tiene en el proceso solo para esta característica ya que esta es medida de manera manual por los operadores a diferencia de la potencia eléctrica, la cual es medida de manera automática por el sistema de medición por la que se descarta el error por reproducibilidad en dicho sistema.

Se realizó un estudio de reproducibilidad y repetibilidad (R&R) de manera que fue posible identificar si existen causas de variación ya sea por parte del dispositivo de medición (precisión,

calibración, repetibilidad, sesgo, linealidad o estabilidad), así como la forma de medir por parte de los inspectores de estas variables (reproducibilidad).



**Figura 59** – Esquemático de relación entra la variación debida al proceso y variación por el sistema de medición. (Elaboración propia)

En el análisis R&R, se mide la variación en el instrumento de medición y en el método de medición, procedemos a seleccionar 10 piezas con las que se trabaja actualmente en el proceso, así como los parámetros actuales de este (velocidad de avance y profundidad del corte).

Se seleccionaron 2 inspectores que tomarán las medidas pertinentes de cada parte, quienes para este análisis fueron los inspectores que más comúnmente están involucrados en el proceso de corte de estas piezas dentro del laboratorio. Cada inspector realizó la medición un total de 3 veces, teniendo entonces 3 mediciones por inspector por pieza, dando un total de 30 mediciones por inspector.

Se aplicaron las siguientes reglas para que el análisis sea satisfactorio:

1. El orden de las piezas maquinadas se aleatoriza para su medición.
2. Los inspectores no pudieron ver los resultados del otro inspector.
3. Los inspectores no tenían conocimiento previo de que piezas cumplen y cuales no cumplen con especificación.

El análisis de gauge R&R con el que se decide proceder es del tipo cruzado, debido a que es donde cada operador mide las mismas partes múltiples veces y particularmente este estudio es el adecuado para determinar qué tanto de la variación observada del proceso se debe a la variación del sistema de medición. El análisis se realiza por el método ANOVA y el cálculo se realiza en software MINITAB.

Características del proceso de corte:

**Máquina-Herramienta:** CNC Hass VF-1

**Tipo de material:** Aluminio

**Dimensiones de la pieza a cortar:** Diámetro = 101.6 mm

**Dimensiones del corte:** Profundidad: 0.05 mm, Ancho = 31.5 mm, Largo = 101.6 mm

**Velocidad de avance del herramental de corte:**  $V_f = 42.24$  mm/min

Variables que medir:

**Rugosidad Superficial ( $R_a$ )** = especificación superior (tolerancia) =  $0.60 \mu\text{m}$

Características del análisis gauge R&R:

**Tipo de análisis** = Cruzado

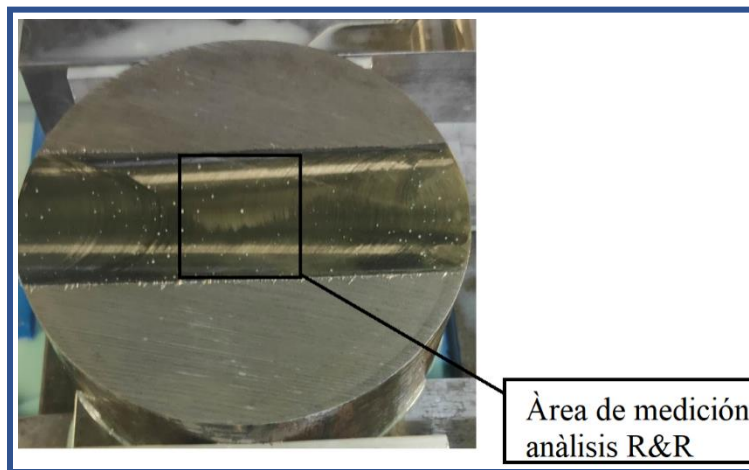
**Cantidad de inspectores = 2**

**Cantidad de piezas a medir = 10**

**Cantidad de intentos por inspector = 3**

**Método de análisis R&R = ANOVA.**

Es importante mencionar que el procedimiento de medición para los fines de este análisis (contrario a lo que se realiza en la práctica diaria durante el proceso) fue el medir la pieza 3 veces sobre la misma área del corte, ya que lo que buscamos es que el equipo haya identificado la misma área y realizado la medición de forma más parecida posible.



**Figura 60** – Área de medida para el análisis R&R. (Elaboración propia)

Se procedió a realizar la medición de las piezas

Los siguientes valores, fueron las mediciones realizadas por cada inspector:

		INSPECTOR 1					INSPECTOR 2		
		Intentos					Intentos		
Pieza		1	2	3	Pieza		1	2	3
1		0.530	0.530	0.500	1		0.530	0.550	0.520
2		0.530	0.510	0.520	2		0.520	0.500	0.500
3		0.570	0.550	0.520	3		0.510	0.530	0.530
4		0.540	0.570	0.520	4		0.550	0.520	0.540
5		0.490	0.490	0.510	5		0.520	0.490	0.470
6		0.580	0.570	0.540	6		0.530	0.570	0.540
7		0.530	0.510	0.490	7		0.520	0.500	0.540
8		0.510	0.520	0.500	8		0.520	0.500	0.490
9		0.500	0.520	0.520	9		0.520	0.490	0.530
10		0.530	0.540	0.500	10		0.540	0.520	0.540

**Tablas 16 y 17 – Tablas con datos medidos (Elaboración propia)**

Los siguientes datos son los resultados de los análisis calculados para la medición de  $R_a$  por medio del software MINITAB.

Tabla ANOVA de dos factores con interacción					
Fuente	GL	SC	MC	F	P
Partes	9	0.0168017	0.0018669	8.33830	0.002
Inspector	1	0.0002017	0.0002017	0.90074	0.367
Partes * Inspector	9	0.0020150	0.0002239	0.71076	0.696
Repetibilidad	40	0.0126000	0.0003150		
Total	59	0.0316183			

$\alpha$  para eliminar el término de interacción = 0.05

**Figura 61 – Tabla de ANOVA de dos factores con interacción para medición en  $R_a$ .**

(Elaboración propia)

Tabla ANOVA dos factores sin interacción					
Fuente	GL	SC	MC	F	P
Partes	9	0.0168017	0.0018669	6.25903	0.000
Inspector	1	0.0002017	0.0002017	0.67613	0.415
Repetibilidad	49	0.0146150	0.0002983		
Total	59	0.0316183			

**Figura 62 – Tabla de ANOVA de dos factores sin interacción para medición en  $R_a$ .**

(Elaboración propia)

Componentes de la varianza		
Fuente	CompVar	%Contribución (de CompVar)
Gage R&R total	0.0002983	53.29
Repetibilidad	0.0002983	53.29
Reproducibilidad	0.0000000	0.00
Inspector	0.0000000	0.00
Parte a parte	0.0002614	46.71
Variación total	0.0005597	100.00

La tolerancia del proceso es = 0.6

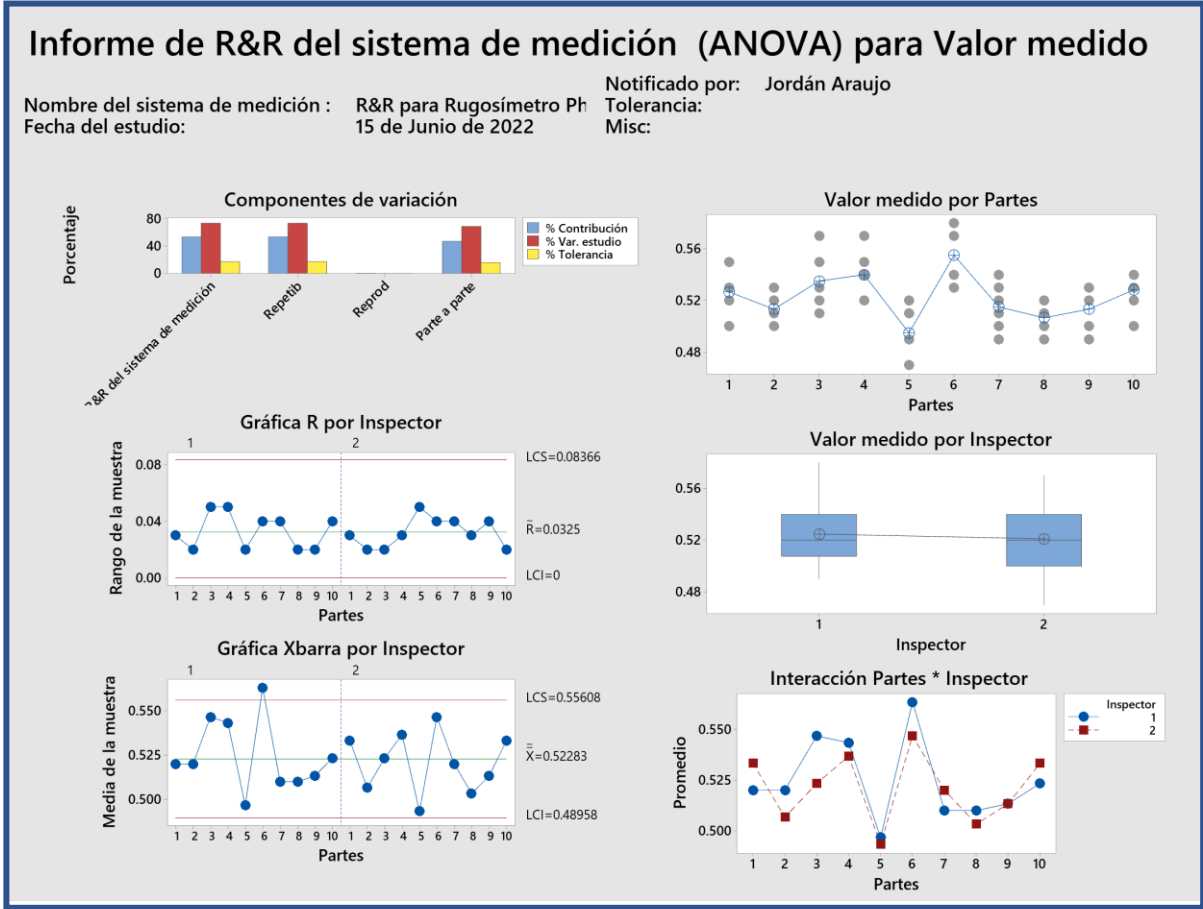
**Figura 63** – Tabla de componentes de la varianza para R&R para  $R_a$ . (Elaboración propia)

Evaluación del sistema de medición				
Fuente	Desv.Est. (DE)	Var. estudio (6 × DE)	%Var. estudio (%VE)	%Tolerancia (VE/Toler)
Gage R&R total	0.0172704	0.103622	73.00	17.27
Repetibilidad	0.0172704	0.103622	73.00	17.27
Reproducibilidad	0.0000000	0.0000000	0.00	0.00
Inspector	0.0000000	0.0000000	0.00	0.00
Parte a parte	0.0161688	0.097013	68.34	16.17
Variación total	0.0236579	0.141947	100.00	23.66

Número de categorías distintas = 1

**Figura 64** – Tabla de resultados de la evaluación del sistema de medición para  $R_a$ .

(Elaboración propia)



**Figura 65** – Informe de R&R del sistema de medición ANOVA para  $R_a$ . (Elaboración propia)

En los resultados podemos ver que para la primera tabla de ANOVA con la interacción del valor de partes\*inspector, nos muestra un valor  $P = 0.696$ , valor mayor a nuestro  $0.05$  que es el valor de nuestra significancia, por lo cual el software calcula la misma tabla, pero esta vez sin la interacción.

Para los resultados en la tabla de los componentes de la varianza, vemos que una gran parte de la variación total corresponde al error de medición por diferencias entre las partes (parte a parte) =  $46.71\%$  mientras que el porcentaje restante corresponde al error de medición debido a la repetibilidad (variación debida a causas del equipo de medición) con un  $53.29\%$  de la variación.

Por parte de la reproducibilidad no tenemos variación debido a errores de medición por parte de esta característica. Podemos decir que la influencia del operador no aporta a los errores en la medición de nuestra característica de calidad.

Como nuestro sistema de medición evalúa las partes en relación con una especificación superior, se tomó el valor de %Tolerancia como la métrica apropiada para nuestra evaluación.

La tabla de evaluación del sistema de medición nos indica que nuestro % gauge R&R total para el %tolerancia = **17.27%**, lo cual es un resultado aceptable dependiendo de la variable a medir pero que aun así se podría mejorar este sistema de medición. Sin embargo, el % de variación parte a parte es solo del 16.17%, este valor al ser menor al 17.27% por la variación debida al sistema de medición es un indicativo que el sistema es adecuado, pero necesitaría corregirse a futuro. Esta condición también la podemos notar en el gráfico de barras de componentes por variación donde ambas barras (las de parte a parte y las del sistema de medición) son prácticamente iguales, lo ideal es ver que la barra de parte a parte sea mucho más grande que la debida al sistema de medición.

Los criterios para determinar un porcentaje adecuado para el % gauge R&R son los siguientes:

- **%R&R total Menor a 10%** = Sistema de medición aceptable
- **%R&R total Entre 10% y 30%** = Se considera aceptable dependiendo la aplicación y si el costo de esta medición es un factor de importancia, pero se podría mejorar el sistema.
- **%R&R total Mayor a 30%** = El sistema de medición es inaceptable y debe de mejorarse.

Sin embargo, algo que no es aceptable en los resultados del análisis es un número de categorías igual a 1, lo que es indicativo que la precisión por resolución del equipo no es la adecuada y no podría distinguir entre las partes adecuadamente.

El gráfico de cajas por operador nos indica que los operadores están midiendo las partes un poco diferentes entre ellos, ya que la horizontal no es 100% paralela al eje X. También esto lo podemos constatar del gráfico de parte \* inspector, ya que sus gráficos no son exactamente alineados uno sobre el otro.

### **3.3.4 Colección de datos de rugosidad superficial**

Una vez determinando que nuestro sistema de medición es considerado aceptable para medir la rugosidad superficial de las piezas, se procedió a realizar la medición de esta característica para la misma muestra de 32 piezas donde medimos la  $P_c$ , se realizó la medición correspondiente y se anotaron los resultados, los cuales se muestran a continuación junto con la estadística descriptiva.

Consumo de energía "E" y Rugosidad superficial "Ra" Aluminio - CNC														
Muestra	Vf	TC	TP	D	VMR	ae = d	ap	TRM	Pc	CFe	F	Ra	Estadística Descriptiva E	Estadística Descriptiva Ra
1	42.24	2.4	208.9	101.6	160.0	31.5	0.05	1.109	1330.9	1200.3	11.15	0.53		
2	42.24	2.4	208.9	101.6	160.0	31.5	0.05	1.109	1336.2	1205.1	11.19	0.53		
3	42.24	2.4	208.9	101.6	160.0	31.5	0.05	1.109	1344.2	1212.3	11.26	0.40	Media	11.18
4	42.24	2.4	208.9	101.6	160.0	31.5	0.05	1.109	1320.6	1191.0	11.06	0.43	Error típico	0.07
5	42.24	2.4	208.9	101.6	160.0	31.5	0.05	1.109	1378.2	1243.0	11.54	0.40	Mediana	11.19
6	42.24	2.4	208.9	101.6	160.0	31.5	0.05	1.109	1357.3	1224.1	11.37	0.43	Moda	#N/D
7	42.24	2.4	208.9	101.6	160.0	31.5	0.05	1.109	1335.0	1204.0	11.18	0.57	Desviación estándar	0.26
8	42.24	2.4	208.9	101.6	160.0	31.5	0.05	1.109	1274.1	1149.1	10.67	0.55	Varianza de la muestra	0.07
9	42.24	2.4	208.9	101.6	160.0	31.5	0.05	1.109	1369.1	1234.8	11.47	0.45	Curtosis	-0.59
10	42.24	2.4	208.9	101.6	160.0	31.5	0.05	1.109	1306.6	1178.4	10.94	0.54	Coefficiente de asimetría	-0.14
11	42.24	2.4	208.9	101.6	160.0	31.5	0.05	1.109	1366.3	1232.2	11.44	0.57	Rango	0.92
12	42.24	2.4	208.9	101.6	160.0	31.5	0.05	1.109	1336.7	1205.5	11.19	0.52	Mínimo	10.67
13	42.24	2.4	208.9	101.6	160.0	31.5	0.05	1.109	1302.8	1175.0	10.91	0.47	Máximo	11.59
14	42.24	2.4	208.9	101.6	160.0	31.5	0.05	1.109	1383.8	1248.0	11.59	0.49	Suma	178.85
15	42.24	2.4	208.9	101.6	160.0	31.5	0.05	1.109	1316.8	1187.6	11.03	0.54	Cuenta	16.00
16	42.24	2.4	208.9	101.6	160.0	31.5	0.05	1.109	1296.9	1169.6	10.86	0.58	Nivel de confianza(95.0%)	0.14
17	42.24	2.4	208.9	101.6	160.0	31.5	0.05	1.109	1295.6	1168.5	10.85	0.49		
18	42.24	2.4	208.9	101.6	160.0	31.5	0.05	1.109	1302.3	1174.5	10.91	0.52		
19	42.24	2.4	208.9	101.6	160.0	31.5	0.05	1.109	1373.9	1239.1	11.51	0.5		
20	42.24	2.4	208.9	101.6	160.0	31.5	0.05	1.109	1353.1	1220.3	11.33	0.48		
21	42.24	2.4	208.9	101.6	160.0	31.5	0.05	1.109	1277.6	1152.2	10.70	0.53		
22	42.24	2.4	208.9	101.6	160.0	31.5	0.05	1.109	1277.4	1152.1	10.70	0.49		
23	42.24	2.4	208.9	101.6	160.0	31.5	0.05	1.109	1372	1237.4	11.49	0.58		
24	42.24	2.4	208.9	101.6	160.0	31.5	0.05	1.109	1311.8	1183.1	10.99	0.45		
25	42.24	2.4	208.9	101.6	160.0	31.5	0.05	1.109	1342.5	1210.8	11.24	0.49		
26	42.24	2.4	208.9	101.6	160.0	31.5	0.05	1.109	1351.2	1218.6	11.32	0.53		
27	42.24	2.4	208.9	101.6	160.0	31.5	0.05	1.109	1283.7	1157.7	10.75	0.46		
28	42.24	2.4	208.9	101.6	160.0	31.5	0.05	1.109	1312.3	1183.5	10.99	0.44		
29	42.24	2.4	208.9	101.6	160.0	31.5	0.05	1.109	1376.4	1241.3	11.53	0.4		
30	42.24	2.4	208.9	101.6	160.0	31.5	0.05	1.109	1333.3	1202.5	11.17	0.51		
31	42.24	2.4	208.9	101.6	160.0	31.5	0.05	1.109	1374.8	1239.9	11.51	0.56		
32	42.24	2.4	208.9	101.6	160.0	31.5	0.05	1.109	1346.0	1213.9	11.27	0.49		

Consumo de energía "E" y Rugosidad superficial "Ra" Acero P20 - CNC														
Muestra	Vf	TC	TP	D	VMR	ae = d	ap	TRM	Pc	CFe	F	Ra	Estadística Descriptiva E	Estadística Descriptiva Ra
1	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	1359.3	1225.92	10.66	0.65		
2	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	1384.8	1248.92	10.86	0.51		
3	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	1391.9	1255.32	10.91	0.61	Media	10.45
4	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	1397.2	1260.10	10.96	0.83	Error típico	0.08
5	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	1294.5	1167.48	10.15	0.74	Mediana	10.46
6	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	1311.4	1182.72	10.28	0.63	Moda	#N/D
7	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	1296.7	1169.46	10.17	0.90	Desviación estándar	0.47
8	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	1368.1	1233.86	10.73	0.45	Varianza de la muestra	0.22
9	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	1334.8	1203.82	10.47	0.78	Curtosis	-0.56
10	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	1328.2	1197.87	10.41	0.48	Coefficiente de asimetría	-0.40
11	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	1353.3	1220.51	10.61	0.50	Rango	1.72
12	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	1380.8	1245.31	10.83	0.61	Mínimo	9.47
13	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	1333.3	1202.47	10.45	0.66	Máximo	11.19
14	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	1344.0	1212.12	10.54	0.55	Suma	334.26
15	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	1208.0	1089.47	9.47	0.61	Cuenta	32.00
16	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	1427.1	1287.07	11.19	0.59	Nivel de confianza(95.0%)	0.17
17	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	1242.8	1120.85	9.74	0.69		
18	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	1405.3	1267.41	11.02	0.79		
19	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	1290.4	1163.78	10.12	0.55		
20	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	1318.8	1189.39	10.34	0.57		
21	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	1386.1	1250.09	10.87	0.75		
22	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	1221.9	1102.00	9.58	0.56		
23	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	1282.7	1156.84	10.06	0.78		
24	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	1358	1224.75	10.65	0.5		
25	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	1327.4	1197.15	10.41	0.55		
26	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	1369.5	1235.12	10.74	0.48		
27	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	1299.1	1171.63	10.19	0.69		
28	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	1423.1	1283.46	11.16	0.66		
29	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	1297.8	1170.45	10.18	0.47		
30	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	1219.6	1099.93	9.56	0.73		
31	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	1261.1	1137.36	9.89	0.58		
32	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	1412.7	1274.08	11.08	0.84		

Tabla 18 y 19 – Muestras de E y Ra en acero y aluminio, así como su estadística descriptiva para el proceso de corte de 32 piezas en máquina CNC. (Elaboración propia)

Consumo de energía "E" y Rugosidad superficial "R <sub>a</sub> " Aluminio - Fresadora														
Muestra	Vf	TC	TP	D	VMR	ae = d	ap	TRM	Pc	CEe	E	Ra	Estadística Descriptiva E	Estadística Descriptiva R <sub>a</sub>
1	42.24	2.41	208.91	101.60	160.0	31.5	0.05	1.109	269.42	242.98	2.26	1.40		
2	42.24	2.41	208.91	101.60	160.0	31.5	0.05	1.109	289.02	260.66	2.42	1.43		
3	42.24	2.41	208.91	101.60	160.0	31.5	0.05	1.109	279.70	252.25	2.34	1.17	Media	2.37
4	42.24	2.41	208.91	101.60	160.0	31.5	0.05	1.109	285.44	257.43	2.39	1.33	Error típico	0.01
5	42.24	2.41	208.91	101.60	160.0	31.5	0.05	1.109	276.40	249.28	2.31	1.27	Mediana	2.37
6	42.24	2.41	208.91	101.60	160.0	31.5	0.05	1.109	296.36	267.28	2.48	1.13	Moda	#N/D
7	42.24	2.41	208.91	101.60	160.0	31.5	0.05	1.109	280.59	253.06	2.35	1.40	Desviación estándar	0.08
8	42.24	2.41	208.91	101.60	160.0	31.5	0.05	1.109	286.72	258.59	2.40	1.40	Varianza de la muestra	0.01
9	42.24	2.41	208.91	101.60	160.0	31.5	0.05	1.109	284.45	256.53	2.38	1.43	Curtosis	-0.99
10	42.24	2.41	208.91	101.60	160.0	31.5	0.05	1.109	269.72	243.25	2.26	1.53	Coefficiente de asimetría	-0.06
11	42.24	2.41	208.91	101.60	160.0	31.5	0.05	1.109	286.12	258.04	2.40	1.37	Rango	0.26
12	42.24	2.41	208.91	101.60	160.0	31.5	0.05	1.109	277.15	249.95	2.32	1.17	Mínimo	2.24
13	42.24	2.41	208.91	101.60	160.0	31.5	0.05	1.109	274.64	247.69	2.30	1.20	Máximo	2.50
14	42.24	2.41	208.91	101.60	160.0	31.5	0.05	1.109	290.29	261.90	2.43	1.30	Suma	75.70
15	42.24	2.41	208.91	101.60	160.0	31.5	0.05	1.109	289.67	261.25	2.43	1.47	Cuenta	32.00
16	42.24	2.41	208.91	101.60	160.0	31.5	0.05	1.109	298.57	269.28	2.50	1.37	Nivel de confianza(95.0%)	0.03
17	42.24	2.41	208.91	101.60	160.0	31.5	0.05	1.109	276.99	249.81	2.32	1.39		
18	42.24	2.41	208.91	101.60	160.0	31.5	0.05	1.109	290.81	262.27	2.44	1.49		
19	42.24	2.41	208.91	101.60	160.0	31.5	0.05	1.109	286.58	258.46	2.40	1.19		
20	42.24	2.41	208.91	101.60	160.0	31.5	0.05	1.109	296.35	267.27	2.48	1.38		
21	42.24	2.41	208.91	101.60	160.0	31.5	0.05	1.109	278.05	250.77	2.33	1.32		
22	42.24	2.41	208.91	101.60	160.0	31.5	0.05	1.109	267.11	240.90	2.24	1.36		
23	42.24	2.41	208.91	101.60	160.0	31.5	0.05	1.109	295.47	266.48	2.47	1.22		
24	42.24	2.41	208.91	101.60	160.0	31.5	0.05	1.109	289.14	260.77	2.42	1.02		
25	42.24	2.41	208.91	101.60	160.0	31.5	0.05	1.109	285.02	257.05	2.39	1.06		
26	42.24	2.41	208.91	101.60	160.0	31.5	0.05	1.109	281.27	253.68	2.36	1.35		
27	42.24	2.41	208.91	101.60	160.0	31.5	0.05	1.109	292.02	263.36	2.45	1.33		
28	42.24	2.41	208.91	101.60	160.0	31.5	0.05	1.109	273.27	246.46	2.29	0.95		
29	42.24	2.41	208.91	101.60	160.0	31.5	0.05	1.109	282.52	254.80	2.37	1.21		
30	42.24	2.41	208.91	101.60	160.0	31.5	0.05	1.109	273.44	246.61	2.29	1.29		
31	42.24	2.41	208.91	101.60	160.0	31.5	0.05	1.109	268.62	242.26	2.25	0.95		
32	42.24	2.41	208.91	101.60	160.0	31.5	0.05	1.109	267.88	241.60	2.24	1.33		

Consumo de energía "E" y Rugosidad superficial "R <sub>a</sub> " Acero - Fresadora														
Muestra	Vf	TC	TP	D	VMR	ae = d	ap	TRM	Pc	CEe	E	Ra	Estadística Descriptiva E	Estadística Descriptiva R <sub>a</sub>
1	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	277.44	250.22	2.18	0.99		
2	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	291.12	262.56	2.28	1.04		
3	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	289.80	261.36	2.27	0.86	Media	2.22
4	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	293.94	265.10	2.30	1.26	Error típico	0.01
5	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	285.21	257.22	2.24	1.32	Mediana	2.22
6	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	289.38	260.99	2.27	1.38	Moda	#N/D
7	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	275.86	248.79	2.16	1.46	Desviación estándar	0.07
8	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	279.30	251.89	2.19	1.09	Varianza de la muestra	0.00
9	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	291.72	263.10	2.29	1.18	Curtosis	-1.15
10	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	283.99	256.12	2.23	1.54	Coefficiente de asimetría	-0.16
11	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	290.56	262.05	2.28	1.48	Rango	0.24
12	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	282.59	254.86	2.22	1.22	Mínimo	2.10
13	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	269.32	242.89	2.11	1.05	Máximo	2.34
14	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	276.64	249.49	2.17	0.87	Suma	71.01
15	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	270.40	243.87	2.12	1.12	Cuenta	32.00
16	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	278.79	251.43	2.19	1.42	Nivel de confianza(95.0%)	0.02
17	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	274.96	247.98	2.16	1.25		
18	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	294.40	265.51	2.31	1.08		
19	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	279.70	252.25	2.19	0.87		
20	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	267.59	241.33	2.10	1.42		
21	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	275.68	248.63	2.16	1.08		
22	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	268.84	242.46	2.11	0.89		
23	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	289.72	261.29	2.27	1.01		
24	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	278.79	251.43	2.19	1.15		
25	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	271.11	244.51	2.13	1.40		
26	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	298.42	269.13	2.34	0.90		
27	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	289.91	261.47	2.27	1.16		
28	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	291.91	263.26	2.29	1.30		
29	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	290.80	262.26	2.28	1.25		
30	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	293.37	264.59	2.30	0.88		
31	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	279.80	252.34	2.19	0.87		
32	42.24	2.10	223.53	88.90	140.02	31.5	0.05	1.109	285.11	257.13	2.24	1.38		

*Tabla 20 y 21 – Muestras de E y R<sub>a</sub> en acero y aluminio, así como su estadística descriptiva para el proceso de corte de 32 piezas en fresadora. (Elaboración propia)*

- Observando las muestras obtenidas, nos damos cuenta de que para la máquina CNC Hass, máquina utilizada en el proceso actualmente, se tuvo una media de consumo de energía de

11.18 KWh/día en aluminio (que es el material utilizado en el proceso actual), mientras que en el acero se tiene un menor consumo eléctrico siendo este una media de 10.45 KWh/día. Para obtener la facturación eléctrica anual y la emisión de GEI's, se calcula de la siguiente manera:

$$E_{car (aluminio)} = E \times 365 \times 0.49 = 11.18 \times 365 \times 0.49 = 2,000 \text{ KgCO}_2\text{e}$$

$$E_{car (acero)} = E \times 365 \times 0.49 = 10.45 \times 365 \times 0.49 = 1,868 \text{ KgCO}_2\text{e}$$

- La facturación eléctrica anual por estos niveles de consumo eléctrico corresponde a \$8,243.48 y \$7,704.79 pesos para el aluminio y el acero respectivamente, dado que al día de realizar la toma de datos el costo unitario por KWh en tarifa industrial para el municipio de Tlajomulco de Zúñiga ( $T_{ar\$}$ ) es de \$2.02 pesos.
- Por parte de la rugosidad superficial, observamos que se obtuvieron 0.5 y 0.63  $\mu\text{m}$  como medias en aluminio y acero respectivamente. El dato de 0.63  $\mu\text{m}$  como media en la rugosidad en esta máquina herramienta para el acero, nos indica que existen posibilidades de obtener mejores resultados de mantener el proceso dentro de especificación aun disminuyendo el consumo eléctrico.
- La tasa de producción se mantiene en 209 piezas diarias aproximadamente ya que el ritmo de producción para el proceso es de 4.6 minutos por pieza, los cuales, para 16 horas continuas de operación diaria de la máquina-herramienta nos da un aproximado de 209 piezas diarias.

- Para la fresadora Aries, máquina-herramienta donde actualmente no se realiza dicho proceso pero se deseaba obtener una línea base para observar su comportamiento con ambos materiales, obtenemos datos muy bajos de consumo eléctrico diario (2.37 y 2.22 KWh/día), lo cual es característico debido a la utilización única del motor eléctrico y la pantalla de parámetros, sin embargo, los niveles de rugosidad se encuentran muy por fuera de la especificación requerida en ambos materiales obteniendo medias de 1.29 y 1.16 para aluminio y acero respectivamente.

El hecho de obtener una media ligeramente más baja en acero nos dice que se pueden obtener mejores resultados en dicho material, pero con especificaciones que permitan obtener dicho nivel de rugosidad. A partir de este punto podemos concluir que la fresadora Aries no es una máquina herramienta que nos permita continuar con el análisis del proceso ya que solo en la muestra prácticamente todas las piezas se encuentran fuera de especificación y no es necesario concluir para esta máquina con un análisis de capacidad del proceso.

### **3.3.5 Análisis de capacidad del proceso de corte para la rugosidad superficial.**

Procedemos a realizar el análisis del control estadístico, con base a las muestras obtenidas para la  $R_a$ . Para E, las mediciones se tomaron únicamente con el propósito de identificar una línea base del consumo de energía diario promedio en la máquina CNC para el proceso actual ya que es una variable que deseamos disminuir más que controlar de acuerdo con límites de especificación.

Dado que en este caso la característica de calidad que deseamos medir y controlar es la rugosidad, siendo esta una variable de tipo cuantitativa y de tipo continuo ya que la medición toma valores intermedios entre ellos, y también de igual manera como se considera que es un proceso

que no se detiene en ningún momento durante las 16 horas continuas (descartando los periodos de cambio de turno y cambio de pieza) se utilizaron cartas de control para individuos (X-MR) para estimar el nivel de calidad del proceso para esta característica.

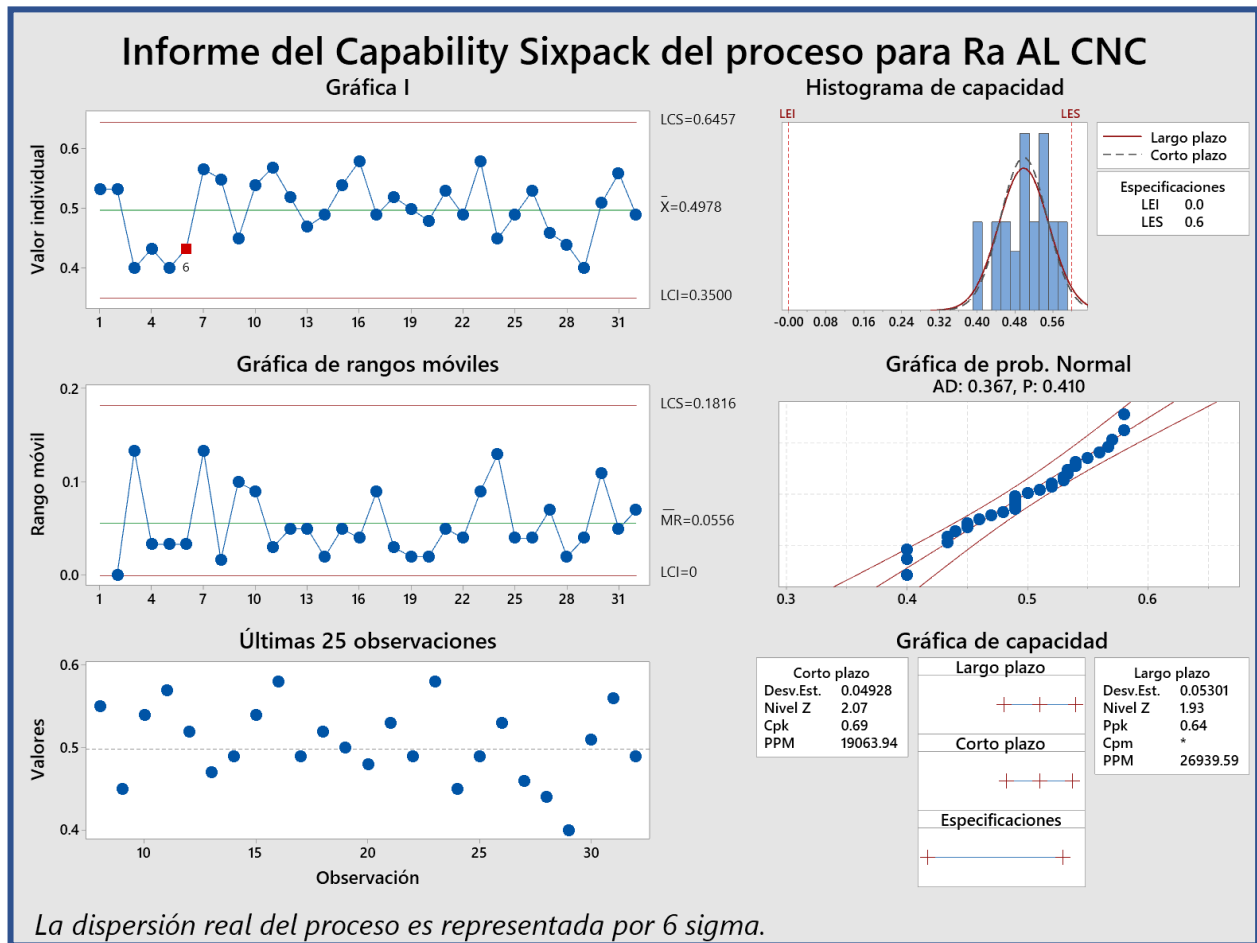
Se realizó entonces un estudio de control del proceso, nivel de capacidad y el cálculo de nivel sigma para la  $R_a$ , así como los gráficos de control de X-MR pertinentes, todo esto se realizó en el software MINITAB.

Se establecieron los límites de control para la  $R_a$  de acuerdo con las especificaciones del cliente para cada material como sigue:

**Acero P20:**  $LCS = 0.9 \mu\text{m}$ ,  $LCI = 0 \mu\text{m}$

**Aluminio:**  $LCS = 0.6 \mu\text{m}$ ,  $LCI = 0 \mu\text{m}$

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para  $R_a$  en aluminio, su capacidad y nivel sigma del proceso, así como sus gráficos de control.



**Figura 66** – Análisis sixpack de capacidad del proceso para  $R_a$  proceso actual en CNC.

(Elaboración propia)

- Por los gráficos de control, podemos observar que nuestros límites de control son LCI = 0.35 y LCS = 0.64 siendo este último mayor a LES = 0.6, esto es indicativo que el proceso no está produciendo de acuerdo con especificación, sin embargo, todos los puntos están dentro de nuestros límites de control indicando que no tenemos causas especiales de variación, pero el proceso no está bajo control estadístico.

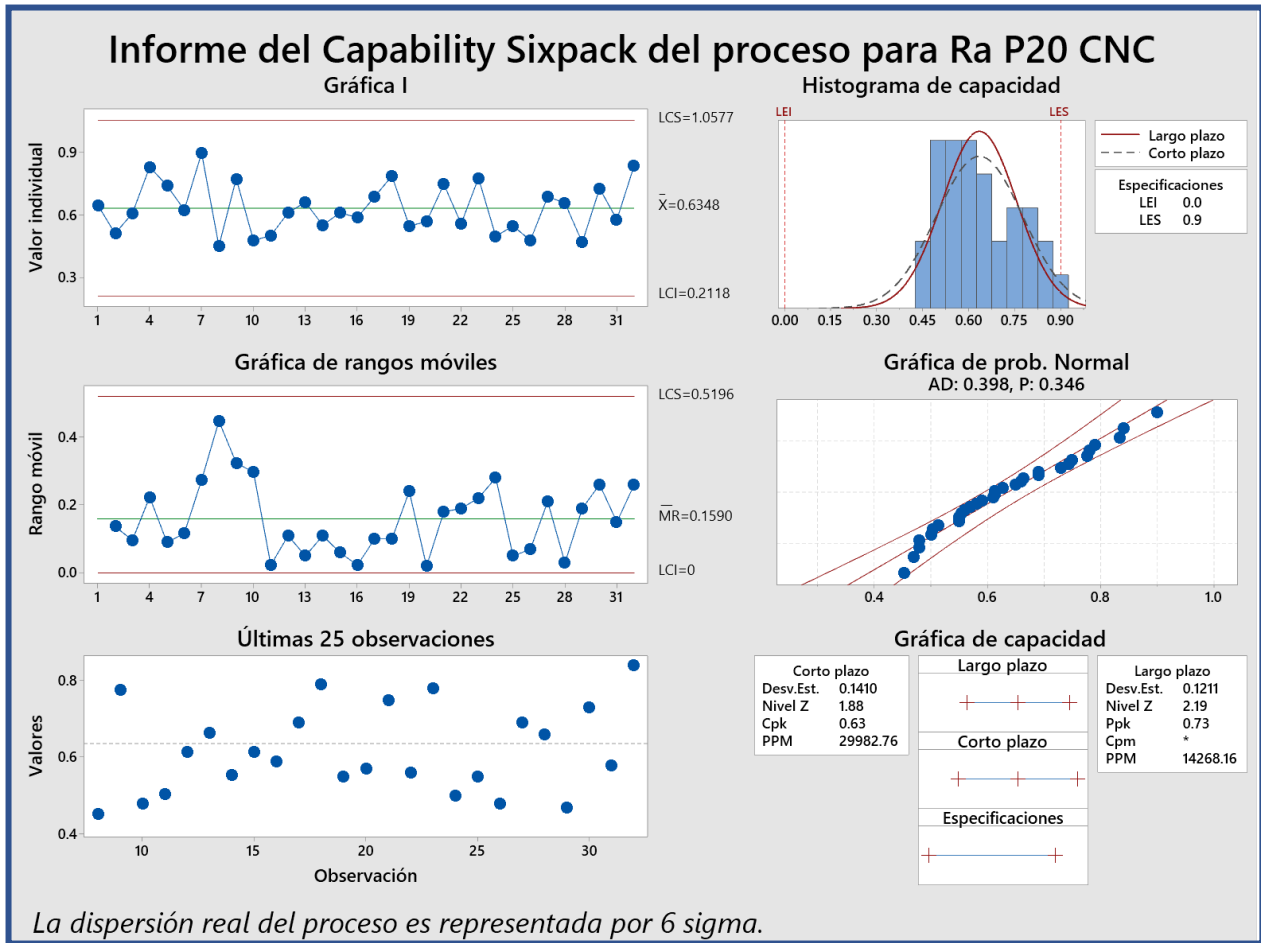
- Por otra parte, podemos ver que falló una prueba en el punto 6 (marcados en rojo en el gráfico de control de individuales):

**PRUEBA 6.** 4 de 5 puntos más de 1 desviación estándar a partir de la línea central (en un mismo lado de la línea central). La prueba falló en los puntos: 6

- Por la prueba de normalidad por Anderson Darling tenemos un valor  $P=0.41$ , mayor a  $\alpha=0.05$ , determinamos que la muestra de datos para  $R_a$  en la CNC persigue una distribución normal.

- Por parte del estudio de capacidad del proceso, tenemos que para un  $LES = 0.60 \mu\text{m}$  de rugosidad, el índice  $CPK = 0.69$ , indica que el proceso no es capaz de producir a corto plazo conforme a especificación, el proceso se muestra descentrado debido a que no existe un límite de especificación inferior y con una cantidad de  $PPMO's =$  igual a 19,063 piezas no conformes por nos da un nivel  $\sigma = 2.07$ . En resumen, la capacidad del proceso es mala y debe de mejorarse.

Los siguientes datos, muestra los resultados del análisis para la muestra de datos de  $R_a$  en acero P20 y máquina CNC, su análisis de capacidad y nivel sigma del proceso con dicho material.



**Figura 67** – Resultados del análisis sixpack del control de proceso  $R_a$  para acero en CNC.

(Elaboración propia)

Por los gráficos de control, podemos observar que nuestros límites de control son  $LCL = 0.21$  y  $LCS = 1.05$  siendo este último mayor a  $LES = 0.9$ , esto es indicativo que el proceso no está produciendo de acuerdo con especificación ya que nuestros límites de control no pueden ser mayores a nuestros límites de especificación establecidos.

Sin embargo, tanto para los resultados de individuales como de rango móvil no tenemos causas especiales de variación, se considera que el proceso está en control estadístico.

Por la prueba de normalidad por Anderson Darling tenemos un valor  $P=0.346$ , mayor a  $\alpha=0.05$ , determinamos que los datos de la muestra de la  $R_a$  para la CNC con acero P20, persiguen una distribución normal.

Por parte del estudio de capacidad del proceso, obtuvimos que para un  $LES = 0.9 \mu m$  de rugosidad, el índice  $CPK = 0.63$ , indica que actualmente el proceso está produciendo fuera de las especificaciones con una cantidad de  $PPMO's = 29,982$  no conformes por millón de oportunidades obtenemos un nivel  $\sigma = 1.88$ . En resumen, el proceso con acero debería de mejorar aún en mayor medida que el proceso con aluminio, esto lo podemos observar porque existe una mayor variación en los datos obtenidos para el acero que para el aluminio.

Con base a la información recabada y los datos obtenidos, podemos establecer la siguiente tabla que contendría tanto nuestra línea base de los resultados de métricos calculados para el acero que es el material que se utiliza en el proceso actual como los objetivos de mejora deseados:

Establecimiento de objetivos para indicadores					
Tipo de métrica	Abreviación	Descripción de métrica	Unidades	Línea base	Mejora esperada
Primaria	Fe	Costo de facturación eléctrica anual por el proceso de corte	\$/año	\$8,243	20% menos
Consecuencial	Ecar	Emisión de gases de efecto invernadero anuales por el proceso de corte	KgCO <sub>2</sub> e/año	2,000 KgCO <sub>2</sub> e/año	20% menos
Secundaria	CPk/Z	Capacidad del proceso de corte para producir dentro de especificación	PPMO's	19,063 PPMO's	20% menos
Secundaria	Tp	Tasa de producción diaria	Piezas por Dia	209 piezas diarias	30% más

**Tabla 22** – Establecimiento de línea base y objetivos de mejora para el proceso de corte.

(Elaboración propia)

Como podemos observar, los objetivos se establecen para esperar un promedio de 20% de mejora general en el proceso, tanto en la disminución del costo de facturación eléctrico debido al

menor E del proceso, disminución también en la emisión de GEI's derivados de esta demanda eléctrica, aumento del número de operaciones por día y del nivel de calidad al establecer objetivos alcanzables de  $R_a$  en ambos materiales.

### **3.3.6 Descripción del análisis: Correlación e interpretación de la información obtenida**

En base a los resultados obtenidos con la que establecimos nuestra línea base del desempeño actual de las máquinas-herramienta, se procedió a realizar la correlación de la información por medio del análisis de regresión de manera que podamos relacionar los parámetros de corte (que lo conforman  $V_f$ ,  $a_p$  y  $a_e$ , como parámetros de corte que pueden ser modificados) con nuestra respuesta  $R_a$ . Además de observar la fuerza de la relación entre estas variables, el análisis nos permitió establecer un modelo predictivo del comportamiento y establecer los valores de parámetros a utilizar para nuestro diseño experimental.

#### **3.3.6.1 Análisis de regresión**

Dado que el consumo de energía diario por el proceso "E", es una variable que depende de la tasa de producción y esta a su vez del tiempo que le toma a la maquina realizar el corte que tiene relación con el tamaño de la pieza "D" (variable diferente para cada material), en lugar de realizar el análisis con "E" debemos realizarlo con el consumo específico de energía "CEe" el cual incluye nuestros parámetros de corte ( $V_f$ ,  $a_p$  y  $a_e$ ) es decir, la "TRM", así como "Pc", de esta manera estamos involucrando en el análisis nuestros parámetros de corte (los cuales son los que nos interesan modificar) y la potencia requerida por la máquina-herramienta.

Para poder comprobar si en el proceso actual existe relación entre la “Ra” y el “CEe”. Para ello se plantearon las siguientes hipótesis:

**Hipótesis para la regresión:**

H0: No Existe relación entre las variables CE<sub>e</sub> y R<sub>a</sub>

H1: Existe relación entre las variables CE<sub>e</sub> y R<sub>a</sub>

P = 0.05

**Hipótesis para la prueba de normalidad:**

H0: Los datos siguen una distribución normal

H1: Los datos no siguen una distribución normal

P = 0.05

Donde (P) en ambos casos es nivel de significancia, indicando que nuestro nivel de confianza es de 95%.

Para el análisis, se tomó una muestra del proceso de Pc y en conjunto con los siguientes valores de parámetros de corte obtenemos la TRM, con esto, cada valor de muestra de CE<sub>e</sub> y R<sub>a</sub> donde sabemos que CE<sub>e</sub> depende de la Pc entre TRM, por lo que para TRM, se establecieron los siguientes parámetros de corte:

$V_f = 42.24, 50.16, 58.08, 66.0, 73.92$  mm/min

Donde 50.16 y 66.0 son velocidades de avance de herramienta medias entre 42.24 y 73.92 que es el rango de parámetros de velocidad de avance recomendados para el proceso en estos materiales.

$$a_p = 0.05, 0.075, 0.1, 0.125 \text{ y } 0.15 \text{ mm}$$

Donde 0.125 y 0.075 son las profundidades de corte medias entre 0.05 y 0.15 de esta manera cubrimos el rango completo de profundidad recomendada para el proceso en estos materiales.

$$a_e = 31.5 \text{ mm}$$

La cual es la profundidad radial del corte y que esta es constante.

Los valores de TRM entonces resultantes para cada combinación serian:

$$\text{TRM1} = (42.24 \times 0.05 \times 31.5)/60 = 1.109$$

$$\text{TRM2} = (42.24 \times 0.1 \times 31.5)/60 = 2.218$$

$$\text{TRM2} = (42.24 \times 0.15 \times 31.5)/60 = 3.326$$

$$\text{TRM4} = (58.08 \times 0.05 \times 31.5)/60 = 1.524$$

$$\text{TRM5} = (58.08 \times 0.1 \times 31.5)/60 = 3.049$$

$$\text{TRM6} = (58.08 \times 0.15 \times 31.5)/60 = 4.573$$

$$\text{TRM7} = (73.92 \times 0.05 \times 31.5)/60 = 1.94$$

$$\text{TRM8} = (73.92 \times 0.1 \times 31.5)/60 = 3.88$$

$$\text{TRM9} = (73.92 \times 0.15 \times 31.5)/60 = 5.821$$

$$\text{TRM10} = (50.16 \times 0.075 \times 31.5)/60 = 1.975$$

$$\text{TRM11} = (66.0 \times 0.125 \times 31.5)/60 = 4.331$$

Se procedió a tomar lecturas de  $P_c$  para cada una de estas combinaciones de parámetros de corte, para cada material y para cada máquina-herramienta, con estas calculamos  $CEe$  para cada uno de ellos y medimos  $Ra$  resultante. Los resultados se muestran a continuación:

<b>TRM</b>	<b><math>P_c</math></b>	<b>CEe</b>	<b>Ra</b>
1.109	1,338	1,206.49	0.51
1.524	1,337	877.29	0.45
1.94	1,332	686.59	0.51
1.975	1,320	668.35	0.55
2.218	1,328	598.73	0.49
3.049	1,338	438.83	0.46
3.326	1,317	395.97	0.45
3.88	1,337	344.58	0.28
4.331	1,391	321.17	0.31
4.573	1,292	282.52	0.32
5.821	1,370	235.35	0.26

**Tabla 23** – Resultados de muestras para análisis de regresión  $CEe$  vs  $Ra$  (Aluminio en CNC).

(Elaboración propia)

<b>TRM</b>	<b>P<sub>c</sub></b>	<b>CEe</b>	<b>Ra</b>
1.109	1,385.25	1,249.09	0.82
1.524	1,412.25	926.67	0.68
1.94	1,425	734.53	0.71
1.975	1,397	707.34	0.67
2.218	1,484	669.07	0.76
3.049	1,546	507.05	0.76
3.326	1,580	475.04	0.66
3.88	1,674	431.44	0.59
4.331	1,762	406.83	0.62
4.573	1,605	350.97	0.65
5.821	1,770	304.07	0.61

**Tabla 24** – Resultados de muestras para análisis de regresión CEE vs Ra (acero P20 en CNC).

(Elaboración propia)

Se procedió a realizar el análisis de regresión en software Minitab con los datos anteriores, los resultados se muestran a continuación:

**CE<sub>e</sub> VS R<sub>a</sub> - Máquina CNC Hass VF-1 con aluminio:**

**Resumen del modelo**

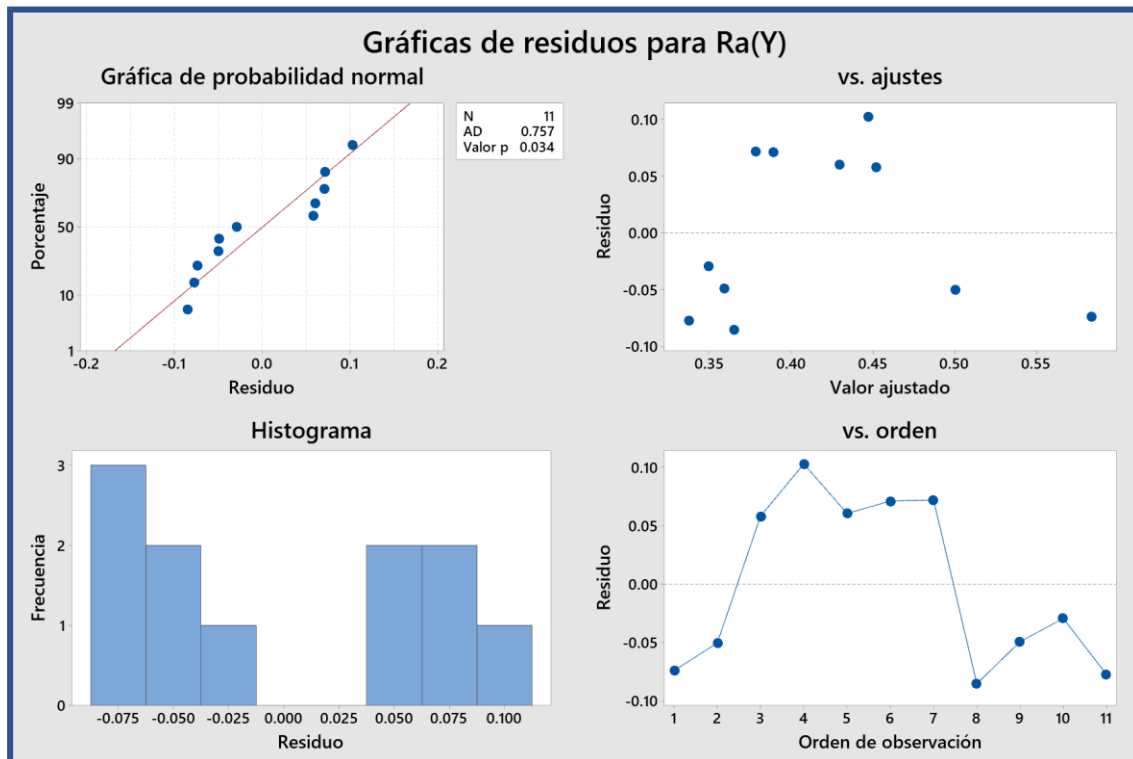
S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.0762081	51.88%	46.53%	13.33%

**Ecuación de regresión**

$$Ra(Y) = 0.2775 + 0.000254 CE_e(X)$$

**Análisis de Varianza**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	1	0.05635	0.056349	9.70	0.012
CE <sub>e</sub> (X)	1	0.05635	0.056349	9.70	0.012
Error	9	0.05227	0.005808		
Total	10	0.10862			



*Figuras 68,69 y 70 – Resultados análisis de regresión lineal de R<sub>a</sub> vs CE<sub>e</sub> para la CNC Hass VF-*

*1 en aluminio (Elaboración propia)*

- Como podemos observar, por el resumen del modelo tenemos un coeficiente de determinación  $R^2 = 51.88\%$  y un  $R^2$  ajustado =  $46.53\%$  , es indicativo de que solo ese porcentaje en la variación del  $CE_e$  puede ser expresada por la relación con  $R_a$ , esto indica que la regresión lineal no es válida para este modelo ya que no explica un porcentaje aceptable de la variación.
- El valor  $P = 0.012$  del análisis de varianza resulta menor al nivel de significancia de  $0.05$ , por lo que rechazamos hipótesis nula y concluimos que sí existe una relación entre las variables de  $CE_e$  y  $R_a$  para este material.
- Por otra parte, en la prueba de normalidad, con un valor de Anderson Darling (AD) igual a  $0.757$  y un valor de  $P$  igual a  $0.034$  (menor a  $0.05$ ) por lo que rechazamos la hipótesis nula y decimos que los datos no persiguen una distribución normal.
- El gráfico de orden de observación contra residuo nos muestra algún patrón visible.

**CEe VS Ra - Máquina CNC Hass VF-1 con acero P20:**

**Resumen del modelo**

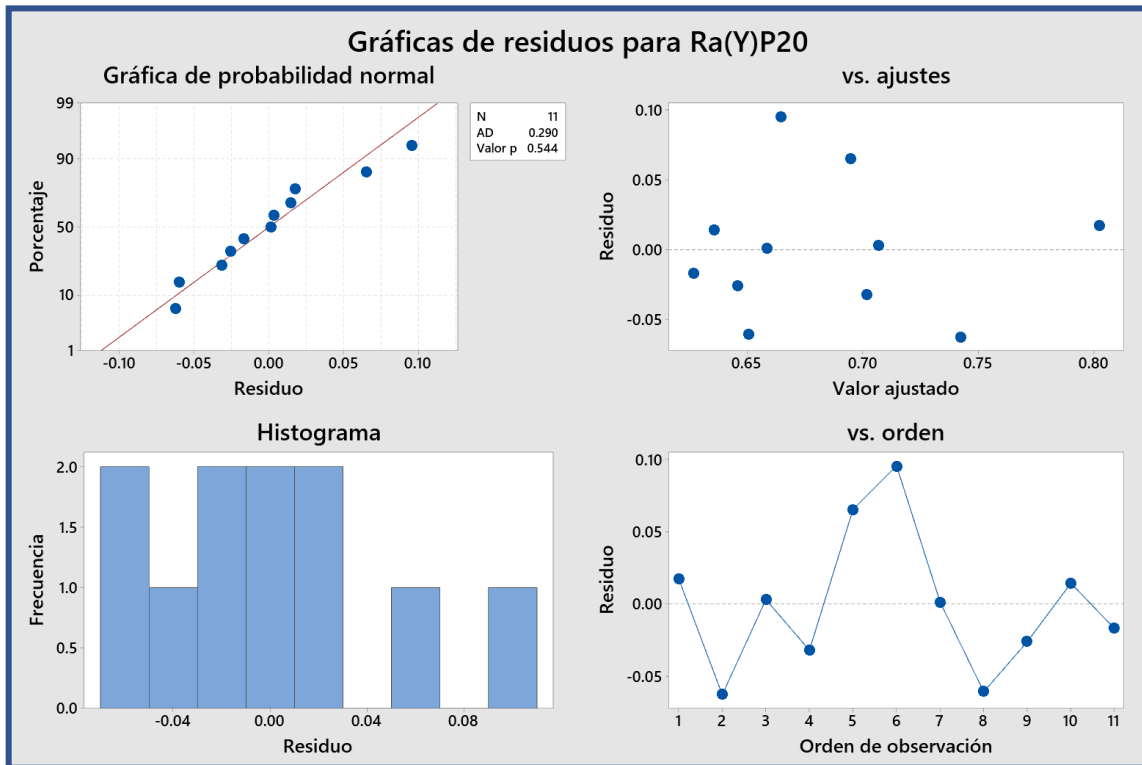
S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.0510383	54.10%	49.00%	36.20%

**Ecuación de regresión**

$$Ra(Y)P20 = 0.5703 + 0.000186 CEE (X)p20$$

**Análisis de Varianza**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	1	0.02763	0.027629	10.61	0.010
CEe (X)p20	1	0.02763	0.027629	10.61	0.010
Error	9	0.02344	0.002605		
Total	10	0.05107			



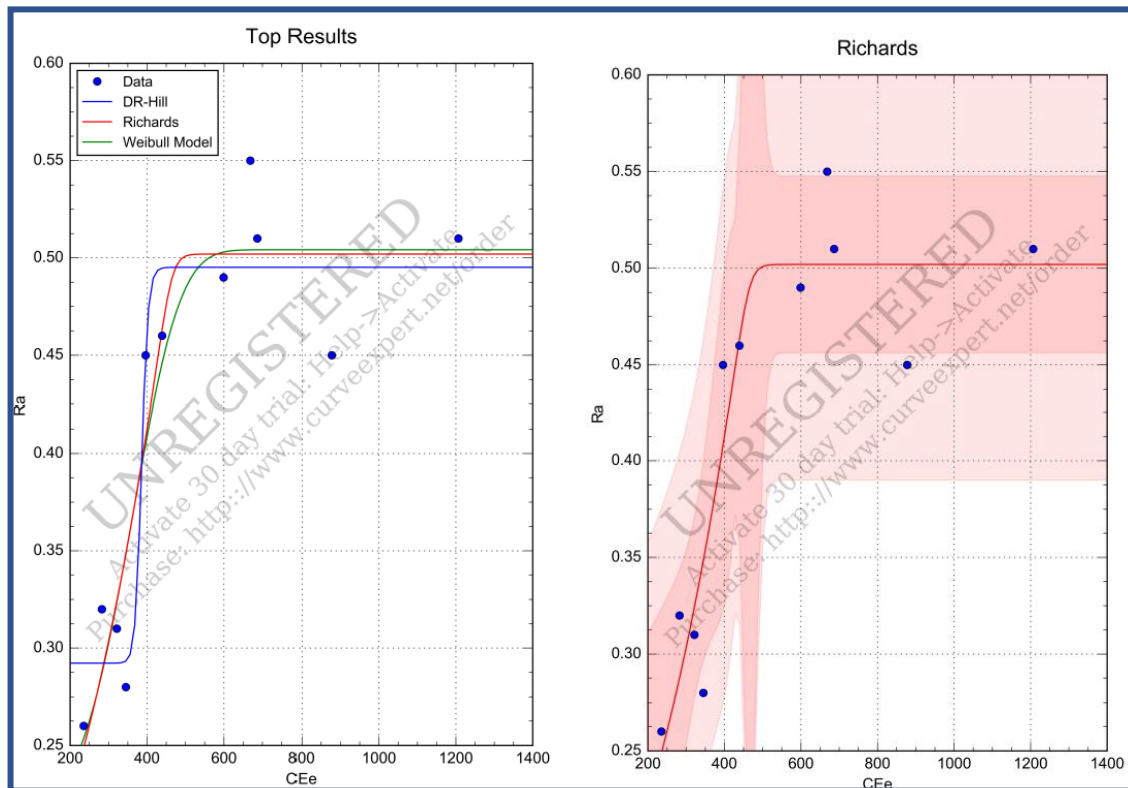
*Figura 71,72 y 73 – Resultados análisis de regresión lineal de Ra vs CEE para la CNC Hass VF-1 en acero p20 (Elaboración propia)*

- Para el acero P20, vemos que con un coeficiente de determinación “ $R^2$ ” igual a 54.10%, y un  $R^2$  ajustado igual a 49%, son indicativos de que ese porcentaje en la variación del  $CE_e$  puede ser expresada por la relación con  $R_a$ . Nuevamente observamos que el modelo no se ajusta a los datos.
- El valor P del análisis de varianza de 0.01 resulta menor al nivel de significancia de 0.05, por lo que rechazamos hipótesis nula y concluimos que si existe una relación igualmente entre las variables.
- En la prueba de normalidad, con un valor de Anderson Darling (AD) igual a 0.290 y un valor de P igual a 0.544 (mayor a 0.05) indicamos que no podemos rechazar hipótesis nula y decimos que los datos siguen una distribución normal.
- El gráfico de orden de observación contra residuo nos indica patrones visibles.

Hasta este punto, al observar principalmente que ninguno de los modelos se ajusta a los datos recabados, procedemos a realizar un análisis a mayor profundidad, en este caso para un análisis de datos no lineales, este análisis es realizado en software en versión de prueba Curve Expert.

Ingresamos los datos para el análisis y lo corremos para regresión no lineal, de manera que el software nos arroje los modelos más adecuados en ambos casos. A continuación, se exponen los resultados obtenidos.

## CE<sub>e</sub> VS Ra - Máquina CNC Hass VF-1 con aluminio:



Richards
Kind: Regression
Family: Sigmoidal Models
Equation: $a/(1 + \exp(b-c*x))^{(1/d)}$
a = 5.019679E-01
b = 3.705780E+01
c = 7.992516E-02
d = 2.599387E+01
Standard Error: 4.32417548506591E-02
Coefficient of Determination (r <sup>2</sup> ): 8.79495814431314E-01
Correlation Coefficient (r): 9.37814381650929E-01
Number of iterations: 13
Status: OK

**Figura 74,75 y 76** – Resultados análisis de regresión no lineal de Ra vs CE<sub>e</sub> para la CNC Hass VF-1 en aluminio. (Elaboración propia)

Los resultados nos indican como 3 posibles modelos que se ajustan a nuestros datos:

- Regresión por dosis-respuesta de Hill
- Regresión de Richards
- Regresión Weibull

Se decide optar por el modelo de Richards con un  $R^2$  igual a 0.87% y  $R^2$  ajustado igual a 0.93%, con lo que podemos determinar que este modelo se ajusta a nuestros datos correspondientes y pueden explicarlo.

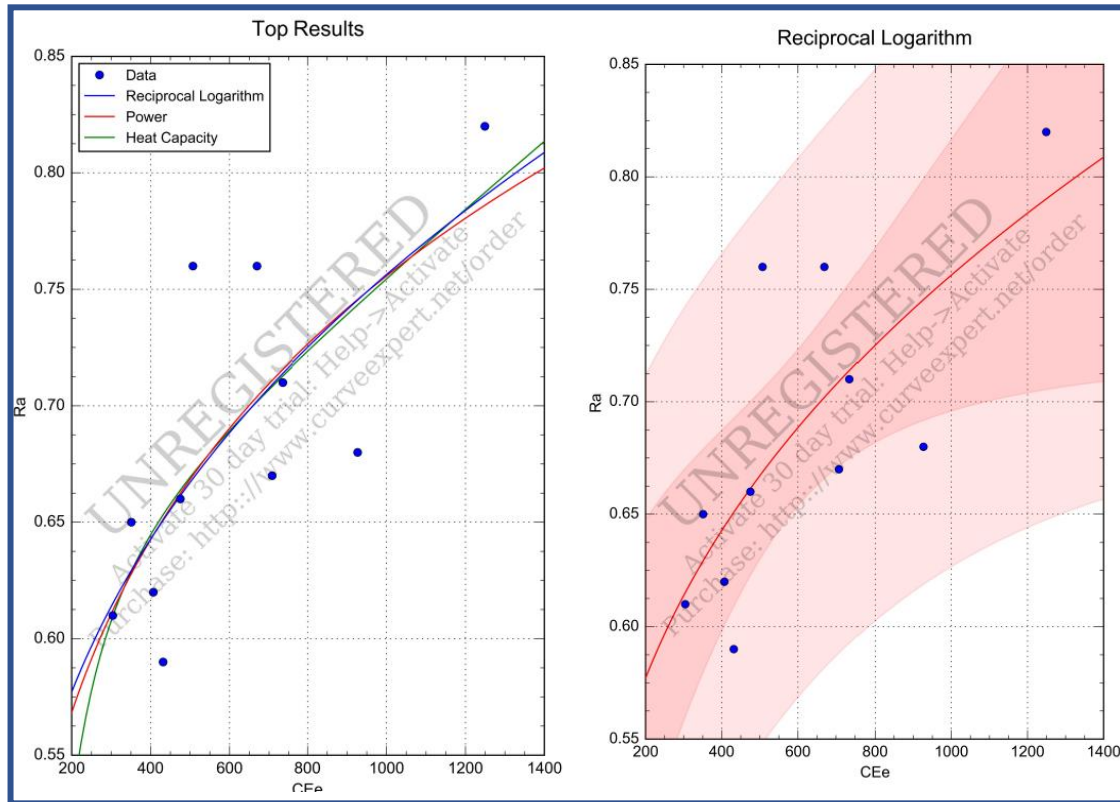
$$y = \frac{a}{(1 + e^{b - cx})^{1/d}}$$

**Figura 77** – Ecuación de regresión de Richards para  $R_a$  VS  $CE_e$  en AL (Elaboración propia)

En ese entendido, podemos analizar que, para el aluminio, se muestran dos grupos distintos de datos de  $R_a$ , los que muestran un menor valor de rugosidad se encuentran también en los menores valores de consumo específico de energía (valores altos de TRM).

Procedemos a realizar el análisis de regresión no lineal para  $CE_e$  y  $R_a$  con el acero P20

## CE<sub>e</sub> VS R<sub>a</sub> - Máquina CNC Hass VF-1 con acero P20:



Reciprocal Logarithm	
Kind:	Regression
Family:	Exponential Models
Equation:	$1/(a + b \cdot \ln(x))$
a =	3.083426E+00
b =	-2.549564E-01
Standard Error:	5.07234963860696E-02
Coefficient of Determination (r <sup>2</sup> ):	5.46610118410228E-01
Correlation Coefficient (r):	7.39330858554023E-01
Number of iterations:	4
Status:	OK

**Figura 78,79 y 80** – Resultados análisis de regresión no lineal de R<sub>a</sub> vs CE<sub>e</sub> en acero p20.  
(Elaboración propia)

Se decide optar por el modelo Logarítmico recíproco con un R<sup>2</sup> igual a 0.54% y R<sup>2</sup> ajustado igual a 0.74%, siendo este el modelo que más se acercaría en la explicación de los datos, sin embargo, aún sigue siendo valores muy bajos, por lo que no explican la variabilidad en el CE<sub>e</sub> para Ra.

$$y = \frac{1}{a + b \ln(x)}$$

**Figura 81** – Ecuación de regresión de logaritmo recíproco para  $R_a$  VS  $CE_e$  en Acero.  
(Elaboración propia)

Con esta información podemos concluir con certeza que para el proceso de corte de estudio existe relación suficiente entre el  $CE_e$  y la  $R_a$  (principalmente en el aluminio que es el material con el que actualmente se ejecuta dicha operación. Para el aluminio en CNC, se muestran dos grupos distintos de datos de  $R_a$ , los datos con un menor valor de rugosidad se encuentran también en los menores valores de consumo específico de energía (valores altos de TRM).

Lo mismo sucede con el acero, podemos ver que conforme disminuye el  $CE_e$  también lo hace la  $R_a$ , para ambos materiales no hay indicios de que la rugosidad disminuya teniendo niveles altos de  $CE_e$  (TRM bajos), por lo que el análisis nos indica que para el desarrollo del diseño experimental, utilicemos valores de parámetros de corte “mayores” a los usados actualmente en el proceso, con el propósito de obtener valores pequeños de  $CE_e$  y por consiguiente reducir  $R_a$  lo más posible dentro del rango de estos parámetros recomendados.

### 3.3.6.2 Prueba t de dos muestras (acero P20 y aluminio)

Con el propósito de poder determinar que exista relación entre el acero y el aluminio procedemos a realizar una prueba t de dos muestras (ambos materiales) con los datos recolectados.

La hipótesis de la prueba sería la siguiente:

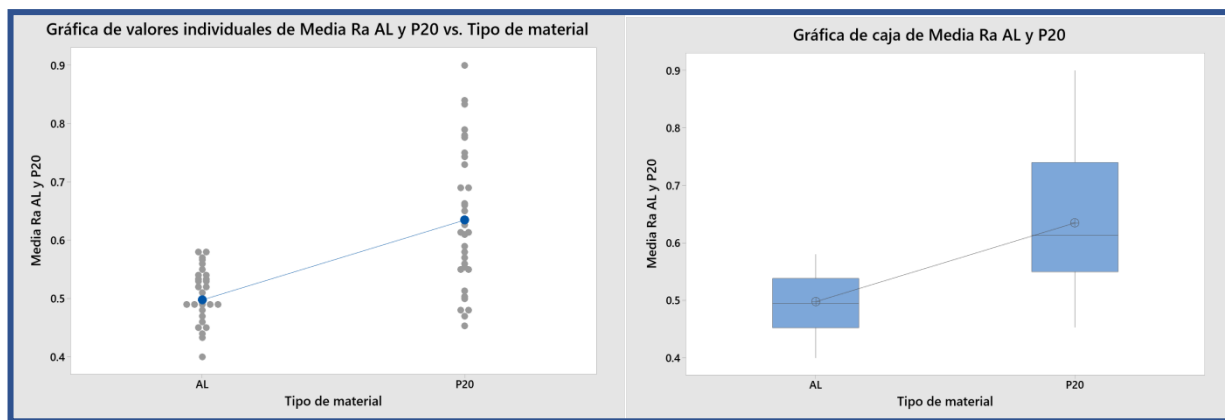
**H0: Las muestras entre el acero y el aluminio son iguales**

# H1: Las muestras entre el acero y el aluminio son diferentes

**P = 0.05**

Los resultados se presentan a continuación:

Prueba		
Hipótesis nula	$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$	
Hipótesis alterna	$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$	
Valor T	GL	Valor p
-5.86	42	0.000



*Figura 82,83 y 84 – Resultados de prueba t de dos muestras para ambos materiales (Elaboración propia)*

- Dado que la prueba t de dos muestras muestra un valor P de 0, procedemos a rechazar hipótesis nula y decimos que **la rugosidad entre los dos materiales es diferente.**
- El gráfico de caja muestra datos asimétricos hacia los valores bajos de nivel de rugosidad, también vemos por este gráfico que la rugosidad media en ambos es diferente

### 3.3.7 Diseño de experimentos

El diseño de experimentos es una herramienta estadística la cual, a través de un conjunto sistemático de experimentos nos permite confirmar si una hipótesis es cierta eliminando aspectos subjetivos de un proceso llamados “factores del diseño” cuando se desconoce el impacto que estos puedan tener sobre el objeto de estudio o de otra manera, verificar si estos factores son significativos o no para la respuesta que deseamos obtener, a esta se le conoce como nuestra variable de respuesta (Ys) del experimento.

*“El diseño de experimentos es la aplicación del método científico para generar conocimiento acerca de un sistema o proceso, por medio de pruebas planeadas adecuadamente”* (Humberto Gutiérrez Pulido, 2012).

Para que el diseño de experimentos sea exitoso se requiere trabajar en las siguientes etapas:

- Definición del problema
- Selección de la variable de respuesta (Ys)
- Selección de factores, niveles y rangos
- Selección del tipo de diseño experimental y del tamaño de muestra
- Realización del experimento.
- Obtención de resultados y optimización.

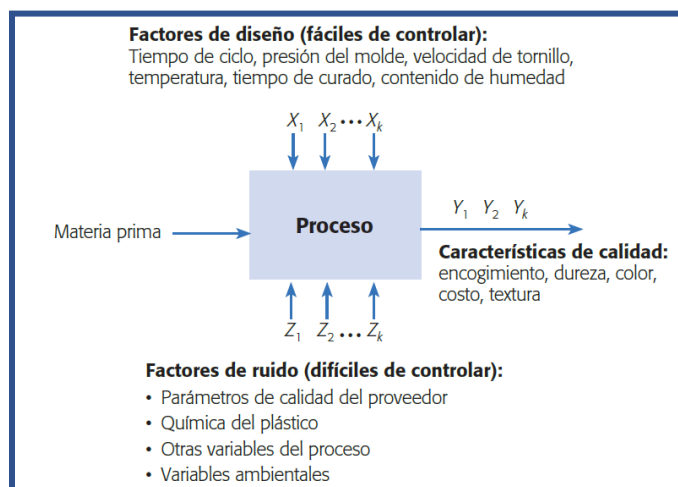
Un diseño de experimentos debe contener los factores que contribuyan al cambio en la variable que se desee analizar, estos factores comúnmente se dividen en “factores de diseño” y “factores de ruido”, los primeros son aquellos en los que se tiene la posibilidad de modificar para cada

prueba, generalmente son factores con variable discreta algunos ejemplos son presión, temperatura, velocidad etc.

Estos factores se deben de ajustar a los diferentes niveles los cuales se deseen incluir en el experimento y que sabemos de antemano que son determinantes a nuestra variable de respuesta, ejemplo nivel de velocidad 1, 2 o 3 etc.

Los factores de ruido son aquellos factores que no se pueden controlar, ya que dependen de variables fuera del alcance del objeto de estudio, sin embargo, estos factores sí que afectan al resultado de nuestra respuesta, algunos ejemplos de estos factores pueden ser, humedad relativa en el ambiente, temperatura ambiental etc.

A continuación, se muestra el esquema de un diseño experimental para el proceso de fabricación de un envase de plástico.



**Figura 85** – Factores y variables para el diseño de experimentos en la fabricación de un envase de plástico. (Humberto Gutiérrez Pulido, 2012).

Consideramos que el diseño de experimentos es la herramienta de calidad y estadística adecuada para analizar E y la  $R_a$  como indicador particular de calidad del terminado del proceso a partir de las pruebas realizadas en cada máquina teniendo como factores controlables el material de la pieza a procesar, velocidad de avance del herramienta de corte y profundidad de corte del herramienta para la máquina-herramienta.

Esta herramienta nos permite tomar en cuenta aquellos factores de ruido que no siempre son controlables en cuanto al consumo energético de este tipo de máquinas sobre todo en una máquina CNC, estos factores serán explicados a detalle más adelante.

### **3.3.7.1 Diseño factorial completo**

El objetivo de un diseño factorial es estudiar el efecto individual y de interacción de varios factores sobre una o varias respuestas, cuando se tiene el mismo interés sobre todos los factores. Uno de los objetivos principales más importantes del diseño factorial es justamente el que atenderemos para este trabajo de investigación que es determinar una combinación de niveles de los factores en la que el desempeño del proceso sea mejor.

Los valores de los factores pueden ser:

**Cualitativo:** Sus niveles toman valores discretos o de tipo nominal (máquinas, tipos de material, operador, la presencia o ausencia de una operación previa, etc.).

**Cuantitativo:** Sus niveles de prueba pueden tomar cualquier valor dentro de cierto intervalo. La escala es continua, (temperatura, humedad, velocidad, presión, etc.).

La familia de diseños factoriales  $2^k$  consiste en  $k$  factores, todos con dos niveles de prueba. La matriz de arreglo factorial es el conjunto de puntos experimentales o tratamientos que pueden formarse considerando todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores. Por ejemplo, con  $k = 2$  factores, ambos con dos niveles se formará el diseño factorial  $2 \times 2 = 2^2$ , que consiste en cuatro combinaciones o puntos experimentales.

### 3.3.7.2 Efectos principales y de interacción

En un experimento factorial completo el efecto principal de un factor viene definido como el cambio en la variable de salida o respuesta producido cuando los niveles del factor cambian.

En particular, los efectos principales son los cambios en la media de la variable de respuesta que se deben a la acción individual de cada factor, por lo tanto, el efecto principal de un factor con dos niveles es la diferencia entre la respuesta media observada cuando tal factor estuvo en su primer nivel, y la respuesta media observada cuando el factor estuvo en su segundo nivel.

Por otra parte, se dice que dos factores interactúan entre sí o tienen un efecto de interacción sobre la variable de respuesta, cuando el efecto de un factor depende del nivel que se encuentra el otro.

El modelo estadístico de efectos para el diseño factorial de  $2^2$  está dado por:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk};$$
$$i = 1, 2, \dots, a; j = 1, 2, \dots, b; k = 1, 2, \dots, n$$

**Figura 86** – Factores y variables para el diseño de experimentos en la fabricación de un envase de plástico. (Humberto Gutiérrez Pulido, 2012).

Donde  $\mu$  es la media general de los datos,  $\alpha_i$  es el efecto debido al  $i$ -ésimo nivel del factor A,  $\beta_j$  es el efecto debido al  $j$ -ésimo nivel del factor B,  $(\alpha\beta)_{ij}$  representa el efecto de la interacción en la combinación “ $ij$ ”, y  $\epsilon_{ijk}$  es el error aleatorio que se supone sigue una distribución normal con media de cero y varianza constante  $\sigma^2$  ( $N(0, \sigma^2)$ ) y son independientes entre sí.

### 3.3.7.3 Desarrollo del diseño factorial

En base a la metodología del diseño factorial  $2^3$  visto hace un momento, procedemos a ejecutar el diseño factorial, para ello utilizamos el método de los 11 pasos, los cuales se describen a continuación:

- **Paso 1 – Definición del problema y el objetivo. selección de variables de respuesta.**

Definimos como la problemática que nuestra variable “E” que es el consumo de energía por día debida al proceso, se considera excesivo en el proceso de corte, por lo tanto, como objetivo se desea optimizar esta variable sin disminuir la característica de calidad del proceso  $R_a$  la cual al menos debe mantenerse al mejorar nuestros parámetros de entrada para el corte, por lo tanto, ambas (E y  $R_a$ ) serían las variables que deseamos optimizar con nuestro diseño de experimentos.

Recordemos que “E” conlleva el tamaño de la pieza a maquinar, el cual es diferente entre cada material de pieza (101.8 mm vs 88.9 mm), esto hace que existan diferentes TP`s para cada material, esta es la principal razón por la que se decide incluir a “E” como variable de respuesta en el diseño en lugar de  $CE_e$  o  $E_e$ . Mejorar la tasa de producción diaria es también un elemento para tomar en cuenta en los resultados finales del DOE.

definimos pues  $R_a$  y E como nuestras variables de respuesta para el experimento.

- **Paso 2 – Enunciar los factores y los niveles de interés.**

Al observar la problemática, se indicó que las variables que interactúan en el C<sub>Ee</sub> y R<sub>a</sub> son aquellas variables que definen un TRM específico las cuales son nuestras variables de control en nuestro proceso, V<sub>f</sub>, a<sub>p</sub> y el tipo de material de la pieza a maquinar, por lo cual estas variables se consideraron nuestros factores para nuestro experimento.

Los niveles para los factores fueron dos, (nivel alto y nivel bajo), los cuales sus características serán cuantitativas para V<sub>f</sub> y a<sub>p</sub> y cualitativos para el tipo de material de la pieza a maquinar.

La selección de los niveles de nuestros factores fue de acuerdo con las características recomendadas para dicho proceso de maquinado, así como con lo observado en el análisis de regresión anterior, donde vemos que la tendencia de la R<sub>a</sub> es de ser menor con menores niveles de C<sub>Ee</sub> (es decir mayores valores de parámetros de corte) de manera que exija un amplio rango de respuesta y el experimento permita obtener valores que alcancen a lograr los valores objetivo-deseados.

Los parámetros elegidos son entonces 42.24 (que es el valor actual con el que se realiza el proceso) y 56.76 mm/min para la velocidad de avance, 0.05 y 0.1 mm para la profundidad del corte y aluminio y acero en sus niveles bajo y alto para el material de la pieza de trabajo respectivamente.

Entonces definimos que deberemos realizar un diseño factorial completo 2<sup>3</sup>, siendo 3 factores por 2 niveles cada uno.

En la siguiente tabla se muestra el orden de factores y niveles de interés.

Niveles	Vf (mm/min)	ap (mm)	Material pieza de trabajo	R <sub>a</sub>	E
1	42.24	0.05	AL		
2	56.76	0.10	P20		

**Tabla 25** – Niveles, factores y respuestas a analizar. (Elaboración propia)

- **Paso 3 – Seleccionar el tamaño de muestra adecuado**

Para que la muestra sea representativa, debemos escoger un tamaño de muestra adecuado para el diseño (cantidad de replicas), claramente esto también incluye si se desea tener bloques o no en el diseño de experimentos, y si se desea analizar tratamientos para puntos centrales.

La estructura del diseño experimental para un diseño factorial  $2^3$  se muestra a continuación:

Total	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
(1)	-	-	-	+	+	+	-
a	+	-	-	-	-	+	+
b	-	+	-	-	+	-	+
ab	+	+	-	+	-	-	-
c	-	-	+	+	-	-	+
ac	+	-	+	-	+	-	-
bc	-	+	+	-	-	+	-
abc	+	+	+	+	+	+	+

**Tabla 26** – Tabla de signos del diseño factorial  $2^3$ . (Elaboración propia)

En la fila en azul podemos ver los efectos principales (A, B y C) y los efectos de interacción (AB, AC, BC y ABC), si se realizan “n” replicas para de cada tratamiento, los efectos de un diseño  $2^3$  se estiman dividiendo los contrastes entre “4n”, por ejemplo, el efecto Ase estimaría de la siguiente manera:

$$\text{Efecto A} = \frac{\text{Contraste A}}{n2^{k-1}} = \frac{1}{n2^2} = \frac{1}{4n}$$

Para la estimación del resultado de las interacciones nos basamos entonces en los signos como se muestra a continuación:

$$AB = \frac{1}{4n} [(1) + ab + c + abc - a - b - ac - bc]$$

$$AC = \frac{1}{4n} [(1) + b + ac + abc - a - c - ab - bc]$$

$$BC = \frac{1}{4n} [(1) + a + bc + abc - b - c - ab - ac]$$

$$ABC = \frac{1}{4n} [a + b + c + abc - (1) - ab - ac - bc]$$

Las sumas de los cuadrados de los efectos se calcularían a partir de sus contrastes con la formula:

$$Sc_{efecto} = \frac{(\text{Contraste}_{efecto})^2}{n2^k} = \frac{1^2}{8n} = \frac{1}{8n}$$

Por lo tanto, la sumatoria de cuadrados nos quedaría de la siguiente manera:

$$SS_A = \frac{1}{8n} [a + ab + ac + abc - b - c - bc - (1)]^2$$

$$SS_B = \frac{1}{8n} [b + ab + bc + abc - a - c - ac - (1)]^2$$

$$SS_C = \frac{1}{8n} [c + ac + bc + abc - a - b - ab - (1)]^2$$

Los diseños OFAT (one factor at time) son diseños que no contemplan una comparación entre los resultados de cada tratamiento con un criterio estadístico además que no se estudia el efecto simultaneo de los factores (no se estudia la interacción), por lo cual generalmente se gastan muchos recursos y se obtiene poca información esto hace que no exista garantía de que la solución propuesta sea la mejor. Esta es la razón por la cual no se escoge esta metodología.

A continuación, se mencionan las ventajas de los experimentos factoriales completos:

- Son más eficientes que los experimentos uno a la vez (OFAT) (one-factor-at-a-time).
- Permite la investigación de los efectos combinados de las interacciones.
- Abarca una región experimental más amplia que los estudios OFAT
- Identificar los factores críticos (entradas).
- Son más eficientes para estimar los efectos de las variables de entrada y ruido en el resultado.

Los puntos centrales en un diseño factorial ayudan a detectar si existe curvatura en nuestra respuesta (ya sea en  $E$  o  $R_a$ ), es recomendable agregar al menos 1 punto central al diseño lo que dará un total de 2 corridas adicionales (1 por cada variable de respuesta categórica).

Los bloques en un diseño factorial, representan las diferencias que puede ocurrir entre corridas que se realizan en diferentes condiciones, dado que por las características del proceso no se tienen inconvenientes en obtener la totalidad de las corridas experimentales, además, el diseño experimental se realiza exactamente igual para ambas máquinas-herramienta (mismas herramientas de corte y parámetros de corte), no se incluyen bloques en el diseño.

Entonces, de acuerdo con lo anterior, nuestro diseño factorial sería un diseño de 3 factores con 2 niveles cada uno, por lo cual es  $2^3 = 2 \times 2 \times 2 = 8$  tratamientos y se decide realizar cuatro replicas, teniendo un total de 32 corridas, pero como agregamos 1 punto central por cada material, el número total de corridas queda en 34.

Nuestro arreglo factorial quedaría de la siguiente manera:

OrdenEst	OrdenCorrida	PtCentral	Bloques	Vf	ap	Material
1	8	1	1	42.24	0.05	AL
2	16	1	1	58.08	0.05	AL
3	24	1	1	42.24	0.1	AL
4	21	1	1	58.08	0.1	AL
5	3	1	1	42.24	0.05	P20
6	13	1	1	58.08	0.05	P20
7	35	1	1	42.24	0.1	P20
8	11	1	1	58.08	0.1	P20
9	6	1	1	42.24	0.05	AL
10	22	1	1	58.08	0.05	AL
11	26	1	1	42.24	0.1	AL
12	20	1	1	58.08	0.1	AL
13	15	1	1	42.24	0.05	P20
14	14	1	1	58.08	0.05	P20
15	10	1	1	42.24	0.1	P20
16	34	1	1	58.08	0.1	P20
17	30	1	1	42.24	0.05	AL
18	31	1	1	58.08	0.05	AL
19	32	1	1	42.24	0.1	AL
20	1	1	1	58.08	0.1	AL
21	2	1	1	42.24	0.05	P20
22	5	1	1	58.08	0.05	P20
23	33	1	1	42.24	0.1	P20
24	25	1	1	58.08	0.1	P20
25	27	1	1	42.24	0.05	AL
26	28	1	1	58.08	0.05	AL
27	36	1	1	42.24	0.1	AL
28	9	1	1	58.08	0.1	AL
29	17	1	1	42.24	0.05	P20
30	4	1	1	58.08	0.05	P20
31	18	1	1	42.24	0.1	P20
32	23	1	1	58.08	0.1	P20
33	12	0	1	50.16	0.075	AL
34	29	0	1	50.16	0.075	AL

**Tabla 27** – Arreglo factorial para el diseño de experimentos en CNC. (Elaboración propia)

En la segunda columna de la tabla anterior vemos el “orden de corrida”, como sabemos, una de las características principales de un diseño de experimentos es que las corridas experimentales sean ejecutadas al azar, por lo cual ese orden es en el que las corridas serán ejecutadas.

- **Paso 4 – Crear una hoja en Minitab de datos experimentales con los factores en sus columnas respectivas y colocar las corridas al azar en la hoja de datos.**

OrdenEst	OrdenCorrida	PtCentral	Bloques	Vf	ap	Material
1	1	1	1	42.24	0.050	AL
2	2	1	1	58.08	0.050	AL
3	3	1	1	42.24	0.100	AL
4	4	1	1	58.08	0.100	AL
5	5	1	1	42.24	0.050	P20
6	6	1	1	58.08	0.050	P20
7	7	1	1	42.24	0.100	P20
8	8	1	1	58.08	0.100	P20
9	9	1	1	42.24	0.050	AL
10	10	1	1	58.08	0.050	AL
11	11	1	1	42.24	0.100	AL
12	12	1	1	58.08	0.100	AL
13	13	1	1	42.24	0.050	P20
14	14	1	1	58.08	0.050	P20
15	15	1	1	42.24	0.100	P20
16	16	1	1	58.08	0.100	P20
17	17	1	1	42.24	0.050	AL
18	18	1	1	58.08	0.050	AL
19	19	1	1	42.24	0.100	AL
20	20	1	1	58.08	0.100	AL
21	21	1	1	42.24	0.050	P20
22	22	1	1	58.08	0.050	P20
24	24	1	1	58.08	0.100	P20
25	25	1	1	42.24	0.050	AL
26	26	1	1	58.08	0.050	AL
27	27	1	1	42.24	0.100	AL
28	28	1	1	58.08	0.100	AL
29	29	1	1	42.24	0.050	P20
30	30	1	1	58.08	0.050	P20
31	31	1	1	42.24	0.100	P20
32	32	1	1	58.08	0.100	P20
33	33	0	1	50.16	0.075	AL
34	34	0	1	50.16	0.075	P20

**Tabla 28 – Arreglo factorial en Minitab. (Elaboración propia)**

Resumen del diseño			
Factores:	3	Diseño de la base:	3, 8
Corridas:	34	Réplicas:	4
Bloques:	1	Puntos centrales (total):	2
Todos los términos están libres de estructuras alias.			

**Figura 86 - Resumen del diseño en Minitab. (Elaboración propia)**

- **Paso 5 – Ejecutar el experimento y agregar los resultados al diseño en Minitab.**

Procedemos a ejecutar el experimento y obtener los valores respectivos de E y Ra. La siguiente tabla muestra los datos obtenidos de nuestras variables de respuesta para cada corrida experimental:

OrdenEst	OrdenCorrida	PtCentral	Bloques	Vf	ap	Material	Ra	E
1	8	1	1	42.24	0.05	AL	0.53	11.139
2	16	1	1	58.08	0.05	AL	0.40	9.464
3	24	1	1	42.24	0.1	AL	0.54	10.979
4	21	1	1	58.08	0.1	AL	0.48	9.535
5	3	1	1	42.24	0.05	P20	0.87	10.656
6	13	1	1	58.08	0.05	P20	0.70	9.314
7	35	1	1	42.24	0.1	P20	0.78	11.699
8	11	1	1	58.08	0.1	P20	0.69	10.314
9	6	1	1	42.24	0.05	AL	0.50	11.189
10	22	1	1	58.08	0.05	AL	0.51	9.478
11	26	1	1	42.24	0.1	AL	0.44	11.080
12	20	1	1	58.08	0.1	AL	0.43	9.578
13	15	1	1	42.24	0.05	P20	0.79	10.852
14	14	1	1	58.08	0.05	P20	0.69	9.314
15	10	1	1	42.24	0.1	P20	0.75	11.973
16	34	1	1	58.08	0.1	P20	0.76	10.156
17	30	1	1	42.24	0.05	AL	0.53	11.256
18	31	1	1	58.08	0.05	AL	0.45	9.556
19	32	1	1	42.24	0.1	AL	0.50	11.289
20	1	1	1	58.08	0.1	AL	0.47	9.428
21	2	1	1	42.24	0.05	P20	0.82	10.907
22	5	1	1	58.08	0.05	P20	0.68	9.261
23	33	1	1	42.24	0.1	P20	0.83	11.087
24	25	1	1	58.08	0.1	P20	0.80	10.084
25	27	1	1	42.24	0.05	AL	0.49	11.239
26	28	1	1	58.08	0.05	AL	0.43	9.499
27	36	1	1	42.24	0.1	AL	0.47	11.155
28	9	1	1	58.08	0.1	AL	0.46	9.492
29	17	1	1	42.24	0.05	P20	0.79	11.032
30	4	1	1	58.08	0.05	P20	0.65	9.294
31	18	1	1	42.24	0.1	P20	0.69	11.785
32	23	1	1	58.08	0.1	P20	0.78	10.170
33	12	0	1	50.16	0.075	AL	0.55	10.148
34	29	0	1	50.16	0.075	AL	0.52	10.482

*Tabla 29 - Resumen del diseño en Minitab. (Elaboración propia)*

Procedemos a introducir los datos obtenidos en Minitab en columnas separadas para Ra y E:

OrdenEst	OrdenCorrida	PtCentral	Bloques	Vf	ap	Material	Ra	E
4	4	1	1	58.08	0.100	AL	0.48	9.535
5	5	1	1	42.24	0.050	P20	0.87	10.656
6	6	1	1	58.08	0.050	P20	0.70	9.314
7	7	1	1	42.24	0.100	P20	0.78	11.699
8	8	1	1	58.08	0.100	P20	0.69	10.314
9	9	1	1	42.24	0.050	AL	0.50	11.189
10	10	1	1	58.08	0.050	AL	0.51	9.478
11	11	1	1	42.24	0.100	AL	0.44	11.080
12	12	1	1	58.08	0.100	AL	0.43	9.578
13	13	1	1	42.24	0.050	P20	0.79	10.852
14	14	1	1	58.08	0.050	P20	0.69	9.314
15	15	1	1	42.24	0.100	P20	0.75	11.973
16	16	1	1	58.08	0.100	P20	0.76	10.156
17	17	1	1	42.24	0.050	AL	0.53	11.256
18	18	1	1	58.08	0.050	AL	0.45	9.556
19	19	1	1	42.24	0.100	AL	0.50	11.289
20	20	1	1	58.08	0.100	AL	0.47	9.428
21	21	1	1	42.24	0.050	P20	0.82	10.907
22	22	1	1	58.08	0.050	P20	0.68	9.261
24	24	1	1	58.08	0.100	P20	0.80	10.084
25	25	1	1	42.24	0.050	AL	0.49	11.239
26	26	1	1	58.08	0.050	AL	0.43	9.499
27	27	1	1	42.24	0.100	AL	0.47	11.155
28	28	1	1	58.08	0.100	AL	0.46	9.492
29	29	1	1	42.24	0.050	P20	0.79	11.032
30	30	1	1	58.08	0.050	P20	0.65	9.294
31	31	1	1	42.24	0.100	P20	0.69	11.785
32	32	1	1	58.08	0.100	P20	0.78	10.170
33	33	0	1	50.16	0.075	AL	0.55	10.148
34	34	0	1	50.16	0.075	P20	0.78	9.998

*Tabla 30 - Diseño factorial con los datos obtenidos para las respuestas de Ra y E. (Elaboración propia)*

- **Paso 6 – Analizar diseño factorial resultante en Minitab.**

Procedemos a realizar el análisis del diseño factorial, primero lo hacemos para la “E”, el nivel de confianza establecido para todos los intervalos es de 95%, los siguientes fueron los resultados obtenidos para la energía consumida debida al corte.

Coeficientes codificados						
Término	Efecto	Coef	EE del	Valor T	Valor p	FIV
			coef.			
Constante		10.4142	0.0289	360.94	0.000	
Vf	-1.5861	-0.7931	0.0289	-27.49	0.000	1.00
ap	0.3972	0.1986	0.0289	6.88	0.000	1.00
Material	0.1407	0.0704	0.0280	2.51	0.019	1.00
Vf*ap	0.0499	0.0249	0.0289	0.86	0.396	1.00
Vf*Material	0.0757	0.0379	0.0289	1.31	0.201	1.00
ap*Material	0.4326	0.2163	0.0289	7.50	0.000	1.00
Vf*ap*Material	0.0056	0.0028	0.0289	0.10	0.923	1.00
Pt Ctral		-0.341	0.119	-2.87	0.008	1.00

Resumen del modelo			
S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.163216	97.23%	96.34%	94.61%

**Figura 87** - Tabla de coeficientes y resumen del modelo para  $R_a$ . (Elaboración propia)

Observamos que el modelo muestra interacciones no significativas en la velocidad de avance con la profundidad ni esta misma con el material, así tampoco como la interacción triple, estas deberán ser retiradas del diseño para proceder con valores más ajustados al modelo. También observamos que existe curvatura en el modelo ya que el punto central se encuentra en 0.008. es decir es significativo. El resumen del modelo nos indica que el 96.34% de la variabilidad en los datos puede ser representada por el modelo actual.

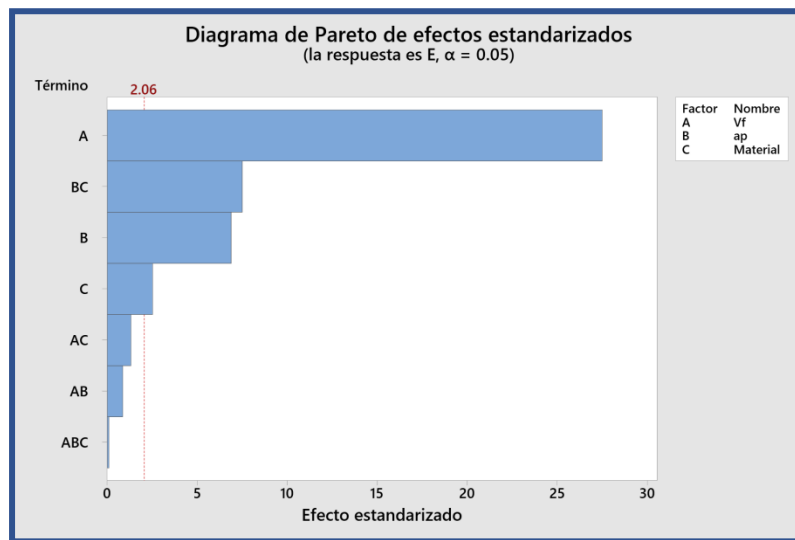
### **Paso 7 – Revisión de tabla ANOVA y reducción del modelo**

Procedemos a revisar la tabla ANOVA y eliminar las interacciones de los efectos no significativos del modelo.

Análisis de Varianza					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	8	23.3391	2.9174	109.51	0.000
Lineal	3	21.5569	7.1856	269.74	0.000
Vf	1	20.1262	20.1262	755.51	0.000
ap	1	1.2624	1.2624	47.39	0.000
Material	1	0.1683	0.1683	6.32	0.019
Interacciones de 2 términos	3	1.5627	0.5209	19.55	0.000
Vf*ap	1	0.0199	0.0199	0.75	0.396
Vf*Material	1	0.0459	0.0459	1.72	0.201
ap*Material	1	1.4970	1.4970	56.19	0.000
Interacciones de 3 términos	1	0.0003	0.0003	0.01	0.923
Vf*ap*Material	1	0.0003	0.0003	0.01	0.923
Curvatura	1	0.2193	0.2193	8.23	0.008
Error	25	0.6660	0.0266		
Falta de ajuste	1	0.0449	0.0449	1.74	0.200
Error puro	24	0.6211	0.0259		
Total	33	24.0051			

**Figura 88** - Tabla ANOVA del análisis factorial antes de limpieza de efectos no significativos.

(Elaboración propia)

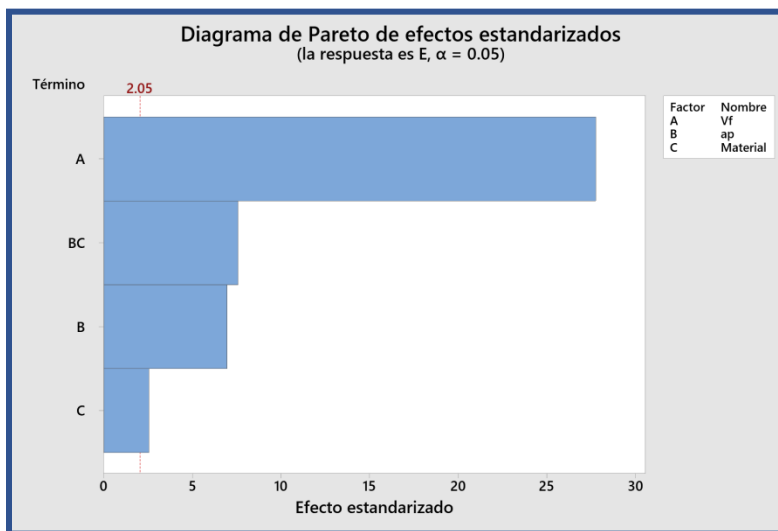


**Figura 89** - Pareto de efectos estandarizados para E, antes de limpieza de efectos no significativos. (Elaboración propia)

Análisis de Varianza					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	5	23.2731	4.6546	178.04	0.000
Lineal	3	21.5569	7.1856	274.86	0.000
Vf	1	20.1262	20.1262	769.85	0.000
ap	1	1.2624	1.2624	48.29	0.000
Material	1	0.1683	0.1683	6.44	0.017
Interacciones de 2 términos	1	1.4970	1.4970	57.26	0.000
ap*Material	1	1.4970	1.4970	57.26	0.000
Curvatura	1	0.2193	0.2193	8.39	0.007
Error	28	0.7320	0.0261		
Falta de ajuste	4	0.1109	0.0277	1.07	0.392
Error puro	24	0.6211	0.0259		
Total	33	24.0051			

**Figura 90** - Tabla ANOVA del análisis factorial después de limpieza de efectos no significativos.

(Elaboración propia)

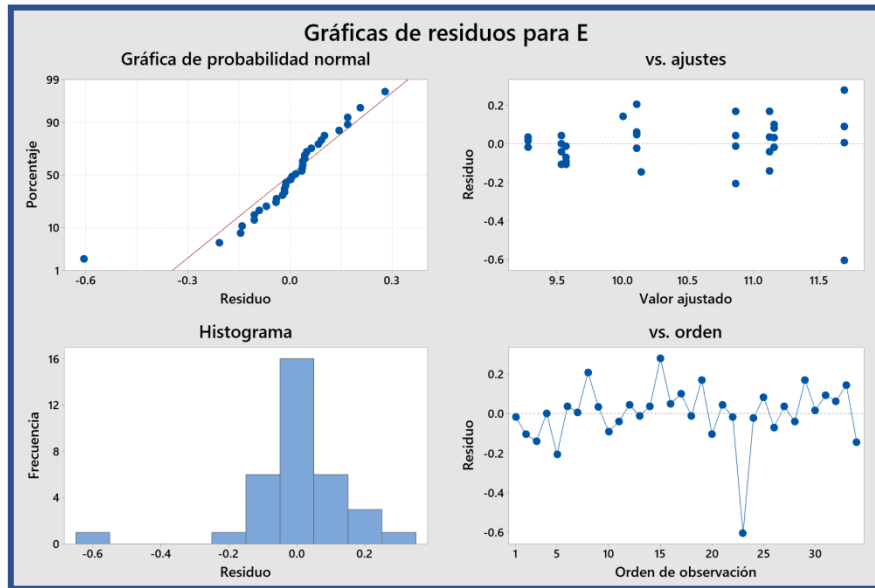


**Figura 91** - Gráfico de efectos estandarizados después de limpieza de efectos no significativos.

(Elaboración propia)

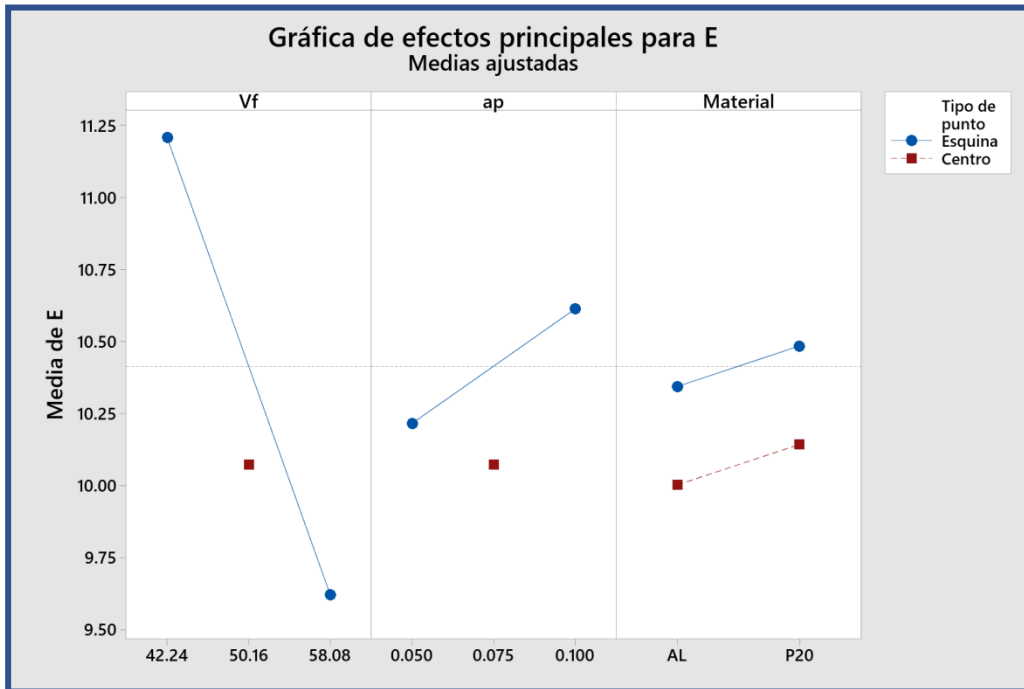
### Paso 8 – Analizar el modelo final

Procedemos a analizar el modelo final, tanto sus residuales, como sus gráficos de factoriales, y el gráfico de cubos respectivo.



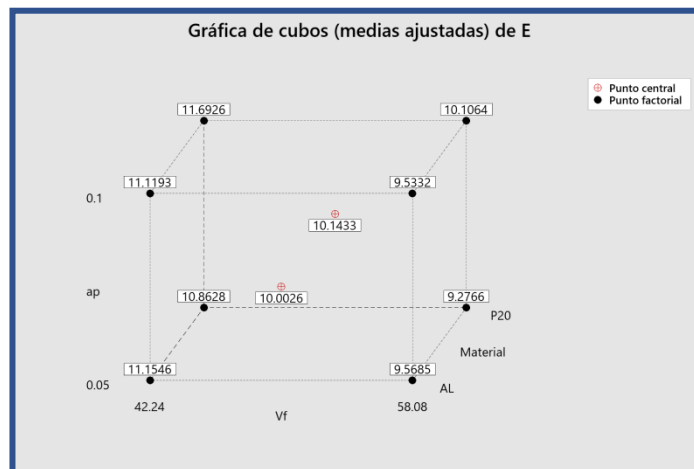
**Figura 92** - Gráfico de residuos para E. (Elaboración propia)

- Por el gráfico de probabilidad normal, vemos que los residuos están distribuidos normalmente.
- Por el gráfico de valor ajustes vs residuo, podemos ver que se tiene una varianza constante ya que se tienen estos distribuidos aleatoriamente y de manera constante a lo largo del valor ajustado y no se reconocen patrones.
- Por el gráfico de residuos vs orden, vemos que no existe un patrón observable por lo cual podemos confirmar que los residuos son independientes entre sí
- Por último, el histograma de residuos nos muestra que los datos son asimétricos, sin embargo, observamos una barra en el residuo -0.6, este es catalogado como un valor atípico y puede ser omitido.



**Figura 93** - Gráfico de efectos principales para E. (Elaboración propia)

Podemos observar por el gráfico de efectos principales que la velocidad de corte es considerablemente el factor que tiene más efecto sobre la energía consumida.



**Figura 94** - Gráfico de cubos de E. (Elaboración propia)

Al tener un valor P de falta de ajuste igual a 0.392, indicamos que no requiere de ningún ajuste adicional y podemos concluir que el modelo se ajusta, y procedemos a la optimización de nuestras respuestas.

- **Paso 9 – Determinar los parámetros óptimos analizando las gráficas de interacciones importantes**

Procedemos a realizar la optimización de respuesta en Minitab, estableciendo como “E” nuestra respuesta a minimizar, establecemos la cantidad de soluciones que necesitamos y observamos los resultados:

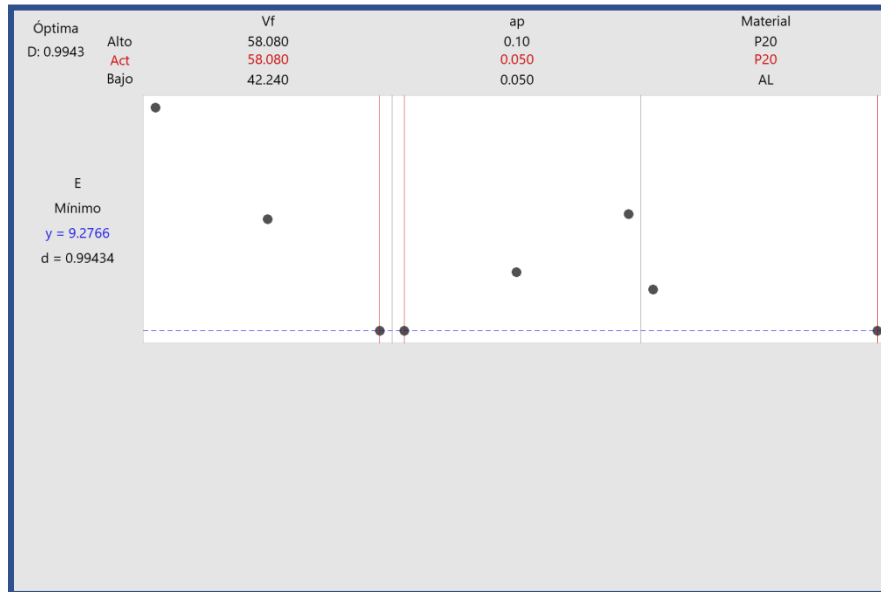
Parámetros						
Respuesta	Meta	Inferior	Objetivo	Superior	Ponderación	Importancia
E	Mínimo		9.26127	11.9732	1	1

Soluciones					
Solución	Vf	ap	Material	E Ajuste	Deseabilidad compuesta
1	58.08	0.050	P20	9.2766	0.994335
2	58.08	0.100	AL	9.5332	0.899743
3	58.08	0.050	AL	9.5685	0.886712
4	50.16	0.075	AL	10.0026	0.726643
5	58.08	0.100	P20	10.1064	0.688350
6	50.16	0.075	P20	10.1433	0.674759
7	42.24	0.050	P20	10.8628	0.409465
8	42.24	0.100	AL	11.1193	0.314873

**Figura 95** - Soluciones de la optimización de respuesta. (Elaboración propia)

Podemos observar que como primera solución nos da Vf = 58.08, ap = 0.05 y Material de la pieza de trabajo = Acero P20 ya que nos estaría dando un valor de 9.26 KWh diarios para el proceso de corte.



**Figura 96** - Soluciones de la optimización de respuesta E. (Elaboración propia)

El **paso 10 y paso 11** del proceso de diseño experimental, se basan en realizar las pruebas piloto pertinentes con los valores objetivo de manera que observemos la respuesta esperada, así como documentar el informe final del diseño experimental y con ello la mejora en el consumo de energía.

Esta prueba piloto será realizada más adelante, ya que ahora analizaremos el diseño factorial para la  $R_a$ . Procedemos a partir del paso 6 como se mostró con el consumo de energía.

- **Paso 6 – Analizar diseño factorial resultante para  $R_a$  en Minitab.**

Procedemos a realizar el análisis del diseño factorial, para la " $R_a$ ", el nivel de confianza establecido para todos los intervalos es de 95%, los siguientes fueron los resultados obtenidos para la energía consumida debida al corte.

Coeficientes codificados						
Término	Efecto	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante		0.61542	0.00696	88.37	0.000	
Vf	-0.05875	-0.02937	0.00696	-4.22	0.000	1.00
ap	0.00333	0.00167	0.00696	0.24	0.813	1.00
Material	0.27490	0.13745	0.00676	20.35	0.000	1.00
Vf*ap	0.04375	0.02188	0.00696	3.14	0.004	1.00
Vf*Material	-0.01292	-0.00646	0.00696	-0.93	0.363	1.00
ap*Material	0.00917	0.00458	0.00696	0.66	0.516	1.00
Vf*ap*Material	0.02375	0.01188	0.00696	1.71	0.101	1.00
Pt Ctral		0.0512	0.0287	1.78	0.086	1.00

Resumen del modelo				
S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)	
0.0393933	94.73%	93.04%	90.35%	

**Figura 97** - Tabla de coeficientes y resumen del modelo para  $R_a$ . (Elaboración propia)

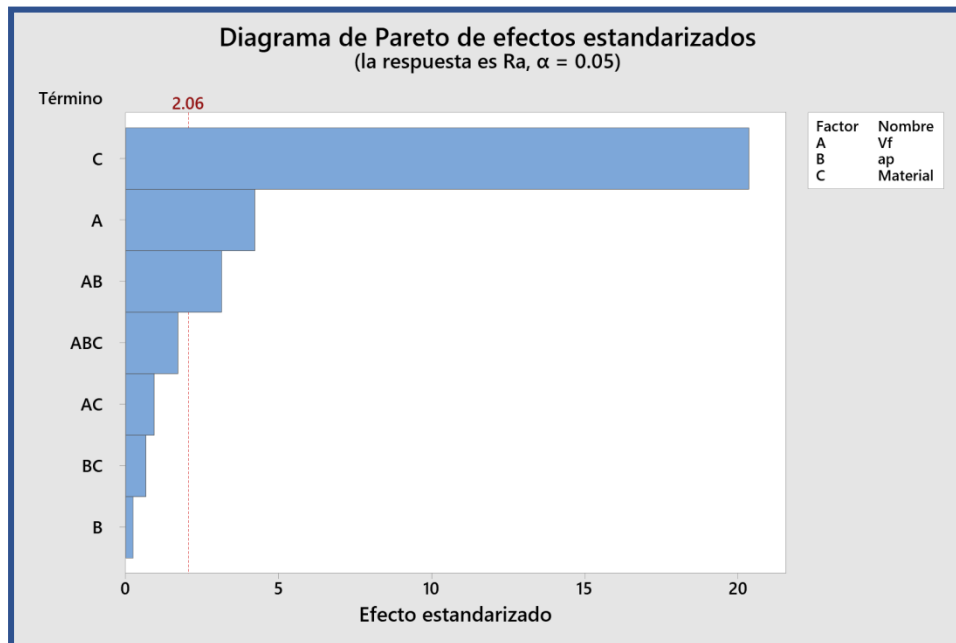
Observamos que las interacciones dobles  $V_f$  y material y ap y material con 0.363 y 0.516 son las de menor significancia para nuestro modelo, por lo cual deben ser retiradas de este. En este caso no observamos curvatura contra ningún factor al tener un valor P de nuestro punto central en 0.086. También la interacción triple deberá ser retirada del modelo con un valor P = 0.101. El punto central en este caso.

### Paso 7 – Revisión de tabla ANOVA y reducción del modelo

Procedemos a revisar la tabla ANOVA y eliminar las interacciones de los efectos no significativos del modelo.

Análisis de Varianza					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	8	0.696832	0.087104	56.13	0.000
Lineal	3	0.670056	0.223352	143.93	0.000
Vf	1	0.027612	0.027612	17.79	0.000
ap	1	0.000089	0.000089	0.06	0.813
Material	1	0.642354	0.642354	413.93	0.000
Interacciones de 2 términos	3	0.017319	0.005773	3.72	0.024
Vf*ap	1	0.015312	0.015312	9.87	0.004
Vf*Material	1	0.001335	0.001335	0.86	0.363
ap*Material	1	0.000672	0.000672	0.43	0.516
Interacciones de 3 términos	1	0.004513	0.004513	2.91	0.101
Vf*ap*Material	1	0.004513	0.004513	2.91	0.101
Curvatura	1	0.004944	0.004944	3.19	0.086
Error	25	0.038796	0.001552		
Falta de ajuste	1	0.000918	0.000918	0.58	0.453
Error puro	24	0.037878	0.001578		
Total	33	0.735627			

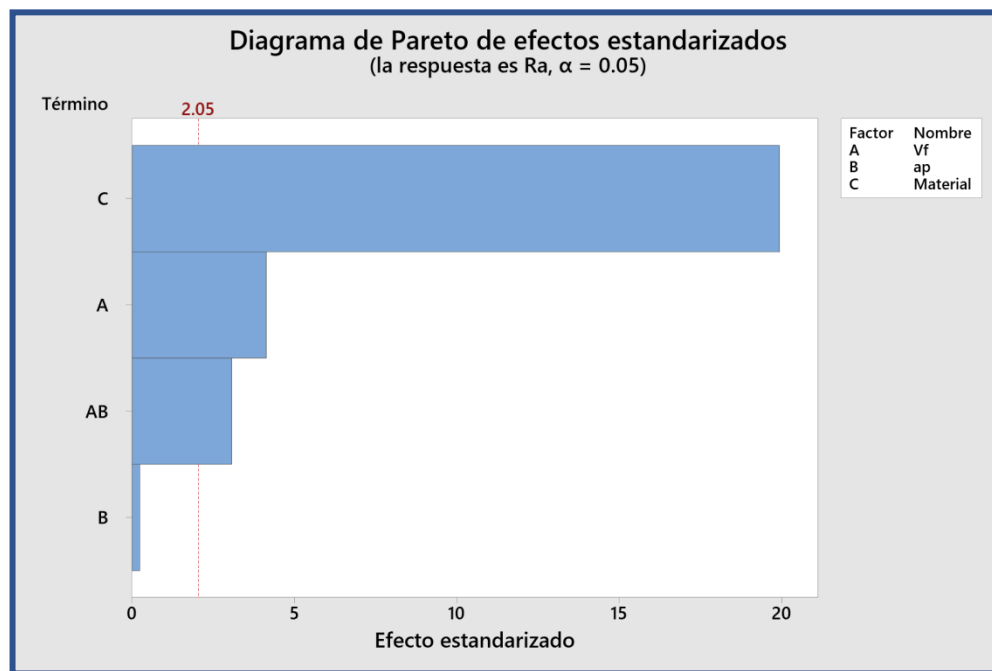
**Figura 98** - Tabla ANOVA del modelo para  $R_a$  antes de eliminación de interacciones no significativas. (Elaboración propia)



**Figura 99** - Pareto de efectos estandarizados para  $R_a$  antes de eliminación de interacciones no significativas. (Elaboración propia)

Análisis de Varianza					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	5	0.690312	0.138062	85.31	0.000
Lineal	3	0.670056	0.223352	138.01	0.000
Vf	1	0.027613	0.027613	17.06	0.000
ap	1	0.000089	0.000089	0.05	0.816
Material	1	0.642354	0.642354	396.91	0.000
Interacciones de 2 términos	1	0.015313	0.015313	9.46	0.005
Vf*ap	1	0.015313	0.015313	9.46	0.005
Curvatura	1	0.004944	0.004944	3.05	0.091
Error	28	0.045315	0.001618		
Falta de ajuste	4	0.007437	0.001859	1.18	0.345
Error puro	24	0.037878	0.001578		
Total	33	0.735627			

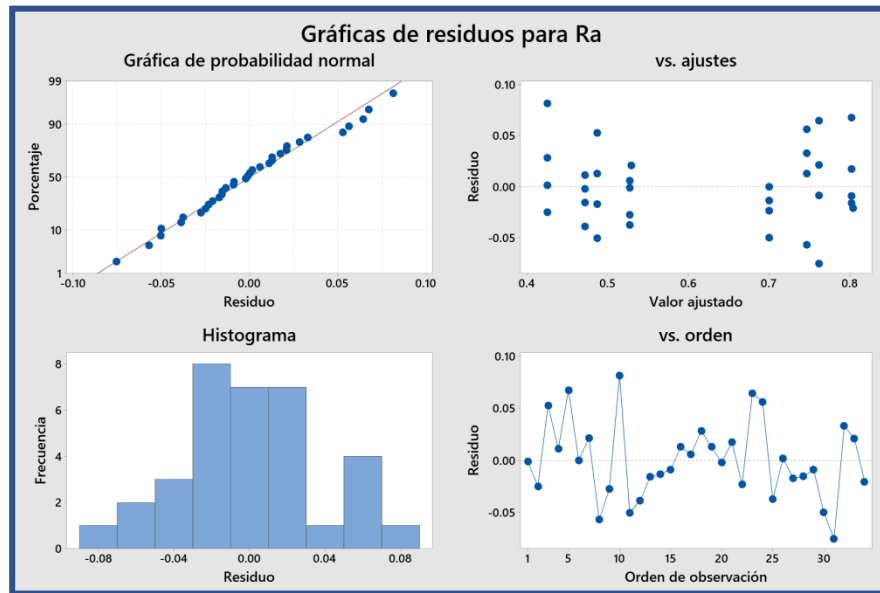
**Figura 100** - Tabla ANOVA del modelo para  $R_a$  después de la eliminación de interacciones no significativas. (Elaboración propia)



**Figura 101** - Pareto de efectos estandarizados para  $R_a$  después de la eliminación de interacciones no significativas. (Elaboración propia)

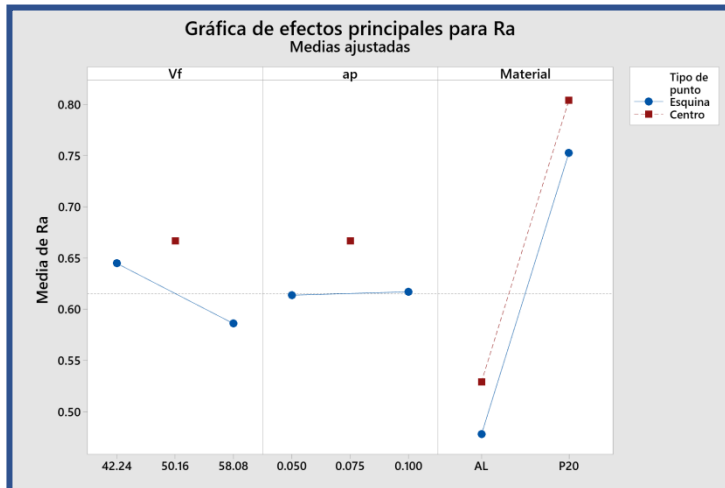
## Paso 8 – Analizar el modelo final

Procedemos a analizar el modelo final, tanto sus residuales, como sus gráficos de factoriales, y el gráfico de cubos respectivo.



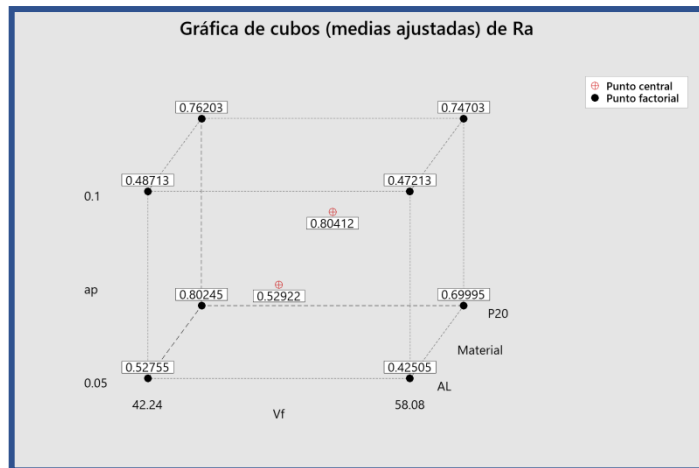
*Figura 102 - Gráfico de residuos para  $R_a$ . (Elaboración propia)*

- Por el gráfico de probabilidad normal, vemos que los residuos están distribuidos normalmente.
- Por el gráfico de ajustes vs residuo, podemos ver que se tiene una varianza constante.
- Por el gráfico de residuos vs orden, vemos que no existe un patrón observable por lo cual podemos confirmar que los residuos son independientes entre sí.
- Por último, el histograma de residuos nos muestra que los datos son asimétricos.



**Figura 103** - Gráfica de efectos principales para  $R_a$ . (Elaboración propia)

Podemos observar por el gráfico de efectos principales que, para la rugosidad, el material de la pieza es significativamente el factor que más significancia tiene, la profundidad por el contrario es indistinta para la rugosidad.



**Figura 104** - Gráfica de cubos para  $R_a$ . (Elaboración propia)

Al tener un valor P de falta de ajuste igual a 0.345, indicamos que no requiere de ningún ajuste adicional y podemos concluir que el modelo se ajusta, y procedemos a la optimización de nuestras respuestas.

- **Paso 9 – Determinar los parámetros óptimos analizando las gráficas de interacciones importantes**

Procedemos a realizar la optimización de respuesta en Minitab, estableciendo como  $R_a$  nuestra respuesta a minimizar, establecemos la cantidad de soluciones que deseamos y observamos los resultados:

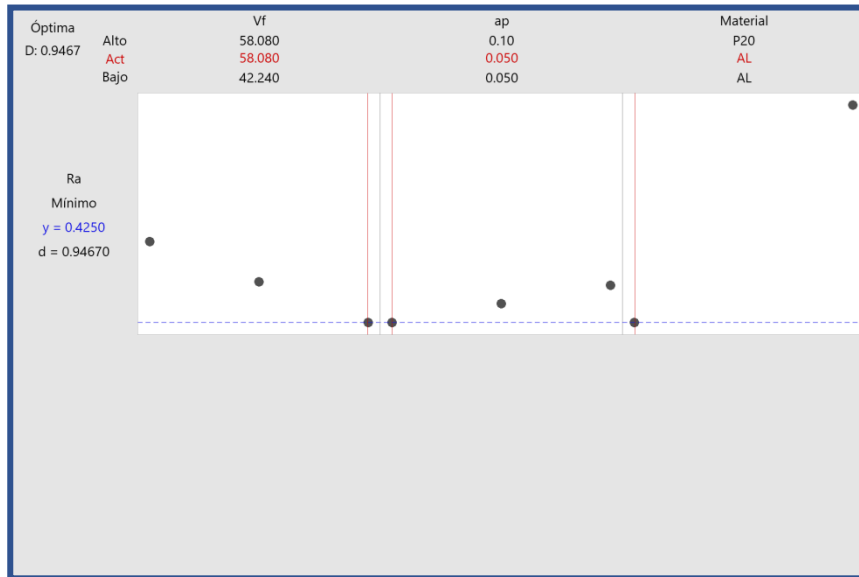
Parámetros						
Respuesta	Meta	Inferior	Objetivo	Superior	Ponderación	Importancia
$R_a$	Mínimo		0.4	0.87	1	1

Soluciones						
Solución	Vf	ap	Material	$R_a$ Ajuste	Deseabilidad compuesta	
1	58.08	0.050	AL	0.425049	0.946704	
2	58.08	0.100	AL	0.472132	0.846527	
3	42.24	0.100	AL	0.437132	0.814612	
4	42.24	0.050	AL	0.527549	0.728619	
5	50.16	0.075	AL	0.529216	0.725073	
6	58.08	0.050	P20	0.699951	0.361806	
7	58.08	0.100	P20	0.747034	0.261629	
8	42.24	0.100	P20	0.752034	0.229714	

**Figura 105 – Soluciones y parámetros para  $R_a$ . (Elaboración propia)**

Podemos observar que como primera solución nos da  $V_f = 58.08$ ,  $a_p = 0.05$  y Material de la pieza de trabajo = Aluminio ya que nos estaría dando un valor de  $R_a$  de 0.42 como respuesta de rugosidad para el proceso de corte.



**Figura 106** - Soluciones de la optimización de respuesta  $R_a$ . (Elaboración propia)

## **4 ESTRATEGIA DE INVESTIGACIÓN**

### **4.1 Justificación de la estrategia de investigación**

La estrategia de haber utilizado como método de investigación justifica en ser una metodología sencilla pero efectiva, que dada su aplicación principal en esta investigación a nivel laboratorio, es poder obtener la información necesaria y enfocarse en “el que hacer” para recomendar los parámetros de corte necesarios, así como las mejores prácticas para desarrollar dicho proceso, el ciclo de Deming permite de una manera practica obtener y concluir con los resultados obtenidos de manera que la información se maneje a futuro como recomendación del proceso y se pueda extrapolar en la industria de la manufactura metalmecánica.

Mientras que el ciclo de Deming es una metodología que se enfoca más en los resultados obtenidos (planteamiento ideal para una investigación en laboratorio), otro tipo de metodologías de investigación se enfocan mas en las actividades necesarias para la mejora del proceso. Como podemos observar a partir de los resultados obtenidos por el DOE, nos permite probar los resultados obtenidos y concluir con ellos, justificación suficiente para haber utilizado esta metodología en lugar de otras tales como la metodología DMAIC.

La metodología DMAIC, también llamada método de Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar, es una herramienta de calidad procedural enfocada en disminuir la variación en los procesos, sin embargo esta requiere de una mayor profundidad en la planificación inicial con la que se aborda la problemática, ya que además de explicar el “que hacer” explica el “como hacerlo” desde una perspectiva de la explicación de la teoría de las herramientas estadísticas a utilizar (utilizadas también en esta investigación).

PDCA	DMAIC
Planificar	Definir
	Medir
	Analizar
Hacer	Mejorar
Verificar	Controlar
Actuar	

**Tabla 31** – Comparación de etapas entre metodologías PDCA y DMAIC. (Elaboración propia).

También esta metodología es apoyada en datos estadísticos del proceso dentro de la industria, en mayor medida de forma histórica de estos, con datos a partir de grandes volúmenes de piezas/lotes, el cual no es el caso de esta investigación. Además, como se mencionó al inicio, esa es una de las justificaciones más importantes en la realización de esta investigación, que no se tenía un histórico principal ni línea base de cual partir para el consumo energético de dicho proceso que permita abordar más adelante la problemática no solo desde una perspectiva de calidad si no también a nivel de ingeniería de procesos.

La metodología DMAIC por su parte, requiere del compromiso de las personas que forman parte de la ejecución del proceso a mejorar. Las anteriores razones suficientes por las que no se desarrolló esta investigación en dicha metodología.

#### **4.1.1 Consideraciones costo/beneficio de la estrategia**

Sin lugar a duda, una de las consideraciones más importantes costo/beneficio de haber realizado esta investigación con el ciclo “planear-hacer-verificar-actuar” es la posibilidad de establecer una mejora continua sobre el tiempo mismo planeado previamente, el cual, debería de ser en el que

estemos realizando una u otra etapa, siendo esto lo que se busca al finalizar y concluir con los datos obtenidos como mejora del proceso.

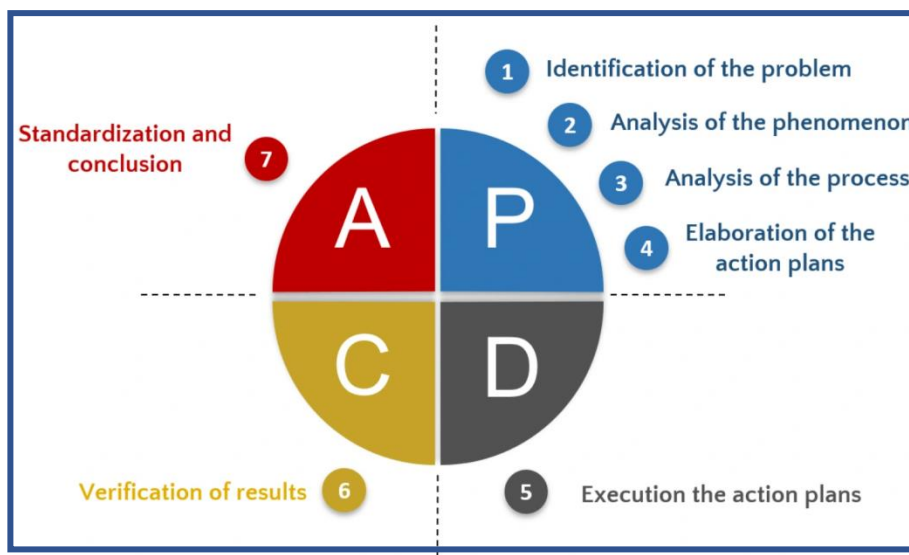
A continuación, se enlistan los beneficios de haber orientado la investigación con esta metodología:

- El hecho de poder realizar cada una de las etapas de manera independiente, es decir sin la necesidad de obtener datos que dependan de otras áreas/personas que involucren al proceso, como compras, materiales y marketing (dado que es una investigación a nivel laboratorio) pudiendo así avanzar en esta investigación conforme se iban obteniendo los resultados de cada herramienta estadística.
- La implementación final de mejora en el proceso de medición crea un ambiente de mejora continua en los operadores de este, haciendo que estos se responsabilicen en mayor medida por el proceso haciéndolos dueños de este y generando el proceso de mejora continua.
- Con lo anterior a su vez se genera una mejora en la eficiencia y productividad del proceso.
- Podemos llegar a conclusiones de forma rápida obteniendo los mismos resultados que con otras metodologías satisfaciendo las necesidades del cliente sin la necesidad de un desarrollo a mayor profundidad.
- La metodología es más comprensiva en su aproximación inicial dando un mejor marco de referencia para que exista un éxito del proyecto establecido.

Por el contrario, algunos de los costos de haber utilizado dicha metodología son:

- No existe un análisis a profundidad de la situación de mercado del proceso que permita obtener mayor claridad en las necesidades del cliente.
- El monitoreo continuo de los resultados es más específico de manera que se pueden detectar errores o cambios en el proceso de manera más eficiente.
- No se aborda la problemática de manera independiente a cada parte del proceso de la cadena de suministro que involucra el proceso.

Dado que muchas son las diferentes herramientas de mejora continua y metodologías que se pueden utilizar para la resolución de problemas, concluimos que la metodología PDCA es la que se mas se adecua a un proyecto de investigación como este donde la problemática percibida es analizada de manera “global” como una problemática que se puede extrapolar a la industria y se elaboran planes de corrección, se ejecutan dichos planes, se verifica la mejora y se estandariza de forma que genere el cierre del ciclo.



**Figura 107** – Etapas y características específicas de ciclo PDCA. (Sigma, 2017)

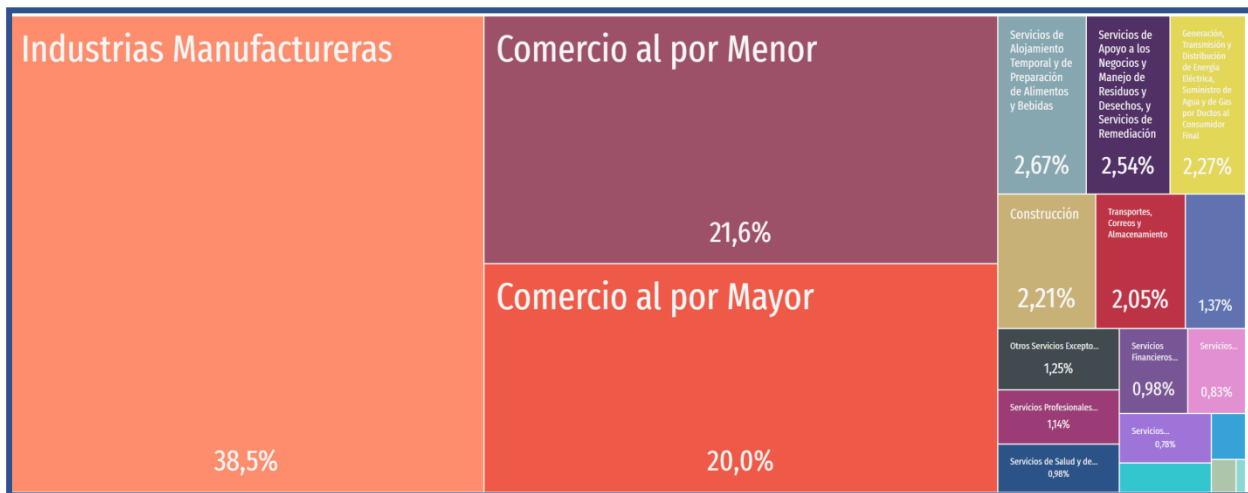
Los costos en materia para la realización de la fase experimental fueron aquellos destinados en la compra del material y/o equipo requerido para la medición realizada en la obtención de la línea base, equipo que también será necesario utilizar nuevamente para este análisis. A continuación, se muestra una tabla donde se enumeran dichos costos.

MATERIAL	PRECIO UNITARIO	COSTO	USO
Caja de acrílico para almacenar analizador de energía	\$ 1,100.00	\$ 1,100.00	Caja de acrílico para trasladar el medidor de energía de forma sencilla hacia las posiciones de medición en conjunto con los TC's
Medidor de energía marca Truometer	\$ 4,500.00	\$ 4,500.00	Medidor de energía trifásico que permite realizar mediciones eléctricas para parámetros de Voltaje, Corriente y Potencia, así como Factor de potencia y armónicos.
3 Transformadores de Corriente	\$ 1,173.00	\$ 3,520.00	Equipos requeridos para poder transformar la corriente medida a valores equivalentes que el equipo Truometer pueda leer.
Fusibles de protección	\$ 36.60	\$ 109.80	Fusibles para limitar la corriente de falla en caso de corto circuito o sobrecorriente
Pieza de trabajo para cortar de Aluminio	\$ 65.00	\$ 252.00	Pieza de trabajo de Aluminio utilizada para realizar los cortes de las experimentaciones
Pieza de trabajo para cortar Acero P20	\$ 89.00	\$ 223.37	Pieza de trabajo de Acero P20 utilizada para realizar los cortes de las experimentaciones
Insertos para el cortador	Insertos ya se tenían en posesión de la universidad		Los insertos son las herramientas que entran en contacto con la superficie a cortar
Software estadístico MINITAB	Software ya se tiene acceso por parte de la universidad		El software estadístico MINITAB apoyara en las tareas de calculo y analisis de los datos medidos
Equipo de computo	El equipo de computo no es necesario comparlo		El equipo de computo es necesario para el resguardo de los datos medidos
<b>TOTAL</b>		<b>\$ 9,705.17</b>	

**Tabla 32** – Tabla de costos totales del proyecto de investigación (Elaboración propia).

## 4.2 Herramientas e instrumentos

A partir de la información recabada que se mencionó al principio de este proyecto en la sección de escenario de objeto de estudio, donde remarcamos la relevancia e importancia en orientar nuestros procesos hacia un marco más sustentable y amigable con el medio ambiente, podemos observar también la importancia que tiene a nivel país la industria de la manufactura desde un punto de vista económico, siendo este sector el más importante en ingresos y comercio con un 38.5% de aportación en los ingresos durante 2019, los cuales representaron \$765,072 millones de pesos (México, 2019).



**Figura 108** – Sectores económicos con mayor concentración de ingresos. (México, 2019)

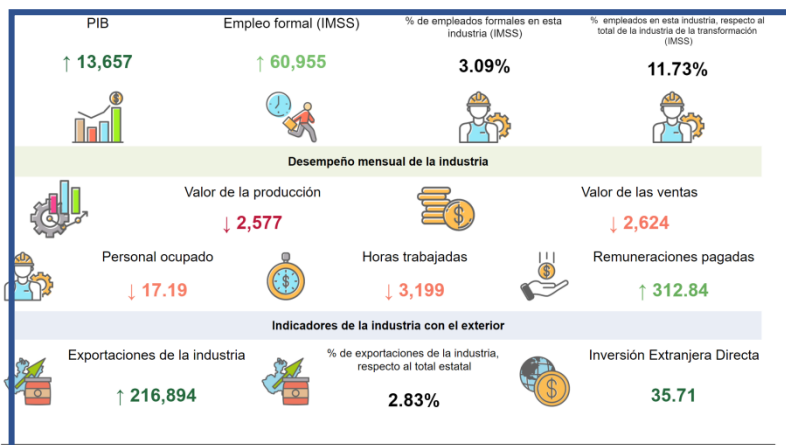
La participación de dicho sector en el PIB a nivel nacional y local (estado de Jalisco), representan el 17.7% y 20.1% (INEGI, 2014), respectivamente. Esto remarca la importancia de abordar la problemática y de ejecutar proyectos que permitan establecer una cultura de mejora continua en nuestros procesos productivos, donde no solo se obtengan beneficios a corto plazo si no que dichos beneficios se relacionen con una mejora en la productividad sin dejar de lado la

gestión de sustentabilidad que demarca el uso de dichas tecnologías para la utilización de estas máquinas en nuestros procesos.



**Figura 109** – Sectores estratégicos para el estado de Jalisco. (Jalisco, 2019)

El PIB a nivel Jalisco por parte de la industria metalmeccánica fue de \$13,657 millones de pesos, el cual se considera que aumentó en un 11.56% durante 2021 respectivo a 2020, particularmente esta industria aporta el 1.15% del PIB total del estado. La inversión extranjera directa durante el cuarto trimestre de 2022 fue de 35.71 millones de dólares.



**Figura 110** – Indicadores de la industria de la metal para el estado de Jalisco. (Jalisco, 2019)

Producto Interno Bruto por Entidad Federativa. Año base 2013										
Industrias manufactureras										
Concepto	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020 <sup>R</sup>	2021 <sup>R</sup>
Valores constantes										
Millones de pesos										
<sup>a</sup> B.1bV - Valor agregado bruto										
Estados Unidos Mexicanos	363,504	2,576,976	2,880,409	2,759,115	2,801,946	2,879,959	2,933,056	2,938,819	2,669,551	2,896,827
Aguascalientes	41,927	44,876	54,849	57,870	60,919	62,225	65,821	65,901	57,518	58,873
Baja California	99,629	100,696	110,058	123,651	129,408	132,350	140,237	146,784	144,085	162,091
Baja California Sur	1,988	2,113	2,213	2,167	2,164	2,166	2,160	2,224	2,242	2,201
Campeche	2,752	2,858	2,868	2,800	2,643	2,529	2,549	2,627	2,465	2,553
Coahuila de Zaragoza	221,832	214,249	222,983	220,702	217,900	226,872	235,253	234,670	201,374	224,666
Colima	3,875	3,992	3,914	4,135	4,145	4,160	4,215	4,087	4,007	4,080
Chiapas	29,883	29,023	30,715	30,012	29,428	25,961	23,596	21,321	18,718	19,863
Chihuahua	116,732	122,756	125,478	132,599	140,998	147,191	149,511	151,705	143,726	160,934
Ciudad de México	171,185	168,347	167,441	164,385	163,267	164,287	167,228	165,409	146,761	161,585
Durango	30,979	30,842	29,491	29,818	30,395	29,981	31,678	32,707	30,474	33,410
Guanajuato	132,403	140,603	159,893	179,508	185,426	187,684	182,431	176,610	167,868	181,262
Guerrero	6,582	6,522	6,409	6,199	6,155	5,948	5,974	6,087	5,635	5,533
Hidalgo	47,864	47,490	49,821	51,214	52,245	54,366	56,259	56,092	45,485	49,561
Jalisco	201,183	211,593	238,602	249,271	248,424	252,012	257,487	262,507	236,406	249,076
México	393,471	289,070	280,893	284,085	279,939	294,764	301,438	288,748	258,393	280,556
Michoacán de Ocampo	36,848	39,147	40,475	36,920	37,512	37,980	37,144	38,113	40,251	39,364
Morelos	33,196	34,218	34,867	35,792	36,254	35,732	34,569	32,792	28,014	30,597
Nayarit	5,715	5,743	5,849	5,907	5,979	6,032	5,966	6,222	6,101	6,316
Nuevo León	171,034	267,103	272,443	282,561	288,684	305,331	319,555	327,043	295,427	336,347
Oaxaca	27,087	29,315	28,766	28,142	29,581	24,800	26,859	24,853	22,847	25,722

**Figura 111** – PIB por entidad federativa para la actividad económica de la industria de la manufactura, mostrando a Jalisco como uno de los principales a nivel nacional. (Geografía, 2023).

Siendo entonces Jalisco, a nivel nacional referente en la industria de la manufactura como sector económico, donde particularmente este tipo de procesos se realizan de manera constante a nivel macro y tienen relación no solo con las características de calidad implicadas si no también con las características de desempeño de estos conforme a las problemáticas medioambientales planteadas con anterioridad.

### 4.3 Etapas del proceso de aplicación / investigación

Las etapas del proceso de investigación se desarrollan en base a la problemática presentada y al análisis de lo que se desea mejorar y lo que se requiere hacer para lograr dicho objetivo, es por ello que la metodología PDCA ayuda a identificar rápidamente la problemática al organizar la información de manera que permita abordar la investigación en un solo sentido.

Esta investigación se divide en 5 secciones principales:

- **Fundamentación del proyecto:** En esta etapa se explica la problemática percibida y la explicación del proceso al cual se quiere abordar y se valida que existen las condiciones para realizar dicha investigación.
- **Marco conceptual:** Se explica el marco de referencia que explica la teoría que demuestra lo que se desea investigar
- **Marco metodológico:** Se define la metodología a utilizar para abordar la problemática y actual en consecuencia, aquí se inicia con el ciclo de Deming en las etapas de planeación y hacer.
- **Estrategia de investigación:** Se explican las generalidades de haber elegido la estrategia utilizada para realizar las acciones que den solución a la problemática presentada.
- **Exposición de hallazgos:** Se explican los hallazgos identificados de haber realizado la estrategia propuesta y se actúa en consecuencia para corregirlas, en esta sección se prosigue con las etapas del ciclo de Deming de verificar y actuar.
- **Discusión final:** Se establecen las conclusiones del proyecto de investigación.

#### 4.3.1 Cronograma de trabajo

El siguiente diagrama de Gantt representa las diferentes etapas y subetapas en las que se han dividido las diferentes acciones hasta el momento para el proyecto para cada una de las secciones de este trabajo de investigación.

El diagrama de Gantt nos ayuda a organizar el tiempo planeado, así como reorientar esfuerzos de ser necesario en áreas del proyecto que lo necesiten.



### 4.3.2 Imprevistos

Los únicos imprevistos que se tuvieron fueron retrasos en la entrega del equipo de medición y en la entrega de los transformadores de corriente. Este imprevisto tuvo solo un ligero impacto de retraso de 2 semanas en las fechas acordadas previamente para la realización de la medición de la línea base del proceso.

Otro imprevisto observado fue que no se tomó en consideración el tiempo estimado de ejecución del DOE en CNC, dado que la regla de realizar las corridas experimentales de forma aleatoria indicaba un mucho mayor tiempo requerido entre cada corrida debido al cambio parámetros ingresados en la máquina-herramienta. Esta situación es mas atenuada en la fresadora, dado la forma en la que se ingresan los datos en esta máquina.

## **5 EXPOSICIÓN DE HALLAZGOS**

Los hallazgos identificados durante la fase experimental (tanto de la toma de datos, como durante la ejecución del diseño experimental) están relacionados con las causas inicialmente identificadas como las de mayor riesgo para nuestro modo de falla (rugosidad no de acuerdo con especificación y consumo de energía excesivo). A continuación, se muestran estos hallazgos y la relación con los riesgos que existen para que la problemática se presente.

### **5.1 Etapa de verificar**

La etapa de verificar dentro del ciclo de Deming es la etapa donde debemos validar la información obtenida, de manera que concuerde con los objetivos iniciales propuestos en la estrategia de investigación. El verificar la información no solo tiene que incluir la comprobación de la hipótesis de trabajo, si no el identificar las acciones necesarias para proceder con el control de la mejora e identificar posibles cambios que requiera para que estas se mantengan en el tiempo.

Es por ello por lo que en esta etapa del proyecto nos enfocaremos en el análisis de hallazgos comprobando que estos tengan relación con los objetivos propuestos en un principio.

Para este proyecto la etapa de verificar y actuar estará ligadas completamente, dado que la verificación de los resultados obtenidos precede al “actuar” en base a esta información obtenida para ejecutar acciones de corrección que permitan comprobar que la solución propuesta es permanente. El actuar es la etapa donde comprobamos y si es necesario se vuelve a verificar (entrando en un ciclo continuo), es de esta manera como se genera la mejora continua.

### **5.1.1 Organización de la información obtenida**

Las causas que en un inicio identificamos como las principales relacionadas a la problemática planteada en esta investigación fueron:

- Propiedades de la pieza de trabajo
- Parámetros de entrada de corte del proceso
- Medición manual de la rugosidad incorrecta

Y como factor adicional a investigar tenemos la comparación entre ambas máquinas-herramienta (fresadora y CNC).

A continuación, se explican los hallazgos identificados para cada una de estas causas. Primero lo hacemos para la máquina CNC.

#### **5.1.1.1 Hallazgos para las propiedades de la pieza de trabajo y parámetros de corte**

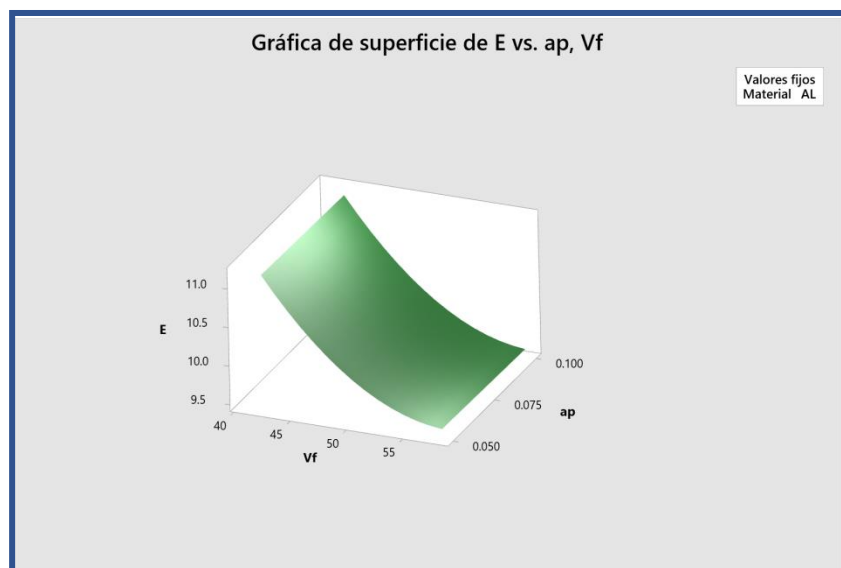
Dado que tanto el material de la pieza a maquinar como los parámetros de corte están intrínsecamente relacionados como variables de entrada de nuestro proceso, podemos agrupar ambos hallazgos (propiedades de la pieza de trabajo y parámetros de corte) derivados de estas características como responsables a ambas causas, los cuales son los siguientes:

1. El diseño experimental realizado para ambos materiales, nos indica la diferencia existente en los parámetros tanto de rugosidad como de consumo eléctrico.

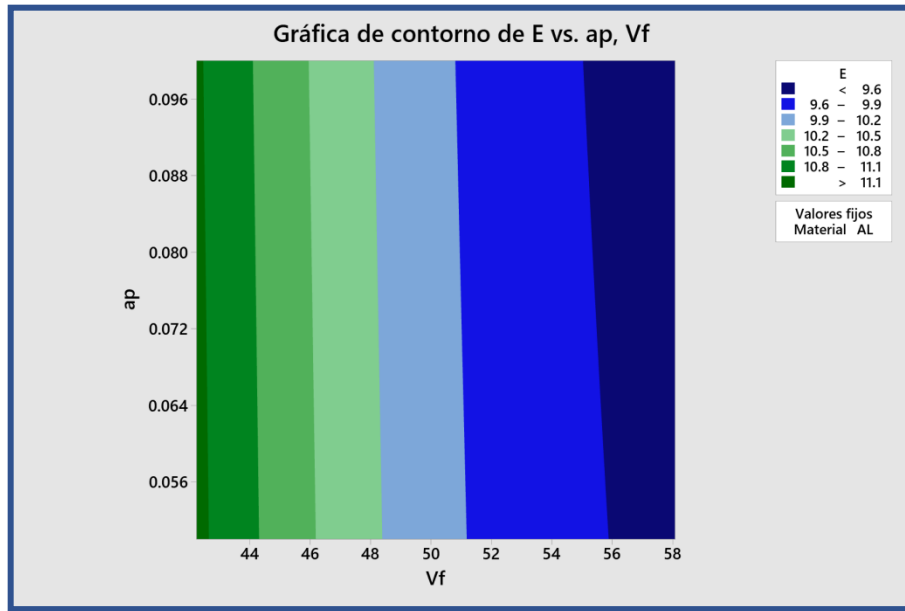
Para E, el factor más significativo fue la velocidad de avance del herramental  $V_f$ , donde a mayor velocidad menor es el consumo de energía, por el contrario, la profundidad del corte  $a_p$ , indica que a mayor profundidad mayor consumo de energía, pero solo cuando el avance del herramental es bajo. El tipo de material tiene un ligero efecto sobre el consumo de energía, siendo ligeramente mayor cuando se utiliza acero P20 en lugar de aluminio.

Se realizó también un gráfico de contorno y superficie, para poder mirar mejor la relación entre nuestros factores con nuestras variables de respuesta.

Como se observó durante el desarrollo del DOE analizando E, el diseño es prácticamente lineal, solo se observa una muy ligera curvatura que indica como la E disminuye rápidamente conforme  $V_f$  aumenta, y de igual manera una ligera curva donde vemos que E aumenta conforme  $a_p$  lo hace solo cuando  $V_f$  está en niveles bajos.

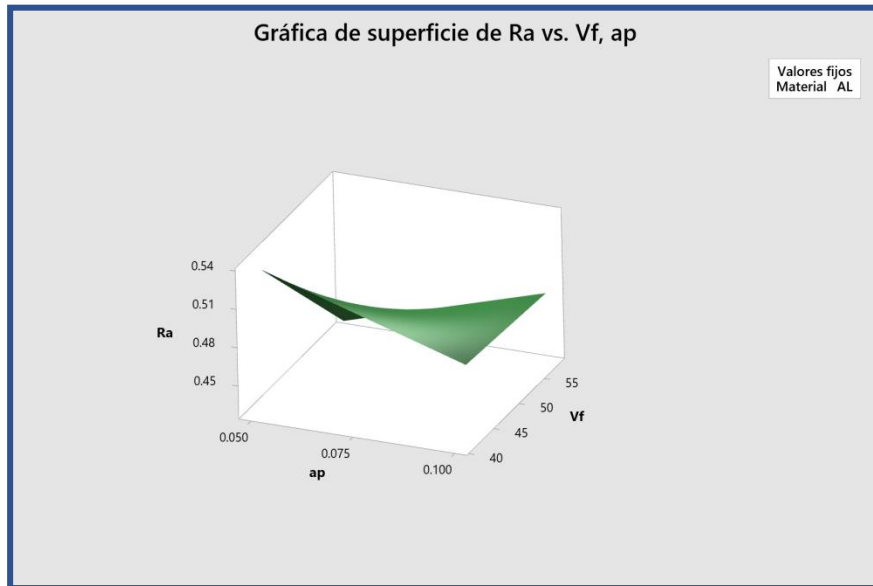


**Figura 112** – Gráfico de superficie para E en el aluminio. (Elaboración propia)



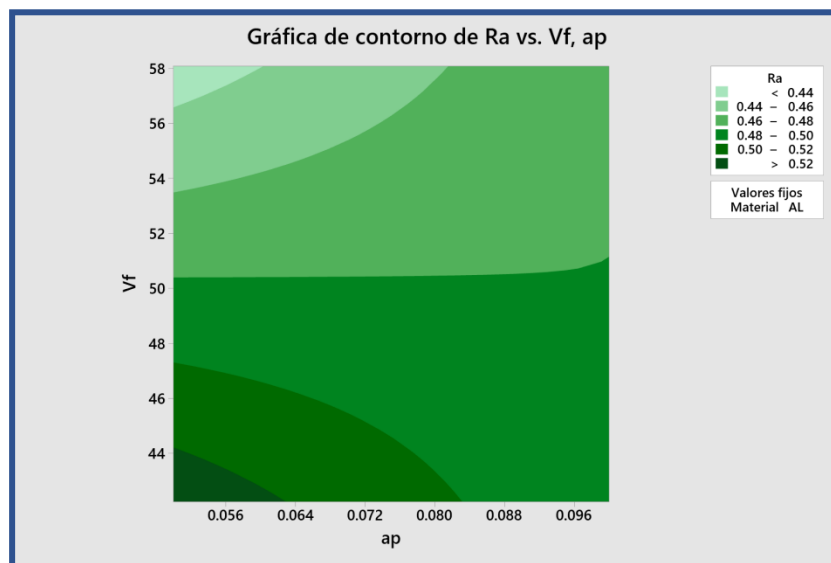
**Figura 113** – Gráfico de contorno para E. (Elaboración propia)

Por parte del análisis de  $R_a$  observamos como el punto central tiene mucho mayor injerencia en esta respuesta, primeramente, vemos que el factor que más afecta en esta respuesta es el tipo de material, lo cual es de alguna manera predecible dado las características mecánicas diferentes que se tienen de cada uno. Por consiguiente, tenemos a la velocidad de avance como el factor que tiene también un efecto sobre la rugosidad siendo esta menor conforme mayor velocidad de avance se tiene. En este caso el punto central nos da un parámetro a tomar en cuenta al ver como la interacción de  $V_f$  con  $ap$  indican que el comportamiento de la rugosidad es muy cambiante conforme estos dos factores cambian.



*Figura 114 – Gráfico de superficie para  $R_a$ . (Elaboración propia)*

El gráfico de superficie para  $R_a$  parece indicarnos que a profundidades bajas y velocidades de avance bajas también se tiene un mayor nivel de rugosidad, pero si esa profundidad baja se mantiene y la velocidad se aumenta, la rugosidad disminuye.



*Figura 115 – Gráfico de contorno para  $R_a$ . (Elaboración propia)*

Las conclusiones que determinamos del análisis de diseño experimental en máquina CNC es que nos indica como valores óptimos la misma velocidad de avance y profundidad tanto para el consumo de energía como para la rugosidad superficial, sin embargo, esto cambia al elegir el tipo de material con el que se va a trabajar, siendo más óptimo utilizar el acero P20 para consumir menos energía que el aluminio. Por el contrario, la rugosidad se ve afectada drásticamente si se utiliza el acero como material de pieza de trabajo.

Observando el valor de consumo de energía  $E$  para la segunda propuesta de optimización de esta, vemos que no existe mucha diferencia entre la primera propuesta y la segunda (9.27 a 9.53 KWh diarios) sin embargo la segunda propuesta sería con el aluminio como material de pieza de trabajo, nivel de factor que satisface completamente a la optimización de rugosidad. Por lo cual se determina para el proceso de corte en CNC como parámetros de corte óptimos:

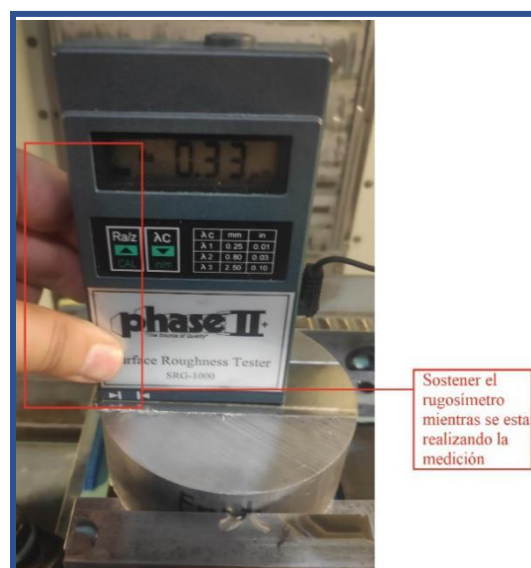
**$V_f = 58.08$  ,  $ap = 0.05$  y aluminio como material de pieza de trabajo.**

#### **5.1.1.2 Hallazgos para la medición de la rugosidad incorrecta**

Los hallazgos encontrados debidos a la medición de la rugosidad superficial se identifican como 2 principales que involucran principalmente el método de medición de este parámetro de calidad con el rugosímetro.

Como observamos, debido al análisis inicial del sistema de medición, el porcentaje de gauge R&R inicial fue de 17.25%. Esto era indicativo de que el sistema es adecuado para lo que se está midiendo. Sin embargo, durante dicha prueba se encontraron los siguientes hallazgos:

1. Se identifica que no existe un manual o procedimiento estandarizado que le indique al operador las acciones paso a paso a seguir para realizar una calibración del equipo adecuada, así como una medición de rugosidad superficial para cada pieza de forma correcta. Lo cual no permite asegurar la correcta utilización de la herramienta o asegurar una calibración de esta de forma adecuada.
2. Se observó que derivado de lo anterior, el cable de alimentación del rugosímetro en el punto de conexión con dicho instrumento puede tener distintas orientaciones, las cuales en combinación con las características físicas del aparato (altura entre base del aparato y conexión de alimentación) y del área general de medición de la pieza, hace que este cable de alimentación tenga contacto con la superficie de la pieza maquinada muchas de las veces, lo que hace que el rugosímetro no siempre pueda tomar una lectura adecuada ya que no se sienta correctamente sobre la base.



**Figura 116** – Imagen de toma de muestra de rugosidad tomando con la mano el rugosímetro mientras esta toma la medición. (Elaboración propia).

3. Se observa en varias de las mediciones realizadas existe una diferencia en la manera de tomar y realizar la medición manualmente, ya que la mitad de los operadores al momento de presionar el botón de “toma de muestra” del rugosímetro, siguen sosteniendo manualmente el instrumento, cuestión que hace que este no pueda realizar una medición adecuada de la rugosidad ya que este no debe de tomarse ni presionarse en lo más mínimo contra la base superficial a medir.



*Figura 117 – Imagen de toma de muestra de rugosidad tomando con la mano el rugosímetro mientras esta toma la medición. (Elaboración propia).*

## 5.2 Etapa de actuar

Los hallazgos encontrados debidos a la medición de la rugosidad superficial se identifican como 2 principales que involucran principalmente el método de medición de este parámetro de calidad con el rugosímetro.

Por esta razón, identificamos las acciones necesarias a realizar para que las mediciones se realicen de manera oportuna en base a las observaciones anteriores, en la siguiente tabla se engloban los hallazgos observados y las acciones de corrección correspondientes para mitigarlos:

HALLAZGOS Y ACCIONES CORRECTIVAS			
	HALLAZGO	ACCIÓN CORRECTIVA	ÁREA DE IMPACTO
Medición manual de $R_a$ incorrecta	No existe un manual o estándar del proceso de medición de $R_a$ de la pieza	Realizar un estándar del proceso de medición adecuado donde incluyan las mejoras en este mismo.	Sistema de medición de $R_a$ = Calidad del proceso (disminución producto no conforme)
	Se observo que en algunas ocasiones, el rugosímetro se toma "para que este no caiga" mientras se realiza el proceso de medición de $R_a$	Indicar en el nuevo estándar de medición de $R_a$ que el rugosímetro no se debe de tocar mientras este realiza la medición	
	Se observa que al momento de manipular el rugosímetro y posicionarlo sobre la ranura del corte, si el cable de alimentación de este esta apuntando hacia "abajo", tiende a mover el aparato y evitar que este sienta correctamente sobre la pieza	Se indica en el nuevo estándar del proceso de medición la acción de dejar este cable de alimentación orientado hacia "arriba"	
Parámetros de corte incorrectos para E	A mayor velocidad de corte (menor tiempo que le tome a la máquina-herramienta realizar este) menor sera el consumo de energía. (esto concuerda con la teoría de TRM). La profundidad ejerce de forma muy ligera un mejor consumo de energía cuando esta es alta, el material es el factor que para el consumo de energía tiene el menor efecto por lo que se deja a utilizar el mas apropiado de acuerdo a obtener mejores resultados para $R_a$ .	Nuevos parametros de corte: Vf = 58.08 , ap = 0.05 y aluminio como material de pieza de trabajo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Menor consumo de energía E = (Disminución de Costos)</li> <li>- Menor emisión de GEI's = (Eficiencia ambiental)</li> <li>- Mayor tasa de producción (productividad y desempeño)</li> </ul>
Parámetros de corte incorrectos para $R_a$	Para $R_a$ el factor mas importante es sin duda el tipo de material de la pieza, siendo el aluminio mas eficiente para este parámetro de calidad y observamos que una combinación de velocidad alta y profundidad baja es la mejor combinación para obtener los mejores resultados.		

**Tabla 34** – Tabla de hallazgos vs acciones correctivas. (Elaboración propia).

### 5.2.1 Acciones correctivas para los hallazgos encontrados

Se procede a realizar un checklist/estándar de proceso de medición para  $R_a$  de manera que se incluya un diagrama del proceso en conjunto con casillas de chequeo para cada etapa del diagrama, esto obliga a que el operador deba marcar que la acción mostro un parámetro adecuado de medición. De otra manera, dicha medición tendría que ser repetida.

La hoja de checklist/estándar de proceso servirá para la medición de 12 piezas, tamaño del que se compone un lote de estas.

A continuación, se muestra el checklist realizado:

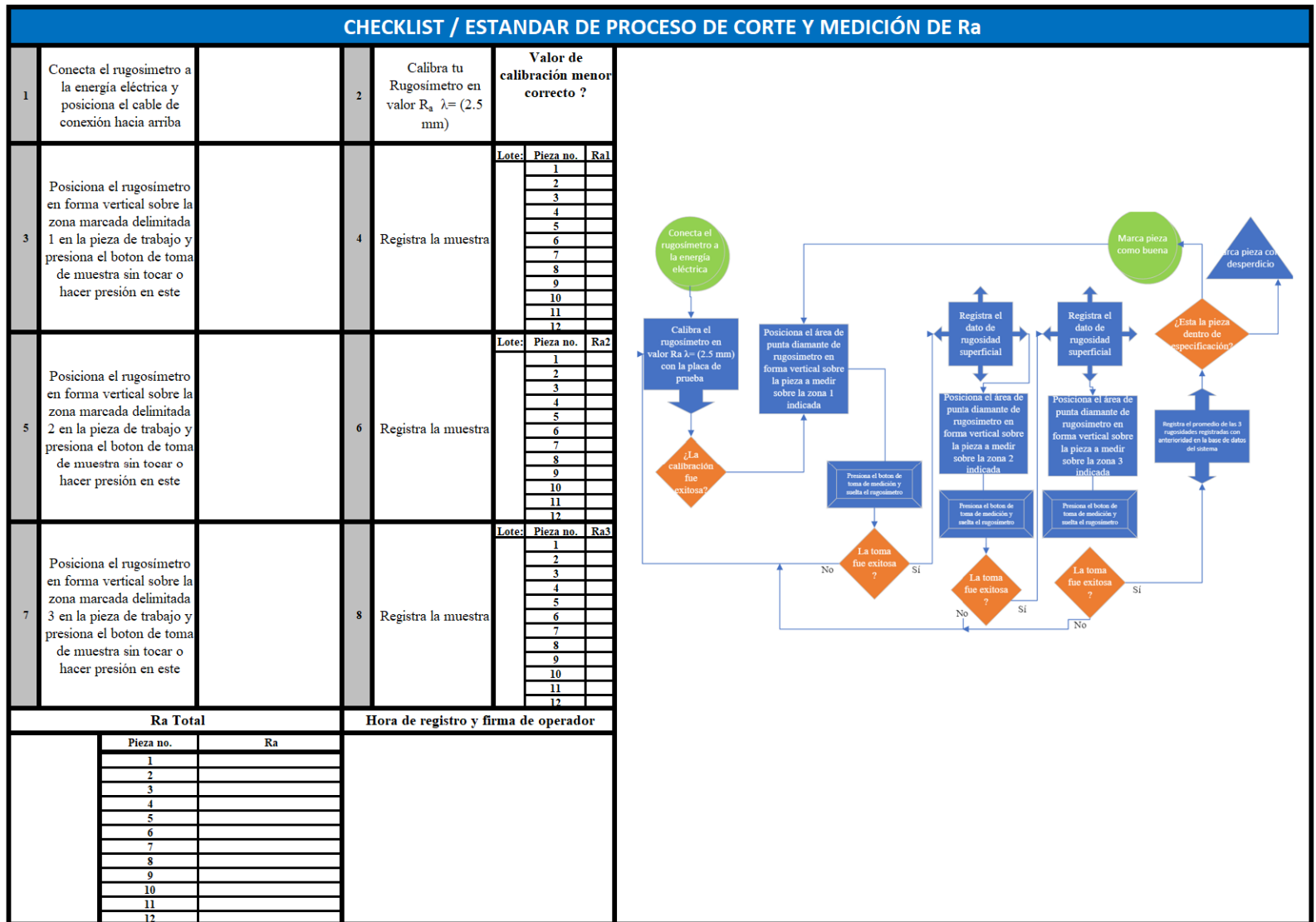
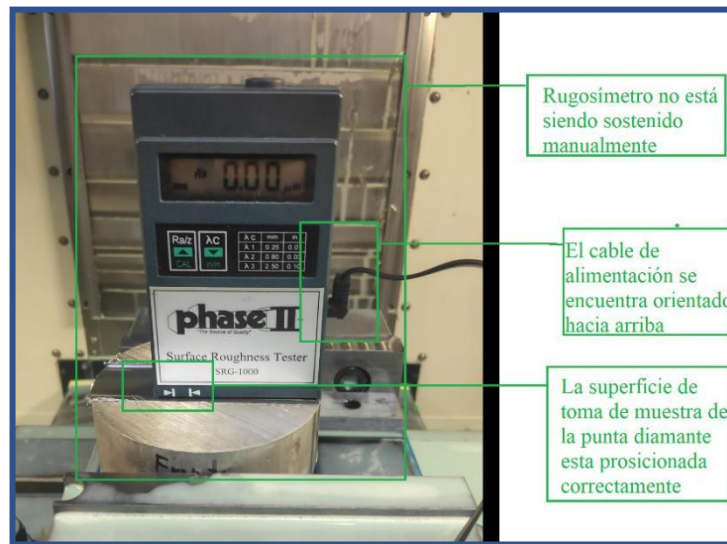


Figura 118 – Checklist/estándar de proceso de medición de Ra. (Elaboración propia).

Se realizó también el ejemplo de ejecución de la medición tomando en cuenta tanto el no estar sosteniendo el rugosímetro con la mano como el tener el cable de alimentación de este orientado hacia arriba, permitiendo que el dispositivo este correctamente sentado sobre el área de medida y la punta diamante del medidor realice la medición sin problemas.



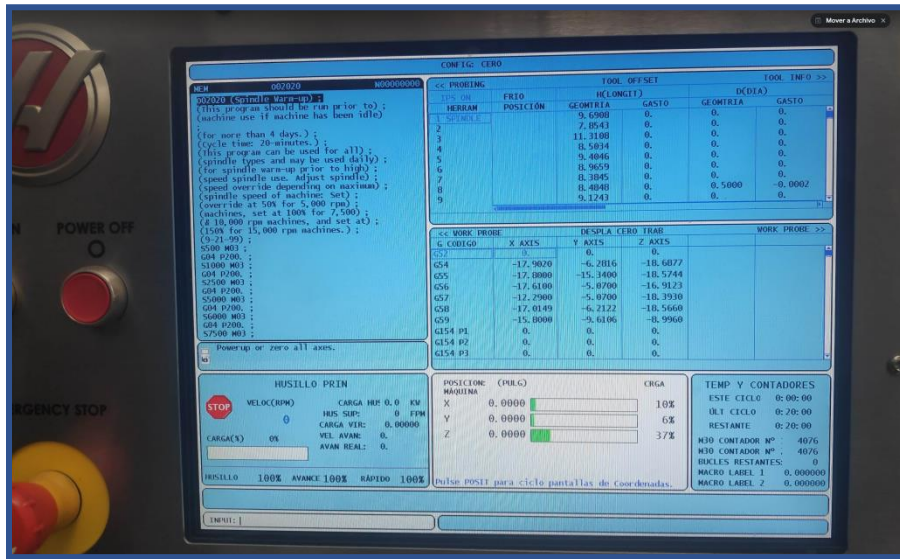
*Figura 119 – Manipulación correcta y ejecución de proceso de medición para  $R_a$ . (Elaboración propia).*

Como acción correctiva para los parámetros de corte, se programan los nuevos parámetros en la máquina-herramienta CNC Hass VF-1, que fue la seleccionada como la mejor para el desempeño de nuestro proceso.

Velocidad de avance de herramental ( $V_f$ ) = 58.08 mm/min

Profundidad de corte ( $a_p$ ) = 0.05 mm

Material de pieza de trabajo a utilizar = Aluminio



*Figura 120 – Panel de control de CNC Hass VF-1 donde se introducen los nuevos parámetros de corte.*

## 5.2.2 Impacto de la estrategia en el objeto de estudio

Para identificar y cuantificar el impacto generado por la estrategia tomada y las acciones correctivas ejecutadas, debemos de realizar una “prueba piloto” del proceso con los nuevos parámetros de corte con el fin de evaluar si existió una mejora en este por parte del consumo de energía diario y rugosidad superficial dejada sobre la pieza.

### 5.2.2.1 Impacto en el sistema de medición

Para realizar dicha prueba piloto primero ejecutamos una prueba de análisis R&R nuevamente con el objetivo de comparar con el primer estudio (previo a implementación de acciones) e identificar si existieron mejoras en el sistema de medición en base a los nuevos parámetros de corte y estrategia de mejora en el proceso de medición. Las características del análisis son los siguientes: Características del proceso de corte:

**Máquina-Herramienta:** CNC Hass VF-1

**Tipo de material:** Aluminio

**Dimensiones de la pieza a cortar:** Diámetro = 101.6 mm

**Dimensiones del corte:** Profundidad: 0.05 mm, Ancho = 31.5 mm, Largo = 101.6 mm

**Velocidad de avance del herramental de corte:**  $V_f = 58.08$  mm/min

Variables que medir:

**Rugosidad Superficial ( $R_a$ )** = (especificación superior =  $0.60 \mu\text{m}$ ) siendo esta la tolerancia de nuestro estudio nuevamente.

Características del análisis gage R&R:

**Tipo de análisis** = Cruzado

**Cantidad de inspectores** = 2

**Cantidad de piezas a medir** = 10

**Cantidad de intentos por inspector** = 3

**Método de análisis R&R** = ANOVA.

El análisis del sistema de medición es realizado en software Minitab, se realizan las mediciones correspondientes:

		INSPECTOR 1					INSPECTOR 2		
		Intentos					Intentos		
Pieza		1	2	3	Pieza		1	2	3
1		0.290	0.280	0.280	1		0.290	0.280	0.290
2		0.290	0.280	0.280	2		0.280	0.300	0.290
3		0.240	0.240	0.250	3		0.240	0.240	0.260
4		0.330	0.340	0.330	4		0.330	0.330	0.340
5		0.220	0.210	0.210	5		0.240	0.240	0.230
6		0.360	0.370	0.350	6		0.340	0.360	0.360
7		0.280	0.290	0.270	7		0.280	0.270	0.280
8		0.270	0.320	0.290	8		0.340	0.330	0.320
9		0.280	0.290	0.280	9		0.270	0.290	0.290
10		0.270	0.280	0.290	10		0.270	0.280	0.290

**Tabla 35 y 36** – Datos medidos para el análisis gauge R&R final. (Elaboración propia).

Recordemos al igual que en el primer análisis, dado que la característica a medir  $R_a$  tiene la particularidad de ser diferente a lo largo del corte, la medición solo se realiza al centro de la pieza para cada intento, de manera que se busque tener la misma área de medida y por lo tanto la misma medida. Los siguientes fueron los resultados obtenidos:

Tabla ANOVA de dos factores con interacción					
Fuente	GL	SC	MC	F	P
Partes	9	0.0775067	0.0086119	75.4935	0.000
Operadores	1	0.0002400	0.0002400	2.1039	0.181
Partes * Operadores	9	0.0010267	0.0001141	0.7867	0.630
Repetibilidad	40	0.0058000	0.0001450		
Total	59	0.0845733			

**Figura 121**– Tabla de ANOVA de dos factores con interacción para medición en  $R_a$ .

(Elaboración propia)

Tabla ANOVA dos factores sin interacción					
Fuente	GL	SC	MC	F	P
Partes	9	0.0775067	0.0086119	61.8136	0.000
Operadores	1	0.0002400	0.0002400	1.7227	0.195
Repetibilidad	49	0.0068267	0.0001393		
Total	59	0.0845733			

**Figura 122** – Tabla de ANOVA de dos factores sin interacción para medición en  $R_a$ .

(Elaboración propia)

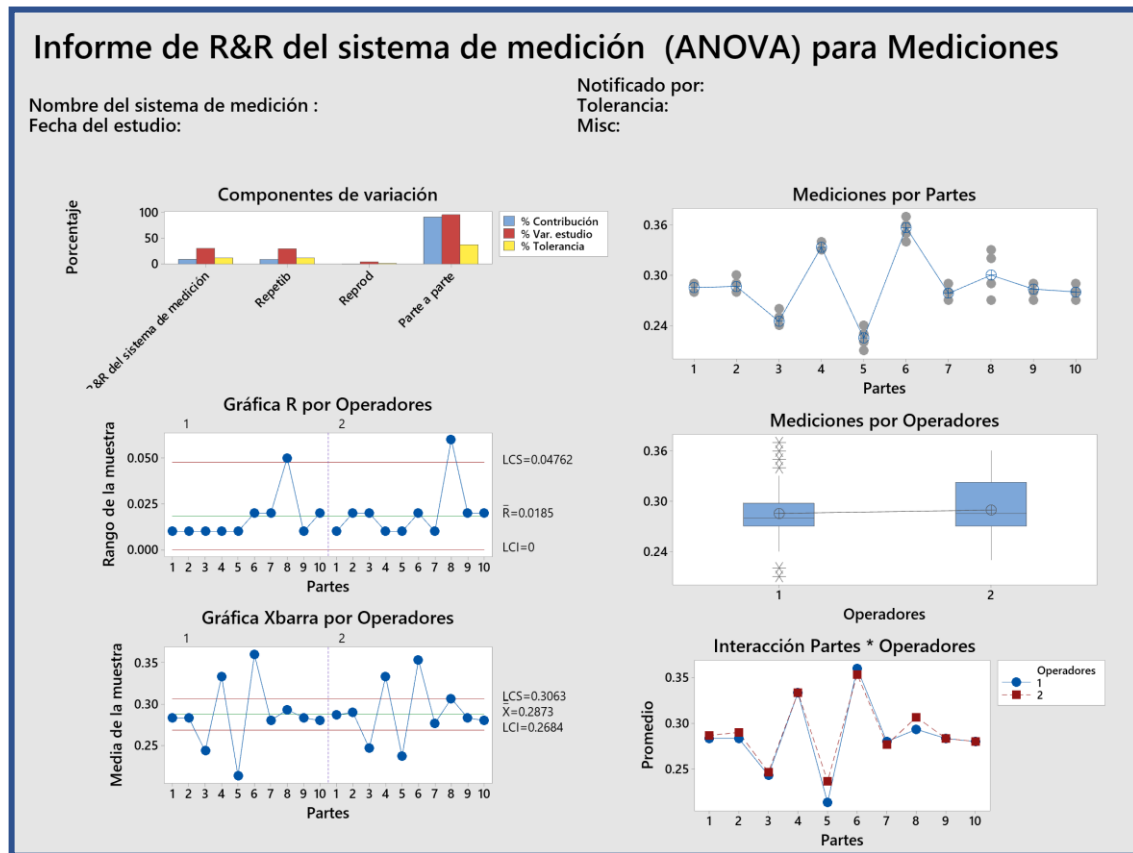
R&R del sistema de medición		
Componentes de la varianza		
Fuente	CompVar	%Contribución (de CompVar)
Gage R&R total	0.0001427	9.18
Repetibilidad	0.0001393	8.96
Reproducibilidad	0.0000034	0.22
Operadores	0.0000034	0.22
Parte a parte	0.0014121	90.82
Variación total	0.0015548	100.00

**Figura 123** – Tabla de componentes de la varianza. (Elaboración propia)

Evaluación del sistema de medición				
Fuente	Desv.Est. (DE)	Var. estudio (6 × DE)	%Var. estudio (%VE)	%Tolerancia (VE/Toler)
Gage R&R total	0.0119447	0.071668	30.29	11.94
Repetibilidad	0.0118034	0.070820	29.93	11.80
Reproducibilidad	0.0018319	0.010992	4.65	1.83
Operadores	0.0018319	0.010992	4.65	1.83
Parte a parte	0.0375778	0.225467	95.30	37.58
Variación total	0.0394305	0.236583	100.00	39.43

Número de categorías distintas = 4

**Figura 124** – Resultados de la evaluación del sistema de medición. (Elaboración propia)



**Figura 125** – Informe de resultados del análisis. (Elaboración propia)

- En los resultados podemos ver que para la primera tabla de ANOVA con la interacción del valor de partes\*operador, nos muestra un valor  $P = 0.181$ , valor mayor a nuestro  $0.05$  que es el valor de nuestra significancia, por lo cual el software calcula la misma tabla, pero esta vez sin la interacción.
- Para los resultados en la tabla de componentes de la varianza, vemos que nuevamente la mayor parte de la variación total corresponde al error de medición por diferencias entre las partes (parte a parte) = **90.82%** (mucho mayor al 46.71% del primer análisis), esto es indicativo de que los errores debidos al sistema de medición disminuyeron dejando la mayor parte del

porcentaje a las diferencias entre las partes. El porcentaje restante corresponde al error de medición debido a la repetibilidad (variación debida a causas del equipo de medición) con un **8.96%** de la variación y para reproducibilidad con solo un **0.22%**. Como nuestro sistema de medición evalúa las partes en relación con una especificación superior, tomamos el valor de %Tolerancia como la métrica apropiada para nuestra evaluación.

- La tabla de evaluación del sistema de medición nos indica que nuestro % gage R&R total para él %tolerancia = **11.94%**, lo cual muestra la mejora en sistema de medición en comparación con el resultado del primer análisis, este sigue siendo un resultado aceptable para la variable que estamos midiendo.
- También podemos observar que el porcentaje de variación parte a parte es de **37.58%**, lo cual muestra un aumento en comparación con el resultado anterior, esto es un indicativo nuevamente de mejora del sistema de medición ya que este está identificando que la mayor parte de la diferencia en los datos es debida a la diferencia entre las partes y no al sistema utilizado para medir dichas partes.
- Vemos que el gráfico Ra por operadores muestra un mucho menor rango de variación entre las muestras.
- El gráfico de cajas por operador nos indica que los operadores están midiendo las partes un poco diferentes entre ellos, ya que la horizontal no es 100% paralela al eje X. También esto lo podemos constatar del gráfico de parte \* inspector, ya que sus gráficos no son exactamente alineados uno sobre el otro.

Podemos concluir entonces de acuerdo con el parámetro estandarizado que identifica si el sistema de medición es adecuado o no, seguimos estando dentro de entre el 10% y 30% por lo cual el sistema **sigue siendo aceptable para medir el proceso implicado además de haberse mejorado.**

### 5.2.2.2 Impacto en la capacidad y productividad del proceso

Una vez que observamos los resultados del impacto en el sistema de medición podemos corroborar que la optimización de los parámetros de corte provistos gracias al diseño experimental realizado haya tenido un impacto positivo en la capacidad para producir de acuerdo con especificación en el proceso de corte, así como en el consumo de energía diaria debida a este. Procedemos primero con la colección de datos, para una muestra de 32 piezas nuevamente, en este caso ya solo para el aluminio en CNC, la siguiente tabla se muestran los datos obtenidos de estas muestras para E y Ra.

Antes de realizar la colección de datos de  $P_c$  y  $R_a$  para la prueba piloto, necesitamos identificar las variables que cambian debido a los cambios en el parámetro de corte. Dado que el parámetro de corte que esta cambiando respecto a los parámetros anteriores es únicamente  $V_f$  (42.24 a 58.08 mm/min), nuestras variables afectadas por dicho cambio como se muestran a continuación.

TRM cambia a:

$$TRM = \frac{ae \times ap \times Vf}{60} = \frac{31.5 \times 0.05 \times 58.08}{60} = 1.525 \text{ mm}^3/\text{seg}$$

El tiempo por el periodo de corte  $T_c$  es:

$$T_c = \frac{D}{Vf} = \frac{101.6}{58.08} = \mathbf{1.74\ s}$$

El tiempo total por operación cambia a:

$$Tt = Tc + Td + Tm + Ta = 1.74 + 0.16 + 1.7 + 0.33 = \mathbf{3.93\ min}$$

Por lo que nuestra tasa de producción aumenta a:

$$TP = Tt \times OEE = \left(\frac{60}{4.59}\right) \times 16 = \mathbf{245\ Piezas\ diarias}$$

**Este es un impacto de mejora en la tasa de producción de 15% aproximadamente.**

El volumen medio removido se mantiene igual debido a:

$$VMR = TRM \times (T_c \times 60) = 1.525 \times (1.74 \times 60) = \mathbf{160\ mm^3}$$

Si la TRM aumenta de acuerdo con la teoría, deberíamos de observar menores valores de  $CE_e$ , por lo cual  $E_e$  también se vería reducido por, supongamos una  $P_c$  constante de 1,300 W (ya que de hecho, no se observó en la primer colección de datos una diferencia significativa en la potencia debida al corte), esto nos daría un  $CE_e$  igual a:

$$CE_e = \frac{P_c}{TRM} = \frac{1,300}{1.525} = \mathbf{852.45\ J/mm^3}$$

Y con ello tendríamos entonces un consumo de energía por operación de:

$$E_e = CE_e \times VMR = 852.45 \times 160 = \mathbf{136,396\ J}$$

Por lo que nuestro consumo de energía diario por el proceso disminuye a:

$$E = \left( \frac{E_e}{3,600,000} \right) \times TP = \left( \frac{136,396}{3,600,000} \right) \times 245 = 9.28 \text{ KWh diarios}$$

Para este ejemplo, esta reducción representa un ahorro de 17% aproximadamente en el consumo de energía diaria debida al proceso respecto a la colección de datos anterior.

Una vez comprendiendo el impacto general del aumento de velocidad por el herramental de corte en las variables que influyen en el proceso y en los métricos, procedemos a realizar la colección de datos para nuestra prueba piloto, para las 32 piezas y para P<sub>c</sub> y R<sub>a</sub>. la tabla de datos colectados, así como la estadística descriptiva de estos se muestra a continuación:

Consumo de energía "E" y Rugosidad superficial "R <sub>a</sub> " Aluminio - CNC (Prueba Piloto)														
Muestra	Vf	TC	TP	D	VMR	ae = d	ap	TRM	P <sub>c</sub>	CLe	E	R <sub>a</sub>	Estadística Descriptiva E	Estadística Descriptiva Ra
1	58.08	1.7	244	101.6	160.0	31.5	0.05	1.525	1275.0	836.3	9.06	0.35		
2	58.08	1.7	244	101.6	160.0	31.5	0.05	1.525	1283.0	841.5	9.12	0.31		
3	58.08	1.7	244	101.6	160.0	31.5	0.05	1.525	1281.0	840.2	9.10	0.39	Media	8.74
4	58.08	1.7	244	101.6	160.0	31.5	0.05	1.525	1255.0	823.2	8.92	0.34	Error típico	0.07
5	58.08	1.7	244	101.6	160.0	31.5	0.05	1.525	1283.0	841.5	9.12	0.42	Mediana	8.66
6	58.08	1.7	244	101.6	160.0	31.5	0.05	1.525	1290.0	846.1	9.17	0.28	Moda	9.12
7	58.08	1.7	244	101.6	160.0	31.5	0.05	1.525	1287.0	844.2	9.14	0.29	Desviación estándar	0.41
8	58.08	1.7	244	101.6	160.0	31.5	0.05	1.525	1309.0	858.6	9.30	0.42	Varianza de la muestra	0.17
9	58.08	1.7	244	101.6	160.0	31.5	0.05	1.525	1174.7	770.5	8.35	0.34	Curtosis	-0.57
10	58.08	1.7	244	101.6	160.0	31.5	0.05	1.525	1094.0	717.6	7.77	0.46	Coefficiente de asimetría	-0.27
11	58.08	1.7	244	101.6	160.0	31.5	0.05	1.525	1184.3	776.8	8.41	0.34	Rango	1.53
12	58.08	1.7	244	101.6	160.0	31.5	0.05	1.525	1186.9	778.5	8.43	0.44	Mínimo	7.77
13	58.08	1.7	244	101.6	160.0	31.5	0.05	1.525	1199.0	786.5	8.52	0.36	Máximo	9.30
14	58.08	1.7	244	101.6	160.0	31.5	0.05	1.525	1188.6	779.6	8.45	0.32	Suma	279.57
15	58.08	1.7	244	101.6	160.0	31.5	0.05	1.525	1183.4	776.2	8.41	0.32	Cuenta	32.00
16	58.08	1.7	244	101.6	160.0	31.5	0.05	1.525	1186.0	777.9	8.43	0.37	Nivel de confianza(95.0%)	0.15
17	58.08	1.7	244	101.6	160.0	31.5	0.05	1.525	1306.6	857.0	9.28	0.36	Nivel de confianza(95.0%)	0.02
18	58.08	1.7	244	101.6	160.0	31.5	0.05	1.525	1301.0	853.3	9.24	0.48		
19	58.08	1.7	244	101.6	160.0	31.5	0.05	1.525	1205.0	790.4	8.56	0.29		
20	58.08	1.7	244	101.6	160.0	31.5	0.05	1.525	1257.5	824.8	8.93	0.38		
21	58.08	1.7	244	101.6	160.0	31.5	0.05	1.525	1248.3	818.7	8.87	0.39		
22	58.08	1.7	244	101.6	160.0	31.5	0.05	1.525	1180.2	774.1	8.39	0.45		
23	58.08	1.7	244	101.6	160.0	31.5	0.05	1.525	1295.3	849.6	9.20	0.37		
24	58.08	1.7	244	101.6	160.0	31.5	0.05	1.525	1204.6	790.1	8.56	0.39		
25	58.08	1.7	244	101.6	160.0	31.5	0.05	1.525	1303.6	855.0	9.26	0.41		
26	58.08	1.7	244	101.6	160.0	31.5	0.05	1.525	1225.0	803.5	8.70	0.32		
27	58.08	1.7	244	101.6	160.0	31.5	0.05	1.525	1290.9	846.7	9.17	0.28		
28	58.08	1.7	244	101.6	160.0	31.5	0.05	1.525	1194.8	783.7	8.49	0.26		
29	58.08	1.7	244	101.6	160.0	31.5	0.05	1.525	1131.5	742.2	8.04	0.41		
30	58.08	1.7	244	101.6	160.0	31.5	0.05	1.525	1212.6	795.4	8.62	0.32		
31	58.08	1.7	244	101.6	160.0	31.5	0.05	1.525	1172.1	768.8	8.33	0.35		
32	58.08	1.7	244	101.6	160.0	31.5	0.05	1.525	1158.7	760.0	8.23	0.34		

Tabla 36 – Datos para muestra de 32 piezas cortadas en aluminio para prueba piloto.

(Elaboración propia)

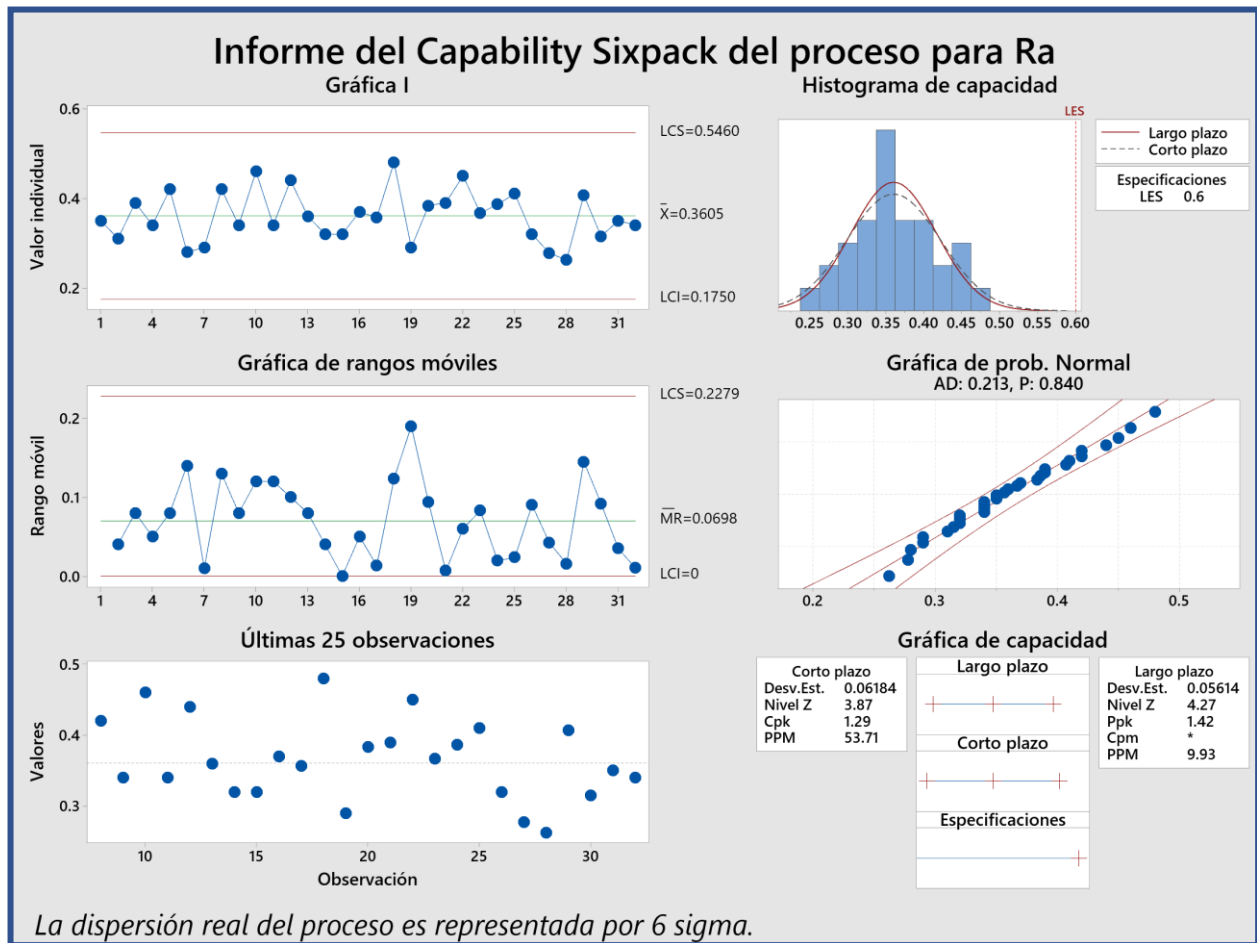
Inicialmente vemos que, para E, la media en el consumo de energía diario por el proceso disminuyó respecto a la media de la colección de datos inicial (8.74 VS 11.18 KWh/día) **refleja una mejora real en el consumo energético diario de 21.82%**.

Por parte de la rugosidad promedio dejada sobre las piezas, observamos una mejora más substancial, (0.36 VS 0.50  $\mu\text{m}$ ), **equivalente a una mejora en la media del proceso en un 28%**.

Procedamos a realizar el análisis de capacidad con los datos obtenidos en nuestra prueba piloto y verifiquemos si la capacidad del proceso observa mejoría, recordemos que el límite de especificación requerido para el material de la pieza finalmente determinado como mejor para el proceso es:

**Aluminio:** LCS = 0.6  $\mu\text{m}$  , LCI = 0  $\mu\text{m}$

A continuación, se muestran los resultados del análisis de capacidad para los datos de la prueba piloto:



**Figura 126** – Informe sixpack de estudio de capacidad prueba piloto. (Elaboración propia)

- Por los gráficos de control, podemos observar que nuestros límites de control son LCI = 0.17 y LCS = 0.54, siendo este último menor a LES = 0.6, esto es indicativo que el proceso ya está produciendo de acuerdo con especificación.
- Tanto para los resultados de individuales como de rango móvil no tenemos causas especiales de variación (ningún dato esta fuera de límites de control), se considera que el proceso está en control estadístico.

- Por la prueba de normalidad por Anderson Darling tenemos un valor  $P=0.840$ , mayor a  $\alpha=0.05$ , determinamos que los datos persiguen una distribución normal.
  
- Por parte del estudio de capacidad del proceso, tenemos que para un  $LES = 0.6 \mu\text{m}$ , el índice  $CPK = 1.29$ , indica que el proceso está produciendo dentro de las especificaciones ya los valores a considerar son los siguientes:
  - **$Cpk > 1$** , el proceso está produciendo dentro de las especificaciones
  - **$0 < Cpk < 1$** , el proceso está produciendo fuera de las especificaciones
  - **$Cpk \leq 0$** , la media del proceso está fuera de las especificaciones
  
- Con una cantidad de PPMO`s = **53.71** no conformes por millón de oportunidades obtenemos un nivel sigma = **3.87**.

**En resumen, el proceso mejoro en un 50% aproximadamente en cuanto a capacidad de producir de acuerdo con especificación.**

***NOTA:** Es importante mencionar que los valores de resultados en la mejora del proceso aquí proporcionados no corresponden a datos de piso de producción en la industria, si no a datos de nivel experimentación en laboratorio de ingeniería mecánica del ITESO, razón por la cual estos datos, son solo una recomendación general y deberán ser extrapolados para los niveles de producción particulares que se tengan en la industria.*

## **6 DISCUSIÓN FINAL**

De los resultados observados anteriormente podemos remarcar entonces los objetivos planteados en un inicio y la comparación respecto a lo logrado finalmente con la ejecución completa de la metodología PDCA considerando aquellos aspectos que se observaron durante la investigación de manera que permita abordar análisis posteriores para la aplicación en dicho proceso.

### **6.1 Consecuencias de la aplicación de la estrategia**

Al inicio de este proyecto de investigación, no existía datos estadísticos históricos de este proceso de corte al menos para el consumo energético, menos aún datos donde se compararán los consumos energéticos derivados de dicho proceso en dos diferentes máquinas-herramienta, máquinas utilizadas particularmente para unos u otros procesos similares, pero que son utilizadas comúnmente en la industria sin tener una línea base del consumo y las emisiones generadas debido a este.

Como consecuencia directa se tiene que, para el laboratorio, ya se tienen datos estadísticos de este proceso que a nivel del laboratorio de ingeniería mecánica del ITESO, se realiza constantemente como parte de las clases curriculares de algunas materias por los alumnos de la carrera de ingeniería mecánica, permitiendo también abordar el proceso desde una perspectiva de sustentabilidad energética.

La utilización del PDCA como estrategia de investigación, permitió realizar el proyecto estableciendo las métricas que impactan lo que se desea mejorar tanto para el cliente como al proceso, enfocando así los esfuerzos únicamente en la utilización de herramientas de calidad específicas que nos permitirían lograr las metas deseadas, seleccionando las variables de estudio que impactan directamente en estos métricos, sin vernos afectados en el tiempo total que hubiese llevado el realizar una metodología diferente.

Consecuencias y resumen de impacto en los métricos objetivo planteados									
Métricos	Antes		Después		% Cambio	Objetivo planteado inicialmente	Logrado?	Observaciones	
Reducir la facturación eléctrica anual derivada del proceso de corte (Fe)	\$ 8,243.00	Pesos	\$ 6,444.00	Pesos	21.82	Disminuyó	20%	✓	N/A
Reducir la emisión de GEI a por consumo energético derivado del proceso de corte (Ecar)	\$ 2,000.00	KgCO <sub>2e</sub>	\$ 1,563.00	KgCO <sub>2e</sub>	21.85	Disminuyó	20%	✓	N/A
Aumentar en el desempeño del proceso ( $\bar{J}_p$ )	209	Piezas/Dia	244	Piezas/Dia	14.34	Aumento	30%	✗	El diseño experimental se enfocó en analizar los parámetros de corte de manera que tanto R <sub>d</sub> como E se optimizaran (ya que eran nuestros objetivos principales), de manera que la mejora influyo en elegir el aluminio en lugar del acero P20 como material predilecto (que es mas pequeño y habría logrado obtener un TP mayor).
Aumentar la capacidad del proceso al disminuir la cantidad de producto no conforme (PPO's, CPk y Nivel Z)	19.064	PPO's	53.71	PPO's	46.5	Aumento	20%	✓	N/A
	2.07	Nivel Z	3.87	Nivel Z					
	0.69	CPk	1.29	CPk					
Objetivos particulares	Antes		Después		% Cambio				
Aumentar el % de confiabilidad del sistema de medición (%R&R)	17.27%	%Gauge R&R	11.94%	%Gauge R&R	30.86	Disminuyó			Objetivo mejorado debido a la ejecución metodologica

**Tabla 37** – Métricos y objetivos logrados en el proyecto y el porcentaje de mejora respectivo. (Elaboración propia)

Como se observó en las acciones correctivas para mejorar el proceso de medición, esta metodología llevo a establecer esta acción de manera que la ejecución correcta en la medición de la rugosidad tenga una iteración permanente, dando así lugar a la mejora continua necesaria que se requiere (como el ciclo de Deming lo indica) para que el control del proceso y la mejora permanezcan en el tiempo.

El DOE y los resultados que este arrojó, permitió decidir cuáles serían las mejores opciones de las que se disponía en el proceso actual (ambos materiales y ambas máquinas-herramienta) y obtener las características adecuadas de dicho proceso dirigidos a una mejora en las métricas iniciales planteadas a mejorar.

## **6.2 Aspectos de mejora para investigaciones subsecuentes**

Las siguientes son algunas observaciones de aspectos de mejora para investigaciones subsecuentes:

- Mejorar el proceso de corte en máquina-herramienta tipo fresadora (disminuyendo la vibración y o factores de ruido que influyan en la lectura de rugosidad) de manera que permita obtener el beneficio del consumo energético menor al de CNC.
- Es claro que el proceso de medición es adecuado para este proceso, pero se puede proponer la compra de un rugosímetro con mayor precisión específico para la medición de rugosidad.
- Aunque para este proyecto y problema planteado se establece las piezas a maquinar ya con ciertas dimensiones antes de ser cortadas (determinadas por el proveedor), se puede establecer un proceso previo de corte de la pieza que permita adecuar las dimensiones al proceso requerido, sin embargo, esto requeriría de mayores costos en este.

## **6.3 Relevancia y trascendencia disciplinaria del caso**

Podemos concluir, que la relevancia de este trabajo es claramente la mejora de uno de los procesos más comunes en la industria metalmecánica, como lo es el corte por arranque de viruta en máquinas-herramienta, pero este desde una perspectiva de gestión de la sustentabilidad de este y con ello los factores ambientales involucrados en el consumo energético derivado de este proceso. No debemos enfocarnos solo en la mejora continua que involucra el desempeño de estos procesos, esto implica el tener un mayor sentido de responsabilidad social que definitivamente tiene un

impacto positivo no solo en la satisfacción de los empleados dentro de las organizaciones si no también en la sociedad misma.

La elaboración de este proyecto me ha permitido ejecutar un plan completo de trabajo de basándome en la metodología del ciclo de Deming, la cual, como herramienta de mejora continua, permite al ingeniero a cargo del proyecto establecer prioridades y sobre todo proponer fronteras de costos y presupuestos de manera que se valore el costo/beneficio del proyecto sin que este llegue a ser excesivo. Creo que dicha metodología aporta positivamente a proyectos de manufactura esbelta donde se puede seguir avanzando de acuerdo con los resultados obtenidos en cada etapa del ciclo, finalizando con un control del proceso y una mejora final de este.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 14955-1:2017, I. (November de 2017). *ISO 14955-1:2017 Machine tools — Environmental evaluation of machine tools — Part 1: Design methodology for energy-efficient machine tools*. Obtenido de International Organization for Standardization: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14955:-1:ed-2:v1:en>
- Ashby F. (2009). *Materials and Environment*. Burlington, MA: Elsevier.
- Berend Denkena, E. A.-A. (2020). Energy efficient machine tools. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 646-667.
- Centro Nacional de Control de Energía. (2020). *Informe de Tecnología de Generación de Referencia Año de Producción 2020*. Ciudad de México: Centro Nacional de Control de Energía.
- Chryssolouris, F. P. (2014). On a generalized approach to manufacturing energy efficiency. *Int J Adv Manuf Technol*, 1437-1452.
- Climatico, I. N. (Mayo de 2018). *Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climatico*. Obtenido de Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climatico: <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero>
- DFM Directorio Forestal Maderero. (30 de Agosto de 2019). *Forestal Maderero*. Obtenido de Forestal Maderero: <https://www.forestalmaderero.com/articulos/item/la-historia-del-cnc-control-numerico-por-computadora.html>
- Diaz, N., M., H., Jayanathan, S., Chen, Y., Horvarth, A., & Dornfeld, D. (2010). Energy Consumption Characterization and Reduction Strategies for Milling Machine Tool Use. *IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology*, 263-267.
- Energía, S. d. (2018). *Balance Nacional de Energía en México 2018*. Obtenido de Balance Nacional de Energía en México 2018.
- Esteves, A. (15 de 03 de 2003). Dos siglos de fresadoras. *Metalmecánica*.
- Farizal, M. (2010). Energy Analysis in Turning and Milling. *School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering*, 58.
- Geografía, I. N. (14 de Mayo de 2023). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística y Geografía: <https://www.inegi.org.mx/app/tabulados/default.aspx?pr=17&vr=7&in=46&tp=20&wr=1&cno=2>
- H. Alswat, P. T. (2021). The International Dimension of Electrical Energy Derived Emissions for Machine Tools. *CIRP Congress for lifecycle engineering* (pág. 6). United Kingdom: ELSEVIER.
- H. Shao, H. W. (2004). A cutting power model for tool wear monitoring in milling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 1503-1509.
- Haas Automation, I. -C. (2022). *HassCNC*. Obtenido de VF-1 product specifications: <https://www.haascnc.com/machines/vertical-mills/vf-series/models/small/vf-1.html>
- Hirohisa Narita, N. D. (2008). Environmental Burden Analysis For Machining operation Using LCA method. *The 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems*, 65-68.
- Humberto Gutiérrez Pulido, R. d. (2012). *Análisis y Diseño de Experimentos*. Guadalajara, México: Mc Graw Hill.

- Inter 2000, S. m. (Febrero de 2015). *Inter 2000, S.L.U. mecanizados*. Obtenido de Inter 2000, S.L.U. mecanizados: <https://www.inter2000mecanizados.com/post/historia-de-los-cnc>
- Jalisco, I. d. (14 de Agosto de 2019). *Sectores estrategicos de Jalisco*. Obtenido de Sectores estrategicos de Jalisco: [https://iieg.gob.mx/ns/?page\\_id=11592#:~:text=Actualmente%20se%20tiene%20disponibilidad%20de,del%20vestido%20y%20sector%20primario](https://iieg.gob.mx/ns/?page_id=11592#:~:text=Actualmente%20se%20tiene%20disponibilidad%20de,del%20vestido%20y%20sector%20primario).
- Leilei Meng, C. Z. (2017). Study on the Power Consumption of Different Milling Modes and. *13th IEEE Conference on Automation Science and Engineering* (págs. 1-6). Xi'an China: IEEE.
- Luis M. Sarache, R. R. (s.f.). *Análisis Multifactorial Del Consumo Energético de un Proceso de Fresado Frontal*. Universidad de Los Andes, Merida, Venezuela.
- Manetto, F. (18 de Febrero de 2021). Crisis del gas: así fue la escalada que puso en jaque al sistema eléctrico de México. *El País*.
- México, D. (01 de 01 de 2019). *Indicadores Económicos (Industria)*. Obtenido de Data México: <https://datamexico.org/es/profile/geo/jalisco-jc?indicatorCensus1=Total+Income#economy>
- Mundo, B. N. (18 de Febrero de 2021). *Apagones en México: la enorme dependencia mexicana del gas de EE.UU. que dejó al descubierto la tormenta invernal de Texas*. Obtenido de BBC News: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-56106262>
- Naturales, S. d. (2018). *Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero*. Ciudad de México: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.
- Naturales, S. d. (2020). *Factor de Emisión del Sistema Eléctrico Nacional*. Ciudad de Mexico: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- País, E. (18 de Febrero de 2021). El Pais. *El Pais*. Obtenido de El Pais: <https://elpais.com/mexico/2021-02-19/la-semana-que-puso-en-jaque-el-sistema-electrico-de-mexico.html>
- Pico Technology. (2019). *PicoLog CM3 Current Data Logge*. Obtenido de Pico Technology: <https://www.picotech.com/data-logger/cm3/current-data-logger>
- producción, G. d. (5 de Julio de 2015). *Gestión de la Producción*. Obtenido de <https://gestiondelaproduccionn.weebly.com/blog/mejora-continua>
- Pulido, H. G. (2010). *Análisis y diseño de experimentos*. México D.F.: McGraw-Hill Interamericana.
- Qiulian Wang, F. L. (2014). Multi-Objective Optimization of machining parameters considering energy consumption . *Int J Adv Manuf Technol*, 1133-1142.
- Secretaría de Energía. (2017). *Balance nacional de energía*. Ciudad de México: Secretaría de Energía.
- Serope Kalpakjian, S. R. (2002). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología* . Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Education.
- Sigma, T. L. (23 de Junio de 2017). *What is PDCA cycle? Learn how to apply it!* Obtenido de Think Lean Six Sigma: <https://www.thinkleansixsigma.com/article/pdca-cycle>
- Sydle. (25 de Enero de 2021). *Sydle. Plataforma digital corporativa*. Obtenido de <https://www.sydle.com/br/blog/gestao-empresarial-615eedb8fa9c9a580ca9faf6>
- Timothy Gutowski, J. D. (2006). Electrical energy requirements for manufacturing processes. *International Conference on Life Cycle Engineering* (págs. 1 - 5). Lovaina: Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology.
- Trumeter. (2021). *APM Power Meter Datasheet*. Obtenido de Trumeter: <https://www.trumeter.com/product/apm-power-meter/>

*Wikipedia*. (1 de Mayo de 2023). Obtenido de <https://en.wikipedia.org/wiki/PDCA>  
*Xometry*. (21 de Febrero de 2022). *Xometry*. Obtenido de <https://xometry.eu/es/acabados/>