



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

Programa de Doctorado en  
Ingeniería y Producción Industrial

**DESARROLLO DE UN MODELO DE FABRICACIÓN SOSTENIBLE  
APLICADO A LOS PROCESOS DE ARRANQUE DE VIRUTA  
EN ENTORNOS COLABORATIVOS**

TESIS DOCTORAL

**Autor:**  
César Ricardo Ayabaca Sarria

**Director:**  
Dr. Carlos Vila Pastor

Valencia, Julio 2021





UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

Departamento de Ingeniería Mecánica y de  
Materiales

Programa de Doctorado en Ingeniería y Producción  
Industrial

*Desarrollo de un Modelo de Fabricación  
Sostenible Aplicado a los Procesos de Arranque  
de Viruta en Entornos Colaborativos*

Tesis Doctoral

**César Ricardo Ayabaca Sarria**

Dirigida por: Dr. Carlos Vila Pastor

Valencia, Julio 2021



## Agradecimientos

Debo agradecer primero a Dios por ser el compañero espiritual, y enseñarme que hay un plan para cada uno de nosotros en este mundo, haciendo que las cosas sucedan.

Siempre acompañado de mi tutor y amigo Profesor Carlos Vila Pastor, muchas gracias por ser el apoyo incondicional y permanente en este crecimiento personal y académico como mi mentor.

Para los que me han acompañado, pero se adelantaron en el camino de la vida: a mi difunta madre Nora Inés, y difunta esposa Karina de Lourdes, gracias por sus enseñanzas y apoyo en los años que pudimos estar juntos.

A mis hijas Natalia Karina y Karen Juliana, quienes son la motivación para muchas cosas.

Para mi padre Julio César, a mis hermanos Nora, Carlos, Iván, David y Mario gracias por el apoyo absoluto que siempre ha estado presente.

A Anita por ser el soporte incondicional para coger las riendas de la vida, comprender que hay que vivir un día a la vez y siempre seguir adelante.

A William por compartir directamente todas estas experiencias que nos han permitido crecer, edificar el alma y a la vez entender que la fe en Dios te permite cruzar océanos.

A Rodrigo, Sergio, Sharon, Alex, Doris, Patricia, Ximena, Geovanni, Ena, Nelly, Alina, Bogdan, Marieke, Dayana, Jaqueline, Lorenzo, José y muchos más con quienes nos volveremos a encontrar en alguna ciudad del mundo, gracias por el apoyo constante.

Al personal de la Universitat Politècnica de València UPV Valencia-España por su colaboración en cada una de las actividades de esta tesis doctoral; a Santiago, Pedro, Lorenzo y demás personal del Área de Fabricación mi más sincera gratitud.

Al personal de la Universitat Jaume I UJI Castellón-Valencia, a Miguel, José Vicente por las facilidades brindadas en las estancias de investigación y el desarrollo experimental.

A la Escuela Politécnica Nacional EPN Quito-Ecuador, por el apoyo y en especial a Iván Zambrano por la confianza para incursionar en el programa doctoral.

A la Fundación Carolina y por su intermedio al Gobierno de España, por la oportunidad brindada mediante la convocatoria de Becas 2017 para Iberoamérica.

Gracias por su presencia.

...Amunt...



## Resumen

La Organización de las Naciones Unidas sugirió que entre los mayores desafíos de la humanidad se encontraba alcanzar un desarrollo sostenible en distintos aspectos medioambientales, económicos y sociales. De entre todos ellos, deberíamos considerar realizar aportaciones en los objetivos relacionados con los aspectos industriales y de producción. De esta forma, esta propuesta de investigación se inicia con la hipótesis de que es posible establecer una contribución referente a la fabricación sostenible que estructure el conocimiento y establezca directrices para una producción más limpia.

La disertación comienza con una revisión de los trabajos previos en análisis de sostenibilidad aplicados a los sistemas de producción y a tecnologías de fabricación en general. El trabajo se centra, posteriormente, en el análisis sobre las tecnologías de arranque de viruta y las tendencias sobre sostenibilidad con la inquietud de encontrar los avances, las tendencias y los indicadores más utilizados. De esta forma, se identifica la oportunidad de implementar los criterios de sostenibilidad en los procesos de fabricación, para distintas etapas del ciclo de vida del producto y desde distintas perspectivas de análisis de materiales, producto y proceso.

El resultado es una propuesta de modelo marco de procesos de conformado con flujos de materiales e información para definir los indicadores, durante las actividades del ciclo de vida del producto, alineados con los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Como validación se ha elaborado una propuesta de conjunto de indicadores, para el caso de arranque de viruta, que contempla la triple dimensión de sostenibilidad, económica y social, las fases del ciclo de vida de producto y la perspectiva del tipo de análisis de ingeniería del proceso. La combinación de estos ha permitido definir una serie de matrices que contienen familias de indicadores que pueden desplegarse y adaptarse en función de la tecnología de conformado y proceso de fabricación.

A nivel de detalle, la definición la familia de indicadores se establece en la fase de fabricación del producto en planta, donde se estructuran las métricas considerando la operación concreta de arranque de viruta y se determinan aquellos factores que influyen intrínsecamente. Por medio de una serie de experimentos se validó la toma de datos para cada indicador y se calcularon los indicadores agregados para facilitarlos en entornos colaborativos, potenciando la información estratégica, que puede ser analizada inmediatamente en cualquier plataforma digital colaborativa. Se define indicadores tecnológicos, como tiempos de mecanizado, estrategias de corte, integridad superficial, pero a la vez se evalúan aspectos como el clima social.

En definitiva, podemos decir que sea se ha logrado realizar una aportación en el ámbito de la definición estructurada de indicadores para fabricación alineados con los colaborativos como parte de la definición de sistemas de indicadores equilibrados y alineados con objetivos de desarrollo sostenible.



## Abstract

The United Nations Organization suggested that among humanity's greatest challenges was to achieve sustainable development in different environmental, economic, and social aspects. Among all of them, we should consider making contributions to the objectives related to industrial and production aspects. In this way, this research proposal begins with the hypothesis that it is possible to establish a contribution regarding sustainable manufacturing that structures knowledge and establishes guidelines for cleaner production.

The dissertation begins with a review of previous work in sustainability analysis applied to production systems and manufacturing technologies in general. Subsequently, the work focuses on the analysis of chip removal technologies and sustainability trends with the concern to find the most widely used advances, trends, and indicators. In this way, the opportunity to implement sustainability criteria in manufacturing processes is identified, for different stages of the product life cycle and from different perspectives of material, product, and process analysis.

The result is a proposal for a framework model of manufacturing processes with material and information flows to define the indicators, during the activities of the product life cycle, aligned with the Sustainable Development Goals. As validation, a proposal for a set of indicators has been prepared, in the case of chip startup, which considers the triple dimension of sustainability, economic and social, the phases of the product life cycle and the perspective type of engineering analysis of the process. The combination of these has made it possible to define a series of matrices that contain families of indicators that can be deployed and adapted according to the forming technology and the manufacturing process.

At the level of detail, the definition of the family of indicators is established in the manufacturing phase of the product in the plant, where the metrics are structured considering the specific chip removal operation and those factors that intrinsically influence are determined. Through a series of experiments, the data collection for each indicator was validated and the aggregated indicators were calculated to facilitate them in collaborative environments, enhancing strategic information, which can be immediately analyzed in any collaborative digital platform. Technological indicators are defined, such as machining times, cutting strategies, surface integrity, but at the same time aspects such as the social climate are evaluated.

In short, we can say that it has been possible to contribute in the field of the structured definition of indicators for manufacturing aligned with collaborative ones as part of the definition of balanced indicator systems aligned with sustainable development objectives.



## Resum

L'Organització de les Nacions Unides va suggerir que entre els majors desafiaments de la humanitat es trobava aconseguir un desenvolupament sostenible en diferents aspectes mediambientals, econòmics i socials. D'entre tots ells, hauríem de considerar realitzar aportacions en els objectius relacionats amb els aspectes industrials i de producció. D'aquesta manera, aquesta proposta d'investigació s'inicia amb la hipòtesi que és possible establir una contribució referent a la fabricació sostenible que structure el coneixement i establisca directrius per a una producció més neta.

La dissertació comença amb una revisió dels treballs previs en anàlisis de sostenibilitat aplicats als sistemes de producció i a tecnologies de fabricació en general. El treball se centra, posteriorment, en l'anàlisi sobre les tecnologies d'arrancada d'encenall i les tendències sobre sostenibilitat amb la inquietud de trobar els avanços, les tendències i els indicadors més utilitzats. D'aquesta manera, s'identifica l'oportunitat d'implementar els criteris de sostenibilitat en els processos de fabricació, per a diferents etapes del cicle de vida del producte i des de diferents perspectives d'anàlisi de materials, producte i procés.

El resultat és una proposta de model marc de processos de conformat amb fluxos de materials i informació per a definir els indicadors, durant les activitats del cicle de vida del producte, alineats amb els Objectius de Desenvolupament Sostenible. Com a validació s'ha elaborat una proposta de conjunt d'indicadors, per al cas d'arrancada d'encenall, que contempla la triple dimensió de sostenibilitat, econòmica i social, les fases del cicle de vida de producte i la perspectiva del tipus d'anàlisi d'enginyeria del procés. La combinació d'aquests ha permès definir una sèrie de matrius que contenen famílies d'indicadors que poden desplegar-se i adaptar-se en funció de la tecnologia de conformat i procés de fabricació.

A nivell de detall, la definició la família d'indicadors s'estableix en la fase de fabricació del producte en planta, on s'estructuren les mètriques considerant l'operació concreta d'arrancada d'encenall i es determinen aquells factors que influeixen intrínsecament. Per mitjà d'una sèrie d'experiments es va validar la presa de dades per a cada indicador i es van calcular els indicadors agregats per a facilitar-los en entorns col·laboratius, potenciant la informació estratègica, que pot ser analitzada immediatament en qualsevol plataforma digital col·laborativa. Es defineix indicadors tecnològics, com a temps de mecanitzat, estratègies de tall, integritat superficial, però alhora s'avaluen aspectes com el clima social.

En definitiva, podem dir que s'ha aconseguit realitzar una aportació en l'àmbit de la definició estructurada d'indicadors per a fabricació alineats amb els col·laboratius com a part de la definició de sistemes d'indicadors equilibrats i alineats amb objectius de desenvolupament sostenible



# Índice General

—

—

# Índice General

<b>Capítulo 1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Motivación.....	4
1.3. Objetivos de la Tesis.....	5
1.4. Alcance.....	6
1.5. Organización de la memoria.....	7
<b>Capítulo 2. Análisis de Sostenibilidad en Fabricación.....</b>	<b>9</b>
2.1. Desarrollo Sostenible.....	9
2.2. Fabricación Sostenible.....	14
2.3. Procesos de Fabricación Sostenible.....	19
2.4. Estudios de métricas para Fabricación Sostenible.....	22
2.5. Análisis de Ciclo de Vida y Sostenibilidad.....	27
2.6. Entornos Colaborativos y Plataformas PLM.....	30
2.6.1. Retos de la Industria 4.0.....	31
2.6.2. Plataforma PLM - 3DEXPERIENCE.....	33
2.6.3. Roles de los participantes de un entorno colaborativo.....	37
2.7. Conclusiones.....	39

<b>Capítulo 3. Análisis de Sostenibilidad en Procesos de Arranque de Viruta.....</b>	<b>41</b>
3.1. Introducción .....	41
3.1.1. Ciclo de Vida en Procesos de Arranque de Viruta. ....	44
3.1.2. Marcos de Referencia de Sostenibilidad.....	47
3.2. Estudios de Mecanizado Sostenible.....	51
3.2.1. Estructura de Indicadores de sostenibilidad.....	63
3.2.2. Indicadores de Mecanizado en la Dimensión Económica. ....	64
3.2.3. Indicadores de Mecanizado en la Dimensión Ambiental. ....	65
3.2.4. Indicadores de Mecanizado en la Dimensión Social. ....	67
3.2.5. Indicadores de Costes del proceso de Arranque de Viruta. ....	68
3.3. Evaluación de Indicadores en el Proceso de Arranque de Viruta. ....	71
3.3.1. Diseño de Experimentos - Metodología Taguchi. ....	71
3.3.2. Ciclo de Mejora Continua.....	73
3.3.3. Análisis Relacional de Grises. ....	74
3.4. Conclusiones .....	76
<b>Capítulo 4. Modelo de Mecanizado Sostenible en Entornos Colaborativos.....</b>	<b>77</b>
4.1. Introducción .....	77
4.2. Entornos Colaborativos en Mecanizado.....	80
4.3. Ámbitos de la Propuesta del Modelo de Sostenibilidad.....	83
4.3.1. Ámbito de Ciclo de vida de Mecanizado.....	84
4.3.2. Ámbito de Dimensiones de Sostenibilidad en mecanizado .....	87
4.3.3. Ámbito de Análisis de Ingeniería Mecanizado.....	87
4.4. Propuesta de Modelo de Mecanizado .....	88
4.5. Matrices de Indicadores para el Análisis de Sostenibilidad.....	91
4.5.1. Matriz I - CAD: Ciclo / Análisis de Ingeniería / Dimensión .....	93
4.5.2. Matriz II - CDA: Ciclo / Dimensión / Análisis de Ingeniería.....	94
4.5.3. Matriz III - DCA: Dimensión / Ciclo / Análisis de Ingeniería .....	96

4.5.4. Matriz IV - DAC: Dimensión / Análisis de Ingeniería / Ciclo .....	97
4.5.5. Matriz V - ADC: Análisis de Ingeniería / Dimensión / Ciclo .....	99
4.5.6. Matriz VI - ACD: Análisis de Ingeniería /Ciclo/ Dimensión .....	100
4.5.7. Relación de Matrices y Familias de indicadores .....	102
4.6 Integración del Modelo de Mecanizado en Entornos Colaborativos .....	105
4.7. Propuesta de Indicadores para el Ciclo de Vida .....	106
4.7.1. Indicadores en Fase de Diseño .....	107
4.7.2. Indicadores en Fase de Fabricación.....	108
4.7.3. Indicadores en Fase de Uso .....	114
4.7.4. Indicadores en Fase de Fin de vida.....	114
4.8. Ponderación de Indicadores .....	115
4.8.1. Ponderación Indicadores Matriz I - Fases del Ciclo de Vida .....	115
4.8.2. Recomendaciones de ponderaciones de la Fase de Fabricación.....	116
4.9. Conclusiones.....	118
<b>Capítulo 5. Validación Experimental .....</b>	<b>119</b>
5.1. Introducción.....	119
5.2. Materiales y Equipos del desarrollo experimental.....	123
5.2.1. Material para Mecanizar.....	123
5.2.2. Centros de Mecanizado y Equipos. ....	124
5.2.3. Herramientas .....	125
5.2.4. Aplicaciones de fabricación asistida por ordenador .....	126
5.2.5. Instrumentos de medición .....	129
5.3. Caso I: Tasa de Eliminación de Material y Tiempo de corte.....	131
5.3.1. Paso 1 - Caso I: Observación .....	131
5.3.2. Paso 2 - Caso I: Formulación de hipótesis de Indicadores .....	133
5.3.3. Paso 3 - Caso I: Diseño experimental - Procedimiento .....	133
5.3.4. Paso 4 - Caso I: Realización del experimento. ....	134

5.3.5. Paso 5 - Caso I: Análisis de Resultados.....	138
5.3.6. Paso 6 - Caso I: Conclusiones del experimento.....	140
5.3.7. Paso 7 - Caso I: Informe de resultados en entornos colaborativos .....	140
5.4. Caso II: Evaluación de Integridad superficial.....	144
5.4.1. Paso 1 - Caso II: Observación. ....	144
5.4.2. Paso 2 - Caso II: Formulación de hipótesis. ....	146
5.4.3. Paso 3 - Caso II: Diseño experimental - Procedimiento.....	146
5.4.4. Paso 4 - Caso II: Desarrollo del experimento.....	147
5.4.5. Paso 5 - Caso II: Análisis de Resultados. ....	149
5.4.6. Paso 6 - Caso II: Conclusiones del experimento. ....	156
5.4.7. Paso 7 - Caso II: Informe de resultados en entornos colaborativos.....	157
5.5. Caso III: Evaluación en diferentes centros de mecanizado.....	159
5.5.1. Paso 1 - Caso III: Observación. ....	159
5.5.2. Paso 2 - Caso III: Formulación de hipótesis.....	161
5.5.3. Paso 3 - Caso III: Diseño experimental - Procedimiento.....	161
5.5.4. Paso 4 - Caso III: Desarrollo del experimento.....	164
5.5.5. Paso 5 - Caso III: Análisis de Resultados.....	166
5.5.6. Paso 6 - Caso III: Conclusiones del experimento.....	169
5.5.7. Paso 7 - Caso III: Informe de resultados en entornos colaborativos.....	170
5.6. Casos IV: Evaluación de Dimensión social. ....	172
5.6.1. Paso 1 - Caso IV: Observación.....	172
5.6.2. Paso 2 - Caso IV: Formulación de hipótesis.....	174
5.6.3. Paso 3 - Caso IV: Diseño experimental - Procedimiento .....	174
5.6.4. Paso 4 - Caso IV: Desarrollo del experimento. ....	174
5.6.5. Paso 5 - Caso IV: Análisis de Resultados.....	180
5.6.6. Paso 6 - Caso IV: Conclusiones del experimento.....	182
5.6.7. Paso 7 - Caso IV: Informe de resultados en entornos colaborativos .....	182
5.7. Conclusiones.....	186

<b>Capítulo 6. Conclusiones y Trabajos Futuros .....</b>	<b>187</b>
6.1. Conclusiones.....	187
6.2. Publicación de resultados de la investigación doctoral.....	191
6.3. Contribuciones de la investigación .....	193
6.4. Trabajos y Líneas de Investigación a futuro .....	194
<b>Referencias.....</b>	<b>195</b>



# Índice de Figuras

---



# Índice de Figuras

Figura 1.1. Objetivos de Desarrollo Sostenible - Agenda 2030.....	1
Figura 2.1. Áreas Claves para las Organizaciones.....	10
Figura 2.2. Modelo de Economía Circular vs Economía Lineal.....	11
Figura 2.3. Esquema de Economía Circular.....	12
Figura 2.4. Despliegue del Círculo del Cometa, Empresa RICOH.....	13
Figura 2.5. Evolución de las Estrategias de Fabricación.....	15
Figura 2.6. Diagrama de calidad para una empresa de servicios de mecanizado.....	17
Figura 2.7. Casa de medición del rendimiento de Fabricación Sostenible.....	24
Figura 2.8. Comparación de grupos de rendimiento de sostenibilidad.....	24
Figura 2.9. Ecosistema de digitalización.....	30
Figura 2.10. Fabricación Física Cibernética - ITRI©.....	31
Figura 2.11. Administración de la Plataforma - 3DEXPERIENCE®.....	34
Figura 2.12. 3DEXPERIENCE® Gestión de Programas - Simplificado.....	34
Figura 2.13. 3DEXPERIENCE® Ingeniería de Sistemas - Simplificado.....	35
Figura 2.14. 3DEXPERIENCE® Ingeniería de Sistemas - Kit de inicio simplificado.....	36
Figura 2.15. 3DEXPERIENCE® Ingeniería de Sistemas - Resumen simplificado.....	36

Figura 2.16. 3DEXPERIENCE® Ejemplo de Roles de Colaborador .....	38
Figura 3.1. Principios de Hannover para sostenibilidad.....	42
Figura 3.2. Sistema de límites del Análisis del Ciclo de Vida .....	43
Figura 3.3. Eco Index: Etapas del ciclo de vida y áreas clave de impacto .....	45
Figura 3.4. Ciclo de desarrollo del Producto.....	46
Figura 3.5. Categorización de indicadores SMIR .....	48
Figura 3.6. Técnicas sostenibles - Producción limpia de metales .....	51
Figura 3.7. Principales aspectos para mejorar y desarrollar: Mecanizado Sostenible...	52
Figura 3.8. Procedimiento para Modelado y Optimización del Ti-grade 2 .....	54
Figura 3.9. Guía de Mecanizado Sostenible.....	55
Figura 3.10. Principios de Fabricación Sostenible Fractal .....	56
Figura 3.11. Escenarios para optimización del maquinado.....	57
Figura 3.12. Sistemas de lubricación en mecanizado.....	58
Figura 3.13. Tendencias de metodologías de evaluación de sostenibilidad .....	60
Figura 3.14. Esquema de los pasos para selección de indicadores .....	63
Figura 3.15. Gráfico Lineal del Arreglo Ortogonal L <sub>27</sub> .....	71
Figura 3.16. Diseño de Experimentos L <sub>27</sub> .....	72
Figura 3.17. Mejora Continua: Planear - Hacer - Verificar - Actuar.....	73
Figura 3.18. Proceso cíclico PHVA .....	74
Figura 4.1. Marco para la propuesta del Modelo de Fabricación planteado.....	79
Figura 4.2. Entorno Colaborativo para el mecanizado .....	80
Figura 4.3. Entorno Colaborativo - Fase: Fabricación .....	81
Figura 4.4. Delimitación del sistema de análisis. ....	84
Figura 4.5. Esquema simplificado del Ámbito de Ciclo de Vida – Software usado ....	85
Figura 4.6. Enfoque de Indicadores de la propuesta.....	86
Figura 4.7. Esquema simplificado del Ámbito de Sostenibilidad en el Mecanizado ....	87
Figura 4.8. Esquema simplificado del Ámbito de Análisis de Ingeniería .....	87
Figura 4.9. Propuesta del Modelo de Sostenibilidad en Mecanizado.....	88
Figura 4.10. Análisis de Sostenibilidad del Mecanizado en Entornos Colaborativos ...	90

Figura 4.11. Matriz y relación de criterios del Modelo de Sostenibilidad .....	92
Figura 4.12. Relaciones y Análisis de las Matrices.....	102
Figura 4.13. Relación entre Indicadores de las Matrices de Análisis.....	103
Figura 4.14. Ejemplo de ámbitos de análisis: Indicador I <sub>1</sub> .....	103
Figura 4.15. Integración de Ámbitos de Análisis y Sostenibilidad.....	105
Figura 4.16. Ejemplo de agrupación de subniveles del Indicador I <sub>1</sub> .....	106
Figura 4.17. Indicadores del Modelo de Sostenibilidad – Fase: Fabricación.....	108
Figura 4.18. Flujo de Información - Fase: Fabricación-Proceso.....	109
Figura 4.19. Pesos Ponderados Iniciales - Matriz I: I <sub>1</sub> a I <sub>36</sub> .....	115
Figura 4.20. Pesos Ponderados Iniciales - Matriz I: Ámbitos.....	116
Figura 4.21. Pesos Ponderados Iniciales - Fase: Fabricación.....	117
Figura 5.1. Propuesta de experimentos para el modelo de fabricación presentado.....	120
Figura 5.2. Pasos del método científico experimental. ....	122
Figura 5.3. Simulación en Inventor CAM del proceso de mecanizado.....	127
Figura 5.4. Visualización de Trayectoria de la Herramienta y Código G.....	127
Figura 5.5. Manejo de Entornos colaborativos con 3DEXPERIENCE® .....	128
Figura 5.6. Caso I: Enfoque de Sostenibilidad.....	132
Figura 5.7. Caso I: TM Tiempo de Mecanizado .....	138
Figura 5.8. Caso I: Diagrama de Bigotes - Tiempo vs Dirección .....	139
Figura 5.9. Caso I: TEM Tasa de Eliminación de Material .....	139
Figura 5.10. Caso I: Simulación de parámetros .....	142
Figura 5.11. Caso II: Enfoque de Sostenibilidad .....	145
Figura 5.12. Caso II: Configuración Experimental.....	148
Figura 5.13. Caso II-A: Experimentos de Rugosidad .....	149
Figura 5.14. Caso II-B: Experimentos de Rugosidad.....	150
Figura 5.15. Caso II-A: Microdureza en la superficie maquinada .....	151
Figura 5.16. Caso II-B: Microdureza en la superficie maquinada .....	151
Figura 5.17. Caso II-A y Caso II-B: Dureza Superficial.....	152
Figura 5.18. Caso II-A: Microdureza vs Limite de Fluencia .....	154

Figura 5.19. Caso II-B: Microdureza vs Limite de Fluencia.....	155
Figura 5.20. Caso II: SEM - Avance longitudinal de la herramienta de corte.....	156
Figura 5.21. Caso II: Uso del Torno Romi-C420 .....	158
Figura 5.22. Caso III: Enfoque de análisis de Sostenibilidad.....	160
Figura 5.23. Caso III: Diseño experimental .....	162
Figura 5.24. Caso III-A: Mediciones (a) Potencia (b) Rugosidad.....	163
Figura 5.25. Caso III-B: Mediciones (a) Potencia (b) Rugosidad .....	164
Figura 5.26. Caso III: Direcciones de mecanizado: 0°; 45°; 90° .....	164
Figura 5.27. Caso III-A: Efecto de la potencia consumida - Gentiger .....	167
Figura 5.28. Caso III-A: Efecto de la rugosidad superficial - Gentiger .....	168
Figura 5.29. Caso III-B: Efecto de la potencia consumida - Deckel Maho.....	169
Figura 5.30. Caso III-B: Efecto de la rugosidad superficial - Deckel Maho .....	169
Figura 5.31. Caso III: Uso de 3DEXPERIENCE Simulación .....	171
Figura 5.32. Caso IV: Enfoque de análisis de sostenibilidad .....	173
Figura 5.33. Caso IV: Radar de la Dimensión Social - Mejora.....	181
Figura 5.34. Caso IV: Dashboard-a Indicadores de Dimensión Social .....	183
Figura 5.35. Caso IV: Dashboard-b Indicadores de Dimensión Social.....	184
Figura 5.36. Caso IV: Documentación Colaborativa en 3DEXPERIENCE.....	185
Figura 5.37. Esquema de Análisis de Fabricación Sostenible Colaborativa .....	186

# Índice de Tablas

---



# Índice de Tablas

Tabla 2.1. Trabajos previos sobre Fabricación Sostenible.....	16
Tabla 2.2. Revisiones de Procesos de Fabricación Sostenible.....	21
Tabla 2.3. Sistemas de clasificación de conceptos de sostenibilidad.....	25
Tabla 2.4. Propuestas de Indicadores de Fabricación Sostenible.....	26
Tabla 2.5. Revisión sobre Sostenibilidad y Análisis de Ciclo de Vida.....	27
Tabla 2.6. Sostenibilidad y Ciclo de Vida.....	29
Tabla 2.7. Revisiones sobre Iniciativas en Industria 4.0.....	32
Tabla 2.8. 3DEXPERIENCE® Estructura de Entornos Colaborativos.....	33
Tabla 2.9. 3DEXPERIENCE® Bibliotecas de aprendizaje.....	37
Tabla 2.10. 3DEXPERIENCE® Roles Mínimos de la propuesta.....	38
Tabla 3.1. Revisiones de Maquinado Sostenible.....	53
Tabla 3.2. Investigaciones en Procesos de Maquinado Sostenible.....	55
Tabla 3.3. Revisiones Bibliográficas de Maquinado Sostenible.....	59
Tabla 3.4. Estudios de Mecanizado Sostenible-Torneado.....	62
Tabla 3.5. Indicadores (Torneado) - Dimensión Económica.....	64
Tabla 3.6. Indicadores (Torneado) - Dimensión Ambiental.....	65

Tabla 3.7. Indicadores (Torneado) - Dimensión Ambiental: Consumo de Energía .....	66
Tabla 3.8. Indicadores (Torneado) - Dimensión Ambiental: Emisiones de Carbono....	67
Tabla 3.9. Indicadores (Torneado) - Dimensión Social.....	68
Tabla 3.10. Costes del proceso de mecanizado .....	69
Tabla 4.1. Ámbitos de la propuesta de Fabricación Sostenible.....	83
Tabla 4.2. Nomenclatura y Acrónimos de Ámbitos de Integración .....	84
Tabla 4.3. Niveles de Selección de Indicadores .....	86
Tabla 4.4. Matrices de Ámbitos propuestos del modelo de sostenibilidad .....	91
Tabla 4.5. Matriz I - CAD: Organización de Indicadores .....	93
Tabla 4.6. Matriz I - CAD: Evaluaciones.....	94
Tabla 4.7. Matriz II - CDA: Organización de Indicadores.....	94
Tabla 4.8. Matriz II - CDA: Evaluaciones .....	95
Tabla 4.9. Matriz III - DCA: Organización de Indicadores.....	96
Tabla 4.10. Matriz III - DCA: Evaluaciones .....	97
Tabla 4.11. Matriz IV - DAC: Organización de Indicadores .....	97
Tabla 4.12. Matriz IV - DAC: Evaluaciones.....	98
Tabla 4.13. Matriz V - ADC: Organización de Indicadores.....	99
Tabla 4.14. Matriz V - ADC: Evaluaciones .....	100
Tabla 4.15. Matriz VI - ACD: Organización de Indicadores .....	100
Tabla 4.16. Matriz VI - ACD: Evaluaciones.....	101
Tabla 4.17. Ámbitos de análisis de la propuesta .....	102
Tabla 4.18. Codificación de Indicadores de Sostenibilidad .....	104
Tabla 4.19. Características de los Indicadores de Sostenibilidad.....	104
Tabla 4.20. Fichas de Codificación de los Indicadores de Sostenibilidad.....	106
Tabla 4.21. Propuesta de Indicadores de mecanizado - Fase: Diseño .....	107
Tabla 4.22. Índice $I_{FA \leftrightarrow MT}$ : Fase de Fabricación - Materiales.....	110
Tabla 4.23. Índice $I_{FA \leftrightarrow PR}$ : Fase de Fabricación - Proceso.....	111
Tabla 4.24. Índice $I_{FA \leftrightarrow PR}$ : Fase de Fabricación - Producto .....	112
Tabla 4.25. Propuesta de Indicadores de mecanizado - Fase: Fabricación.....	113

Tabla 4.26. Propuesta de Indicadores de mecanizado - Fase: Uso.....	114
Tabla 4.27. Propuesta de Indicadores de mecanizado - Fase: Fin de vida .....	114
Tabla 4.28. Pesos ponderados Iniciales - Matriz I (4 Fases).....	115
Tabla 4.29. Pesos ponderados Iniciales - Fase: Fabricación .....	116
Tabla 5.1. Experimentos Propuestos: Casos de Estudio .....	121
Tabla 5.2. Pasos del Método experimental .....	122
Tabla 5.3. Materiales y equipos para los Casos de Estudio .....	123
Tabla 5.4. Denominaciones para el material F-114 (ANSI 1045).....	123
Tabla 5.5. Composición química de los materiales seleccionados.....	124
Tabla 5.6. Centro de Mecanizado Gentiger.....	124
Tabla 5.7. Torno CNC: Romi C420 .....	124
Tabla 5.8. Centro de Mecanizado Deckel Maho .....	125
Tabla 5.9. Herramienta VPX300R .....	125
Tabla 5.10. Inserto LOGU12 07080 PNER-M .....	125
Tabla 5.11. Inserto DNMG 15 06-08 PM 4325 .....	126
Tabla 5.12. Aplicaciones de Fabricación Asistida por Computadora .....	126
Tabla 5.13. Durómetro Duroline M .....	129
Tabla 5.14. Analizador de Metales Bruker .....	129
Tabla 5.15. Microscopio Olympus GX41 .....	129
Tabla 5.16. Pinza Amperimétrica HT9022 .....	130
Tabla 5.17. Rugosímetro Mitutoyo SJ-210 .....	130
Tabla 5.18. Rugosímetro Mitutoyo SJ -201 .....	130
Tabla 5.19. Caso I: Detalles generales del experimento .....	131
Tabla 5.20. Caso I: Indicadores.....	133
Tabla 5.21. Caso I: Materiales y equipos del experimento .....	133
Tabla 5.22. Caso I: Factores de análisis .....	134
Tabla 5.23. Caso I: Combinación CAD/CAM de Parámetros .....	134
Tabla 5.24. Caso I: Combinación de Parámetros L <sub>27</sub> .....	135
Tabla 5.25. Caso I: Factores y Tiempos de Mecanizado .....	136

Tabla 5.26. Caso I: Tasa de Eliminación de Material .....	137
Tabla 5.27. Caso I: Valores de los Parámetros TM $\sphericalangle$ .....	138
Tabla 5.28. Caso I: Factores TEM $\nearrow$ .....	140
Tabla 5.29. Caso I: Factores TM y TEM .....	140
Tabla 5.30. Caso I: Estadística Tiempo de Mecanizado TM .....	141
Tabla 5.31. Caso I: Tiempo de Mecanizado TM.....	141
Tabla 5.32. Caso I: Estadística TEM.....	141
Tabla 5.33. Caso I: Resumen Tasa de Eliminación de Material TEM .....	142
Tabla 5.34. Caso I: Resumen valores de los Indicadores TM y TEM.....	142
Tabla 5.35. Caso II: Detalles Generales del experimento .....	144
Tabla 5.36. Caso II: Indicadores .....	146
Tabla 5.37. Caso II: Materiales y equipos para los experimentos .....	146
Tabla 5.38. Caso II: Diseño de experimentos con rpm constante .....	147
Tabla 5.39. Caso II-A: Análisis de Microdureza.....	150
Tabla 5.40. Caso II-B: Análisis de Microdureza.....	151
Tabla 5.41. Caso II-A: Deformación Plástica .....	153
Tabla 5.42. Caso II-B: Deformación Plástica.....	153
Tabla 5.43. Caso II-A: Microdureza vs Limite de Fluencia.....	154
Tabla 5.44. Caso II-B: Microdureza vs Limite de Fluencia .....	155
Tabla 5.45. Caso III: Detalles generales del experimento .....	159
Tabla 5.46. Caso III: Indicadores .....	160
Tabla 5.47. Caso III: Materiales y equipos para los experimentos.....	161
Tabla 5.48. Caso III: Factores y Niveles .....	162
Tabla 5.49. Caso III: Combinaciones de Factores.....	163
Tabla 5.50. Caso III-A: Resultados Centro de Mecanizado A .....	165
Tabla 5.51. Caso III-B: Resultados Centro de Mecanizado B.....	166
Tabla 5.52. Caso III-A: Análisis Centro de Mecanizado A.....	167
Tabla 5.53. Caso III-B: Análisis Centro de Mecanizado B.....	167

Tabla 5.54. Caso III-A: ANOVA Potencia Consumida .....	168
Tabla 5.55. Caso III-A: ANOVA Rugosidad Superficial .....	168
Tabla 5.56. Caso III: Resumen de Parámetros para cada Centro de Mecanizado .....	169
Tabla 5.57. Caso IV: Indicadores.....	172
Tabla 5.58. Caso IV: Plan de Mejora Dimensión Social.....	175
Tabla 5.59. Caso IV: Ponderaciones Indicadores Dimensión Social .....	176
Tabla 5.60. Caso IV: Evaluación Inicial - Dimensión Social .....	177
Tabla 5.61. Caso IV: Indicadores Iniciales de la Dimensión Social .....	178
Tabla 5.62. Caso IV: Evaluación Final - Dimensión Social .....	179
Tabla 5.63. Caso IV: Indicadores Finales de la Dimensión Social .....	180
Tabla 5.64. Caso IV: Evaluación Comparativa de la Dimensión Social.....	181



## TABLA DE ABREVIATURAS

SIGLAS	SIGNIFICADO
10-YPF	10-Year Framework of Programmes on Sustainable Consumption and Production Patterns
ACV	Análisis de Ciclo de Vida
ANOVA	Análisis de varianza
C2C	Crane to Crane
CAB	Controlled Atmosphere Brazing
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CNC	Computer Numerical Control
CPS	Consumo y Producción Sostenible
EMC	Electromechanical Machining
EMD	Electrodischarge
EnSI	Enterprise Sustainability Index
EPE	Environmental Performance Evaluation
ERP	Enterprise Resource Planning
FCD	Fabricación Cero Desperdicios
FS	Fabricación Sostenible
GRI	Grey Relational Analysis
GRI	Global Reporting Initiative
IEMA	Institute of Environmental Management & Assessment
IoT	Internet of things
ISO	International Organization for Standardization
LCA	Live Cycle Analysis
LM	Lean Manufacturing
MDSC	Medición del desempeño de la Sostenibilidad Corporativa
MQL	Minimum Quantity lubrication
NIST	National Institute of Standards and Technology
ONU	Organización de Naciones Unidas
PLM	Product Lifecycle Management
ProcSI	Índice de sostenibilidad del Proceso
ProcSI	Process Sustainability Index
ProdSI	Product Sustainability Index
RAMI	Reference Architecture Model Industry
RSM	Metodología de respuesta de superficie
S Cycle	Bucle de Sostenibilidad
S Loop	Ciclo de Sostenibilidad
SME	Sustainable Manufacturing Engineering
SMIR	Sustainable Manufacturing Indicator repository
VANV	Valor Agregado Neto Verde



# Capítulo 1

---

—

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Antecedentes.

En septiembre de 2015, la Asamblea General de la ONU “Organización de las Naciones Unidas” adoptó la Agenda 2030, en la que reconocen “que el mayor desafío del mundo es la erradicación de la pobreza”, a la cual debe ponerse fin para que pueda existir desarrollo sostenible. La Agenda 2030 considera 17 objetivos (Figura 1.1) que contienen 169 metas que se encuentran relacionadas y que reflexionan los ámbitos económicos, ambientales y sociales (United Nations, 2017).



Figura 1.1. Objetivos de Desarrollo Sostenible - Agenda 2030 (United Nations, 2015).

Para que la agenda tenga resultados, es necesario el compromiso de cada país, el cual determinara sus políticas y términos. Esta tesis doctoral busca aportar procedimientos para desarrollar a estos objetivos y alcanzar sus metas, especialmente sobre los objetivos relacionados con fabricación, objetivos 9 y 12.



**Objetivo 9 - Industria, innovación e Infraestructura:** en especial con la meta 9.4 que trata del modernizando las infraestructuras y reconvirtiendo las industrias para que sean sostenibles hasta el año 2030.

Las metas para este objetivo son:

- 9.1 “Desarrollar infraestructuras fiables, sostenibles, resilientes y de calidad”.
- 9.2 “Promover una industrialización inclusiva y sostenible”.
- 9.3 “Aumentar el acceso de las pequeñas empresas industriales y otras empresas, en particular en los países en desarrollo, a los servicios financieros”.
- 9.4 *“Mejorar la infraestructura y reajustar las industrias para que sean sostenibles, usando los recursos con mayor eficacia y promoviendo la adopción de tecnologías y procesos industriales”.*

Los medios que se proponen para alcanzarlos son:

- 9.A “Facilitar el desarrollo de infraestructuras sostenibles y resilientes en países en desarrollo.”
- 9.B “Apoyar el desarrollo de tecnologías nacionales, la Investigación y la innovación en los países en desarrollo.”
- 9.C “Aumentar de forma significativa el acceso a la tecnología de la información y las comunicaciones.”



**Objetivo 12: Producción y Consumo Responsable:** en especial con la meta 12.6, que busca adoptar prácticas sostenibles y sistemas de información en su ciclo de producción.

Las metas para este objetivo son:

- 12.1 “Aplicar el Marco Decenal de Programas sobre Modalidades de Consumo y Producción Sostenibles”.
- 12.2 “Lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales”.
- 12.3 “Reducir a la mitad el desperdicio de alimentos per cápita mundial”.
- 12.4 “Lograr la gestión ecológicamente racional de los productos químicos y de todos los desechos a lo largo de su ciclo de vida”.
- 12.5 “Reducir considerablemente la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización”.
- 12.6 “*Alentar a las empresas a que adopten prácticas sostenibles e incorporen información sobre la sostenibilidad en su ciclo de presentación de informes*”.
- 12.7 “Promover prácticas de adquisición pública que sean sostenibles, de conformidad con las políticas y prioridades nacionales”.
- 12.8 “Asegurar que las personas de todo el mundo tengan la información y los conocimientos pertinentes para el desarrollo sostenible y los estilos de vida en armonía con la naturaleza”.

Los medios que se proponen para alcanzarlos son:

- 12.a “Ayudar a los países en desarrollo a fortalecer su capacidad científica y tecnológica para avanzar hacia modalidades de consumo y producción más sostenibles”.
- 12.b “Elaborar y aplicar instrumentos para vigilar los efectos en el desarrollo sostenible”.
- 12.c “Racionalizar los subsidios ineficientes a los combustibles fósiles que fomentan el consumo antieconómico eliminando las distorsiones del mercado”.

## **1.2. Motivación.**

Esta propuesta de investigación parte de la hipótesis de que es posible establecer una contribución relativa a la fabricación sostenible que estructure el conocimiento y realice aportaciones a una producción más limpia.

Para ello es necesario elaborar un modelo aplicado a las actividades de fabricación combinando diferentes ámbitos que deben quedar bien definidos para determinar dónde se mide, cómo se mide y cuándo se mide, y su análisis puede ser considerado en tiempo real para lograr la sostenibilidad en un proceso industrial.

Las dimensiones para alcanzar la sostenibilidad combinan aspectos: económicos, ambientales y sociales, los cuales se complementan con otros aspectos que se deben analizar simultáneamente como son las fases del ciclo de vida y el análisis desde la perspectiva del proceso industrial.

De la revisión bibliográfica se constata que hay muchas aportaciones de investigaciones recientes dirigidas a la sostenibilidad en fabricación y producción industrial, trabajos dirigidos a optimizaciones y mejoras sobre el proceso o tecnología de fabricación, pero no logran identificar cómo en un proceso industrial esta mejora puede ser implementada.

Además, el desarrollo de tecnologías de información, la cada vez más demandante integración tecnológica, a lo que hoy se denomina la Industria 4.0, la analítica de datos y de información de procesos, requiere un marco que nos permita ordenar lo que estamos evaluando.

Para el caso de las tecnologías de arranque de viruta, los departamentos de investigación y desarrollo de las empresas generan *Know How* propio, en donde la selección del material, la herramienta, la máquina y la estrategia de mecanizado definirá los criterios sostenibles del proceso, por lo que es necesario tener organizado y definido que indicadores (métricas) permiten mejorar continuamente.

El uso de tecnologías de información, el uso de dispositivos móviles, permiten tener tiempos de respuesta más cortos, para lo cual la configuración de entornos colaborativos en tareas de producción cada vez se irá incorporando e implementando en diferentes tipos de industrias.

Consideramos que todas estas razones nos deben estimular para realizar una propuesta alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, para establecer un modelo de fabricación sostenible, aplicado al mecanizado, en entornos colaborativos.

### 1.3. Objetivos de la Tesis.

El objetivo principal de esta disertación es establecer un modelo de fabricación sostenible aplicado a los procesos industriales de fabricación de productos discretos por arranque de viruta, determinando los procedimientos y los parámetros tecnológicos necesarios para alcanzar los objetivos estratégicos de minimizar el impacto ambiental.

El trabajo de investigación consiste en analizar los procesos de conformado por arranque de viruta desde la perspectiva de desarrollo sostenible y reflexionar sobre todos los aspectos tecnológicos, de recursos, así como las mejoras e innovaciones. El trabajo abordará no sólo la tecnología de fabricación mecánica sino también los recursos empleados y cómo deben estar analizados para la evaluación de su impacto, considerando un enfoque de sostenibilidad.

Este objetivo principal puede desglosarse en tres objetivos parciales de investigación de la siguiente forma:

- O1:** Definir un modelo de fabricación sostenible marco y particularizarlo en procesos y operaciones de arranque de viruta.
- O2:** Caracterizar la influencia de los parámetros del proceso en la sostenibilidad y definir las estrategias de fabricación sostenible.
- O3:** Contribuir a establecer los pilares de la sostenibilidad en los procesos de arranque de viruta.

Las líneas de acción para conseguir los objetivos de esta tesis son:

- Análisis de propuestas en la línea de fabricación sostenible.
- Análisis de indicadores de sostenibilidad en procesos de fabricación aplicados al arranque de viruta y definición de un modelo.
- Desarrollo de modelos teóricos para establecer la relación parámetro de proceso e indicadores de sostenibilidad.
- Validar la propuesta mediante experimentación aplicada a casos de alto valor añadido.

#### **1.4. Alcance.**

Delimitar el campo de análisis, investigación y redacción de la propuesta es de vital importancia ya que puede ser tan amplio que sobrepase el trabajo requerido académicamente para la aprobación de una tesis doctoral.

En este sentido se analizará y revisará el estado del arte de propuestas de fabricación sostenible en el ámbito genérico y, particularmente, en tecnologías de arranque de viruta. Por ello, la propuesta se centra para estas últimas y la propuesta de indicadores para la medición de los aspectos de sostenibilidad, se realizará en el marco global, pero se concretará para el nivel de planta o taller. Esto es, nos centraremos en el enfoque funcional de la fabricación a nivel de fábrica y los indicadores que se generan en el proceso de mecanizado con arranque de viruta.

Desde un punto de vista científico, este trabajo va a permitir incrementar los conocimientos sobre la influencia de parámetros durante el procesado de materiales por arranque de viruta y medir mejoras en el campo de sostenibilidad.

Desde el punto de vista tecnológico, los objetivos a alcanzar en esta tesis doctoral son de gran interés, ya que pretenden conseguir posibles mejoras en cuanto a la planificación de procesos de fabricación, fomentando el control de la sostenibilidad en procesos industriales integrados en entornos colaborativos.

Para la validación de la propuesta concreta en mecanizado, se realizarán una serie de experimentos en operaciones básicas de arranque de viruta. Para la validación en los entornos colaborativos se realizará una aproximación práctica a la integración de los resultados de cada caso, en una plataforma colaborativa, lo que nos permitirá demostrar la versatilidad del manejo de los resultados y de la información. En cada caso experimental se presenta una propuesta de la participación colaborativa mínima, que permita mantener un flujo de información de manera colaborativa, para la realización del caso experimental.

## **1.5. Organización de la memoria.**

La presente memoria se la ha organizado en los siguientes capítulos que se describen a continuación:

En este Capítulo 1 se ha realizado una revisión de los antecedentes del tema, así como la motivación y los objetivos planteados. Asimismo, se han definido los fines que se buscan con la investigación, el alcance, así como la organización y estructura de la memoria.

En el Capítulo 2 se recopila la bibliografía existente sobre fabricación sostenible, las tendencias actuales y una revisión de las propuestas existentes.

En el Capítulo 3 se realiza la revisión del estado del arte de sostenibilidad en procesos de arranque de viruta, la evaluación en los diferentes procesos de mecanizado, el avance tecnológico y de tendencias de sostenibilidad, así como investigaciones recientes en metodologías aplicadas a diferentes materiales y equipos de mecanizado.

En el Capítulo 4 se elabora la propuesta del modelo de mecanizado sostenible en entornos colaborativos, se presenta las matrices de análisis y los grupos de familias de indicadores para todo el ciclo de vida, en donde se selecciona las familias de indicadores que corresponden a la etapa de fabricación y se desarrolla una propuesta de indicadores para el proceso de mecanizado por arranque de viruta. Seleccionamos la matriz que permite visualizar de mejor manera el análisis y se generan fichas de indicadores para ver su organización y clasificación.

En el Capítulo 5 se describe el desarrollo de casos experimentales de estudio. Se analizan varios indicadores en la fase fabricación y otros que pueden ser obtenidos en la fase de diseño, usando una plataforma colaborativa y software o aplicaciones de ingeniería. Entre los casos analizados tenemos: tiempos de mecanizado, consumo de energía, evaluación de la integridad superficial de la parte mecanizada, criterios de selección entre dos centros de mecanizado, evaluación de sostenibilidad en la dimensión social. El uso de la plataforma colaborativa PLM nos introduce en la idea futura de la Industria 4.0.

En el Capítulo 6 se analizan las conclusiones y contribuciones de la tesis doctoral, se presenta la propuesta de trabajos futuros, así como un resumen de las publicaciones realizadas, que son resultado de la presente investigación, tanto en revistas indexadas como en congresos nacionales e internacionales.

Finalmente se presenta las referencias de la bibliografía consultada.



# Capítulo 2

---

—

# Capítulo 2

# Análisis de

# Sostenibilidad en

# Fabricación

## 2.1. Desarrollo Sostenible.

Las Naciones Unidas han establecido como prioritario para el presente siglo el Desarrollo Sostenible en todos los aspectos de la sociedad, para la humanidad y por el bien del futuro del planeta. Es así, que para definir objetivos y alinear esfuerzos se lo ha denominado de la siguiente forma: *“El desarrollo sostenible es un desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades”* (Cassen, 1987)

Sobre esta iniciativa, a través de los últimos años, se han desarrollado muchos esfuerzos para ir desplegando políticas que permitan afianzar en la práctica su implementación. Así las Naciones Unidas, con su división del Desarrollo Sostenible, y junto con organizaciones de estandarización a nivel global, como la Organización Internacional de Estandarización (*International Standards Office*, ISO) han conseguido afianzar mucho más los objetivos planteados y promover su aplicación. Así pues, las nuevas tendencias de la ingeniería nos llevan a considerar la Ingeniería Sostenible como un aporte que permita reforzar esos requisitos.

De la revisión y análisis del estado del arte, se encuentran investigaciones que han consolidado a través de los años la Fabricación Sostenible y el desarrollo de metodologías y herramientas que han permitido su despliegue en empresas, estableciéndolas como estrategia nacional. Los criterios de evaluación del proceso de creación de productos considerando los materiales, las tecnología y técnicas, las actividades y operaciones, y la propia empresa han ido evolucionando y requieren de

consideraciones bajo varios puntos de vista que deben desarrollarse de manera simultánea. Los puntos de vista también pueden establecerse como dimensiones, fases del proceso o ámbitos de estudio y afectan a los diferentes criterios que se utilizan para la evaluación. El concepto de Fabricación Sostenible requiere de acciones concretas, políticas de implementación, metodologías de evaluación y el desarrollo de indicadores. Ciertos autores, como Haapala, recomiendan que para ello se deberían cambiar enfoques en cuatro ámbitos principales (Haapala et al., 2011):

- a) Procesos de Fabricación y Equipos.
- b) Sistemas de Fabricación.
- c) Cambiar los Paradigmas del Ciclo de Vida.
- d) Educación.

Por otra parte, el “Instituto de Gestión y Evaluación Medioambiental (*Institute of Environmental Management & Assessment, IEMA*)” recomienda a las empresas que realicen cambios internos dentro de su organización, así como de los sistemas que maneja. Esto debe desarrollarse a lo largo de todo el ciclo del negocio, partiendo de los requisitos de los clientes hasta el usuario final (IEMA, 2014a). La Figura 2.1 representa este nuevo enfoque que debemos afrontar en las áreas clave propuestas por IEMA. Tres acciones estratégicas que deben atenderse de acuerdo con las recomendaciones del IEMA son: a) Eficiencia y eficacia de los recursos que usa, b) Seguridad de disponer de los recursos y c) los ciclos que deben cumplir estos recursos.

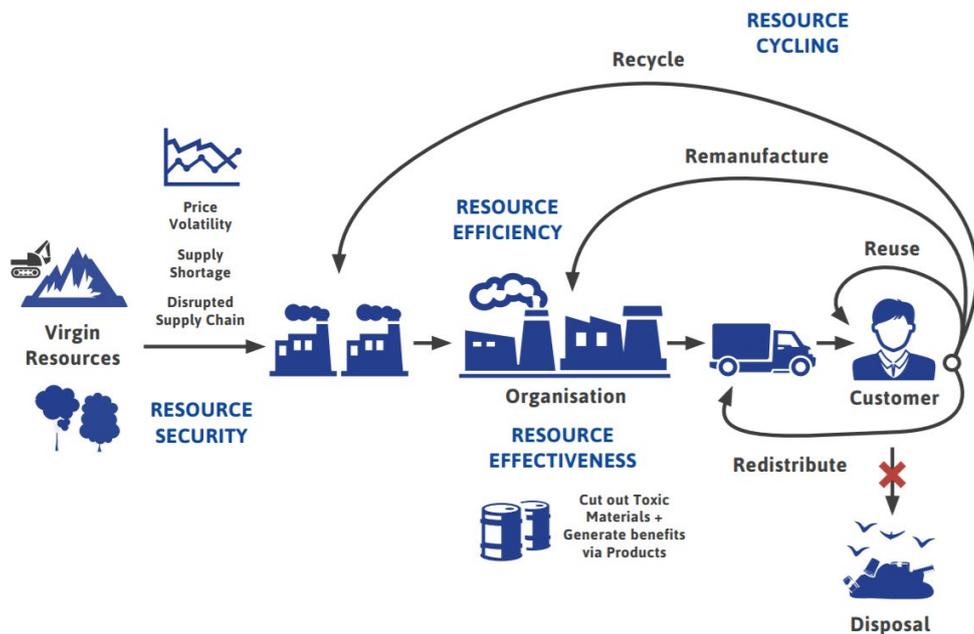


Figura 2.1. Áreas Claves para las Organizaciones (fuente: IEMA, 2014a).

En este sentido el cambio de paradigma incluye cambios culturales como clientes y también como productores de bienes y servicios. El concepto tradicional que se ha venido manejando en las empresas basadas el concepto de economía lineal, que considera “Tomar, Hacer, Vender, Usar y Descartar” se le debe incorporar el “Separar y Reciclar” desplegando así, el modelo de economía circular (Figura 2.2).

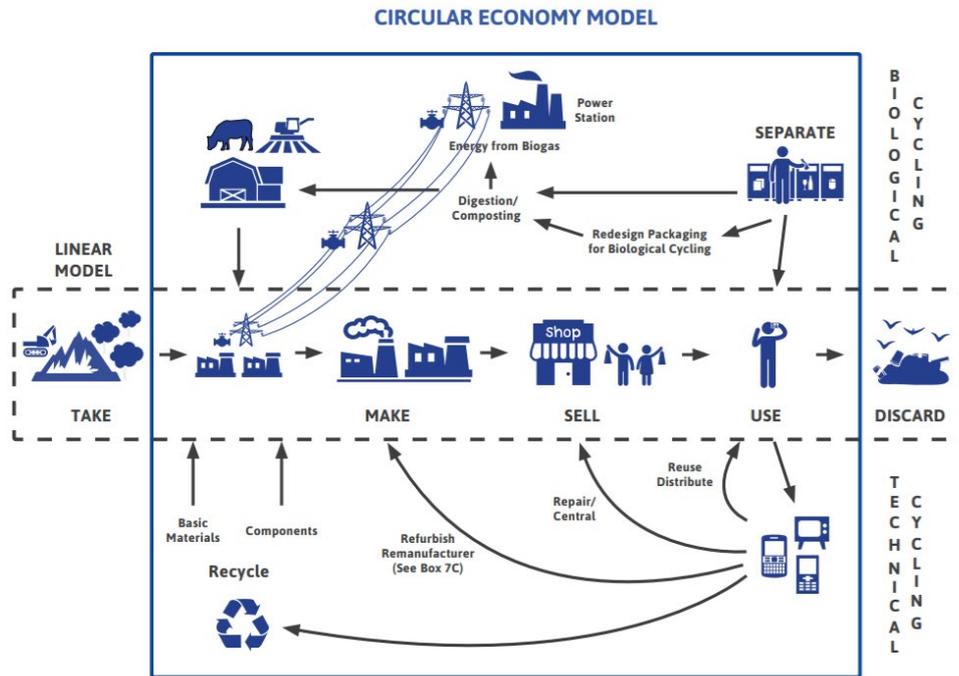


Figura 2.2. Modelo de Economía Circular vs Economía Lineal (fuente: IEMA, 2014b).

Además, la propuesta de IEMA incluye, especialmente, separar en lo que corresponde a todos los componentes del envase y embalaje que pueden estar dentro de un ciclo Biológico y que permita, entre otras cosas, nuevas formas de energía o ser parte de nuevos procesos productivos. Por otra parte, un reciclaje tecnológico supone incorporar conceptos como: *Reusar, Reparar, Refabricar, Remanufacturar* o *Reciclar*, para ser parte nuevamente de materiales básicos o nuevos componentes (IEMA, 2014b).

Este cambio de paradigma ha permitido que a nivel mundial se impulse su implementación a nivel industrial y de servicios. En la literatura revisada hay aportes interesantes como el de la Fundación Ellen MacArthur (Ellen MacArthur Foundation, 2012) que define su misión como: “acelerar la transición hacia el concepto de economía Circular” (Ellen McArthur Foundation, 2021) promoviendo en diferentes niveles su implementación en varios actores de la sociedad.



El planteamiento del ciclo de vida bajo el denominado Ciclo del Cometa nos muestra la articulación del concepto de economía circular y como se pueden ir definiendo e implementando las políticas que nos permitan implementar la sostenibilidad.

De allí que se ve la necesidad y se identifica que un aporte importante, para todos los procesos es poder definir los diagramas de flujo de su proceso y las formas de mejorarlo desde el punto de vista sostenible.

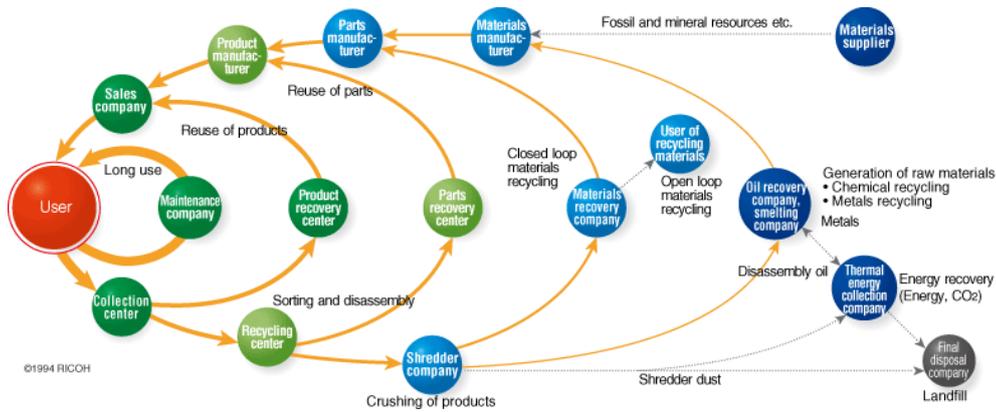


Figura 2.4. Despliegue del Circulo del Cometa, Empresa RICOH (fuente: RICOH, 2019).

De la figura anterior podemos identificar actividades que deben ser analizadas y que presentan las ideas de negocios futuros, a ser reforzados. El mantenimiento del producto, la recuperación de partes, el reciclaje de componentes, nos van a permitir que se minimice el consumo de materiales nuevos y se potencie el uso de partes recuperadas, evitando así terminar tempranamente el uso que debemos darles. Enfocado desde este punto de vista es necesario que en la fase de diseño de los productos o servicios que se ofrece, el criterio de sostenibilidad apalanque estas políticas.

Para los procesos de fabricación y en especial el del mecanizado se puede mencionar que con el fin de definir las mejores estrategias de implementación y de análisis, se buscaran las más importantes, que permitan una fácil implementación, así como el desarrollo de un análisis del proceso, por ejemplo el propuesto por Linke (Linke & Dornfeld, 2012), así como el desarrollo de modelos que permitan definir indicadores que sean de utilidad a nivel empresarial (Garbie, 2014; Mesa, Esparragoza, & Maury, 2018) que serán consideradas en el presente análisis.

El consumo energético es uno de los que es más analizado en una etapa temprana en los análisis de sostenibilidad, por ejemplo un análisis interesante y completo, es el planteado por Zhou para el proceso de mecanizado (Zhou et al., 2016).

## **2.2. Fabricación Sostenible.**

Empezaremos realizando una breve revisión bibliográfica de las aportaciones en el campo de la Fabricación Sostenible, en donde se detallan estudios y aplicaciones recientes y aportaciones a los Sistemas de Fabricación de manera general.

Uno de los primeros Hartini, en su estudio detalla el beneficio y el efecto en el desempeño y señala las dificultades más importantes que se pueden presentar en su revisión de 58 artículos. Se evidencia que las plantas industriales con sistemas “Lean Manufacturing” (LM) producen resultados ecológicos más altos, pero no determina su impacto. También se evidencia que los modelos Integrados Lean Manufacturing (LM) y Fabricación Sostenible (FS) mejoran el desempeño de la empresa (Hartini & Ciptomulyono, 2015).

Rauch, plantea que se puede reforzar la sostenibilidad a través de los sistemas de fabricación distribuidos, su propuesta plantea el uso de unidades de fabricación pequeñas pero que sean lo más eficientes. Se analiza los beneficios de la implementación y desafíos futuros (Rauch, Dallinger, Dallasega, & Matt, 2015).

Rödger, presenta un método de evaluación para ser operativo en empresas industriales altamente automatizadas en varios niveles (Rödger, Bey, & Alting, 2016).

Xu, con el fin de mejorar la sostenibilidad plantea un modelo conjunto multiobjetivo de consumo de energía y producción, que considera las condiciones múltiples de los servicios de fabricación (Xu, Shao, Yao, Zhou, & Pham, 2016).

Fargani, realiza un análisis empírico de los factores que impulsan la fabricación sostenible, recopila datos de 36 empresas y clasifica 10 factores de entre los cuales la competitividad es lo más importante (Fargani, Cheung, & Hasan, 2016)

Stock, presenta una alternativa práctica para la adaptación de equipos ya existentes a los cuales se los moderniza “retrofitting” y que tengan una oportunidad en el entorno de los requisitos de la Industria 4.0 (Stock & Seliger, 2016).

Mutingi, plantea que, para llegar a la fabricación sostenible, el diseño del producto debe considerar la condición que sea modular, lo que permite minimizar los costes y el daño ambiental durante su ciclo de vida. También presenta un algoritmo genético para evaluar posibles alternativas (Mutingi, Dube, & Mbohwa, 2017).

Moldavska, para una mejor comprensión de la definición del término “Fabricación Sostenible” realiza una revisión de la literatura entre 1990 a 2016, en donde identifica que la definición más utilizada es la expresada por el Departamento de Comercio de los EE. UU. del 2008, de un total de 189 artículos en los que se menciona el término “Fabricación Sostenible” y 89 en que presentan sus definiciones originales, el 63% lo cita o reformulan. El objetivo de su estudio es desarrollar un lenguaje común de esta definición (Moldavska & Welo, 2017).

Premarathne, en la industria del latón que se encuentra en dos aldeas de Sri Lanka, identifica que el capital humano y social no está suficientemente adecuado para la implementación de los conceptos de fabricación sostenible. Desarrolló una metodología para mejorar el capital humano y social (Premarathne, Kulatunga, Ekanayake, & Miyanadeniya, 2017).

Ogbemhe, indica que los sistemas operativos robóticos, desempeñan un papel de liderazgo en el aumento de productividad. Discute la temática relevante para el uso de robots para lograr la sostenibilidad (Ogbemhe, Mpofu, & Tlale, 2017).

Salido, propone un algoritmo para la programación de trabajos en talleres de forma dinámica y que sean energéticamente eficientes (Salido, Escamilla, Barber, & Giret, 2017).

Bhanot, presenta resultados concluyentes al analizar los habilitadores más influyentes (10) que permiten mejorar los aspectos de sostenibilidad y de rendimiento en el sector de fabricación como: la inversión extranjera, la capacitación en tecnología avanzada, así como crear conciencia sobre los beneficios de las iniciativas sostenibles (Bhanot, Rao, & Deshmukh, 2017).

Kaku, investiga en Japón los sistemas de producción “Seru” como una alternativa de planificación. Analiza un caso real de implementación en la empresa Canon, y compara las emisiones de CO<sub>2</sub> de los informes de sostenibilidad de 2006 y 2014 (Kaku, 2017).

Jin, describe los principales desarrollos de sostenibilidad en sistemas avanzados, en las diferentes fases del ciclo de vida como son: diseño, evaluación y control de eficiencia energética, optimización de parámetros, planificación de procesos e integración a la cadena de suministro (Jin et al., 2017).

Badurdeen, recopila las estrategias para la fabricación sostenible y como los beneficios del criterio de triple línea permite implementarlas. La evolución de las estrategias se muestra a continuación (ver Figura 2.5) (Badurdeen & Jawahir, 2017).

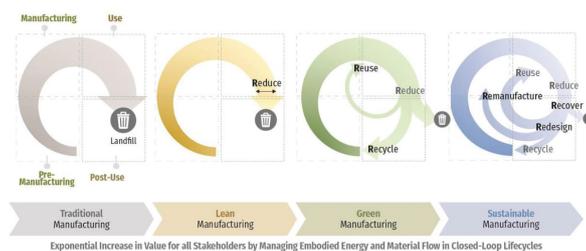


Figura 2.5. Evolución de las Estrategias de Fabricación (fuente: Badurdeen, 2017).

Demeke, plantea para la medición de la sostenibilidad, el indicador de Valor Agregado Neto Verde (VANV) que considera costes totales y externalidades ambientales. Determina para el caso de las toallas de papel Boundy®, que la línea que se encontraba

más establecida es la que tenía un valor más alto de VANV (Demeke, Ingwersen, Weisbrod, Ceja, & Weber, 2018).

En la Tabla 2.1 se resumen los estudios, investigaciones y revisiones bibliográficas, así como una breve explicación.

*Tabla 2.1. Trabajos previos sobre Fabricación Sostenible (fuente: elaboración propia).*

<b>Autores</b>	<b>Estudio</b>
Hartini 2015	Realiza una revisión bibliográfica entre “Lean Manufacturing” y “Fabricación Sostenible” de 58 artículos científicos entre 2000 y 2014, en donde efectúa un análisis descriptivo y cuantitativo de su impacto.
Rauch 2015	Analiza la sostenibilidad de la fabricación a través de sistemas de fabricación distribuidos.
Rödger 2016	Propone un marco para la sostenibilidad que lo denomina “el cono de la sostenibilidad” aplicando el pensamiento objetivo del ciclo de vida.
Xu 2016	Propone optimizar la producción de varios equipos basada en un modelo de planificación sostenible que en conjunto analiza energía y producción.
Fargani 2016	Realiza un análisis empírico de factores que soportan la fabricación sostenible y la importancia de la competitividad.
Stock 2016	Presenta una descripción general de las oportunidades de fabricación sostenible a nivel macro y micro, así como un caso práctico de adaptación de equipos, como una oportunidad de fabricación sostenible en la Industria 4.0.
Mutingi 2017	Enfoca la fabricación sostenible de productos desde la perspectiva modular en la fase de diseño.
Moldavska 2017	Realiza una revisión de las definiciones de fabricación sostenible desde 1990 a 2016 en revistas académicas. Propone un lenguaje común para su correcta interpretación en el campo de investigación e industrial.
Premarathne 2017	Evalúa en el personal que se dedica a la industria del Latón, los métodos de aprendizaje de fabricación sostenible e identifica los factores asociados al capital humano para su implementación.
Ogbemhe 2017	Expone la importancia del uso de la robótica para lograr la sostenibilidad en los procesos de fabricación, por lo que la adopción de sistemas operativos robóticos debe ser considerados para mejorar los entornos sostenibles.
Salido 2017	Propone un algoritmo de programación de la ocupación de máquinas que trabajan a diferentes velocidades en el que se minimice el consumo de energía.
Bhanot 2017	Propone un marco de sostenibilidad integral para el dominio de la fabricación, en el que se analiza los habilitadores que deben reforzarse para lograr implementarse, así como mejorar el rendimiento de la fabricación.
Kaku 2017	Propone una investigación de los sistemas de producción “Seru” y analiza un caso de implementación.
Jin 2017	Informa sobre las mejoras de sostenibilidad en los sistemas de fabricación avanzada, en las diferentes fases de ciclo de vida.
Badurdeen 2017	Recalca que para la fabricación sostenible necesita esfuerzos colaborativos basados en estrategias para crear valor sostenible.
Demeke 2018	Plantea una metodología de cálculo de costes, que considera los costes convencionales e incorpora el coste de externalidades. Establece el Valor Agregado Neto Verde (VANV) para las toallas de papel “Bounty®” en dos plantas de producción.

Para aportar una visión más aplicada, y desde el enfoque de procesos de negocio, desarrollamos una primera idea que nos permite esquematizar el “Diagrama de Calidad” de una empresa de servicios de mecanizado, considerando aspectos medioambientales, el cual se encuentra esquematizado en la Figura 2.6 la cual está basada en las directrices de la Organización Internacional de Normalización (ISO 9001, 2015).

Como se muestra en la siguiente figura, se sugieren procesos de gestión y de soporte que apalancan los procesos que se mencionan y describen en el diagrama de calidad.

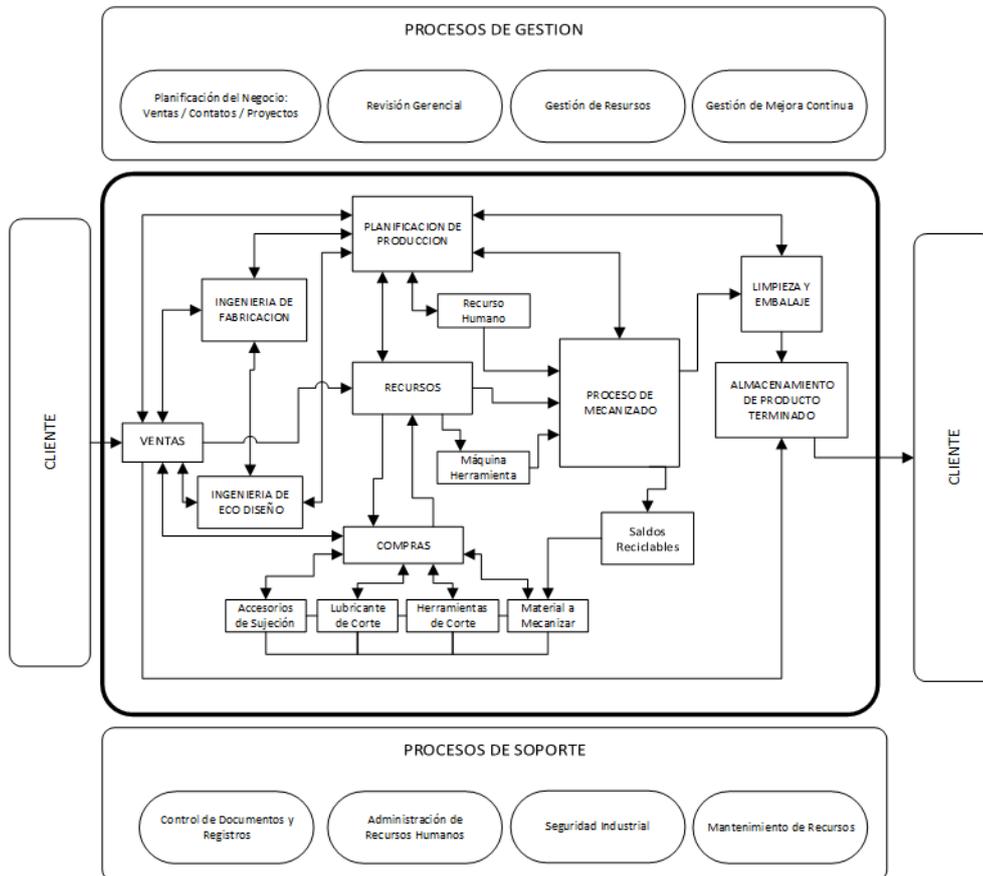


Figura 2.6. Diagrama de calidad para una empresa de servicios de mecanizado. (fuente: elaboración propia adaptada de ISO 9001).

Se identifican los siguientes procesos que permiten que se desarrolle la empresa de servicios de mecanizado:

- **Ventas:** recopila los requerimientos del cliente, puede documentarse como una venta, contrato, proyecto o servicio.
- **Ingeniería de Fabricación:** encargado de desarrollar la ingeniería de detalle de los productos, se puede soportar en un PLM.
- **Ingeniería de Ecodiseño:** considera el desarrollo de nuevos productos, usa sistemas CAD /CAM.
- **Planificación de Producción:** organiza las actividades y tareas del proceso productivo.
- **Compras:** suministra los recursos necesarios para el proceso de mecanizado. Entre los ítems principales están los materiales a mecanizar, las herramientas de corte, lubricantes y accesorios de fijación.
- **Procesos de Mecanizado:** incluye procesos de fabricación con máquinas manuales y de control Numérico CNC.
- **Limpieza y embalaje:** se limpia y almacena las piezas mecanizadas para su almacenamiento y distribución.
- **Almacenamiento de producto terminado:** se embala y almacena para ser entregada al cliente. Considerando los cuidados necesarios de las superficies mecanizadas, se protege las superficies que requieran ser cuidadas para evitar daños antes de la entrega al cliente.
- **Procesos de gestión:** considera la planificación del negocio, la revisión gerencial, y la gestión de recursos y la mejora continua.
- **Procesos de soporte:** son los que permiten un correcto funcionamiento como el control de documentos y registros., la administración de recursos humanos, la seguridad industrial de los colaboradores y el mantenimiento de los recursos.

En cada organización se pueden implementar normas que aseguren su funcionamiento, entre las que se recomiendan como básicas en los sistemas integrados de gestión podemos mencionar:

- “Sistema de Gestión de Calidad” (ISO 9001, 2015).
- “Sistemas de Gestión Ambiental” (ISO 14001, 2015).
- “Seguridad y Salud Ocupacional” (ISO 45001, 2018).

Para dar soporte en cada uno de los procesos también existe normas y estándares que son propios para cada proceso de fabricación. Muchos de ellos van a estar regidos por la normativa vigente en cada país.

### 2.3. Procesos de Fabricación Sostenible.

En el campo de la sostenibilidad un aporte muy importante ha sido la representación y el entendimiento por medio de los diagramas de proceso, en los cuales al definir las entradas, los recursos que se requieren, así como las salidas, permite representar el comportamiento de este proceso como que fuera un sistema, y también de la cadena de valor (De Ron, 1998) en donde con el uso de indicadores se puede monitorear el comportamiento del mismo, así como el rendimiento, por ejemplo al comparar una entrada con una salida. Desde el punto de producción limpia, los diagramas de proceso y los balances de masa, han permitido cuantificar las entradas y salidas, así como los subproductos. Existe diversa literatura sobre procesos de fabricación sostenible y su enfoque en el campo de la sostenibilidad, entre los que podemos mencionar:

Linke, propone una orientación sencilla para evaluar procesos de fabricación, por medio de indicadores sostenibles, la cual tiene la ventaja sobre modelos más complejos como los que consideran el análisis de ciclo de vida. Presenta una comparación sostenible entre dos estrategias de pulido para la fabricación de un eje: rectificado convencional y muela abrasiva (Linke, Corman, Dornfeld, & Tönissen, 2013).

Humphrey, realiza un análisis de los sistemas de monitoreo y medición de potencia eléctrica en procesos de fabricación sostenibles, mediante la precisión en la medición de energía. Se evidencia dos casos de estudio: a) el cambio de herramientas en un centro de mecanizado vertical y b) en el proceso de taladrado (Humphrey et al., 2014).

Peralta, elabora un modelo de fabricación fractal para gestionar los procesos de fabricación, considerando el concepto de sostenibilidad, incluyendo los modelos de producción más limpia bajo los principios de “Cuna a la Cuna” (C<sub>2</sub>C) (Peralta, Marcos, Aguayo, Lama, & Córdoba, 2015).

Zhang, desarrolla un modelo de información para ser aplicado en procesos de fabricación sostenible que integra la información en la fase del diseño del producto. Explica su uso con un caso para evaluar preliminarmente el software (Zhang, Zhu, Li, Yaman, & Roy, 2015).

Jassin, desarrolla sosteniblemente un proceso de compresión y extrusión en frío que utiliza virutas de aleación Al-Zn y virutas de cobre para producir un eje de diámetro 12 mm a presiones de 10, 20 y 30 toneladas, al cual se le evalúa la microestructura, dureza y densidad, demostrando el uso de tecnologías limpias (Jassim, 2016).

Garretson 2016, indica que es necesario definiciones de términos comunes que apoyen la implementación de estándares y mejores prácticas, por lo que presenta 47 términos que buscan describir la producción sostenible agrupados en 6 categorías: alcance, límites, materiales, medición, modelo y flujo (Garretson, Mani, Leong, Lyons, & Haapala, 2016).

Kluczek, por medio de un enfoque multicriterio, evalúa una empresa que produce dispositivos de calefacción en la que se valora la sostenibilidad de los procesos de fabricación, utilizando el análisis de jerarquización analítica (Kluczek, 2017).

Lee, desarrolla un modelo para un sistema de fabricación que se auto reconfigura y que considera factores de sostenibilidad. También presenta la propuesta de ponderación interesante de los factores. Concluye que la reconfiguración del proceso no garantiza que el nuevo proceso vaya a ser optimo (Lee, Ryu, & Shin, 2017).

Panda, evalúa el potencial del uso de la fabricación aditiva a gran escala de elementos de construcción, cuando se usa el cemento polimérico, valida la calidad del producto con ensayos mecánicos para evaluar las propiedades y sacar conclusiones (Panda, Paul, Hui, Tay, & Tan, 2017).

Priarone, discute la aplicación de sistemas de fabricación aditiva y de mecanizado final como una alternativa tecnológica para transformar las rutas de fabricación actuales en rutas de producción integradas (Priarone & Ingarao, 2017).

Singh, investiga la literatura relacionada con la implementación del concepto de “Fabricación Cero Desperdicios (FCD)”, para lo cual, mediante un caso de estudio de un componente del sector aeroespacial, evidenció las ventajas del mecanizado en seco, con mínima lubricación “*Minimum Quantity Lubrication*” y el de torneado tradicional. En su revisión evidencio como estas prácticas sostenibles ayudan a controlar los problemas de residuos. Por otra parte, también resalta las ventajas de la fabricación aditiva como una alternativa de procesos en los que se busque cero desperdicios (Singh, Ramakrishna, & Gupta, 2017).

Por su parte, Yang et al. analiza el criterio de consolidación de piezas que permitan la reducción de peso, tamaño y que minimice los ensamblajes, el estudio propone investigar para las fases del ciclo de vida el impacto ambiental y el consumo de energía (Yang, Talekar, Sulthan, & Zhao, 2017).

La literatura analizada anteriormente resume las tendencias de los procesos de fabricación sostenibles, en donde la estructura de proceso facilita y ayuda su entendimiento (Mani, Johansson, Lyons, Sriram, & Ameta, 2013; Mani, Madan, Lee, Lyons, & Gupta, 2014) así como su relación con los indicadores de producto y proceso (Lu et al., 2011).

Complementariamente, los criterios de fabricación verde y producción más limpia generan la necesidad de cuidar la energía, el agua y otros recursos (D. A. Dornfeld, 2014). Otra opción es la evaluación de la sostenibilidad de: una célula de trabajo de producción (Zhang et al., 2015), sus procesos (Bellés Segarra, 2016) o en casos específicos como el sistema de mecanizado (Dornfeld, 2013) (Dahmus & Gutowski, 2004) así como casos de comparación de alternativas donde también son evidenciados (Kopac, 2009; Pusavec, Krajnik, & Kopac, 2010; Pusavec, Kramar, Krajnik, & Kopac, 2010).

En la Tabla 2.2 se resumen las propuestas de fabricación sostenible realizadas por diversos autores, así como una breve explicación:

Tabla 2.2. Revisiones de Procesos de Fabricación Sostenible (fuente: elaboración propia).

Autores	Estudio
Linke 2013	Propone un método de evaluación de sostenibilidad en el que selecciona indicadores de sostenibilidad para procesos de fabricación discreta y los evalúa en un caso práctico que compara dos estrategias de rectificado.
Humphrey 2014	Presenta una inducción básica a la medición de la energía eléctrica y potencia trifásica al analizar y monitorear en tiempo real, el consumo de energía eléctrica consumida del proceso, lo que permite la cuantificación energética sostenible.
Peralta 2015	Presenta el concepto de fabricación fractal y su orientación en los procesos de mecanizado.
Zhang 2015	Desarrolla un modelo de información que está orientado a procesos de fabricación sostenible, en el cual se pueda capturar e integrar la información para el cálculo de la energía consumida.
Jassin 2016	Propone un proceso de fabricación sostenible usando el reciclaje directo de aleación Al-Zn y virutas de cobre que se generaron del proceso de corte, para ser usadas en fabricar un eje por el proceso de prensado en frío
Garretson 2016	Recopila la terminología a ser utilizada en la caracterización y evaluación del proceso de fabricación sostenible. Agrupa términos, sinónimos y definiciones armonizadas en diferentes categorías.
Kluczek 2017	Desarrolla un enfoque multicriterio para la evaluación de sostenibilidad en los procesos de fabricación.
Lee 2017	Desarrolla un modelo de simulación para un sistema de fabricación que se auto reconfigura cuando cambia su función, que considera los factores de sostenibilidad. Se plantea criterios de ponderación para los factores seleccionados.
Panda 2017	Explica un caso práctico de sostenibilidad, en la fabricación aditiva de un cemento geo polímero y un proceso de impresión 3D con concreto, así como su análisis mecánico como una opción de mejora en entornos sostenibles.
Priarone 2017	Analiza los criterios de la fabricación integrada (Híbrida), combinando fabricación aditiva y mecanizado, que permita llegar a la selección de procesos sostenibles de fabricación.
Singh 2017	Revisa las tendencias actuales de fabricación sostenible en el mecanizado con el objetivo de reciclar o reutilizar las piezas, para producir una nueva. Presenta un caso en la industria aeroespacial, en la que se refuerza el concepto de “Fabricación Cero Desperdicios FCD”.
Yang 2017	Plantea un modelo genérico de la sostenibilidad hacia la consolidación de piezas fabricadas por fabricación aditiva.

## **2.4. Estudios de métricas para Fabricación Sostenible.**

El estudio de métricas (indicadores) es muy amplio y existen propuestas que abarcan el nivel global, empresarial y de producto. Empezaremos realizando una revisión de las métricas a nivel general para después particular para el mecanizado.

Cabe indicar que cada proceso tiene sus particularidades y muchos de los análisis los enfocan desde las dimensiones de sostenibilidad, es decir desde la perspectiva económica, ambiental y social. Cada proceso tendrá que ser evaluado para ser mejorado, por eso el desarrollo de métricas, métodos de cálculo y factores que afectan su desempeño dependerá de la implementación efectiva de la sostenibilidad. El desarrollo tecnológico y la cultura organizacional facilitara en gran medida su uso en los diferentes niveles. De la revisión bibliográfica, se destaca los siguientes artículos:

Sekulic, analiza el consumo de energía real del proceso de soldadura fuerte de atmosfera controlada CAB (*Controlled Atmosphere Brazing*) de aluminio en intercambiadores de calor compactos, para la industria automotriz, en el que compara el punto de vista real y el mínimo teórico. En donde concluye que la energía real es 105 veces mayor que la mínima teórica (Sekulic, Nehete, Yu, & Fu, 2014).

Moldavska, aborda desde el punto de vista empresarial el proceso de fabricación, las herramientas que evalúan las dimensiones de sostenibilidad, fundamentado en el concepto de cadena de valor (Moldavska & Welo, 2017).

Lu, propone una metodología de evaluación de sostenibilidad en procesos de mecanizado criogénico involucrando los indicadores de la evaluación basada en el índice de sostenibilidad del proceso denominado “*ProcSI*” (Lu & Jawahir, 2015).

Eastwood, presenta un estudio durante el diseño de un engranaje, en el que evalúa la sostenibilidad, planteando la metodología de procesos unitarios en el que propone 3 alternativas de diseño de un engranaje: a) un solo componente b) varios componentes que son unidos por fricción y c) ensamble con juntas mecánicas. Indica que las métricas necesitan diversas formas de agregación que van desde el proceso al sistema de fabricación, pero no incluye un sistema de ponderación métrica, para una evaluación global (Eastwood & Haapala, 2015).

Antolín, presenta una lista de indicadores en las dimensiones económicas ambientales y sociales, que pueden ser una orientación para diferentes partes interesadas, partiendo del criterio de sostenibilidad corporativa y como medir su desempeño. Después de una revisión bibliográfica produjo 9 instrumentos que pueden ser aplicados (Antolín, Delgado, & Montiel, 2016).

Moldavska, para la evaluación de la sostenibilidad presenta un modelo basado en la teoría de la complejidad, investiga el potencial de este modelo bajo la idea principal de evaluar el rendimiento del sistema en vez de indicadores individuales agregados (Moldavska, 2016).

Wu, evalúa el desempeño del proceso de fabricación del acero en la industria China cuando los desechos (aguas residuales) son reciclados, reutilizados y se requiere varias etapas (Wu, Lv, Liang, & Hu, 2017).

Lafit, presenta su propuesta de indicadores de sostenibilidad para la industria de fabricación. Basa su modelo en la comparación por pares, promedio ponderado y técnicas de normalización (Latif, Gopalakrishnan, Nimbarte, & Currie, 2017).

Helleno, revisa el estado del arte de los indicadores de sostenibilidad en el periodo de 2009 a 2014, en donde integra el “*Lean Manufacturing*” y lo aplica a casos de la industria multinacional de cosméticos, la industria multinacional de productos termoplásticos y la industria brasileña de utensilios de cocina de aluminio, en donde se consigue mejoras (Helleno, de Moraes, Simon, & Helleno, 2017).

Raoufi, analiza la cadena de suministro y el proceso de fabricación considerando el indicador de huella de carbono y muestra como puede ser un criterio para no expertos durante la fase de diseño del producto. Presenta un caso de aplicación en la evaluación de dos diseños de carcasa de un cuadricóptero, en donde también se analiza la cadena de suministro (Raoufi et al., 2017).

Shankar, identifica las prácticas más comunes (indicadores) de fabricación sostenible con una metodología de toma de decisiones multicriterio DEMATEL y las representa en un mapa de relaciones de impacto, en donde identifica 22 practicas comunes (indicadores) en las dimensiones económicas, ambientales y de seguridad en una empresa que fabrica neumáticos (Shankar, Kannan, & Udhaya, 2017).

Luqmani, relata como la innovación orientada a la sostenibilidad, para una empresa global que fabrica alfombras, le permitió llegar al éxito, factores que contribuyeron, así como el aprendizaje de sus errores (Luqmani, Leach, & Jesson, 2017).

Parada, resume las practicas que deben ser incorporadas en el diseño de biorrefinerías, y recomienda un análisis integral que permita resolver: impactos sociales, disponibilidad de datos, enfoques normativos entre los más relevantes (Parada, Osseweijer, & Posada, 2017).

Huang 2017, plantea un marco de evaluación para poder evaluar a nivel de empresa, que se basa en el índice de sostenibilidad de productos y procesos de cinco etapas: métricas individuales, subgrupos, clústeres, subíndices e índices (Huang & Badurdeen, 2017).

En la Figura 2.7 se muestra la casa de medición de la sostenibilidad propuesta por Huang.

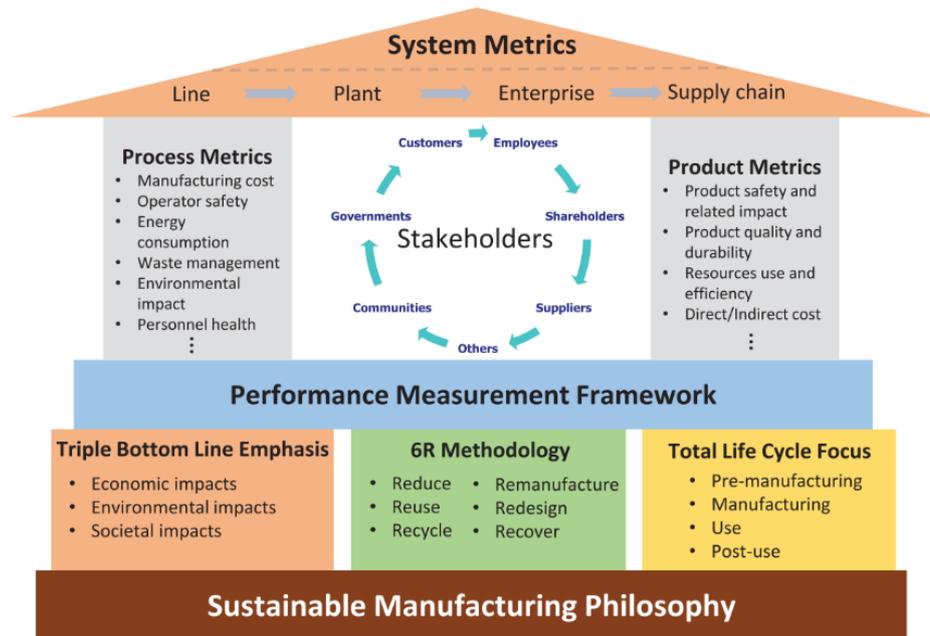


Figura 2.7. Casa de medición del rendimiento de Fabricación Sostenible (fuente: Huang, 2017).

Por otra parte, la comparación de grupos de rendimientos de sostenibilidad propuesta por estos autores realiza un mapeado entre las dimensiones de desarrollo sostenible e indicadores propuestos (Figura 2.8).

Clusters	Economy				Environment							Society												
	Initial investment	Direct/Indirect costs and overhead	Benefits and losses	Net profit	Capital charge	Manufacturing cost	Material use and efficiency	Energy use and efficiency	Other resources use and efficiency	Waste and emission	Product EOL	Energy consumption	Waste management	Environmental impact	Product safety and health impact	Product societal impact regulations and certification	Product quality and durability	Functional performance	Product EOL management	Health and safety	Stakeholder engagement	Operational safety	Personnel health	
ProdSI	√	√	√				√	√	√	√	√				√	√	√	√	√					
ProcSI						√						√	√	√								√	√	
EnSI					√	√	√	√	√	√										√	√			

Figura 2.8. Comparación de grupos de rendimiento de sostenibilidad (fuente: Huang, 2017).

En donde para los diferentes niveles se identifica por sus siglas en ingles que significa ProdSI “Product Sustainability Index”, ProcSI “Process Sustainability Index” y EnSI “Enterprise Sustainability Index”, es decir se puede analizar a nivel de producto, de proceso o de fábrica, (Huang & Badurdeen, 2017).

Prosiguiendo con otros autores, Hegab desarrolla y discute un algoritmo de evaluación para procesos de mecanizado, así como el planteamiento de indicadores en las dimensiones de la sostenibilidad. En la Tabla 2.3 se presentan varios sistemas de clasificación de conceptos e indicadores de sostenibilidad que se han planteado y que están disponibles (Hegab, Darras, & Kishawy, 2018).

Tabla 2.3. Sistemas de clasificación de conceptos de sostenibilidad (fuente: Hegab, 2018).

Varios Sistemas de evaluación de Sostenibilidad	Cantidad de Indicadores y/o Criterios
Iniciativa de Informe Global (GRI)	70
Índice (DJSI)	12 criterios
Indicadores de desempeño ambiental 2006	19
Comité de Naciones Unidas sobre Indicadores de Desarrollo sostenible	50
Índices de Sostenibilidad de Productos Ford	8
Indicadores para Fabricación Sostenible GM	46
Evaluación de desempeño ambiental ISO 14031	155 ejemplos
Indicadores ambientales de la unión europea	60
Eco-Indicadores 1999	3 factores principales

La Tabla 2.4 resume las propuestas antes mencionadas de las investigaciones y estudios que buscan establecer indicadores de fabricación sostenible. A continuación, se presenta una síntesis a nivel general y su respectivo resumen:

Tabla 2.4. Propuestas de Indicadores de Fabricación Sostenible (fuente: elaboración propia).

Autores	Estudio
Sekulic 2014	Propone métricas de los recursos energéticos consumidos en el proceso de unión por soldadura fuerte en atmosfera controlada CAB ( <i>Controlled Atmosphere Brazing</i> ) de los elementos de un intercambiador de calor compacto utilizado en la industria automotriz y compara la energía consumida real y teórica.
Moldavska 2015	Analiza la aplicabilidad de varias herramientas de evaluación de criterios de sostenibilidad, en los procesos de fabricación.
Lu 2015	Realiza la evaluación de las dimensiones de sostenibilidad en el proceso de mecanizado criogénico utilizando el método ProcSI.
Eastwood 2015	Propone una metodología de evaluación de sostenibilidad del modelado de un proceso unitario de diseño de un engranaje cónico y propone 3 alternativas.
Antolin 2016	Compara los instrumentos de Medición del Desempeño de la Sostenibilidad Corporativa (MDSC), para encontrar sus similitudes y diferencias, así como normaliza los subdimensiones que deben cubrirse al considerar las dimensiones de la sostenibilidad para el cálculo de indicadores.
Moldavska 2016	Propone un modelo de fabricación sostenible basado en la teoría de la complejidad para mejorar la visualización de los aspectos y una evaluación integral del desempeño.
Wu 2017	Mide el rendimiento del proceso de fabricación bajo criterios de sostenibilidad considerando los residuos reciclables por medio del caso de estudio de la industria del acero en China.
Lafit 2017	Propone un modelo para el desarrollo de índices de sostenibilidad en la industria de fabricación.
Helleno 2017	Realiza una revisión de indicadores de sostenibilidad entre 2009 y 2014 y plantea el modelo de gestión sostenible para procesos de fabricación que consideran mejoras y optimizaciones mediante algunos casos de estudio de la industria brasileña combinando el mapa de flujo de valor y el “Lean Manufacturing.”
Raoufi 2017	Revisa los desarrollos recientes de la huella de carbono, indicador ampliamente usado para medir el rendimiento ambiental en los procesos de fabricación y la cadena de suministro. Muestra su aplicación en el análisis de dos diseños de carcasa de un cuadricóptero.
Shankar 2017	Propone un modelo de evaluación de la influencia de las prácticas de fabricación sostenible en la India en las dimensiones económicas, ambiental y de seguridad y mediante un análisis de caso explica la metodología.
Luqmani 2017	Analiza los factores que contribuyeron al éxito y que se encuentran presentes en la innovación empresarial. Comenta las experiencias en el caso práctico de una empresa global de alfombras.
Parada 2017	Analiza los métodos y las métricas de sostenibilidad y las prácticas para lograr incorporar la sostenibilidad en el diseño de biorrefinerías.
Huang 2017	Plantea una metodología basada en métricas, que se basa en el índice de sostenibilidad de productos y de procesos y plantea un índice de sostenibilidad empresarial. Presenta un caso de aplicación de la metodología en una empresa local de electrónica de consumo.
Hegab 2018	Desarrolla el modelo de evaluación del proceso de mecanizado, por medio de un algoritmo en las fases del ciclo de vida. Emplea una lista de cada métrica y define un método de medición.

## 2.5. Análisis de Ciclo de Vida y Sostenibilidad.

En este apartado se presentan las revisiones del estado del arte, del “Análisis de Ciclo de Vida ACV” y como se encuentran consideradas en diferentes partes de un proceso industrial, lo que refuerza los criterios de sostenibilidad. A continuación, podemos mencionar:

Chang, presenta una revisión novedosa del “ACV” ya que presenta estudios desde la perspectiva de aplicaciones de desarrollos de productos (Chang, Lee, & Chen, 2014).

Por su parte, Hay realiza una revisión bibliográfica y desarrolla modelos para explicar la naturaleza de la sostenibilidad en el planeta tierra. Plantea dos modelos: a) el de ciclo de sostenibilidad (S-Cycle) en el que se detalla la operación de las actividades en un sistema y b) el Bucle de sostenibilidad (S-Loop) que esboza un proceso básico, los cuales pueden conducir a la sostenibilidad (Hay, Duffy, & Whitfield, 2014).

Alberti, realiza una revisión de normas y estándares, así como las directrices de sostenibilidad de los “Análisis de Ciclo de Vida” actuales, en especial para el entorno de ciudad o región en la dimensión ambiental (Alberti, Balaguera, Brodhag, & Fullana-i-Palmer, 2017).

Dyllick, presenta un nuevo significado a lo que se denomina “Producto Sostenible”, para lo cual, ha resumido la evolución conceptual en tres fases que buscan caracterizar los productos como verdaderamente sostenibles (Dyllick & Rost, 2017).

En la Tabla 2.5 se resume los artículos revisados y sus aportaciones.

Tabla 2.5. Revisión sobre Sostenibilidad y Análisis de Ciclo de Vida (fuente: elaboración propia).

Autores	Revisiones – Estudio
Chang 2014	Presenta una revisión de cómo se puede utilizar el ACV en el desarrollo de productos sostenibles, considerando el diseño conceptual, el diseño de piezas y el diseño de procesos.
Hay 2014	Realiza una revisión de la sostenibilidad y contribuye con dos modelos generales y complementarios: el ciclo de sostenibilidad (S-Cycle) y el bucle de sostenibilidad (S-Loop), que permiten comprender la sostenibilidad dentro de un proceso.
Alberti 2017	Revisa los métodos y las normativas existentes que se pueden utilizar para la evaluación ACV a nivel de ciudad o región urbana especialmente desde la perspectiva ambiental.
Dyllick 2017	Realiza una revisión de los cambios de las perspectivas de sostenibilidad del producto, agrupado en tres fases: a) desde mejoras selectivas, b) de mejores productos a buenos productos, y c) de valor privado a la generación de valor público.

Complementariamente a estas revisiones generales en la Tabla 2.6 se resume los aportes en el campo de sostenibilidad para varios tipos de empresas y productos.

Kurilova, partiendo del criterio de economía circular analiza el ciclo de vida del producto, plantea establecer flujos de información circular para lo cual explora, identifica y propone iniciativas para mejorar el flujo de información (Kurilova, Lindkvist, & Sundin, 2015).

Ceschin, hace una revisión del diseño para sostenibilidad y presenta un marco de referencia que es analizado desde los puntos de vista que permiten visualizar los vínculos y superposiciones de los aspectos particulares de la sostenibilidad (Ceschin & Gaziulusoy, 2016).

Gupta, recopila diferentes tecnologías para la fabricación sostenible de engranajes y realiza las siguientes recomendaciones: minimizar el uso de fluido de corte, minimizar la cantidad de material, minimizar el consumo de energía y eliminar procesos de ensamble complementarios para mejorar la producción y garantizar la sostenibilidad (Gupta, Laubscher, Davim, & Jain, 2016).

Manda, presenta su propuesta de un marco de valor sostenible para la industria química y la creación de valor en las dimensiones económica, ambiental y social (Manda et al., 2016).

Schmid, presenta un estudio interesante de la combinación de múltiples técnicas de fabricación en un sistema, es decir aprovechar un equipo robusto para poder desarrollar varios procesos de producción. En el estudio presenta una máquina herramienta de tecnología múltiple que combina las facilidades para fresado y laser (Schmid et al., 2016).

Tao, nos introduce en el internet de las cosas “*IoT Internet of Things*” para la administración energética del ciclo de vida del producto en las diferentes fases. La recopilación y transferencia de datos que permitan un mejor control (Tao, Wang, Zuo, Yang, & Zhang, 2016).

De los Rios, contribuye con una descripción de los casos exitosos que se han implementado en la industria y como el cambio del rol del diseño ha permitido identificar que habilidades y capacidades se requieren para la sostenibilidad y la economía circular (De los Rios & Charnley, 2017).

Dong, realiza su propuesta de sostenibilidad ambiental y de indicadores para lo que identifica sus aplicaciones y las compara los indicadores ambientales de diferentes áreas, además proporciona sugerencias (Dong & Hauschild, 2017).

Laso, analiza el ciclo de vida para un proceso industrial del sector alimenticio, en donde define para este sector las fases de ciclo de vida, así como recopila propuestas que pueden hacer que sea efectivo (Laso et al., 2017).

Lim, proporciona bases para los análisis de consumos sostenibles y analiza tres perspectivas de comportamiento del consumidor que pueden ser de interés en cada negocio: consumo responsable, autoconsumo y consumo eficiente. También indica como los consumidores pueden aportar en el desarrollo de la sostenibilidad (Lim, 2017).

Tabla 2.6. Sostenibilidad y Ciclo de Vida (fuente: elaboración propia).

Autores	Estudio
Kurilova 2015	Elabora un diagrama de Sankey en el que muestra: el flujo de información del ciclo de vida de producto, las pérdidas y cuellos de botella, en base al cual propone iniciativas para un flujo de información eficiente considerando la fabricación.
Ceschin 2016	Realiza una revisión de la evolución del diseño aplicable a la sostenibilidad, y como ha ido expandiéndose progresivamente.
Gupta 2016	Recopila los desarrollos en la fabricación sostenible de engranajes y realiza una revisión de las alternativas de mejora sostenible.
Manda 2016	Propone contextualizar la aplicación del análisis del ciclo de vida en empresas químicas, creando valores sostenibles.
Schmid 2016	Presenta el caso de estudio del ciclo de vida de una Máquina Herramienta de tecnología múltiple de un centro de mecanizado Multi-tecnológico que tiene dos unidades de trabajo que puede usar simultáneamente, un husillo para proceso de fresado y una unidad para el proceso de láser.
Tao 2016	Aporta con su estudio en el cual presenta un marco de referencia donde el internet de las cosas puede aplicarse a la gestión de la energía del ciclo de vida del producto.
De los Rios 2017	Analiza el cambio del rol del diseño del producto en varios casos de estudio y como se debe desarrollar habilidades y capacidades para implementar una economía circular y sostenible.
Dong 2017	Presenta un estudio donde revisa indicadores aplicados en el análisis del ciclo de vida (ACV) tomando en cuenta los objetivos del desarrollo sostenible y el marco de límites de sostenibilidad ambiental.
Laso 2017	Realiza el análisis del ciclo de vida para productos y presenta el caso de estudio aplicado a la industria alimenticia de anchoas enlatadas, en donde se define las mejores técnicas.
Lim 2017	Nos introduce al consumo sostenible, por medio de una propuesta de modelo de consumo sostenible bajo perspectivas de consumo responsable, autoconsumo y consumo consciente.

## 2.6. Entornos Colaborativos y Plataformas PLM.

Al hablar de entornos colaborativos es necesario mencionar hacia dónde van los sistemas de producción, y es así como la Industria 4.0 ya es una realidad. En el caso del mecanizado, la transformación digital ya se encuentra presente, siendo los ecosistemas digitales una realidad que se está implementando cada vez más. En la Figura 2.9 se presenta el esquema de un ecosistema digital de un estudio denominado: “España 4.0 - El reto de la transformación digital de la economía” (Berger, 2016).

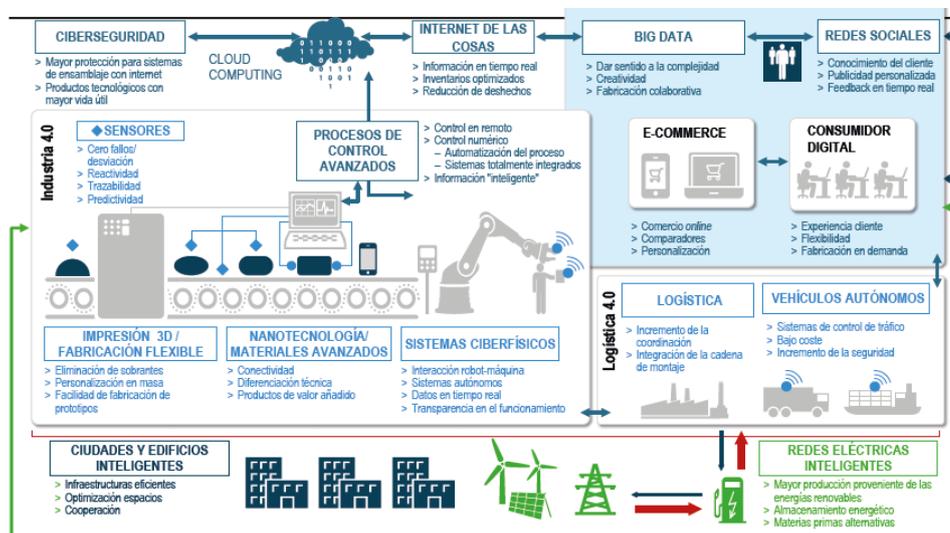


Figura 2.9. Ecosistema de digitalización. (fuente: Berger, 2016).

En el campo del mecanizado, un ejemplo de los esfuerzos que están orientados al desarrollo de un software inteligente es el del “*Instituto de Investigación de Tecnología Industrial (ITRI)*” de Taiwan y la empresa Fagor, los que se encuentran trabajando en un proyecto denominado *Intelligent Machine* con lo que buscan enfrentar el reto de la competencia global y a la demanda de una customización. Desde 2015 la “*Apps VMX*” se encuentra mejorando, ya que proporciona una interfaz a diversos controladores comerciales y a dispositivos de capturas de datos, que permitan controlar las vibraciones del cabezal y eliminar marcas de vibración, así como detectar posibles colisiones, detección de fallas, monitoreo de velocidad del husillo de corte, monitoreo de utilidades y optimización de la velocidad de avance, entre otros.

En la Figura 2.10 se muestra el esquema del sistema de fabricación cibernética propuesto por el ITRI y Fagor (Fagor, 2017).

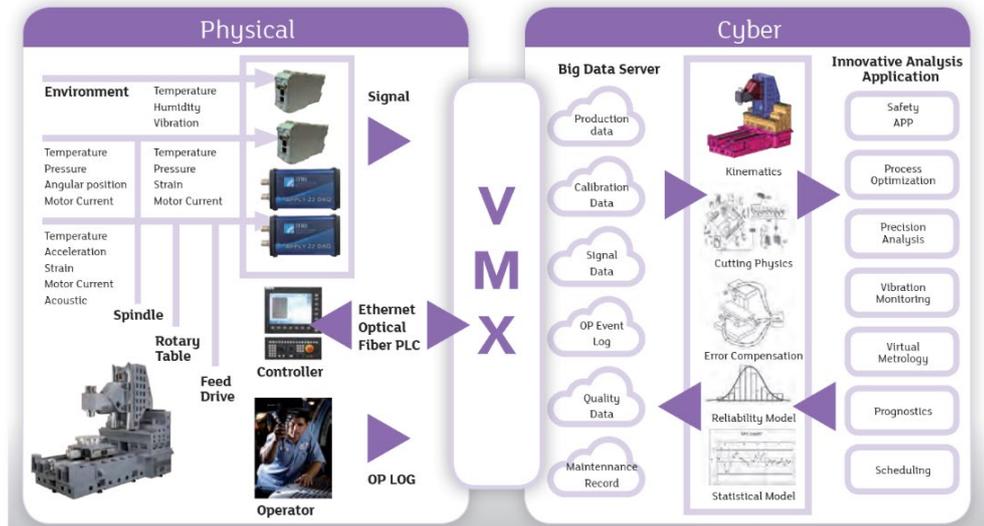


Figura 2.10. Fabricación Física Cibernética -ITRI©. (fuente: Fagor Automation, 2017).

### 2.6.1. Retos de la Industria 4.0.

Es así como para la implementación de la Industria 4.0 se generan algunos retos actuales que deben ser abordados y analizados, para lo cual se ha recopilado investigaciones recientes que resumen: propuestas, metodologías y recomendaciones para lograr su implementación.

Como primera aportación, Erol, realiza la propuesta de un modelo de competencias tentativo para la Industria 4.0 y el uso de escenarios, con lo que se plantea implementar la primera fábrica piloto de Industria 4.0 en Austria (Erol, Jäger, Hold, Ott, & Sihh, 2016).

Pozo, muestra los avances de la empresa Siemens, la cual impulsa la Industria 4.0 y sus soluciones a todo nivel, con lo que se denomina “Gemelo digital del producto, del proceso de producción y de los equipos”, juntamente con el uso de la Plataforma Colaborativa Teamcenter®, explica algunos casos de uso (Pozo, 2016).

Rennung realiza una investigación con diferentes compañías proveedoras de servicios en Europa, y propone un modelo que considera tres fases y las operaciones asociadas: en donde el servicio de ingeniería y administración, son un componente importante para implementar el proyecto de Industria 4.0 (Rennung, Luminosu, & Draghici, 2016).

Qin, se centra en la concepción fundamental de la Industria 4.0 y relaciona el nivel de automatización de la máquina, el proceso y la fábrica, con el nivel de inteligencia en el

manejo de información, partiendo de un nivel básico de control, la integración hasta llegar al estado de fabricación inteligente. Presentando varios casos de estudio donde se muestra la visión y el concepto de Industria 4.0 (Qin, Liu, & Grosvenor, 2016).

Zezulka, presenta la explicación de dos modelos básicos de la plataforma de Industria 4.0: el “RAMI 4.0 - *RAMI Reference Architecture Model Industry 4.0*” y el “Modelo de componentes de la Industria 4.0”. (Zezulka, Marcon, Vesely, & Sajdl, 2016). Un estudio similar lo realiza Contreras et al. (Contreras, García, & Díaz Pastrana, 2017) en donde muestra también el desarrollo de algunas aplicaciones.

De Man, realiza su investigación analizando los modelos de negocios en donde hay la posibilidad de oportunidades para convertirlos en sostenibles, aplicando el concepto de diseño para la longevidad, la reparación y el reciclaje, de manera que los esfuerzos no solo se enfoquen en que sus procesos sean más eficientes sino en usar menos materia prima y más reciclaje (De Man & Strandhagen, 2017).

En la Tabla 2.7 se resume las principales revisiones en el campo del concepto de Industria 4.0.

*Tabla 2.7. Revisiones sobre Iniciativas en Industria 4.0 (fuente: elaboración propia).*

<b>Autores</b>	<b>Estudio</b>
Erol 2016	Sugiere un concepto de fábrica de aprendizaje de Industria 4.0 basada en escenarios.
Pozo 2016	Muestra las tendencias de las empresas hacia la empresa digital y el camino que deben seguir hacia la Industria 4.0, así como la integración y digitalización de toda la cadena de valor con el uso de una plataforma PLM.
Rennung 2016	Presenta una propuesta de modelo de evaluación del sector servicios a través de diferentes enfoques del concepto de Industria 4.0.
Qin 2016	Presenta una propuesta de estructura de implementación de Industria 4.0 y un marco de múltiples capas que puede ayudar en la comprensión y cumplimiento de los requisitos de la Industria 4.0.
Zezulka 2016	Resume los conocimientos cibernéticos e informáticos, así como los pasos básicos en cualquier diseño e implementación de sistemas de Industria 4.0.
Contreras 2017	Expone las características esenciales que un sistema de fabricación debería adoptar para convertirla en una aplicación de Industria 4.0.
De Man 2017	Analiza posibles escenarios empresariales sostenibles y propone una investigación del uso de Industria 4.0 para crear modelos empresariales sostenibles.

### 2.6.2. Plataforma PLM - 3DEXPERIENCE.

El uso de la Plataforma PLM 3DEXPERIENCE (Dassault Systemes, 2021) permite gestionar el mundo físico, el lógico y el funcional de un producto, proceso o sistema productivo, por medio del uso de varias aplicaciones “Apps” en diferentes fases como: diseño, simulación, fabricación, información del proyecto, en donde dependiendo el rol que cumpla tiene acceso y competencia .

En la Tabla 2.8 se presenta una explicación de su contenido y de la estructura de la información de los entornos colaborativos.

Tabla 2.8. 3DEXPERIENCE® Estructura de Entornos Colaborativos (fuente: elaboración propia basado en manual 3DExperience).

Componente de la estructura de la Plataforma Colaborativa	Contiene
Administración de la Plataforma	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estructura corporativa Clientes/Proveedores.</li> <li>• Datos de Personas y Organizaciones.</li> <li>• Datos del Programa y del Contrato.</li> <li>• Datos de Productos y del Portafolio.</li> </ul>
Gestión de Programas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contratos.</li> <li>• Requerimientos.</li> <li>• Ensayos.</li> <li>• Portafolio de Productos.</li> <li>• Programación y Proyectos.</li> <li>• Riesgos y Oportunidades.</li> <li>• Identificación de Evoluciones y Variantes.</li> <li>• Enlace a Ingeniería de Sistemas (Link).</li> </ul>
Ingeniería de Sistemas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño 3D.</li> <li>• Ingeniería de Fabricación.</li> <li>-Seguimiento de unidades.</li> <li>• Ingeniería de Pruebas.</li> <li>• Ingeniería de Soporte.</li> </ul>
Simulaciones/ Test	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simulaciones y Pruebas.</li> </ul>

- La **Administración de la Plataforma**, detallada en la Figura 2.11 esquematiza las relaciones entre: a) la estructura corporativa: Clientes & Proveedores en un dominio ERP “Enterprise Resource Planning”, b) los datos de personas y organizaciones que típicamente están conectados con los “Colaboradores” o lo denominado como recurso humano de la empresa, c) los datos del programa y de los contratos creado en PLM “Product Lifecycle Management”, enviado al ERP a través de la integración, y d) los datos del portafolio & productos.

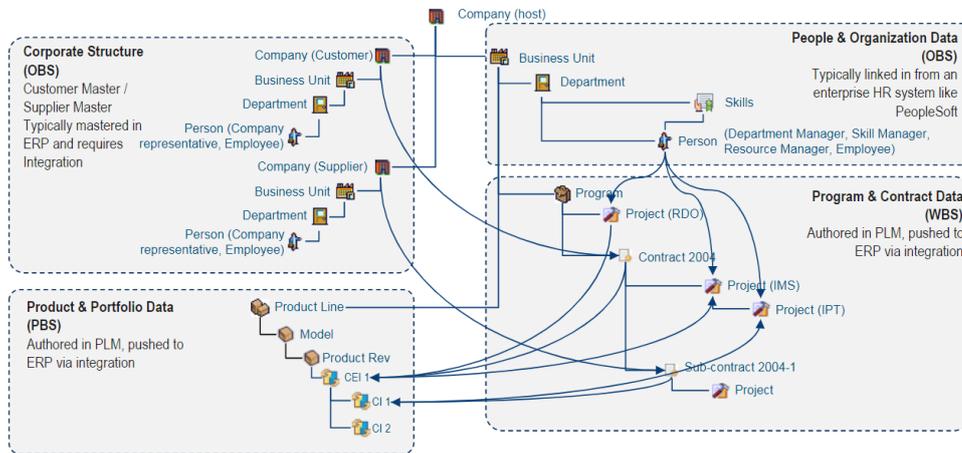


Figura 2.11. Administración de la Plataforma-3DEXPERIENCE® (fuente: Dassault Systemes, 2021)

- La **Gestión de programas** contempla varias relaciones entre: la “Gestión de los Contratos” recibidos u “ordenes de producción” y la línea de producción con su portafolio de productos “Gestión del portafolio de productos” a la vez que alimenta la Gestión de Proyectos y Planificación de tareas en donde se considera los riesgos y oportunidades. La gestión del portafolio de productos a la vez realiza una identificación de evoluciones y variantes, así como gestiona los requerimientos y pruebas solicitadas (ver Figura 2.12).

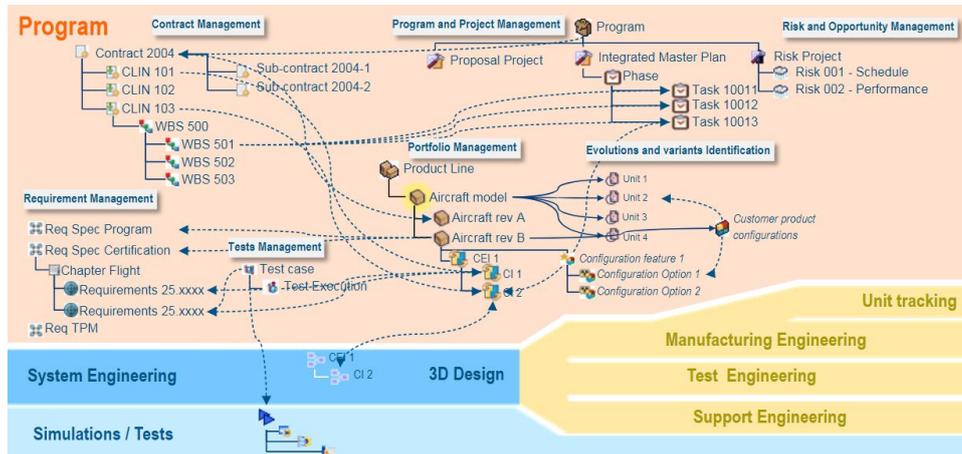


Figura 2.12. 3DEXPERIENCE® Gestión de Programas - Simplificado (fuente: Dassault Systemes, 2021).

La relación entre los módulos de Ingeniería de Fabricación, Ingeniería de Sistemas y el Diseño 3D es muy importante, ya que la planificación de recursos, el enrutamiento de la información de los recursos y la ingeniería desarrollada, perfecciona la Ingeniería de Fabricación y Lista de Materiales “BOM (*BOM Bill of Materials*)” y permite un diseño en 3D bajo los criterios Físicos, cinéticos (“*KIN*”) y lógicos.

Las simulaciones pueden considerar el uso de robots y criterios ergonómicos. Por otra parte se define como: “*KIN*” al simulador de cinemática, el cual define mecanismos para maquetas digitales, simula el movimiento del mecanismo y analiza su movimiento comprobando si hay interferencias y calculando distancias mínimas. Cabe indicar que bajo el criterio lógico se sigue la estructura de desglose del producto (ver Figura 2.13).

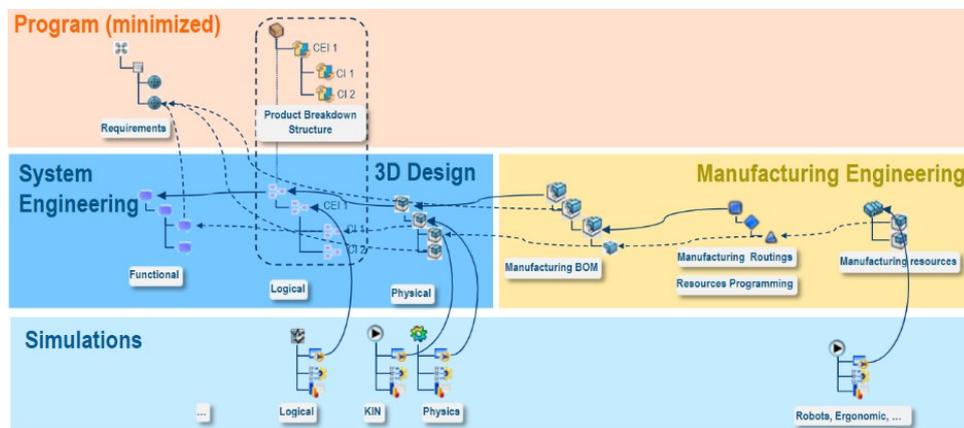


Figura 2.13. 3DEXPERIENCE® Ingeniería de Sistemas - Simplificado (fuente: Dassault Systemes, 2021).

En la Figura 2.14 se muestra a detalle como el Diseño 3D se nutre de la información que viene del seguimiento de las unidades, en donde:

- La ingeniería de fabricación considera los recursos de fabricación, sus rutas y la programación del uso de los recursos para tener actualizada la lista de materiales necesarios.
- La ingeniería de pruebas y ensayos, que evalúa los recursos de fabricación, realiza casos de prueba y genera la lista de materiales, que forma parte del diseño 3D.
- Ingeniería de soporte, se encuentra encargada del mantenimiento de los recursos, de las rutas y del mantenimiento actualizada de la lista de materiales.

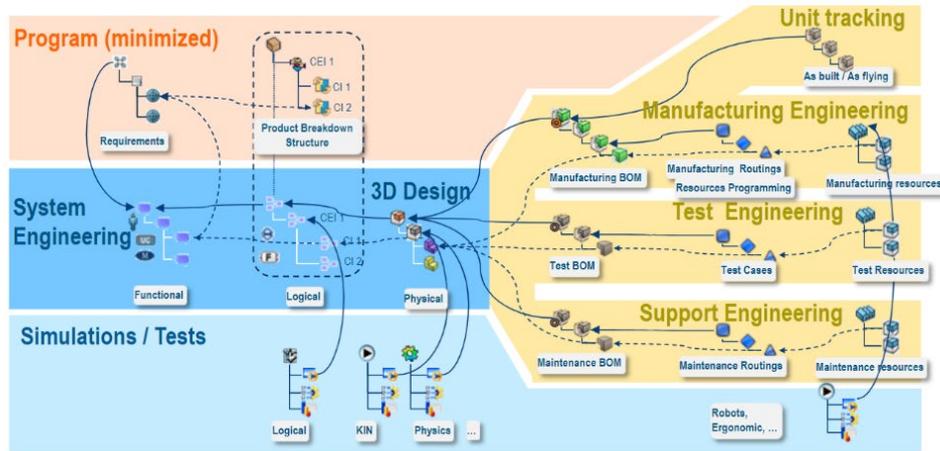


Figura 2.14. 3DEXPERIENCE® Ingeniería de Sistemas - Kit de inicio simplificado (fuente: Dassault Systemes, 2021).

Las simulaciones juegan un rol importante ya que el análisis puede ser enfocado considerando la perspectiva lógica, “KIN”, física con el uso de robots, criterios ergonómicos, lo que permitirán un mantenimiento eficiente de los recursos. La Figura 2.14 muestra este detalle. Se puede aprovechar toda la información generada en el Diseño 3D para crear y actualizar la estructura de ingeniería de detalle del producto, así como las listas de materiales. La Figura 2.15 explica el esquema.

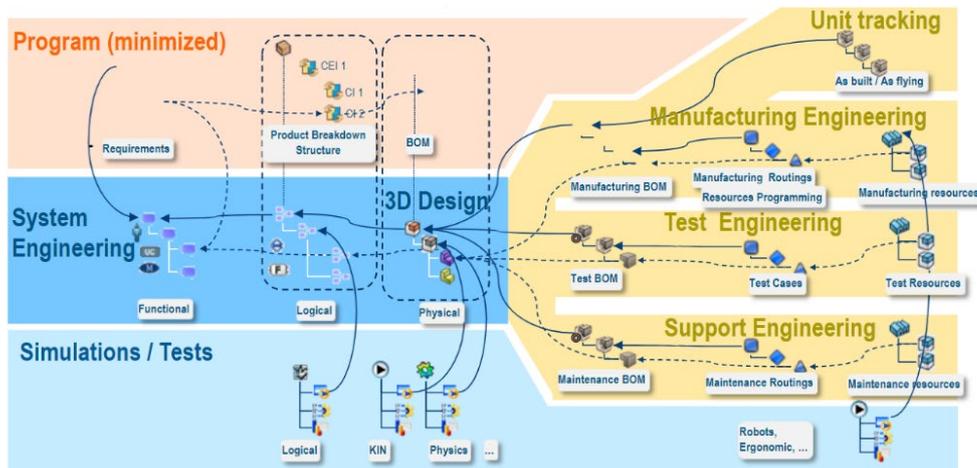


Figura 2.15. 3DEXPERIENCE® Ingeniería de Sistemas – Resumen simplificado. (fuente: Dassault Systemes, 2021).

### 2.6.3. Roles de los participantes de un entorno colaborativo.

Una consideración importante para destacar en el uso de la plataforma colaborativa es el flujo de información y los roles de los diferentes actores que se explicó anteriormente, en donde el tamaño de la empresa requiere de personal especializado, o su vez puede contratar o subcontratar tareas específicas. En la Tabla 2.9 se resume diferentes roles que presenta la plataforma 3DEXPERIENCE, la cantidad de roles que se consideran en los grupos macro están contenidas en los programas de certificación y en su plataforma de capacitación 3DEXPERIENCE que se resume a continuación.

Tabla 2.9. 3DEXPERIENCE® Bibliotecas de aprendizaje (fuente: elaboración propia basada en manual 3DEXPERIENCE).

Áreas Colaborativas	Opción de Rol	Ejemplo de Rol en 3DEXPERIENCE	
		Ejemplo Código de Rol	Posición de Trabajo
Innovación Colaborativa	6	LTR	“Lean Team Player”
Trabajos	44	CHG	“Change Manager”
Diseño / Ingeniería	88	MDG	“Mechanical Designer”
Simulación	45	MDG	“Mechanical Designer”
Fabricación / Producción	45	NPT	“Prismatic & Turning Programmer”
Gobernanza /Ciclo de Vida	37	PDM	“Product Manager”

- **Innovación colaborativa:** permite diseñar y supervisar los proyectos que usan la nube, así como reducir la cantidad de recursos y los costos. Conecta a las personas y los datos para impulsar el diseño creativo y la innovación.
- **Trabajos:** permite desarrollar soluciones en dominios como: colaboración diseño, simulación y fabricación.
- **Diseño /Ingeniería:** aplica las últimas prácticas de diseño e ingeniería para producir productos innovados y de forma rápida, como parte de un flujo de trabajo.
- **Simulación:** permite mejorar el rendimiento del producto y reducir costes y riesgos.
- **Fabricación / Producción:** brinda ideas innovadoras para que los diseños planeados se fabriquen de manera eficiente, ofreciendo habilidades para navegar dentro de la transformación de la fabricación digital.
- **Gobernanza / Ciclo de Vida:** acelera la colaboración entre los diferentes equipos y el desarrollo del producto.

Para la propuesta de la tesis doctoral, en la que analizamos el proceso de mecanizado con arranque de viruta a nivel de taller, en la Tabla 2.10 se muestra la propuesta mínima de roles que en un entorno colaborativo permitirá retroalimentar el proceso de fabricación.

Cabe indicar que cada rol tiene habilitado el acceso a diferentes niveles de información, lo que implica que aporten de manera colaborativa. Es importante destacar que hay colaboradores que pueden tener la experticia necesaria para cubrir varios roles simultáneamente.

Tabla 2.10. 3DEXPERIENCE® Roles Mínimos de la propuesta (fuente: elaboración propia).

Área	Código Rol	Posición de Trabajo	Función
Diseño/Ingeniería	MDG	Mechanical Designer	Ingeniero de Materiales
Simulación	MDG	Mechanical Designer	Diseñador CAD
Fabricación /Producción	PST	Manufacturing Engineer	Diseñador CAM
	NTT	Cutting Tool Technologist	Técnico de Operación
	NTT	Cutting Tool Technologist	Operador de Maquinaria

Se debe considerar que depende del tamaño de la empresa y como se encuentren distribuidas las funciones, ya que, en algunos casos, una sola persona puede tener varias funciones a cargo, en especial si es una empresa pequeña. En la Figura 2.16 se representa un ejemplo de roles que puede tener habilitado un colaborador usando la plataforma 3DEXPERIENCE.

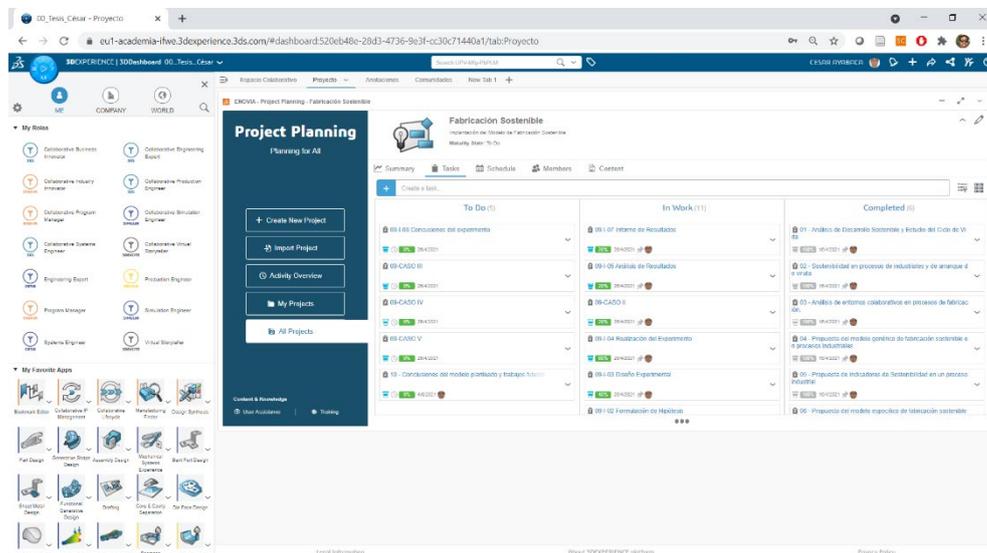


Figura 2.16. 3DEXPERIENCE® Ejemplo Roles de Colaborador (fuente: Dassault Systemes, 2021).

## **2.7. Conclusiones.**

A nivel mundial los esfuerzos por tener un mundo donde vivir que brinde mejores condiciones es evidente, y mucho más con la constante evolución de mercados, técnicas, métodos que buscan hacerlos más eficientes y que a la vez permita cuidar el medioambiente, implementando los criterios de sostenibilidad.

En este capítulo hemos revisado los aportes a la fabricación sostenible, las propuestas de métricas generales que se encuentran planteadas en investigaciones recientes. La evolución de las estrategias de fabricación, nos dan una visión que a nivel mundial y empresarial se realiza grandes esfuerzos para mejorar y optimizar permanentemente.

Al iniciar la recopilación bibliográfica para realizar la revisión del estado del arte, se encontró aportes diversos, de entre los cuales se seleccionó los más afines al tema de la presente investigación doctoral, es de esa manera que se ha priorizado en esta primera parte aquellas experiencias orientadas a los procesos de fabricación considerando el ciclo de vida.

También podemos mencionar que muchas de las investigaciones específicas sobre mecanizado han iniciado con revisiones generales de la sostenibilidad, que les han permitido, posteriormente, plantear sus propuestas y aportaciones específicas. Es así como muchos autores que consideramos en esta primera parte del análisis han desarrollado aportaciones cada vez más concretas.

En la actualidad la información de la fabricación del producto, del proceso o de la empresa debe manejarse y recopilarse por medio de entornos colaborativos que usen plataformas PLM, ya que brindan facilidades de comunicación y de conectividad, las cuales se van incorporando a pasos acelerados a los procesos productivos. La idea de implementar el concepto de Industria 4.0 cada vez se afianza más ya que permite, en las diferentes fases del ciclo de vida, facilitar la analítica de datos y el flujo de información.

Para el proceso de mecanizado, la implementación en el corto plazo de propuestas de los fabricantes de equipos y de los controladores, para el campo de mecanizado, permitirá que en entornos colaborativos se los monitoree y administre, lo cual se consolida cada día mucho más, con el desarrollo de las telecomunicaciones, los sistemas de producción y en general lo que hoy en día se denomina Industria 4.0.

El modelo del ciclo de vida permite ubicarnos en qué fase del producto, proceso o de la empresa, podemos reforzar la aplicación de los principios de fabricación sostenible, lo que nos puede permitir aportaciones importantes.

En el próximo capítulo presentaremos a detalle para el proceso de arranque de viruta, sus indicadores y formas de evaluación.



# Capítulo 3

---

—

# Capítulo 3

## Análisis de

### Sostenibilidad en

#### Procesos de Arranque

#### de Viruta

### 3.1. Introducción

El concepto de sostenibilidad puede tener varias definiciones, pero la más difundida, de amplia aplicación y, por tanto, más conocida es la que propuso la comisión Brundtland, y que expresa literalmente como “*cubrir las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades*” (Brundtland, 1987). Esto ha motivado a que se realicen esfuerzos en muchos ámbitos y, sobre todo, en el de fabricación y producción industrial. Es en este espacio donde se hace necesario realizar aportaciones científicas y tecnológicas concretas sobre sostenibilidad en procesos de fabricación de productos, especialmente, en tecnologías y técnicas concretas de conformado de piezas.

Debemos recordar que, a nivel global y considerando el entorno que nos rodea, han existido aportaciones importantes en el ámbito de la sostenibilidad, como la de McDonoug y Braungart, quienes en el año 2000 por encargo de la ciudad de Hannover, propusieron los principios de Hannover que son válidos hasta la actualidad, los cuales indican que para evaluar un proceso tenemos diferentes perspectivas (generalmente denominadas dimensiones) bajo las cuales podríamos hacer el análisis en cualquier proceso de fabricación.

Estas se denominan, la dimensión económica, la dimensión ecológica (medio ambiente) y la dimensión social (McDonough, Braungart, Anastas, & Zimmerman, 2003). Para ilustrar esta definición, la Figura 3.1 nos permite representar por medio de

diagramas la definición de sostenible, entendiendo como aquel espacio donde los criterios económicos, medio ambientales y sociales pueden coexistir.



Figura 3.1. Principios de Hannover para sostenibilidad. (fuente: elaboración propia).

Una herramienta muy utilizada para cuantificar la sostenibilidad es el “Análisis del Ciclo de Vida – ACV”, que en muchas investigaciones en inglés se lo encuentra como “*Life Cycle Analysis - LCA*” la cual nos permite determinar la interacción entre los recursos necesarios y las emisiones del proceso, siendo importante definir los límites del sistema que se desee analizar, ya que de las entradas y salidas (recursos y emisiones) dependerá la profundidad de nuestro análisis.

Por otro lado ISO 14040 (ISO 14040, 2006) define como: “*ciclo de vida a las etapas consecutivas e interrelacionadas de un sistema del producto, desde la adquisición de materia prima o su generación a partir de recursos naturales hasta la disposición final*” y define al “*análisis de ciclo de vida como la recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales de un sistema de producto a través de su ciclo de vida*” el cual dispone de cuatro fases de análisis:

- Fase 1.** Definición del objetivo y alcance.
- Fase 2.** Análisis de Inventario (Inventario de Ciclo de Vida, ICV).
- Fase 3.** Evaluación del impacto ambiental (EICV).
- Fase 4.** Interpretación.

En cada una de estas fases se definen consideraciones importantes del análisis y es así como en la fase 1: se define el objetivo y se especifican los límites del sistema a analizar y el nivel de detalle. En la fase 2 se realiza un inventario de los datos de las entradas y las salidas del sistema que estemos analizando. En la fase 3 proporciona información adicional para evaluar los resultados del inventario del ciclo de vida, la interpretación y el análisis de sus resultados. ISO 14040 considera dos tipos de estudio: a) el Análisis del Ciclo de Vida (ACV) y b) el análisis del Inventario del Ciclo de Vida (ICV). Este último análisis es similar al primero, pero no considera la fase 3 y muchas veces eso genera confusión.

Delimitar el sistema que analicemos es importante, así por su parte Ashby propone un sistema de límites del ACV (Ashby, 2013) donde el límite del Sistema A considera una parte simple del ciclo de vida; el límite del Sistema B encierra las entradas directas y las emisiones del ciclo de vida completo y, finalmente, un sistema C, al que no tiene sentido colocar un límite, ya que no tiene una frontera bien definida (Figura 3.2). En donde se observa el flujo de recursos y emisiones a través de los límites de los sistemas.

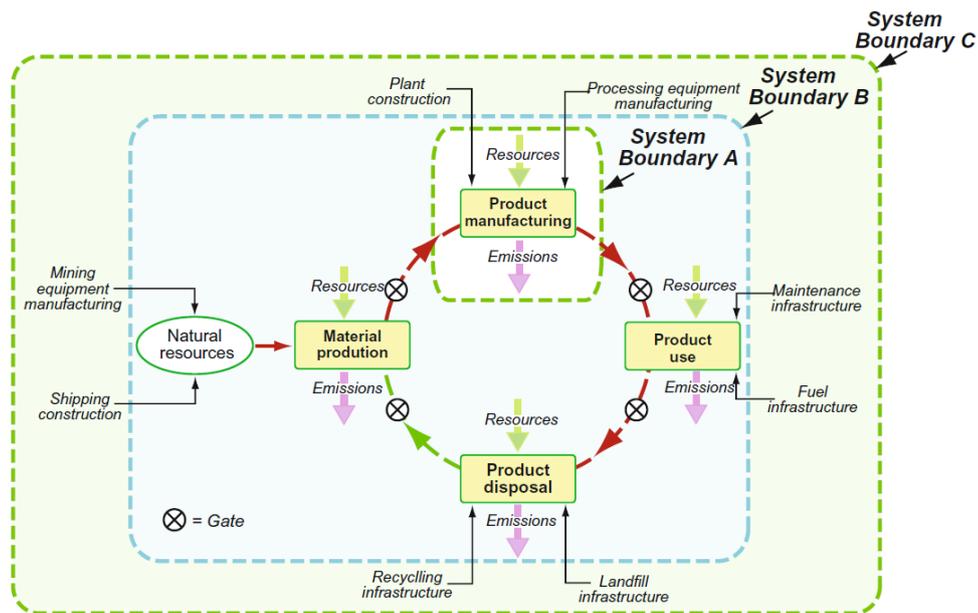


Figura 3.2. Sistema de límites del Análisis del Ciclo de Vida. (fuente: Ashby, 2013).

En la idea macro de este análisis, diversos autores definen cuatro fases básicas genéricas que podrían explicar el ciclo de vida del producto, considerándolas en el sentido más amplio, las cuales son: a) Producción de material, b) Fabricación del producto, c) Uso del producto y d) Disposición del producto.

### 3.1.1. Ciclo de Vida en Procesos de Arranque de Viruta.

Considerando las actuales aplicaciones asistidas por ordenador que permiten hacer evaluaciones del ciclo de vida, hay que destacar la definición de indicadores de sostenibilidad como, por ejemplo, los modelos “Eco-Index”. Estos modelos evalúan las fases del ciclo de vida del producto y su impacto en siete áreas estratégicas como son: *Intensidad y Uso de la Tierra, Agua, Desperdicios, Biodiversidad, Productos Químicos y Tóxicos para las Personas, Productos Químicos y Tóxicos para el Medio Ambiente y Uso de la Energía.*

De forma más aplicada, según la visión de desarrolladores de aplicaciones de ingeniería como Solidworks de Dassault Systèmes (Solidworks, 2019), proponen las siguientes etapas del ciclo de vida para implantar un modelo “Eco-Index”.

- **Etap 1: Materiales: Extracción Procesamiento y Transformación:** Esta etapa considera los recursos que se utilizan para la adquisición de los materiales primarios que se van a utilizar en el producto, partiendo desde la extracción de materias primas en sus diferentes estados, existe una amplia clasificación de estos y pueden incluir nuevos materiales. También se puede considerar que los materiales pueden ser reciclados e incorporados nuevamente para producir nueva materia prima.
- **Etap 2: Embalaje:** Las materias primas deben ser movilizadas y es así como es necesario darles una forma específica para que puedan ser usadas en los diferentes procesos. Por ejemplo, en el acero, es muy común usar laminas para los espesores más delgados y laminas o planchas para espesores mayores. Los tamaños dependerán de las consideraciones de transporte y de la normativa dimensional que los rija. Por ejemplo, en la fabricación de ejes, la forma más utilizada son barras cilíndricas del diámetro requerido. La longitud de la barra dependerá del transporte en el que se vaya a movilizar.
- **Etap 3: Fabricación del producto y ensamble:** Los procesos de fabricación permitirán la transformación de las materias primas a los productos principales y los subproductos que se generan. Entendiéndole como un proceso las entradas y salidas requeridas de recursos y consumibles que son necesarios para su realización. La ingeniería de diseño del producto permitirá analizar procesos de ensamblaje más adecuados cuando se traten de partes o subensambles de elementos más complejos.
- **Etap 4: Transporte y Distribución:** Los productos fabricados deben ser entregados en los sitios de consumo, para lo cual el transporte de estos debe ser realizado considerando el sitio de fabricación y el sitio de uso. Se puede considerar también cadenas de distribución de clientes mayoristas hasta los consumidores finales.
- **Etap 5: Uso y Servicio:** El uso del producto fabricado requiere de todos los insumos necesarios para su apropiada operación. Por ejemplo, para una máquina

herramienta como un centro de mecanizado, la energía requerida, filtros, lubricación, deben estar de acuerdo con el mantenimiento recomendado por el fabricante de este, ya que de ser así se garantizará el tiempo de vida útil.

- **Etapas 6: Fin de vida:** Al término del uso de un producto, queda la interrogante de qué hacer con el mismo. Es así como en muchos casos se ve la manera de prolongar su tiempo de uso, mediante la realización de un mantenimiento correctivo de las partes o piezas que se encuentren desgastadas, o mejor conocido como un “*Overhaul*” (desarmar para examinarlo y reparar si es necesario). De no ser así se busca la manera de reciclar los materiales que lo componen. Las 9R o nueve principios del consumo sostenible se definen como: “*Reducir, Reutilizar, Reciclar, Revalorizar, Redistribuir, Relacionar, Resiliencia, Reevaluación y Reestructuración*”.

A continuación se presenta el modelo Eco-Index (ver Figura 3.3).

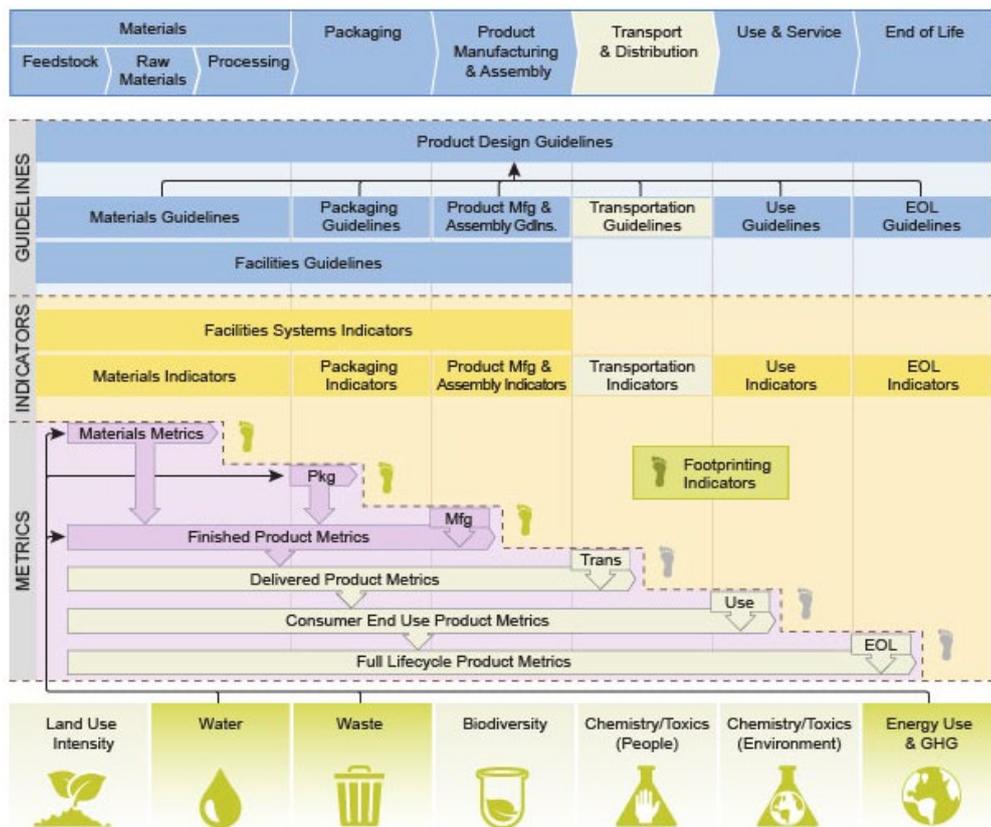


Figura 3.3. Eco Index: Etapas del ciclo de vida y áreas clave de impacto (fuente: Solidworks, 2019).

Algunas recomendaciones al realizar el análisis de ciclo de vida mencionan que se debe definir desde el inicio de la evaluación el alcance del estudio, ya que la etapa 2 de embalaje y la etapa 4 de transporte y distribución se podrían considerar dentro del análisis.

La ingeniería de sostenibilidad en un futuro próximo será un área del conocimiento muy importante, ya que el diseñador de productos deberá tomar decisiones iniciando desde identificar ese producto estratégico y la investigación del mercado, así como el ciclo de vida de un producto, de manera que se pueda seleccionar las mejores entradas y salidas del proceso de fabricación.

Por otra parte, en la Figura 3.4 propuesta por Lewis, recomienda que para ver reflejada las ventajas de hacer sostenibilidad, una prioridad es implementar decisiones tempranas que afecten las etapas del ciclo del desarrollo de un producto, que consideren los criterios de sostenibilidad, tan pronto como sea posible (Lewis et al., 2017).

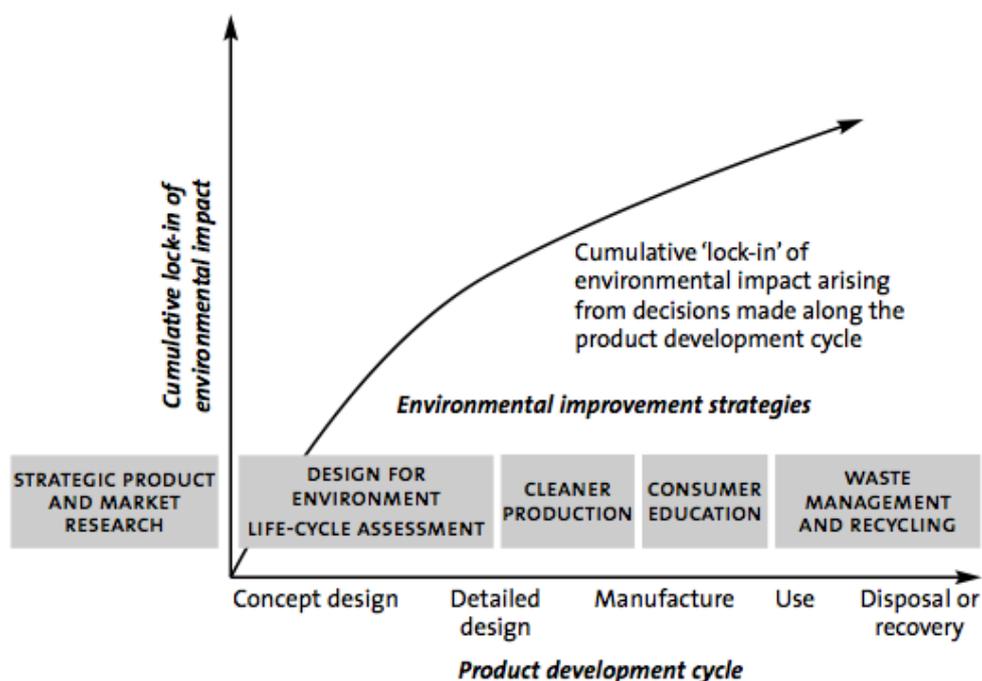


Figura 3.4. Ciclo de desarrollo del Producto (fuente: Lewis, 2017, p. 14).

El desafío se plantea el momento de implantar los indicadores en procesos de fabricación específicos, ya que se debe considerar la creciente evolución de las técnicas de fabricación. Es importante recordar que cada proceso de conformado tiene su casuística y hay que definir sus indicadores de sostenibilidad particulares, en nuestro

caso centraremos el estudio en los procesos, tecnologías y técnicas de arranque de viruta. De acuerdo con estudios iniciales, se pronostica que los ingenieros que manejen criterios de ingeniería de sostenibilidad mejorarán la ingeniería de detalle, permitiendo que los procesos de fabricación sean más eficientes y menos contaminantes, así como ser más asertivos en el análisis de entradas y salidas del proceso de fabricación que mejoren la producción, el uso y la disposición final del mismo.

Consideraremos al ciclo de vida como el primer ámbito de análisis de sostenibilidad de la presente propuesta y delimitaremos al estudio de los procesos de arranque de viruta, que en el siguiente capítulo se detalla, juntamente con la explicación de la propuesta de esta tesis doctoral.

### **3.1.2. Marcos de Referencia de Sostenibilidad.**

Existen diferentes marcos de referencia que se han desarrollado para realizar las evaluaciones de sostenibilidad, entre los que cabe destacar los siguientes:

- **ODS Objetivos del desarrollo sostenible:** “El 25 de septiembre de 2015, los líderes del mundo se reunieron y plantearon objetivos globales para erradicar la pobreza, proteger al planeta y asegurar la prosperidad para todos, como parte de una nueva agenda de desarrollo sostenible para las naciones, donde cada objetivo tiene metas específicas para los próximos 15 años”(United Nations, 2015).
- **ISO 26000:2010 Responsabilidad Social:** “ayuda a las empresas y organizaciones a traducir los principios en acciones efectivas y comparte las mejores prácticas relacionadas con la responsabilidad social a nivel mundial, la cual está dirigido a todo tipo de organizaciones, independientemente de su actividad, tamaño o ubicación” (ISO 26000, 2010).
- **ISO 14031:2013 - Gestión ambiental:** “brinda orientación sobre el diseño y uso de la evaluación del desempeño ambiental (*EPE: Environmental Performance Evaluation*) dentro de una organización y es aplicable a todas las organizaciones independientemente del tipo, tamaño, ubicación y complejidad” (ISO 14031, 2013)
- **Sustainable Manufacturing Indicator Repository SMIR:** El Repositorio de Indicadores de Fabricación Sostenible (Sustainable Manufacturing Indicator Repository, SMIR) elaborado por el del *NIST (“National Institute of Standards and Technology”)* proporciona “acceso centralizado a información de indicadores de sostenibilidad para medir su rendimiento de sostenibilidad mediante análisis de 13 bases de datos, indicadores categorizados basados en similitud y aplicación del indicado” según establece el propio organismo (NIST, 2018)
- **United Nations Global Compact “Pacto global”:** El cual fue planteado en el año 2000 y “es una llamada a las empresas a alinear sus estrategias y operaciones con diez principios universales sobre derechos humanos, normas laborales, medio ambiente y lucha contra la corrupción, y a tomar medidas que promuevan los objetivos de desarrollo sostenible ODS” (United Nations, 2018).

- **Global Reporting Initiative “GRI”:** “es la organización internacional independiente que ayuda a las empresas y otras organizaciones a asumir la responsabilidad de sus impactos, proporcionándoles el lenguaje común global para comunicar esos impactos. Ofrece los estándares más utilizados en el mundo para informes de sostenibilidad: los estándares GRI” (GRI, 2020).

De los marcos de referencia mencionados, para la categorización de indicadores, SMIR ha planteado una propuesta de categorización con criterios multidimensionales de sostenibilidad y considera tres dimensiones principales: *crecimiento económico* (dimensión **económica**), *cuidado del medio ambiente* (dimensión **ambiental**), *bienestar social* (dimensión **social**) a las cuales se les adiciona dos dimensiones adicionales que son el **adelanto tecnológico** y la **gestión del rendimiento** que corresponden a nivel de organización.

Esta propuesta de indicadores, como lo menciona Joung, (Joung, Carrell, Sarkar, & Feng, 2013) requiere de indicadores a nivel de proceso, lo que aparentemente eliminaría la consideración de los sistemas regionales y nacionales de medición sostenible, pero una revisión de los indicadores de los sistemas de función con igual significado fue incluida en el repositorio de indicadores SMIR (ver Figura 3.5).

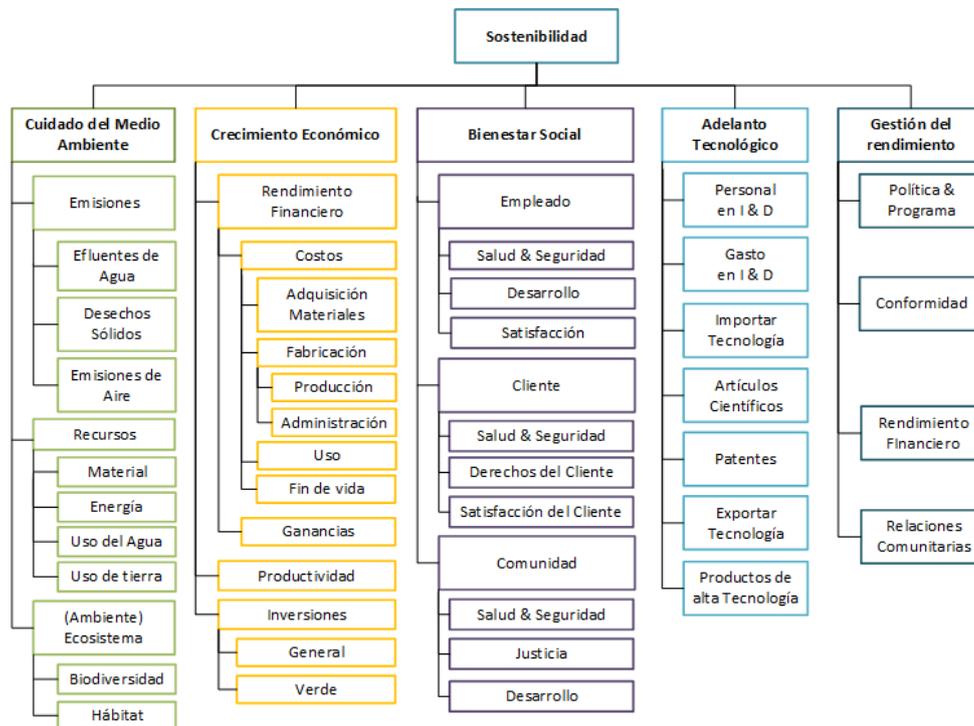


Figura 3.5. Categorización de indicadores SMIR (fuente: Joung, 2013).

En el **cuidado del medio ambiente (Dimensión Ambiental)**, los indicadores se clasifican por: a) su impacto organizacional, b) por el proceso/producto y c) por el uso/agotamiento de recursos, como:

- Indicadores de emisiones: incluyen indicadores de descargas (sólidas, gaseosas o líquidas) durante la fabricación del producto o servicio.
- Indicadores de recursos: incluyen material, energía, agua, tierra usada o procesos en la producción y uso del producto.
- Indicadores de ecosistema: muestran los impactos en la biodiversidad y el hábitat circundante a la organización.

En el **crecimiento económico (Dimensión Económica)** los indicadores buscan medir el rendimiento económico, la productividad, y las inversiones de una organización y sus procesos y productos. Esta dimensión incluye 3 subcategorías:

- Indicadores de rendimiento económico: que consideran ganancias y costes operativos, costes de producción que incluyen energía mano de obra, gestión de residuos, embalaje entrega y almacenamiento.
- Indicadores de productividad: se refieren al personal y la eficiencia laboral.
- Inversiones: medir el crecimiento financiero general y la sostenibilidad de la organización.

En el **bienestar social (Dimensión Social)** los indicadores están enfocados desde la perspectiva de los empleados, el cliente y la comunidad, considera aspectos como:

- Indicadores de los empleados: seguridad y salud de los trabajadores desarrollo de habilidades y satisfacción dentro de la organización.
- Indicadores del cliente: cubren los impactos en salud, seguridad de la fabricación y el uso del producto, la satisfacción de las operaciones y los productos y la conformidad e inclusión de los derechos específicos para los clientes.
- Indicadores comunitarios: consideran las acciones de la organización en los servicios sociales, así como en el desarrollo de obras de derechos humanos.

Los indicadores de **adelanto tecnológico** miden la capacidad de la organización para promover el avance tecnológico de la sociedad mediante la educación e investigación.

- Personal en I&D: “Investigación y desarrollo”, su experiencia en innovación, así como en el desarrollo de productos y procesos.
- Gasto en I &D: “Investigación y desarrollo”, considera las inversiones monetarias y de tiempo para proyectos de investigación y desarrollo.
- Importación de tecnologías: son las tecnologías o productos importados desde el país de residencia de una organización y establecen el nivel de tecnología para una organización.
- Los artículos científicos publicados: son la referencia de las contribuciones de una organización en el campo científico para desarrollar tecnología.

- Las patentes: establecen el nivel de la organización en conceptos innovadores y contribuciones por nuevas tecnologías y productos.
- Exportaciones de tecnología: es una medida global del uso de ciertos productos y tecnologías fabricados por una organización en otros países y regiones.
- Los productos de alta tecnología: se relacionan con las exportaciones de tecnología que contribuyen al avance y desarrollo tecnológico de la organización.

Finalmente, en la **gestión del rendimiento**, los indicadores incluyen colectivamente las tres dimensiones principales, pero no miden directamente estas dimensiones.

- Indicadores de políticas y programas: los cuales miden la gestión de objetivos y políticas para la producción y fabricación sostenibles.
- Indicadores de conformidad: evalúan la capacidad de la organización para cumplir o superar las pautas generales y específicas del sector para los procesos y productos de fabricación.
- Indicadores de desempeño financiero: la cual mide a la organización con respecto a los gastos e inversiones ambientales.
- Indicadores de relaciones comunitarias: apertura de la organización para la educación comunitaria y desarrollo sostenible.

### 3.2. Estudios de Mecanizado Sostenible.

Centrándonos en la tecnología de arranque de viruta, dentro del análisis del estado del arte en sostenibilidad, en esta temática, encontramos trabajos de revisión muy importantes que realizan una compilación de los avances que se han desarrollado en los últimos años, así como trabajos que presentan aportaciones específicas en procesos de mecanizado sostenible.

Los primeros trabajos metódicos que integran las dimensiones principales corresponden a Chetan, que realiza una revisión de las técnicas sostenibles que utilizan fluidos de corte en operaciones de mecanizado, en donde se destaca aquellos que permitan erradicar efectos nocivos asociados a su uso. Técnicas como nitrógeno líquido, aceite vegetal o aire comprimido. En la Figura 3.6 se resumen las técnicas de lubricación sostenibles, que buscan fomentar su uso en el mecanizado de metales de manera que el proceso sea más rentable y que también consoliden el cuidado del medio ambiente (Chetan, Ghosh, & Venkateswara Rao, 2015).

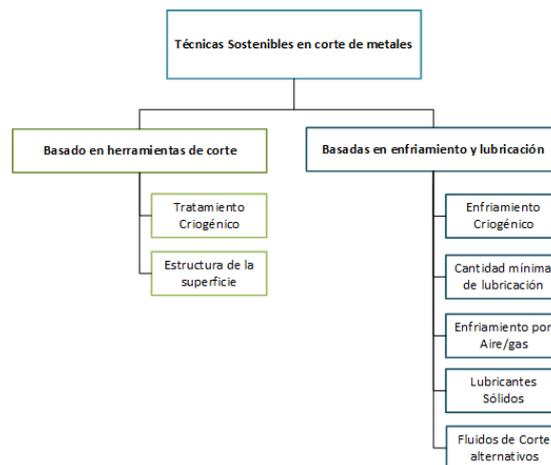


Figura 3.6. Técnicas sostenibles - Producción limpia de metales (fuente: Chetan, 2015).

Por otra parte, Gamage, revisa el estado del arte de las prácticas de mecanizado a partir del año 2000 efectuando una revisión de 120 contribuciones de las cuales el 90% fueron publicadas después del año 2000 y casi el 40% entre 2010-2013. De estas publicaciones el 70% fueron publicadas después de 2006 en donde se destaca 25 publicaciones que tratan de procesos de mecanizado sostenible no convencional, en donde el proceso de Electrodescarga (“*EDM Electrodischarge*”) tiene 50% de participación, laser 31% y Maquinado electromecánico (“*ECM Electrochemical Machining*”) 10%, lo que indica un creciente interés de los grupos de investigación, en estudios de sostenibilidad en procesos de mecanizado no convencionales (Gamage & DeSilva, 2015).

Goindi revisa los principales aspectos del mecanizado en seco enfocándose principalmente en tres temáticas: a) identifica las áreas donde el mecanizado en seco ha sido exitoso y donde no es posible utilizarlo, b) realiza una revisión bibliográfica del estado del arte entre los años 2000 - 2015, en especial de los últimos 5 años, c) en encontrar la brecha entre los conocimientos actuales y sugerir algunas direcciones para trabajos futuros para hacer del mecanizado en seco lo más sostenible (Goindi & Sarkar, 2017).

Peralta et al, realiza una revisión entre los años 2000-2015, de los procesos de mecanizado sostenible, y permite tener una visión mucho más actual de cómo se los analiza. En la Figura 3.7 se resume las principales líneas de investigación en diferentes áreas de conocimiento, en un sistema de mecanizado de triple perspectiva para la máquina herramienta, el trabajador, la tarea y el proceso, así como las métricas e indicadores de la ingeniería de fabricación sostenible (*SME Sustainable Manufacturing Engineering*) en sus actividades de modelamiento, simulación, optimización (Peralta, Marcos, & Aguayo, 2017)

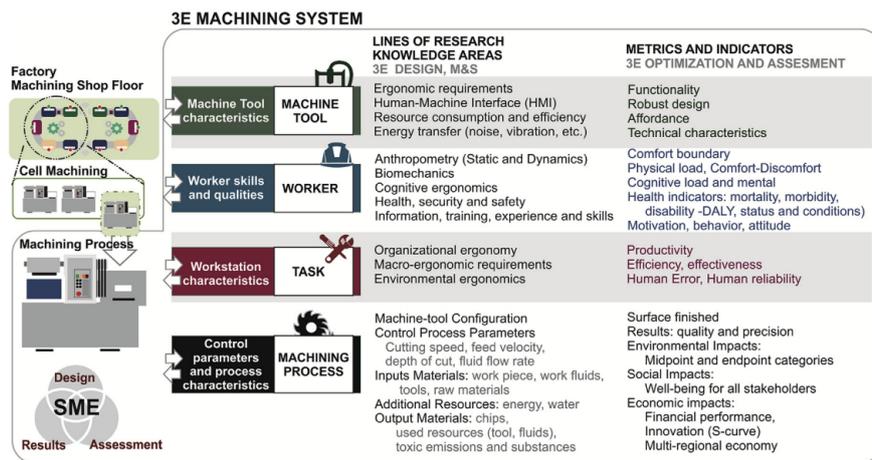


Figura 3.7. Principales aspectos para mejorar y desarrollar: Mecanizado Sostenible (fuente: Peralta, 2017)

Rajurkar, realiza una revisión de los procesos de mecanizado no tradicionales bajo consideraciones de sostenibilidad del maquinado electroquímico y por electrodescarga (Rajurkar, Hadidi, Pariti, & Reddy, 2017).

El consumo de energía de los procesos también es analizada y la generación de modelos predictivos son de vital interés, como los presenta en la revisión de Zhao (Zhao, Liu, He, Cao, & Guo, 2017).

La Tabla 3.1 resume los aportes mencionados de las revisiones de maquinado sostenible:

Tabla 3.1. Revisiones de Maquinado Sostenible (fuente: elaboración propia).

Autores	Estudio	Discusión
Chetan 2015	Realiza una revisión de técnicas Sostenibles en corte de metales para mejorar la maquinabilidad.	Las técnicas de mecanizado sostenibles utilizan cantidad mínima de fluido de corte nitrógeno líquido, aceite vegetal o aire comprimido como lubricante y enfriamiento.
Gamage 2015	Revisión bibliográfica de la evaluación de prácticas de mecanizado convencional y no convencional de 1984-2014.	Se realiza una revisión de 120 publicaciones de las cuales 25 abordan la evaluación de mecanizado no convencional, de las cuales el 70% se publican después de 2006.
Goindi 2017	Revisión de los aspectos del mecanizado en seco, incluyendo los aspectos de sostenibilidad.	Realiza una revisión del estado del arte del mecanizado en seco del 2000- 2015.
Peralta 2017	Realiza una revisión de las tendencias de la sostenibilidad en el ciclo de vida de 2000-2015 de los procesos de mecanizado.	Propuesta de un Marco unificado a partir de triple resultado, el cual se define como la base de las tres dimensiones de sostenibilidad: económica, ambiental y social.
Rajurkar 2017	Revisa trabajos de sostenibilidad en procesos de mecanizado no tradicionales: mecanizado electromecánico y maquinado por electro descarga.	Aborda en su estudio, la integridad superficial, la detección y el control de los problemas de sostenibilidad a escala macro, micro y nano.
Zhao 2017	Métodos predictivos de consumo de energía.	Estrategias de reducción clasificación y predicción de consumo energético a niveles de máquina, husillo o proceso.

De estas revisiones del estado del arte, también recopilaremos aportes específicos y puntuales que se han perfeccionado en los últimos años y se resumen a continuación.

El enfriamiento y la lubricación es revisada por Pusavec, en su estudio examina el proceso de torneado del Inconel 718 y analiza su comportamiento bajo cuatro alternativas (Pusavec et al., 2014).

Gamage, estudia la optimización del consumo de energía en el de proceso de mecanizado por electrodescarga del Inconel 718 y el Ti64al4V, en donde cuatro parámetros generales: material y espesor de la pieza de trabajo, material y diámetro del alambre, así como cuatro parámetros de descarga: voltaje de separación, la intensidad de corriente máxima, el tiempo de encendido y el tiempo de apagado. Utilizó el diseño de experimentos de Taguchi y el análisis de varianza ANOVA para el análisis experimental (Gamage, DeSilva, Chantzis, & Antar, 2017).

Gupta, modela y optimiza desde la perspectiva de sostenibilidad el material aeroespacial titanio (Ti, grado 2) en el cual para el proceso de torneado determina las mejores condiciones: de avance, de velocidad y ángulo de corte, para obtener la calidad y rugosidad superficial solicitada, así como pequeñas fuerzas de corte, para un desgaste

menor de la herramienta de corte y una menor micro dureza (Gupta, Sood, Singh, & Sharma, 2017). En la Figura 3.8 se muestra el flujograma desarrollado para la investigación experimental.

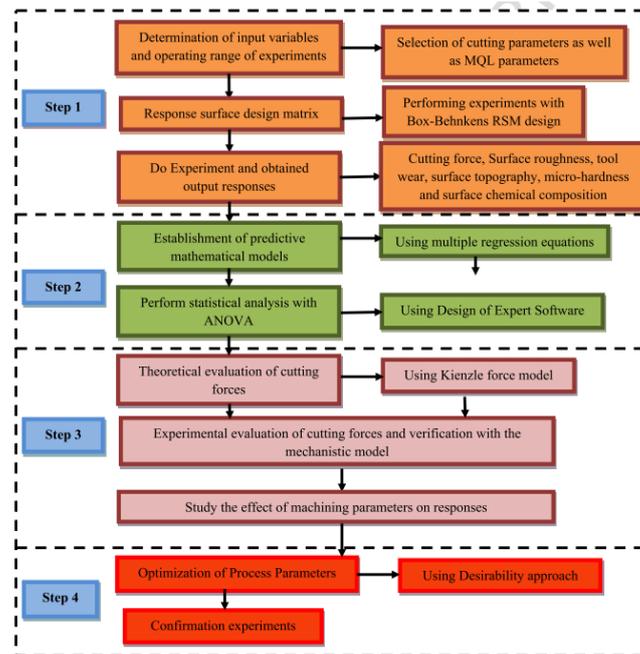


Figura 3.8. Procedimiento para Modelado y Optimización del Ti-grade 2 (fuente: Gupta, 2017).

El modelado del consumo de energía en procesos de mecanizado proporciona criterios para su optimización considerando los parámetros de corte como lo presenta Shin (Shin, Woo, & Rachuri, 2017).

Hegab, presenta un modelo de evaluación general del proceso de mecanizado, con su algoritmo el cual es desarrollado y discutido. Incluye las cuatro fases presentes en el ciclo de vida (pre-fabricación, fabricación, uso y post-uso), así como un modelo de evaluación de indicadores. En la Figura 3.9 se presenta la guía de mecanizado sostenible propuesta y define 5 grandes métricas: a) Consumo de energía, b) Costes de mecanizado, c) Manejo de desechos, d) Impacto Ambiental y e) Salud y seguridad del personal. En cada una de estas métricas propone indicadores que permitirán evaluar la sostenibilidad (Hegab, Darras, & Kishawy, 2018).

Resumimos las investigaciones antes mencionadas en la Tabla 3.2, en donde se resalta el tema de sostenibilidad considerando diferentes procesos y condiciones. Cabe indicar que en muchos de los casos se ensayan condiciones de mecanizado para lograr cumplir con los requerimientos del producto.

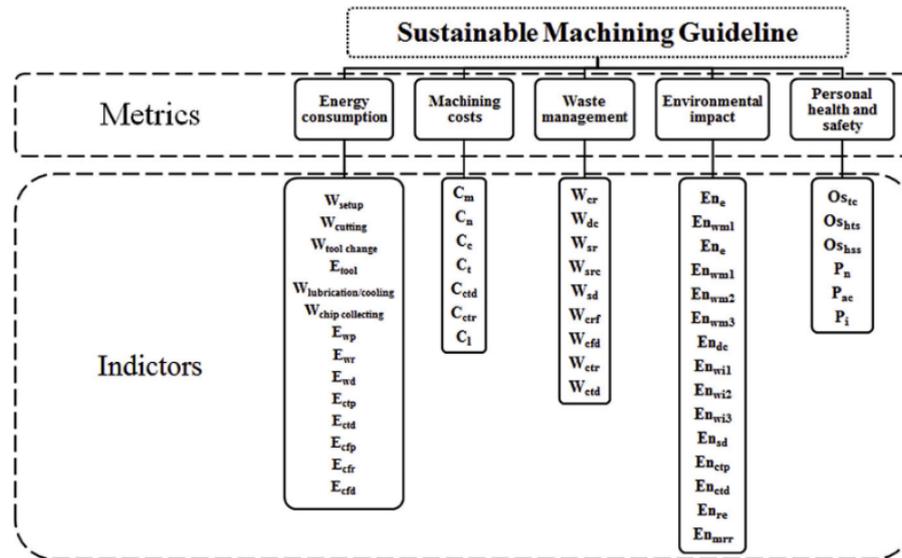


Figura 3.9. Guía de Mecanizado Sostenible (fuente: Hegab, 2018).

Tabla 3.2. Investigaciones en Procesos de Maquinado Sostenible. (fuente: elaboración propia).

Autores	Proceso y Material	Estudio	Discusión
Pusavec 2014	Torneado Inconel 718	Prueba cuatro alternativas diferentes de mecanizado (Seco, Casi seco, Criogénico y Crio + lubricación).	El enfriamiento/ lubricación tiene influencia en el rendimiento del mecanizado.
Gamage 2017	Electrodescarga Inconel 718	Optimización de la energía del proceso de mecanizado por electrodescarga.	Identifica los parámetros para optimizar el consumo de energía y la calidad superficial.
Gupta 2017	Torneado Ti (Grado 2)	Comparación entre una investigación empírica y experimental aplicando la técnica de MQL.	Analiza el impacto en las fuerzas de corte, rugosidad superficial, desgaste de herramienta, topografía superficial, micro dureza y composición química superficial.
Shin 2017	Mecanizado AISI 1018	Modelos de predicción de consumo y optimización del consumo de energía.	Presenta una metodología de modelado en tiempo real del consumo de energía y busca parámetros de corte que lo minimicen.
Hegab 2018	Torneado: I:AA7075-15wt% II:AISI 1045 III:PEEK-CF-30	Presenta un algoritmo de evaluación de sostenibilidad considerando las variables a optimizar.	I: Energía, tiempo de vida de la herramienta. II y III: Energía y rugosidad superficial.

Otros trabajos que también son importantes en el campo de sostenibilidad y que aportan temáticas específicas son los que se resumen a continuación:

Bhanot et al., realizan un análisis de la interacción de los parámetros de mecanizado usando la teoría de Gráfos, con los indicadores en las dimensiones económica, ambiental y social. Su investigación relaciona en la dimensión económica principalmente los indicadores de costes de producción, calidad del mecanizado, régimen de producción y gestión de proceso. En la dimensión ambiental analizan: consumos de energía, refrigerante, materiales, la gestión de virutas y residuos y así como las regulaciones ambientales. En la dimensión social analizan: salud de los colaboradores “trabajadores”, clima profesional, entrenamiento y formación, entre otros. Concluyen que es esencial para una fabricación más competitiva, la optimización de parámetros de producción como: coste de producción, calidad de corte, problemas ambientales, problemas de salud de los colaboradores. También recomiendan que es necesario realizar este análisis debido a la naturaleza compleja de los procesos de fabricación y a varios efectos interrelacionados de los diferentes parámetros (Bhanot, Rao, & Deshmukh, 2015).

Peralta et al., continúan con el desarrollo de un modelo de fabricación basado en paradigmas fractales, para gestionar y estructurar los procesos de fabricación, incluida la sostenibilidad que incorpora nuevos paradigmas como fabricación verde y producción más limpia. En la Figura 3.10 se presenta una breve descripción de los principios del modelo. Principio de organización fractal (I) establece los requerimientos para organizar todos los procedimientos como procesos fractales deterministas para adaptarse a la dinámica caótica del mercado. Principio de organización (II) derivado de la variedad fractal. Principio de “fractalización” (III) del ciclo de vida de producto sostenible. Principio de los niveles fractales (IV) de fabricación sostenible (Peralta, Marcos, Aguayo, Lama, & Córdoba, 2015)

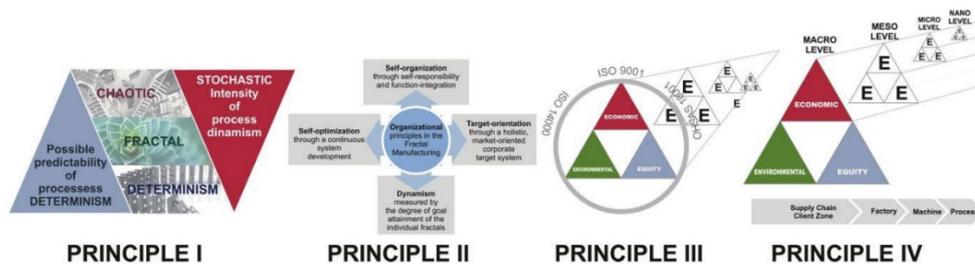


Figura 3.10. Principios de Fabricación Sostenible Fractal (fuente: Peralta, 2015).

Wang realiza una propuesta para la planificación y gestión sostenible de procesos en talleres de mecanizado, donde las actividades de fabricación se caracterizan por una gran variedad y bajo volumen. Presenta un enfoque innovador y sistémico para la planificación y optimización de los parámetros de proceso como: velocidad de corte y de giro, así como la profundidad de corte, las cuales son usadas para determinar el

consumo de energía, la rugosidad superficial y la tasa de eliminación de material. Utiliza la teoría relacional de grises para el proceso de optimización (Wang, Lu, Li, & Li, 2015).

Zhang plantea una estructura basada en escenarios, en el cual, el marco conceptual presenta como resolver el problema de optimización de mecanizado (Zhang, Owodunni, & Gao, 2015). Es especialmente adecuado para resolver problemas de objetivos múltiples y facilita un método genérico para abordar los problemas y lograr un mecanizado sostenible. La Figura 3.11 muestra la estructura propuesta.

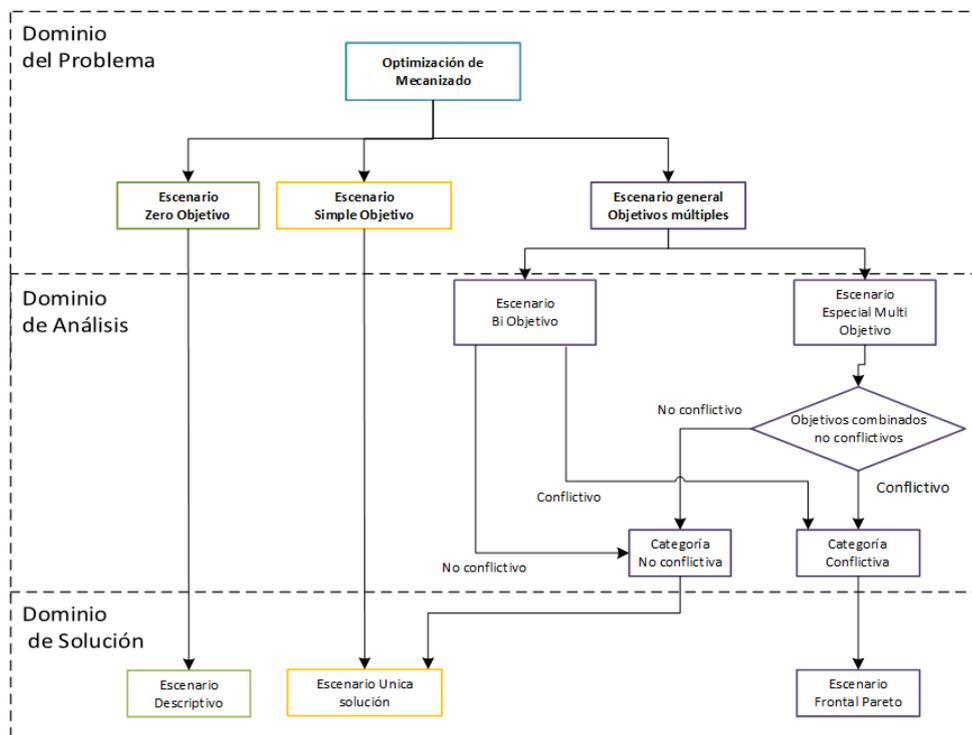


Figura 3.11. Escenarios para optimización del maquinado (fuente: Zhang, 2015).

Benedicto realiza un análisis del uso de los fluidos de corte y las principales alternativas de mecanizado, considerando la perspectiva: económica, ambiental y técnica. Presenta la Figura 3.12 en donde se realiza un estudio comparativo de 8 diferentes sistemas de lubricación/enfriamiento. Los valores de coste y sostenibilidad son una estimación representativa del estudio. En la figura antes mencionada, el diámetro de las esferas representa el potencial industrial usado dependiendo de la factibilidad técnica (Benedicto, Carou, & Rubio, 2017).

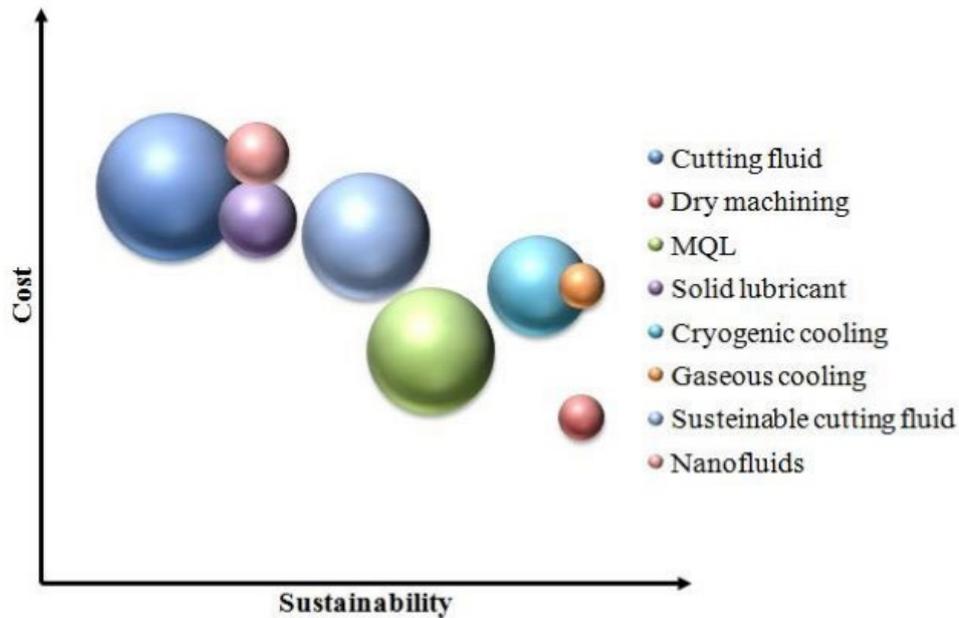


Figura 3.12. Sistemas de Lubricación en mecanizado (fuente: Benedicto, 2017).

Uhlmann aplica en el proceso de fresado el incrementador de velocidad del husillo como una manera de actualizar las máquinas herramientas para procesos de mecanizado sostenible y realiza un estudio en materiales como acero y aluminio, calculando en ellos las tasas de eliminación de material al comparar el uso de tres tipos de amarres: a) mecánico, b) impulsado por aire y c) refrigerado. Estos permiten incrementar la tasa de eliminación de material y de esa manera ahorrar tiempo de máquina (Uhlmann, Thom, & Ehrlicke, 2017).

Zhao realiza una clasificación del consumo de energía basada en las etapas de la fabricación a diferentes niveles; nivel máquina, nivel de giro, nivel de proceso. Presenta estrategias para la reducción del consumo de energía (Zhao et al., 2017).

Los estudios sobre indicadores sostenibles en los procesos de arranque de viruta son amplios y las propuestas antes mencionadas nos dan una mejor perspectiva de la importancia de la temática y del estado del arte. En la Tabla 3.3 se las comenta, se resalta los estudios y se explica las propuestas.

Tabla 3.3. Revisiones Bibliográficas de Maquinado Sostenible (fuente: elaboración propia).

<b>Autores</b>	<b>Estudio</b>	<b>Comentario</b>
Bhanot 2015	Interacción de los parámetros de mecanizado utilizando la teoría de gráficos Grafos.	Presenta un sistema de red de parámetros mediante la aplicación de análisis de modularidad basado en gráficos.
Peralta 2015	Propone un nuevo enfoque para la sostenibilidad en los procesos de mecanizado mediante la fabricación fractal sostenible desarrollando un modelo de fabricación.	Para gestionar y estructurar los procesos de fabricación, incorpora los criterios de Fabricación ecológica y Producción más limpia.
Wang 2015	Propone un enfoque sistemático de la planificación de los procesos y la optimización de la programación de las actividades de mecanizado sostenible.	En talleres de fabricación la gran variedad y bajo volumen, hace que la planificación de procesos requiera ser analizada.
Zhang 2015	Presenta escenarios de optimización parámetros de proceso de múltiples objetivos para maquinado sostenible. Caracteriza 128 escenarios.	Consideran 7 objetivos: energía, coste, tiempo, potencia, fuerza de corte y acabado superficial.
Benedicto 2017	Realiza una revisión de los sistemas de lubricación/enfriamiento, considerando la perspectiva técnica, económica y ambiental.	Compara 8 técnicas de lubricación / enfriamiento que pueden ser más eficientes.
Uhlmann 2017	Para el fresado de aluminio y acero realiza una revisión bibliográfica de como la aplicación del incrementador de velocidad del husillo mejora las condiciones de sostenibilidad.	Compara el efecto de tres tipos de amarre diferentes y como la tasa de eliminación de material puede ser mejorada al trabajar con diferentes diámetros de herramienta.
Zhao 2017	Realiza una revisión del consumo de energía en mecanizado, su clasificación, predicción y estrategias de reducción.	Plantea un modelo predictivo de consumo de energía en un sistema de mecanizado.

Siguiendo con trabajos de sostenibilidad en técnicas de torneado, Pusavec presenta una segunda parte de su trabajo sobre mecanizado sostenible del material Inconel 718 para el cual evalúa en cuatro condiciones de lubricación sostenible el modelo de rotura de viruta, en el que se determina los parámetros o condiciones más óptimos que permitan disminuir entre otros efectos la tasa de desgaste de herramienta y prolongar la vida útil, mejorando la calidad de la superficie maquinada, disminuir los componentes de la fuerza de corte, mejorando la eficiencia energética del proceso y la rotura de la viruta con los parámetros que permitan incrementar la rentabilidad del proceso y su productividad (Pusavec et al., 2015).

Dambhare realiza una investigación sobre el mecanizado en el proceso de torneado del material AISI1040 en la Industria India. Considera parámetros como la rugosidad de la superficie, tasa de eliminación de material y consumo de energía como factores de sostenibilidad y los optimiza desde el criterio del consumo energético para lo cual

considera los parámetros de proceso y su efecto, así como el entorno de mecanizado y el tipo de herramienta. Se utilizaron 3 tipos de herramientas que son las más usadas en la industria y que fueron seleccionadas para este estudio. La experimentación se desarrolló utilizando un diseño de experimentos de 3 niveles y un arreglo ortogonal L<sub>27</sub>. Utiliza la “Metodología de la superficie de respuesta (RSM)” y el “Análisis de varianza (ANOVA)” para obtener los resultados, los cuales ayudaron a comprender el efecto de los parámetros de corte en el acabado de la superficie (Dambhare, Deshmukh, Borade, Digalwar, & Phate, 2015).

Lu realiza una evaluación de métricas de sostenibilidad en el proceso de torneado criogénico del material AZ31B utilizando el *ProcSI* “*Process Sustainability Index*” en donde la composición del coste de fabricación y el consumo de energía son discutidos. En general se concluye que las condiciones donde la velocidad de corte es alta da los mejores resultados globales de sostenibilidad (Lu & Jawahir, 2015).

En este trabajo se menciona la publicación de Feng, en donde se representa las prominentes metodologías de evaluación de sostenibilidad y su relación con la unidad de dominio en la que se aplique, versus el nivel de detalle técnico que se requiere. En la Figura 3.13 se las detalla.

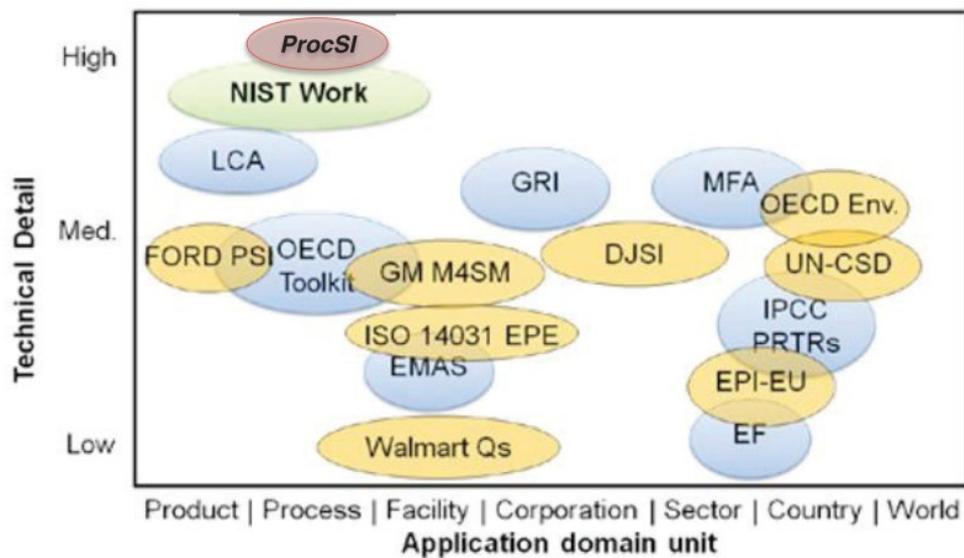


Figura 3.13. Tendencias de metodologías de evaluación de sostenibilidad (fuente: Lu, 2015 adaptado de Feng).

Jawahir realiza un análisis del maquinado criogénico al utilizar materiales de implantes biomédicos para mejorar su rendimiento funcional, vida y sustentabilidad a nivel de la integridad superficial y también subsuperficial. Realiza comparaciones de los

resultados experimentales con simulaciones analíticas, en donde se muestra un tremendo potencial para componentes biomédicos (Jawahir, Puleo, & Schoop, 2016).

Bhanot presenta un marco de evaluación de la sostenibilidad para el proceso de torneado del material AISI 4140 en tres condiciones operativas de la industria:

- a) Condiciones húmedas.
- b) Condiciones secas.
- c) En el valor óptimo sugerido.

Lo cual permite determinar sus diferencias teniendo que, en el escenario de maquinado con lubricación se inclina hacia la perspectiva económica antes que, a la medioambiental, en el segundo escenario, las condiciones óptimas en seco sugeridas por las especificaciones ayudan a minimizar el impacto negativo del proceso en el medioambiente, teniendo una diferencia mínima del coste de producción en ambos escenarios. El índice de Sostenibilidad social es muy bajo y necesita el apoyo estratégico de la organización para mejorar (Bhanot, Rao, & Deshmukh, 2016a).

Gunda presenta un estudio sobre el uso de lubricante a alta presión y mínima cantidad de lubricación sólida en el proceso de torneado del STAVAX EXR en el cual analiza el desgaste de flanco en los ambientes:

- a) Seco.
- b) Húmedo.
- c) Mínima cantidad de lubricación.
- d) Mínima cantidad de lubricación sólida a alta presión.

En su estudio realiza una comparación y determina que la alternativa de alta presión lubricación sólida es una de las alternativas prometedoras dentro de las ensayadas (Gunda, Reddy, & Kishawy, 2016)

Kadam evalúa la sostenibilidad del Inconel 718 en el proceso de torneado a alta velocidad, así como la integridad superficial, donde dependiendo de la tasa de eliminación de material que se esté aplicando, se encuentra las mejores condiciones de la superficie mecanizada, también se realiza un análisis de esfuerzos residuales en tres ambientes:

- a) Ambientes secos.
- b) Con flujo de refrigerante.
- c) Con vapor de agua.

En su estudio, presenta una evaluación de sustentabilidad y determina en cuales condiciones la lubricación por vapor de agua es satisfactoria, y también determina el ambiente donde la integridad superficial tiene mejores condiciones (Kadam & Pawade, 2017).

Para concluir este apartado, se presenta la Tabla 3.4 que resume las investigaciones específicas de mecanizado sostenible, para el proceso de torneado.

Tabla 3.4. Estudios de Mecanizado Sostenible-Torneado (fuente: elaboración propia).

<b>Autores</b>	<b>Proceso y Material</b>	<b>Estudio</b>
Pusavec 2015 Parte 2	Torneado Nickel alloy- Inconel 718	Presenta un modelo para la rotura de la viruta complementario al mostrado en un estudio previo. Se evalúan cuatro alternativas de lubricación para mecanizado sostenible convencional: seco, casi seco MQL, criogénico y criogénico casi seco.
Dambhare 2015	Torneado AISI 1040 (EN-8)	Realiza un estudio sobre el torneado sostenible en una empresa de mecanizado de la India y optimiza el consumo de energía. Calcula y valida experimentalmente el comportamiento de la rugosidad superficial y la tasa de eliminación de material mediante experimentos.
Lu 2015	Torneado AZ31B	Presenta un método de evaluación de sostenibilidad para procesos de fabricación, centrándose en mecanizado criogénico, e involucra el índice de sostenibilidad del proceso ProcSI.
Jawahir 2016	AZ31B	Realiza el análisis del mecanizado con enfriamiento criogénico de biomateriales que se utilizan como metales biocompatibles usados en implantes biomédicos. El estudio se centra en los hallazgos sobre la producción de superficies en ingeniería para lograr mejores características a nivel de la superficie y sub-superficie.
Bhanot 2016	Torneado AISI 4140	Presenta un marco de evaluación de la sostenibilidad para el proceso de torneado, en donde se evalúa las 3 dimensiones. Evalúa mediante su propuesta los indicadores de la dimensión económica y ambiental.
Gunda 2016	Torneado STAVAX ESR	Evalúa y compara el efecto del desgaste de la herramienta y su efecto en la rugosidad superficial, en cuatro condiciones de lubricación: seco, mojado, MQL (mínima cantidad de lubricación) y HP-MQSL (mezcla de lubricante a alta presión con una mínima cantidad de lubricante sólido).
Kadam 2017	Torneado Inconel 718	Realiza la evaluación de sostenibilidad de la integridad superficial en maquinado de alta velocidad en tres condiciones de lubricación: seca, refrigerante inundado y vapor de agua.

**3.2.1. Estructura de Indicadores de sostenibilidad.**

En los diferentes marcos de referencia que se han desarrollado, existen propuestas de indicadores como la realizada por Dornfeld que permiten evaluar la sostenibilidad del proceso; desde niveles macro hasta el nivel de taller, en donde se enmarcan las dimensiones económicas, ambientales y sociales (Dornfeld, 2013). En la Figura 3.14 se muestra los aspectos y dimensiones desde los niveles globales a los niveles de métricas e indicadores de proceso.

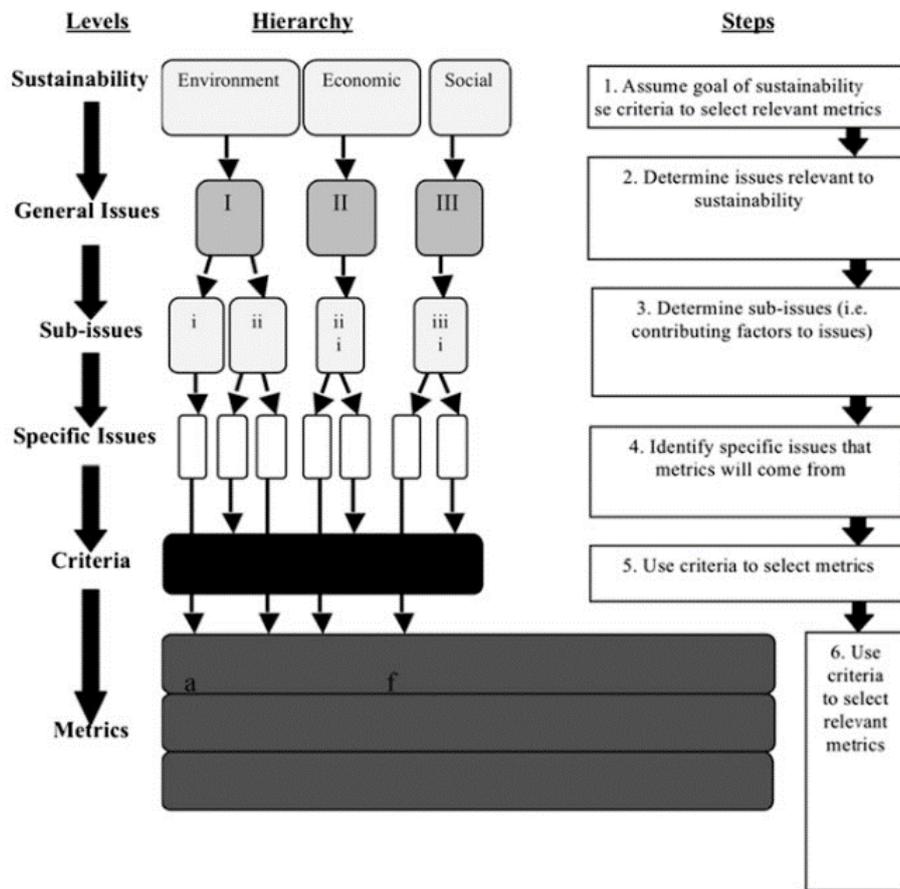


Figura 3.14. Esquema de los pasos para selección de indicadores (fuente: Dornfeld, 2013, p.76).

El esquema presentado es de utilidad en la presente propuesta ya que nos permite enfocarnos a nivel de taller, como está definido en el alcance de este trabajo. En los siguientes apartados resumiremos las recomendaciones para los indicadores propuestos en las tres dimensiones principales.

### 3.2.2. Indicadores de Mecanizado en la Dimensión Económica.

De la revisión del estado del arte, describiremos en este apartado los indicadores propuestos por Bhanot, y las recomendaciones en cada una de las dimensiones de sostenibilidad (Bhanot et al., 2016a). En la dimensión económica, para el caso del torneado, los denominaremos con las siglas EC, los cuales pueden contener indicadores de menor nivel que requieran ser calculados y que se presentan a continuación (ver Tabla 3.5).

Tabla 3.5. Indicadores (Torneado) - Dimensión Económica (fuente: elaboración propia adaptado de propuesta de Bhanot).

Indicador	Siglas	Unidad	Formula y Detalle
EC-01 Tasa de Eliminación de Material	$TEM$	$\frac{m^3}{s}$	$TEM = \frac{v \times f \times d}{60}$ Es el producto de la velocidad de corte ( $v$ ), avance ( $f$ ) y la profundidad de corte ( $d$ ). (Walsh & Cormier, 2006)
EC-02 Tiempo de vida Herramienta por filo	$\frac{T.V.}{filo}$	$min$	Se determina experimentalmente el tiempo, hasta que el inserto alcanza el criterio de desgaste de flanco, que se considera de 300 $\mu m$ , tomando mediciones con el microscopio después de cada 3 -4 pasos
EC-03 Tasa de producción por filo	$\frac{T.P.}{filo}$	$\frac{unidad}{min. filo}$	$\frac{T.P.}{filo} = \frac{\frac{T.V.}{filo}}{\frac{Tiempo de corte}{unidad}}$ Número de unidades, por filo de corte del inserto hasta su desgaste completo
EC-04 Rugosidad superficial	$R_a$	$\mu m$	Se examina la integridad de la superficie mecanizada y se determinada usando el rugosímetro.
EC-05 Costes de producción por unidad	$\frac{C.P.}{unidad}$	€ ; £ ; \$	Considera: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Costes laborales (implica el tiempo de la manipulación de piezas, maquinado, energía ociosa, tiempo de inactividad);</li> <li>• Costes de herramienta;</li> <li>• Costes de energía (de corte, básica, ociosa, de tiempo de inactividad);</li> <li>• Costes de preparación del refrigerante y de su eliminación;</li> <li>• Costes de planificación para lote completo.</li> <li>• Costes de materia prima.</li> <li>• Costes de programación CNC y problemas relacionados con el refrigerante se recomienda calcular en un período de seis meses según el refrigerante</li> </ul>

### 3.2.3. Indicadores de Mecanizado en la Dimensión Ambiental.

Para el análisis de la dimensión ambiental, se resumen los indicadores propuestos por Bhanot que se muestran en la Tabla 3.6. Para identificarlos de mejor manera utilizaremos las siglas AM.

Tabla 3.6. Indicadores (Torneado) - Dimensión Ambiental (fuente: elaboración propia adaptado de propuesta de Bhanot).

Indicador	Siglas	Unidades	Formula y Detalle
$C.E. = E_c + E_b + E_{ti} + E_o$			
AM-01 Consumo de Energía	C.E.	kWh	Donde se considera valores por unidad producida: a) Energía Corte ( $E_c$ ) b) Energía Básica ( $E_b$ ) c) Energía Tiempo inactivo ( $E_t$ ) d) Energía Ociosa ( $E_o$ )
AM-02 Emisiones de Carbono	E.C	kg CO <sub>2</sub>	Li, presenta un estudio para estimar la cantidad de emisiones de carbono para los sistemas de mecanizado CNC, basado en los factores de emisión de carbono C.E. (Li, Tang, Cui, & Li, 2015) donde considera por unidad producida: $E.C = \sum E.C_i.$ a) Electricidad ( $E.C_e$ ) b) Herramienta ( $E.C_h$ ) c) Fluidos de Corte ( $E.C_{fc}$ ) d) Aceite ( $E.C_a$ ) e) Residuos de Herramienta ( $E.C_{rh}$ ) f) Materia Prima ( $E.C_{mp}$ ) g) Virutas ( $E.C_v$ )
AM-03 Consumo de Refrigerante	C.R	l	Para el estudio desarrollado por Bhanot, la relación en volumen de agua y aceite de 1:20 y se estima un tiempo de uso de seis meses antes del cambio para el refrigerante.
AM-04 Temperatura de Corte	$\Delta T$	°C	Presenta una ecuación experimental para una gran variedad de materiales (Cook, 1973) y también se la válida para el AISI4140 (Akbar, Mativenga, & Sheikh, 2007). $\Delta T = 0.4 \frac{U}{\rho C} \left( \frac{vt_o}{K} \right)^{0.333}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\Delta T</math> es el incremento de temperatura media en la interfaz herramienta-viruta en [°C]</li> <li>• <math>U</math> es energía de corte específica en <math>\left[ \frac{N-m}{mm^2} \right]</math></li> <li>• <math>\rho C</math> es el calor volumétrico específico del material en <math>\left[ \frac{J}{mm^3 \cdot ^\circ C} \right]</math></li> <li>• <math>v</math> es la velocidad de corte en <math>\left[ \frac{mm}{sec} \right]</math></li> <li>• <math>t_o</math> es el espesor antes del corte [mm] y aproximadamente es "feed x sin <math>\emptyset</math>"; Siendo <math>\emptyset</math> el ángulo principal de corte.</li> <li>• <math>K</math> es la difusividad térmica del material de trabajo en <math>\left[ \frac{mm^2}{sec} \right]</math></li> </ul>

El consumo de energía tiene los siguientes componentes que se resumen en la Tabla 3.7 y de la misma manera para las emisiones de carbono y sus componentes se los detallan a continuación (ver Tabla 3.8).

Tabla 3.7. Indicadores (Torneado) - Dimensión Ambiental: Consumo de Energía (fuente: elaboración propia adaptado de propuesta de Bhanot).

Indicador	Siglas	Unidades	Formula y Detalle
AM-01a Energía de Corte	$E_c$	$kWh$	$E_c = \frac{F_v}{60000} \times \frac{T_c}{3600}$ <p>Cantidad de energía consumida durante el proceso de corte, se calcula basándose en el Tiempo de corte (<math>T_c</math>) (s) y en las fuerzas (<math>F_v</math>) (N) generadas a través de dinamómetro</p>
AM-01b Energía Básica	$E_b$	$kWh$	$E_b = \frac{P_b \times (T_{carga+descarga+limpieza} + T_{cambio\ herramienta})}{3600}$ <p>Cantidad de energía básica <math>P_b</math> (en kW) gastada en la carga y descarga de la pieza como la limpieza intermitente de la máquina junto con el tiempo empleado en cambiar la herramienta (en segundos) (Overcash, 2009).</p>
AM-01c Energía de Tiempo Inactivo	$E_t$	$kWh$	$E_t = \frac{P_b \times (T_{inactivo})}{\# unidades\ torneadas}$ <p>Cantidad de energía gastada en las actividades fuera del proceso, <math>P_b</math> (en kW) como son la programación para el lote completo, preparación del refrigerante y limpieza del tanque. Por lo tanto, esta energía se calcula basándose en el número de unidades torneadas hasta el ciclo de reposición del refrigerante. El tiempo inactivo se considera en horas.</p>
AM-01d Energía ociosa	$E_o$	$kWh$	$E_o = \frac{(P_r + P_h + P_e) \times (T_{corte\ al\ aire})}{3600}$ <p>Se calcula cuando se toma en cuenta el tiempo de corte sin contacto de la herramienta (en segundos) durante el cual se consume la potencia en: el refrigerante (<math>P_r</math>), el husillo (<math>P_h</math>) y el eje motor (<math>P_e</math>), medidas en (kW). El tiempo de corte al aire se considera en segundos.</p>

En el estudio de Bhanot se considera el modelo propuesto por Li, para estimar las emisiones de carbono para sistemas de mecanizado CNC (Li et al., 2015).

Éste se fundamenta en los “Factores de Emisión de Carbono” (F.E.C.) como los factores de electricidad (F.E.C.<sub>e</sub>), los factores herramientas de corte (F.E.C.<sub>hc</sub>), los factores de fluidos de enfriamiento (F.E.C.<sub>fe</sub>), los factores de materiales (F.E.C.<sub>m</sub>), los factores de plaquitas o insertos (F.E.C.<sub>i</sub>) y los factores de viruta (F.E.C.<sub>v</sub>). También considera la masa del inserto  $M_i$  y la masa de la viruta  $M_v$ , así como las emisiones de Carbono del aceite y la eliminación de los líquidos residuales.

Tabla 3.8. Indicadores (Torneado) Dimensión Ambiental – Emisiones de Carbono (fuente: elaboración propia adaptado de la propuesta de Bhanot).

Indicador Emisiones de Carbono	Siglas	Unidades	Formula y Detalle
AM-02a De electricidad	$E.C._e$	$KgCO_2$	$E.C._e = (F.E.C._e) \times (E_{(c+b+i+o)})$
AM-02b De herramientas	$E.C._{hc}$	$KgCO_2$	$E.C._{hc} = \left(\frac{T_c}{T.V.}\right) \times (F.E.C._{hc}) \times (M_i)$
AM-02c De fluidos para enfriamiento	$E.C._{fe}$	$KgCO_2$	$E.C._{fe} = \frac{T_{operación}}{T_{enfriamiento}} \times (E.C._a + E.C._r)$ <p>Para el cálculo del tiempo en la operación de maquinado se considera la suma de: tiempo de corte, carga, descarga, limpieza, cambio de herramienta, corte al aire. También las emisiones de carbono del aceite y la eliminación de líquidos residuales.</p>
AM-02d De materiales en bruto	$E.C._m$	$KgCO_2$	$E.C._m = (F.E.C._m) \times (M_v)$
AM-02e De material de viruta.	$E.C._v$	$KgCO_2$	$E.C._{viruta} = (F.E.C._v) \times (M_v)$

### 3.2.4. Indicadores de Mecanizado en la Dimensión Social.

Para el análisis de la dimensión social, la propuesta de Bhanot incluye evaluar los indicadores que se resumen en la Tabla 3.9 y que consideran evaluaciones del jefe, de auditores externos y de los propios “colaboradores” trabajadores. Pueden contener indicadores de nivel inferior. Se utiliza las siglas SO para identificarlos:

Tabla 3.9. Indicadores (Torneado) Dimensión Social (fuente: elaboración propia adaptado de la propuesta de Bhanot).

Indicador	Unidad	Evaluado/ Evaluador	
SO-01 Productividad	%		
SO-02 Relaciones con los demás	%	Colaborador (Personal de Planta)	Jefe de Taller o de Sección Ingeniero de Fabricación o jefe de Planta
SO-03 Habilidades individuales	%		
SO-04 Flexibilidad de rotación de turnos	%		
SO-05 Puntualidad en el trabajo	%		
SO-06 Soporte de la alta dirección	%	Colaborador	Autoevaluación
SO-07 Satisfacción laboral	%		
SO-08 Ambiente de trabajo	%		
SO-09 Grado de apoyo	%	Colaborador	Auditor externo
SO-10 Requisitos reglamentarios	%	Colaborador	Auditor externo

### 3.2.5. Indicadores de Costes del proceso de Arranque de Viruta.

Al hablar de costes del proceso de mecanizado, tenemos que mencionar lo que es la economía del mecanizado, la cual tiene como objetivo determinar las condiciones en las que se obtiene el coste más bajo, así como también calcular el coste del proceso de mecanizado que permita obtener las especificaciones solicitadas.

Al analizar este coste se pueden tener criterios para la selección de los mejores recursos disponibles de la parte fabricada, entendiéndose como coste de máquina, coste de herramientas, coste de equipos complementarios, coste de la mano de obra requerida, etc. Se requiere para ello determinar principalmente los tiempos necesarios para realizar el proceso de producción, así como los costes por hora de los recursos utilizados, como las cantidades utilizadas en la fabricación.

En muchas empresas el análisis de estos valores permite generar indicadores como lo que se obtiene con la metodología basada en actividades “*Activity Based Cost, ABC*”. La generación de los denominados “Cost drivers” o manejadores pueden hacer que las mediciones realizadas en el proceso puedan ser expresadas en términos económicos. Por otra parte, del cálculo de costes unitarios permite también definir los valores necesarios.

También debemos tomar en cuenta que, al fabricar un elemento mecanizado, podría tratarse de una producción en serie de grandes cantidades de producto (lotes), o una producción individual (parte) como es el caso de las reparaciones o mantenimientos de piezas específicas, por lo que el tamaño del lote influirá en el coste que se calcule.

Los costes asociados al proceso de arranque de viruta se resumen a continuación (ver Tabla 3.10.). El uso de sistemas de información como las plataformas PLM también brinda soporte para el cálculo de costes, ya que permite recopilar la información.

Para la siguiente descripción que se detalla a continuación utilizaremos la letra “C”, para indicar que estamos considerando el coste “C = Coste”, y las unidades en las que puede estar expresado en euros, dólares, libras, yen, etc. (€; \$; £; ¥).

Tabla 3.10. Costes del proceso de mecanizado (fuente: elaboración propia).

Costes	Expresión	Considera:
Mecanizado	$C_{MC}$	Depende del volumen de elementos a fabricarse.
Material	$C_{MT}$	Preparación, caracterización, ensayos transporte de material y corte del material en bruto.
Herramienta	$C_{HT}$	La herramienta para utilizar o los insertos y así como los accesorios necesarios y el porta-herramientas.
Gestión de residuos	$C_{GR}$	Los residuos químicos como aire contaminado, lubricantes, agua, emisiones de gas y los residuos físicos como los desperdicios generados viruta, fluidos de corte, aguas residuales y la herramienta desgastada.
Proceso	$C_{PR}$	El aire o fluido de corte, las facilidades del proceso utilizado, la energía del proceso, el coste de la máquina herramienta utilizada y el recurso humano requerido.
Pieza Fresada	$C_{PF}$	Coste de material más coste de la herramienta, coste del proceso y el coste de la gestión de residuos (si la empresa lo tiene definido).
Limpieza final	$C_{LF}$	El coste de la limpieza una vez que ha terminado el proceso de mecanizado.
De Calidad	$C_{CC}$	El coste de los controles de calidad necesarios para garantizar los requerimientos de la pieza.
Pieza fabricada	$C_{PF}$	El coste de la pieza fabricada más el coste de los controles de calidad necesarios.

**Coste de Material  $C_{MT}$** : que considera el coste de preparación de la pieza, la caracterización de ensayos requeridos para garantizar la calidad del mecanizado y el transporte de material al sitio en donde se lo va a fabricar. Una vez que el material entra al proceso productivo (ver Ecuación 3.1).

$$C_{\text{Material}} = C_{\text{Material(Pieza)}} + C_{\text{Material(no usado)}}$$

$$C_{MT} = C_{MP} + C_{Mnu} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Dependiendo de la presentación del material, se generan desperdicios ya que se debe aproximar a la geometría de la pieza a fabricar, generando material perdido por el corte y material que puede ser reciclado para su reutilización (ver Ecuación 3.2).

$$C_{\text{Material(no usado)}} = C_{\text{Material(perdido)}} + C_{\text{Material(reciclado)}}$$

$$C_{Mnu} = C_{Mp} + C_{Mr} \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Bajo estas consideraciones el coste del material considera lo que va en la pieza, el material perdido por el corte y el material que se va a reciclar (ver Ecuación 3.3).

$$C_{\text{Material}} = C_{\text{Material(Pieza)}} + C_{\text{Material(perdido)}} + C_{\text{Material(reciclado)}}$$

$$C_{MT} = C_{MP} + C_{Mp} + C_{Mr} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

**Coste de Herramienta  $C_{HT}$ :** Considera todos los elementos accesorios que se necesitan para poder tener instalada y montada la herramienta, así como los insertos requeridos o elementos de recambio como portaherramientas que sean necesarios. (ver Ecuación 3.4).

$$C_{\text{Herramienta}} = C_{\text{Accesorios}} + C_{\text{Herramienta/Insertos}} + C_{\text{Portaherramienta}}$$

$$C_{HT} = C_A + C_{H/I} + C_P \quad \text{Ecuación 3.4}$$

**Coste de procesos de fabricación  $C_P$ :** Considera los costes de uso de máquina herramienta, la lubricación requerida, así como las facilidades necesarias. También se considera el coste que se incurre en el consumo de energía que interviene en el proceso y el recurso humano que monitorea el proceso en las diferentes fases.

**Coste de Gestión de Residuos  $C_{GR}$ :** el tratamiento de los residuos químicos y físicos que se presentan en el proceso, tales como aire contaminado, lubricantes, emulsiones, agua y emisiones de gas, así como la disposición de desperdicios (viruta, fluido de corte gastado, aguas residuales y herramientas desgastadas, entre otros).

Cabe indicar que muchas empresas empiezan campañas de concientización sobre el tratamiento de los residuos generados y del post uso de los elementos fabricados.

### 3.3. Evaluación de Indicadores en el Proceso de Arranque de Viruta.

De la revisión del estado del arte, una gran cantidad de publicaciones, han identificado la relación que hay en el proceso de mecanizado entre: el material seleccionado, la herramienta de corte que se requiera seleccionar y la máquina herramienta disponible (que por lo general es de control numérico CNC) y así definir los mejores parámetros del proceso en los cuales por medio de alguna técnica de optimización se determina el valor óptimo requerido. De las publicaciones analizadas se identifican indicadores cuantitativos e indicadores cualitativos, que se apoyan en técnicas de cálculo, de mejora y optimización, entre los que mencionamos: a) Diseño de Experimentos, b) Ciclo de Mejora Continua y c) Teoría de Análisis Relacional Gris.

#### 3.3.1. Diseño de Experimentos - Metodología Taguchi.

La metodología Taguchi permite relacionar varios factores que se requieran analizar. Para el análisis que desarrollaremos en la presente tesis doctoral, por ejemplo, detallaremos la combinación de parámetros y utilizaremos un arreglo  $L_{27}$  para combinar cuatro factores que utilizaremos en algunos de los experimentos, los cuales se muestran en la Figura 3.15 que se ha planteado para el proceso de fresado. Consideramos principalmente aquellos parámetros que se definen en el CAM y que se encuentran detallados en el archivo que contiene la información escrita en código G. Esta metodología se puede utilizar para otros procesos de mecanizado en donde se requiera ver la interacción de los factores.

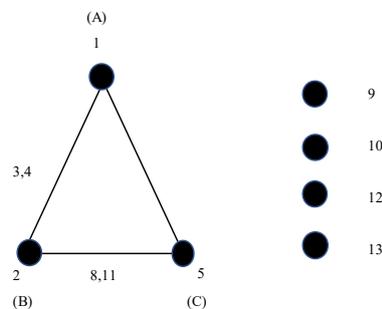


Figura 3.15. Gráfico Lineal del Arreglo Ortogonal  $L_{27}$  (fuente: Roy, 2001).

Por otra parte, en la Figura 3.16 se muestran las combinaciones de acuerdo con lo establecido con el arreglo Ortogonal  $L_{27}$  del método Taguchi. Los fabricantes de herramientas recomiendan 3 niveles para los diferentes parámetros, por lo que el valor 1 se le asignara al valor más bajo, 2 al intermedio y 3 al más alto. Los datos obtenidos pueden ser analizados por diversas técnicas estadísticas por ejemplo el ANOVA para evaluar la importancia de cada factor. Para otros factores como: la dirección de las pasadas, en el proceso de fresado, se puede plantear por ejemplo, tres posibles direcciones de avance a ser analizadas (Roy, 2001).

Experimento	Columna													
	A	B	AxB	AxB	C	AxC	AxC	BxC	D	-	BxC	-	-	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3	
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1	
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2	
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2	
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3	
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1	
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1	
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2	
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3	
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1	
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1	
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2	
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3	
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1	
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1	
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3	
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3	
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1	
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2	

Figura 3.16. Diseño de Experimentos L<sub>27</sub> (fuente: Roy, 2001).

También se dispone de fórmulas y definiciones que se aplican en el caso de los diferentes procesos de arranque de viruta. Utilizaremos el sistema métrico para expresarlas. Cada proveedor de herramientas dispone de esa información en sus catálogos: Sandvik, Mitsubishi disponen de catálogos muy explicativos para cada proceso, en donde recomienda los parámetros para su uso e información técnica de las herramientas de corte (Mitsubishi Materials, 2019)(Sandvik Coromant, 2019).

### 3.3.2. Ciclo de Mejora Continua.

La medición de indicadores requiere la elaboración de planes de medición y mejora. La metodología del ciclo PHVA o de mejora continua “Planificar - Hacer - Verificar - Actuar” permite implementar dicha mejora en los procesos y es una herramienta muy útil. En la Figura 3.17 se representa la relación de la norma ISO 9001:2005 con el ciclo PHVA (ISO 9001, 2015). Entre paréntesis se encuentran los números de capítulos de los apartados de la norma ISO 9001 que tratan cada tema a implantar.

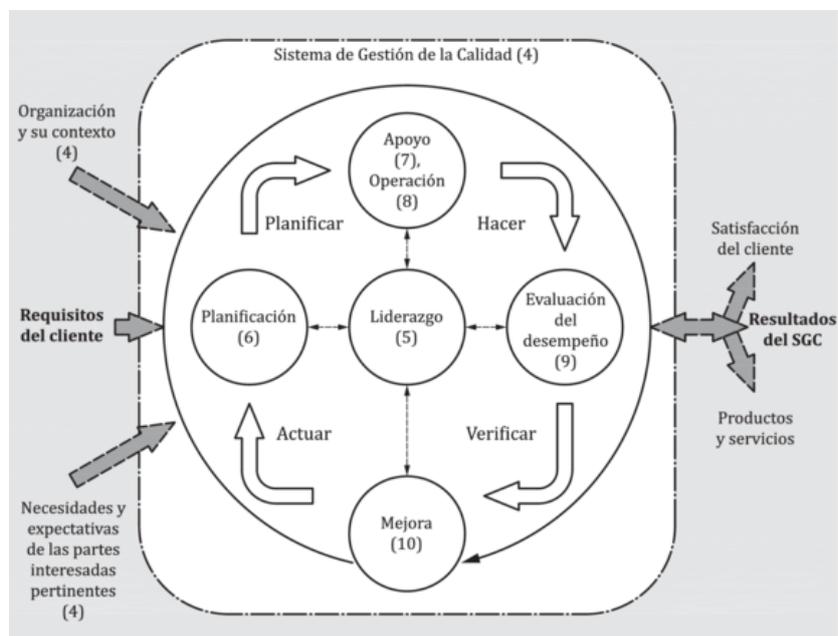


Figura 3.17. Mejora Continua: Planear – Hacer – Verificar - Actuar (fuente: ISO 9001:2015)

- **Planificar:** es importante evaluar la situación inicial, e identificar los datos y hechos con el fin de establecer las acciones a desarrollarse para alcanzar las metas planteadas. Se establecen las operaciones necesarias y se desarrolla un plan de mejora.
- **Hacer:** se realiza el trabajo y se establece el personal que tiene las competencias para hacerlo. Se debe considerar los recursos necesarios y el tiempo para desarrollar el trabajo.
- **Verificar:** se mide el desempeño y comparara las metas y objetivos planteados con los que se encontraron en la evaluación inicial. Se verifica su efectividad.
- **Actuar:** se estandariza y se establece una línea base en donde se define indicadores con los cuales se toma acciones correctivas y/o preventivas de

mejora continua. Se documenta y registra para monitorear los siguientes planes de mejora.

Cabe indicar que, en los ciclos de mejora continua, el ciclo PHVA se puede repetir las veces sean necesarios hasta lograr los resultados planificados. Pero nuevamente esos resultados pueden ser la línea base para nuevas acciones de mejoras. El objetivo es repetirlo hasta tener resuelto o cumplir la meta. En la Figura 3.18 contiene el esquema cíclico de la mejora continua (Deming, 2018)

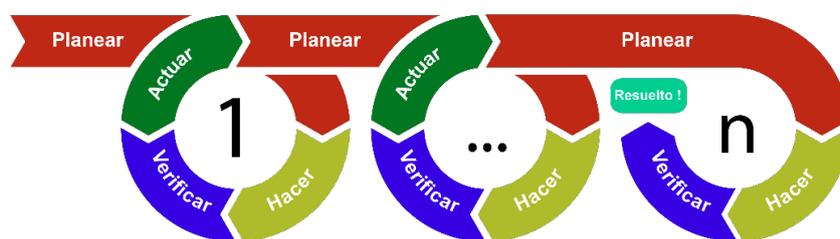


Figura 3.18. Proceso cíclico PHVA (fuente: Elaboración Propia adaptado de Deming 2018).

### 3.3.3. Análisis Relacional de Grises.

Dentro de los métodos de evaluación de indicadores en mecanizado, en diferentes investigaciones se utiliza la teoría de Grises o denominado como el Análisis Relacional Gris, (“en la literatura se lo denomina como GRA Grey Relational Analysis”) (Wang et al., 2015) (Bhanot, Rao, & Deshmukh, 2016b), y se requiere los siguientes pasos:

- **Preparación y Normalización de datos:** se los normaliza en el rango de 0 a 1, en donde el valor de 1 corresponde al criterio “el mayor valor es el mejor” en el caso del mecanizado un ejemplo puede ser el tiempo que la herramienta de corte tiene filo, y así entre otros indicadores que se analice; pero también podría tener otros criterios que apliquen que “el menor valor es el mejor” como en el caso del coste de fabricación, tiempo de mecanizado, entre otros. Para su cálculo, se debe considerar la definición de la Ecuación 3.5 para el caso de “el menor valor es mejor” o el de la Ecuación 3.6 “el mayor valor es mejor”.

$$X_{ij} = \frac{y_{ij} - \text{Min}(y_{ij}, i=1,2,\dots,m)}{\text{Max}(y_{ij}, i=1,2,\dots,m) - \text{Min}(y_{ij}, i=1,2,\dots,m)} \quad \text{Ecuación 3.5}$$

$$X_{ij} = \frac{Max(y_{ij,i=1,2,\dots,m}) - y_{ij}}{Max(y_{ij,i=1,2,\dots,m}) - Min(y_{ij,i=1,2,\dots,m})} \quad \text{Ecuación 3.6}$$

- Determinar los Grado Relacional Gris (GRG), que se calcula aplicando la definición que se detalla en la Ecuación 3.7:

$$\gamma(x_{0j}, x_{ij}) = \frac{\Delta_{min} + \zeta \Delta_{max}}{\Delta_{ij} + \zeta \Delta_{max}} \quad \text{Ecuación 3.7}$$

Para  $i = 1, 2, \dots, m$  y  $j = 1, 2, \dots, n$

Donde:

$\gamma(x_{0j}, x_{ij})$  es el coeficiente relacional gris entre  $x_{0j}$  y  $x_{ij}$

$\Delta_{min} = Min(\Delta_{ij}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$

$\zeta$  es el coeficiente distintivo y  $\zeta \in \{0, 1\}$

$\Delta_{max} = Max(\Delta_{ij}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$

$\Delta_{ij} = |x_{0i} - x_{ij}|$

- Calcular el Grado Relacional Gris (GRG) para lo cual a los coeficientes antes determinados se los pondera de acuerdo con la Ecuación 3.8.

$$\Gamma(x_0, x_i) = \sum_{j=1}^n w_j \gamma(x_{0j}, x_{ij}) \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, m \quad \text{Ecuación 3.8}$$

El cálculo puede ser procesado en un software como MATLAB, hoja electrónica con programación de macros u otros. La metodología del “Análisis Relacional Gris”, es muy amigable para usarla con varios indicadores que se requieran analizar y facilita su cálculo.

El indicador global obtenido en la bibliografía consultada se lo denomina GRG “Grey Relational Grade” o “Grado Relacional Gris”, el cual puede ser aplicado en varios niveles dependiendo la delimitación del sistema. Un tema importante aquí, y que lo analizaremos en el próximo capítulo de la tesis, es respecto a los criterios de ponderación que se deben asignar y a la versatilidad de esta metodología con indicadores cuantitativos y/o cualitativos.

### **3.4. Conclusiones**

Los criterios de sostenibilidad en fabricación se soportan en los diferentes marcos de referencia propuestos y han permitido estructurar indicadores para los procesos de mecanizado, esto se evidencia en las aportaciones e investigaciones recopiladas, ya que son amplias y diversas, coincidiendo en muchas de ellas las perspectivas de análisis tradicionales, como son las dimensiones de sostenibilidad.

Muchos de esos indicadores pueden ser medidos y calculados, aunque también se utilizan expresiones que se encuentran propuestas y demostradas, lo que se ha complementado con investigaciones permanentes del desarrollo de materiales y herramientas, las cuales han aportado ecuaciones experimentales muy importantes.

Las propuestas de indicadores en la dimensión económica nos permiten observar que el sistema de costes de la empresa y de la organización, debe proveer información a detalle que permita calcular los costes unitarios del proceso, una metodología muy útil es el Costeo basado en actividades “ABC”.

De las propuestas de indicadores en la dimensión ambiental, son de mucho interés las que identifican los recursos que se utilizan y las emisiones al ambiente que generan, aquí se plantean varios estudios que permiten expresarlos en términos de la cantidad de Kg de CO<sub>2</sub> que se envía al ambiente.

Las aportaciones de indicadores de la dimensión social permiten evaluar, en el contexto del proceso productivo, a los colaboradores, lo cual debe tomarse en consideración para los procesos de mejora continua.

Al hablar de indicadores de proceso, generalmente se asocia la idea de los sistemas de gestión que deben estar ayudando al desarrollo de las actividades, ya que muchos de ellos pueden tener metas comunes.

Para la evaluación de indicadores se propone diversas metodologías, que evalúen indicadores cuantitativos y cualitativos, de entre las cuales acorde con la literatura revisada, el “Análisis Relacional Gris”, permite su cálculo de forma sencilla y amigable.

Todos estos criterios nos permiten en el capítulo siguiente proponer un marco conceptual y ver el aporte de los entornos colaborativos que se detallarán a continuación.

# Capítulo 4

---

—

# Capítulo 4

# Modelo de Mecanizado Sostenible en Entornos Colaborativos

## 4.1. Introducción

Las aportaciones recientes de investigaciones en el ámbito de la fabricación sostenible y, específicamente, en las tecnologías de mecanizado, brindan nuevas posibilidades de mejora e innovación en el ámbito industrial. Estos temas han sido investigados en los últimos años teniendo como objetivo optimizar los recursos utilizados en el proceso productivo y cuidar el medio ambiente. Además, las tecnologías de información, así como la conectividad hace cada vez más rápida la comunicación y la toma de decisiones a nivel industrial y empresarial.

La “Industria 4.0” es una clara tendencia de hacia dónde tienen que evolucionar los sistemas de fabricación para ser competitivos. El concepto de sostenibilidad cada vez se encuentra más implementado y difundido en las fases del ciclo de vida de lo que se fabrica, proporcionando un flujo de información que permite calcular indicadores de proceso consiguiendo por lo tanto facilitar la fabricación. La revisión del estado del arte realizada en los capítulos anteriores, a nivel global en fabricación y específico de las tecnologías de mecanizado, nos ha permitido identificar la necesidad de un modelo personalizado de fabricación sostenible para procesos de arranque de viruta. Esta propuesta se desarrolla partiendo de un marco genérico de fabricación sostenible en entornos colaborativos, con la que elaboramos el modelo específico aplicado al proceso de mecanizado por arranque de viruta. Para ello se ha seguido un procedimiento

metodológico en cuanto a la realización de la propuesta. Tras el análisis de los trabajos previos en cuanto a sostenibilidad, se han establecido una serie de etapas para la elaboración de la disertación. En concreto, el procedimiento establecido considera 10 etapas que permitan elaborar la propuesta y la cual es el resultado de las reflexiones realizadas en las diferentes etapas (Figura 4.1).

- **Etapa 1: Análisis del desarrollo sostenible y estudio de ciclo de vida:**  
Se recopila las aportaciones en el campo del desarrollo sostenible, tendencias y definiciones que permiten explicar la necesidad de la implementación de los objetivos del desarrollo sostenible.
- **Etapa 2: Sostenibilidad en procesos de industriales y de arranque de viruta**  
Se realiza la revisión bibliografía de las investigaciones y marcos de referencia que permiten evaluar la sostenibilidad y sus implicaciones a nivel industrial y en el campo del mecanizado en procesos de arranque viruta.
- **Etapa 3: Análisis de entornos colaborativos en procesos de fabricación.**  
Se analiza los sistemas asistidos por ordenador, así como las herramientas CAD/CAM/CAE que permiten trabajar colaborativamente durante el ciclo de vida de la parte o pieza fabricada.
- **Etapa 4: Propuesta del modelo genérico de fabricación sostenible en procesos industriales.** Se define un modelo genérico que permita relacionar los criterios de sostenibilidad a nivel industrial. A partir de este modelo, el análisis de los procesos específicos permitirá generar modelos para cada proceso.
- **Etapa 5: Propuesta de indicadores de sostenibilidad en un proceso industrial.**  
Al relacionar las entradas, salidas, recursos, se podrán definir controles o indicadores que permitirán evaluar el proceso.
- **Etapa 6: Propuesta del modelo específico de fabricación sostenible en procesos de mecanizado con arranque de viruta.** Se presenta la propuesta del modelo aplicado y se detalla cada una de sus definiciones.
- **Etapa 7: Propuesta de indicadores de sostenibilidad en Mecanizado.**  
Se presenta las definiciones y conceptos de los indicadores que permitan evaluar el proceso de mecanizado
- **Etapa 8: Enfoque de sostenibilidad en el mecanizado/ ciclo de vida /dimensiones y diseño de experimentos.** Se elaboran experimentos que permitan evaluar la sostenibilidad en el proceso de mecanizado, así como los conceptos de ciclo de vida que permitan generar criterios e indicadores en situaciones reales a nivel de taller. Esta etapa se tratará a profundidad en el capítulo 5, en donde se describe la metodología experimental utilizada.
- **Etapa 9: Evaluación de los experimentos.** Se analiza los resultados obtenidos y se encuentra nuevas aportaciones y criterios para mejorar las definiciones del modelo y los indicadores propuestos con casos reales.
- **Etapa 10: Conclusiones del modelo planteado y trabajos futuros.**  
Se plantean las conclusiones a nivel de cada experimento realizado y a nivel global, así como las recomendaciones de trabajos futuros de investigaciones.

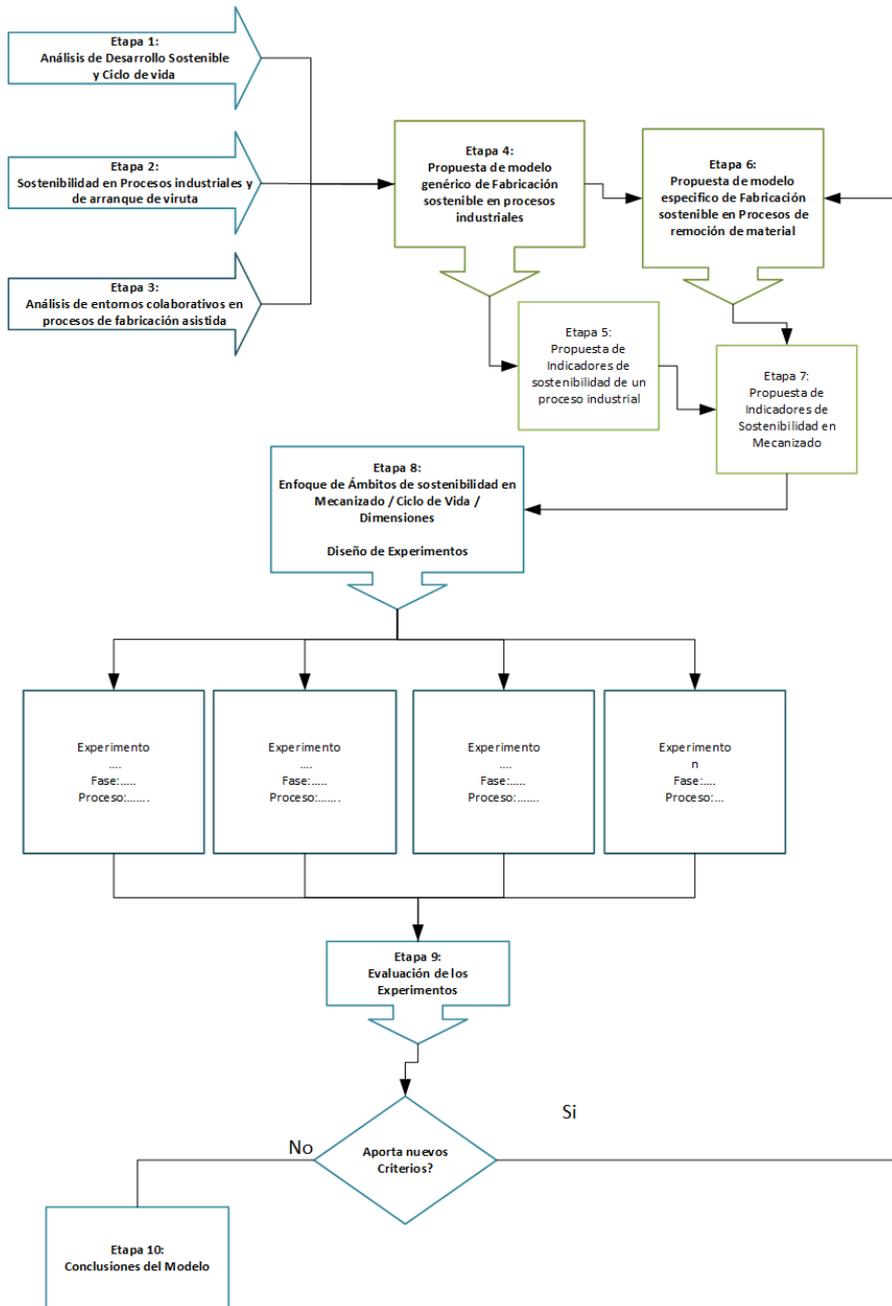


Figura 4.1. Marco para la propuesta del Modelo de Fabricación planteado (fuente: elaboración propia).

## 4.2. Entornos Colaborativos en Mecanizado

La elaboración de una propuesta de un marco de fabricación sostenible debe contextualizarse en un entorno de trabajo. Es por ello por lo que, atendiendo a las líneas estratégicas futuras de la Industria 4.0, se pretende que toda la información entrelazada, conocimiento generado y datos obtenidos durante los procesos pueda ser compartida en entornos de ingeniería, es decir en entornos de ingeniería colaborativa.

Para ello se ha elaborado un esquema conceptual que nos permita integrar ambos aspectos de desarrollo sostenible, colaboración y tecnologías de fabricación. Este modelo conceptual (Figura 4.2) muestra la interacción de las diferentes entradas de datos, recursos y de información que se proveen a los sistemas de ingeniería asistida por ordenador (CAD/CAE/CAM y PLM) que pueden registrarse en diversos formatos y presentarse desde distintas perspectivas. Esta información se debe compartir para la toma de decisiones y puede ir desde datos técnicos de una operación de conformado hasta decisiones sobre diseño o compras que influyan en aspectos de las dimensiones económica, ambiental o social.

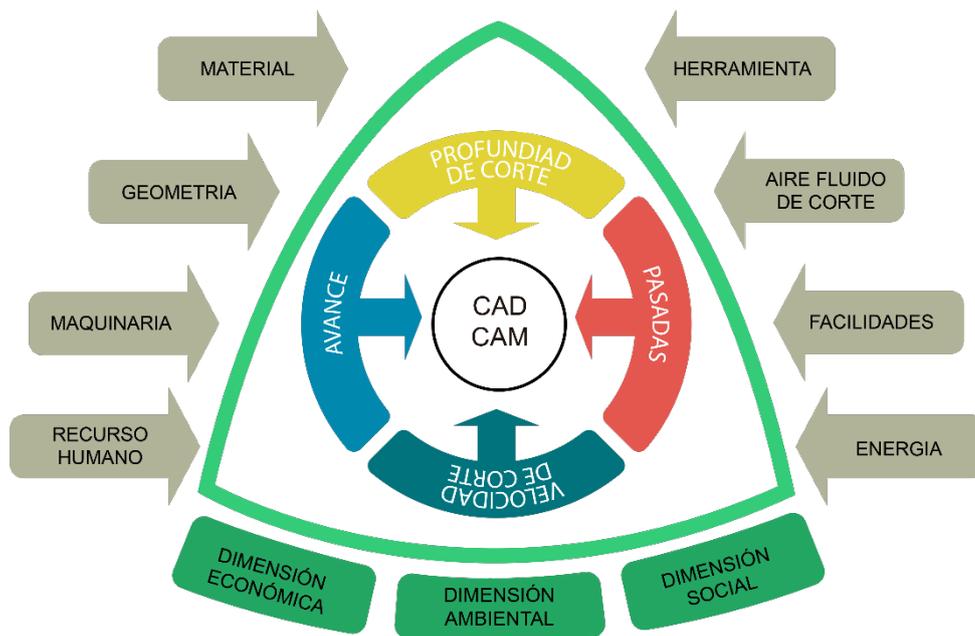


Figura 4.2. Entornos Colaborativos para el mecanizado (fuente: elaboración propia).

Para facilitar toda la interacción de datos e información en tiempo real, se dispone de sistemas de gestión de información que permiten la gestión de vida del producto, o más conocidos como PLM “*Product Life Management*”, en los que se puede integrar datos,

procesos de fabricación, simulaciones, sistemas de producción y procesos empresariales, así como el recurso humano “colaboradores” que intervienen en sus diferentes roles.

En la Figura 4.3 se muestra la propuesta de flujo de información en los entornos colaborativos, para el caso concreto de actividades en la fase de fabricación, el cual va a retroalimentarse de toda la información que se le provea y de la toma de decisiones en el proceso productivo. Particularmente para el caso de tecnologías de mecanizado, la información entrelazada para sostenibilidad debe incorporarse en la planificación de procesos y transcribirse a las aplicaciones de fabricación asistida por ordenador (CAM) y generar los códigos máquina para construir las piezas individuales que al final se van a inspeccionar.

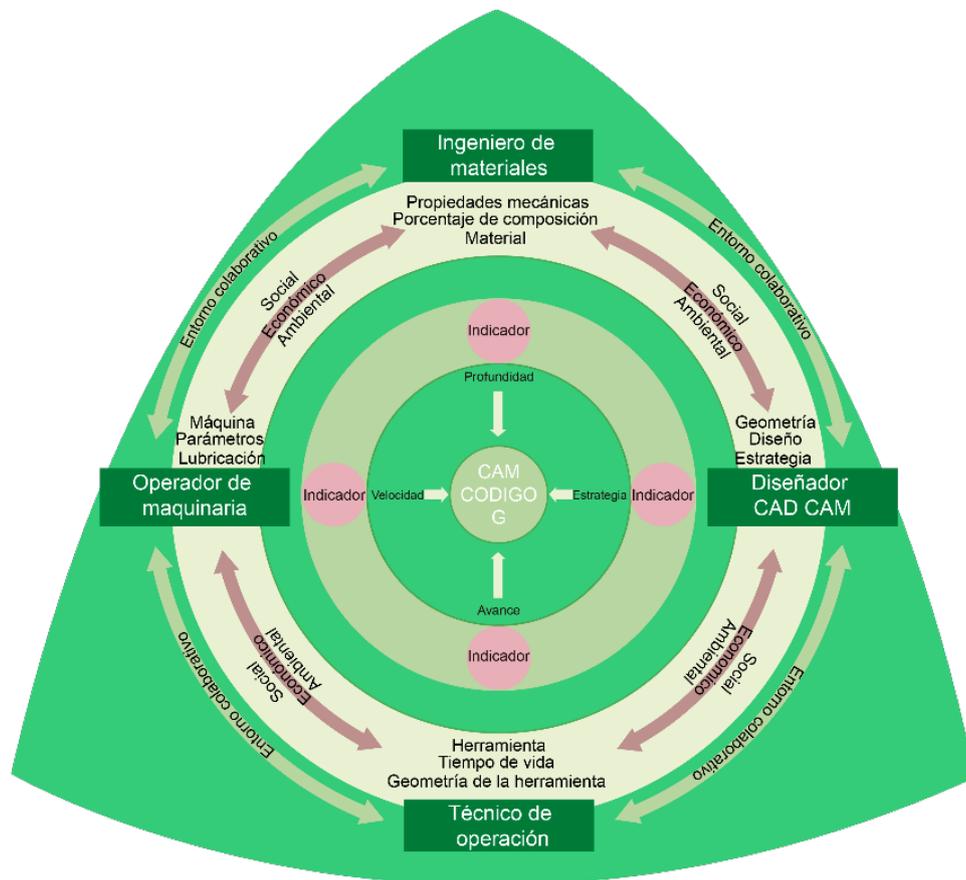


Figura 4.3. Entorno Colaborativo – Fase: Fabricación (fuente: elaboración propia).

Los principales roles que recomendamos que se encuentren participando en la fase de fabricación son:

- **Ingeniero de Materiales:** provee información de tipos de materiales y de criterios de selección sostenibles. Conoce de propiedades mecánicas de materiales y maneja los criterios de % de composición y de reciclaje.
- **Ingeniero de Diseño CAD/CAM:** conoce el efecto de los parámetros de fabricación, el proceso y la calidad de la pieza fabricada. Maneja el software CAD/CAM y conoce las bondades de sus opciones de las estrategias de mecanizado.
- **Técnico de Operación:** tiene la experticia del manejo de herramientas, por lo que tiene criterios sobre tiempo de vida de herramienta, así como condiciones y parámetros que se requiere para el funcionamiento del equipo CNC y conoce sobre parámetros de lubricación.
- **Operador de Máquina:** es experto en el uso del equipo de mecanizado, así como los efectos de la lubricación. Verifica parámetros de operación a nivel de máquina.

### 4.3. Ámbitos de la Propuesta del Modelo de Sostenibilidad

Para empezar el análisis que se presenta en esta propuesta y que se concluye al final de este apartado, se han considerado tres ámbitos de análisis que facilitarán la integración de los enfoques en sus dimensiones y que nos permitirá generar los diferentes modelos de evaluación y análisis (Tabla 4.1). El modelo deberá contemplar la propuesta de indicadores y sus recomendaciones para la ponderación y posterior evaluación.

Tabla 4.1. Ámbitos de la propuesta de Fabricación Sostenible (fuente: elaboración propia).

<p><b>Ciclo de Vida</b></p> <p>Diseño</p> <p>Fabricación</p> <p>Uso</p> <p>Fin de Vida</p>	<p><b>Sostenibilidad</b></p> <p>Económico</p> <p>Ambiental</p> <p>Social</p>	<p><b>Análisis de Ingeniería</b></p> <p>Materiales / Insumos</p> <p>Proceso de Transformación</p> <p>Producto (Bien o servicio)</p>

- **Ámbito de Ciclo de Vida:** analiza el ciclo de vida desde la perspectiva de diseño, fabricación, uso y fin de vida de lo que se fabrica. Es importante delimitar el alcance que queremos desarrollar en nuestro análisis.
- **Ámbito de Dimensiones de Sostenibilidad:** considera en su análisis la perspectiva económica, ambiental y social.
- **Ámbito de Análisis de Ingeniería:** considera las entradas y salidas del proceso. Por ejemplo, como entradas las materias primas/insumos al proceso, y como salidas el producto y los residuos generados.

Los aportes de las investigaciones que revisamos en capítulos anteriores, en el campo de sostenibilidad, combinan diferentes criterios bajo los cuales se realiza su análisis, de los cuales en el presente trabajo se seleccionó aquellos que permitirían entenderlos de mejor manera. En cualquier caso, pueden existir otros criterios adicionales, los cuales pueden ser incorporados en futuros análisis.

En la elaboración de la propuesta se han establecido unos términos y una nomenclatura para facilitar el diseño del modelo de sostenibilidad. En la Tabla 4.2 se describen los acrónimos de las perspectivas, la que se describe para la perspectiva general y en cada una de las perspectivas específicas.

Tabla 4.2. Nomenclatura y Acrónimos de Ámbitos de Integración (fuente: elaboración propia).

Sigla	Perspectiva General	Siglas	Perspectiva Específica
C	Ciclo de vida - Fases	DI	Diseño
		FA	Fabricación
		US	Uso
		FV	Fin de Vida
D	Dimensiones de Sostenibilidad	EC	Económica
		AM	Ambiental
		SO	Social
A	Análisis Ingeniería	MT	Material / Insumos
		PR	Proceso
		PD	Producto de Fabricación

#### 4.3.1. Ámbito de Ciclo de vida de Mecanizado

Para complementar la propuesta del modelo definiremos los límites del sistema a analizar, o denominado alcance del análisis, en la Figura 4.4 ilustramos la delimitación del sistema de análisis para un producto fabricado en un proceso de arranque de viruta, en el cual definiremos los principales parámetros y los indicadores de sostenibilidad en este trabajo doctoral, específicamente en la fabricación. (Ayabaca & Vila, 2020)

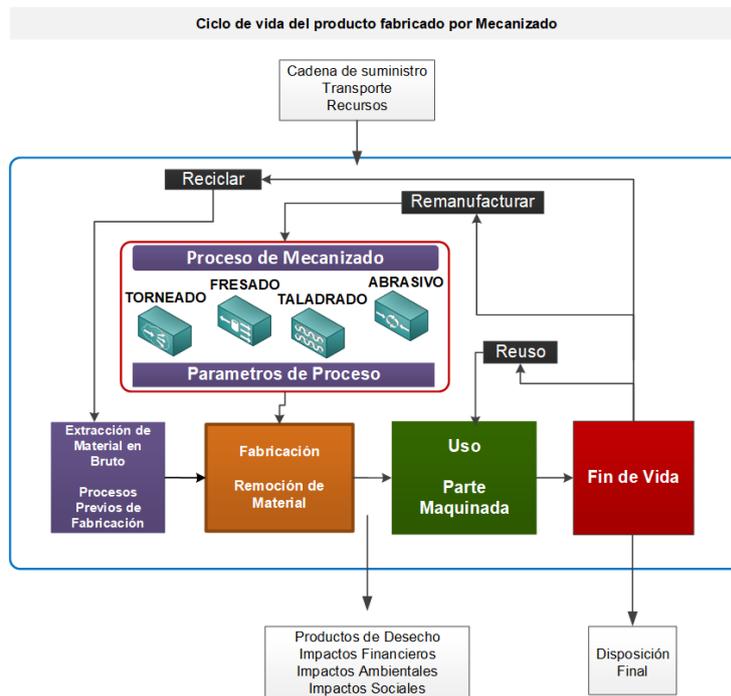


Figura 4.4. Delimitación del sistema de análisis. (fuente: Ayabaca, 2020).

Los principales procesos de arranque de viruta que analizaremos serán el torneado, fresado, taladrado y limado. Cada uno de ellos tiene su cinemática y dinámica propia por lo que los criterios definidos deberán ser ajustados considerando las ecuaciones propias descritas. La cadena de suministro, transporte del material en bruto y recursos, son indispensables para el correcto desarrollo del proceso de fabricación, en donde un primer paso conlleva la selección del material a mecanizar, con lo que nos permite una amplia gama de opciones de procesos y nos orienta en la selección del más adecuado, y que podrán ser: metálicos, cerámicos, poliméricos y compuestos.

También hay que considerar que en la extracción de materia prima (virgen o que tenga un porcentaje de material reciclado) el criterio de las 9R (consideraciones medioambientales) se debe aplicar. El reciclar material que ha cumplido su vida útil también debe cumplir con los criterios de sostenibilidad.

Es importante indicar que los controles de calidad y las caracterizaciones de material permitirán validar la calidad de este. Una definición general de lo que sería fabricar una pieza por arranque de viruta (pieza mecanizada), sería aquella en la que se arranca material por procedimientos mecánicos y con la ayuda de herramientas que tienen una geometría definida y que se aplican dependiendo el material que se utilice. En la actualidad existe opciones de software que manejan en forma total o parcial las etapas del ciclo de vida, algunos ejemplos los mencionamos a continuación (Figura 4.5).

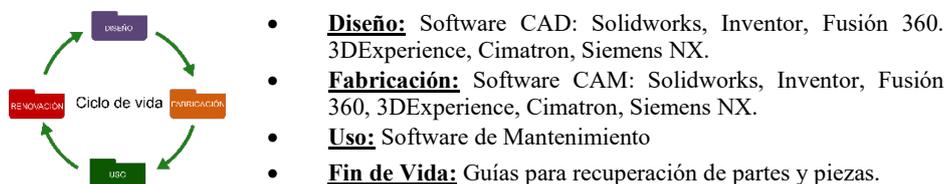


Figura 4.5. Esquema simplificado del Ámbito de Ciclo de Vida - Software usado (fuente: elaboración propia).

- **Diseño:** es la etapa en que se define la estrategia de fabricación, el concepto del producto, la ingeniería formal y la de detalle, así como el proceso de fabricación.
- **Fabricación:** Es importante indicar que se pueden tener varias opciones de proceso de fabricación del producto, de las cuales se seleccionará la más adecuada dependiendo de la cantidad de elementos a ser fabricados y de los requisitos que se soliciten que cumpla el producto.
- **Uso:** En la etapa de uso del producto, se debe considerar que las partes mecanizadas generalmente forman parte de máquinas o mecanismos que son más complejos, por lo que en su evaluación deberá tomarse en cuenta lo que se requiera para su operación y mantenimiento. En el caso de piezas mecanizadas, se requiere la limpieza de la pieza después del proceso de eliminación de material, con lo que se garantiza que cualquier material sobrante presente pueda ser retirado.

- **Fin de vida:** Después de su uso, la parte o pieza puede ser evaluada para ver o no la conveniencia de su reparación de ser posible o de su reciclaje.

Dentro de las evaluaciones de cada una de estas etapas, proponemos realizarlas considerando varios enfoques, tomando en cuenta que se debe ponderar entre estos tres ámbitos, de acuerdo con la importancia y las prioridades de nuestro análisis.

De igual manera es necesario definir el nivel de los indicadores que se requiere analizar. En la Tabla 4.3 se muestra la recomendación del nivel de análisis propuestos por Winroth et al. (Winroth, Almström, & Andersson, 2016) donde se muestra que dependiendo el nivel que se requiere analizar, se considera el nivel jerárquico, que puede ser a nivel Global (multinacional), nacional, corporativa, de fabrica o de taller, en cada uno de las cuales la dimensión funcional seleccionada, definirá el punto de vista y el análisis que se requiera. Expresando de forma gráfica lo mencionado en la Tabla 4.3 en la Figura 4.6 se representa el nivel en el que desarrollaremos la propuesta de indicadores de la presente tesis doctoral.

Tabla 4.3. Niveles de Selección de Indicadores (fuente: elaboración propia).

Jerárquico (Dimensiones)	Funcional (Dimensiones)
Global	Productor
Nacional	Proveedor
Corporativa	Producción
Fábrica	Logística
Taller	Cliente

		Enfoque Jerárquico			
		Global	Nacional	Corporativa	Fabrica
Enfoque Funcional	Productor				
	Proveedor				
	<b>Producción</b>				<i>Métricas o Indicadores</i>
	Logística				
	Cliente				

Figura 4.6. Enfoque de Indicadores de la propuesta (fuente: Winroth, 2016).

### 4.3.2. *Ámbito de Dimensiones de Sostenibilidad en mecanizado*

Las dimensiones de la sostenibilidad son criterios de análisis que están presentes en los procesos industriales, y en especial en el de mecanizado. Bajo esta consideración en nuestra propuesta consideramos la dimensión económica, que por lo general se expresa en valores monetarios. (\$, €, £, otras), la ambiental en unidades de impacto ambiental (kg de CO<sub>2</sub>) y el social en % de cumplimiento o de satisfacción. En la Figura 4.7 se resume las definiciones de las dimensiones que utilizaremos en la presente propuesta.



- **Económica:** se consideran aspectos económicos en la realización del producto.
- **Ambiental:** se consideran los aspectos ambientales que se generan por la realización del producto.
- **Social:** se consideran los aspectos sociales que influyen sobre los colaboradores que realizan el proceso productivo.

Figura 4.7. Esquema simplificado del Ámbito de Sostenibilidad en el Mecanizado. (fuente: elaboración propia).

### 4.3.3. *Ámbito del Análisis de Ingeniería en el mecanizado*

Utilizaremos los diagramas de “Entradas-Proceso-Salidas, EPS” de operaciones, que es la idea gráfica de lo necesario y secuencial del proceso de fabricación, el cual se describe en la Figura 4.8 en donde se ha identificado las entradas (materias primas y/o insumos) y demás recursos que se necesitan, teniendo principalmente como producto la pieza o parte fabricada, así como los residuos generados. Desarrollando el modelo EPS, en la Figura 4.8 se representa el modelo simplificado de un proceso de fabricación en donde se describe en general cada una de las entradas, salidas. En el siguiente apartado se desarrolla el modelo complejo.



- **Materiales:** lo que ingresa al proceso de mecanizado.
- **Recursos:** energía, máquina herramienta CNC, herramienta de corte.
- **Proceso de Mecanizado:** por ejemplo, fresado, torneado, taladrado.
- **Producto o pieza mecanizada:** pieza torneada o cilindrada.
- **Residuos que se generan:** viruta y diferentes emisiones.

Figura 4.8. Esquema simplificado del Ámbito de Análisis de Ingeniería (fuente: Ayabaca, 2020).



cual es necesario para que inicie el proceso productivo. En el modelo se considera que existe un proceso principal de fabricación del material en bruto, en donde se obtiene una pieza de material que puede estar compuesta por un 100% de material virgen o por reciclaje si es que es posible.

También se puede contar con productos recuperados que puedan ser nuevamente mecanizados, así como aquellos que cumplieron su vida útil y que el material que lo conforma podría ser parte de los procesos previos de fabricación. Para la selección del material, se requiere que en la fase de diseño se considere las características del CAD/CAM a utilizar, ya que al post procesar la información para ir a máquina, se definirán las condiciones del proceso.

- **Salidas:** se considera al producto mecanizado que generalmente se denomina parte o pieza, que una vez fabricada, es limpiada para ser entregada y por otra parte salen: a) residuos químicos del proceso, como es el aire contaminado, lubricantes, agua y emisiones de gases y b) residuos físicos como son los desperdicios de material, la viruta, el fluido de corte, aguas residuales, así como los insertos utilizados o la herramienta desgastada.
- **Recursos:** para el proceso de mecanizado por arranque de viruta, la máquina herramienta utilizada por lo general es de control numérico, dentro de la cual se tiene incorporado su sistema de lubricación de corte y de enfriamiento; así como las facilidades de las instalaciones. También se debe considerar la energía requerida para el proceso productivo, que básicamente sirve para el funcionamiento de la máquina, equipos, y elementos auxiliares. El recurso humano que permite realizar el proceso es de vital importancia. Herramientas de corte, insertos, conos y demás accesorios elementos se deben considerar.
- **Controles:** conocidos también como indicadores, que son los que determinan cómo se desarrolla el proceso, relacionan las entradas, las salidas y los recursos. Desde el punto de vista de la sostenibilidad se debe analizar los ámbitos en cada una de las fases del ciclo de vida de lo que se fabrica, las diferentes dimensiones de sostenibilidad y en que parte del proceso industrial estamos.

El flujo de información es vital ya que la relación entre el material, la herramienta y la máquina, define los parámetros del proceso y por ende muchos de los recursos que se utiliza, así como los indicadores más adecuados. Los entornos colaborativos, que utilizan un software permiten gestionar de mejor manera y en tiempo real, el flujo de información que se va generando en el proceso.

Las evaluaciones de cada una de estas etapas podemos realizarlas considerando enfoques: económicos, ambientales y sociales, para lo cual hay que tomar en cuenta que hay que ponderar de entre estos tres enfoques, los más importantes, de acuerdo con la importancia y las prioridades de nuestro análisis. Este punto lo trataremos a detalle al final de este capítulo.

Los tres ámbitos así descritos, deben interactuar simultáneamente, y compartir información, para lo que el uso de los entornos colaborativos, permitirán dar el soporte al mismo.

En la Figura 4.10 se representa la interacción en los entornos sostenibles de esta información, para lo cual se utiliza los esquemas simplificados de sostenibilidad, ciclo de vida y de proceso de fabricación.

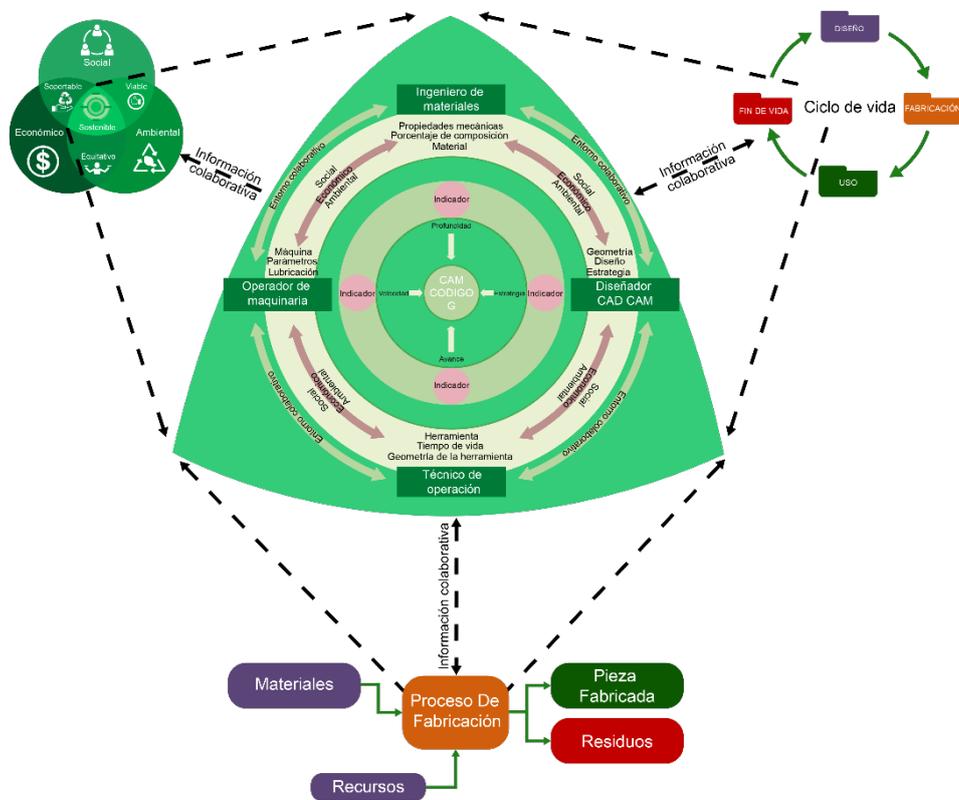


Figura 4.10. Análisis de Sostenibilidad del Mecanizado en Entornos Colaborativos. (fuente: elaboración propia).

En cada perspectiva de análisis, la información colaborativa entra para definir las mejores decisiones en el proceso de fabricación, pero a la vez se retroalimenta para conseguir la mejora continua. Para la evaluación se generan matrices de análisis que son propuestas en el siguiente apartado.

## 4.5. Matrices de Indicadores para el Análisis de Sostenibilidad

El relacionar estos tres ámbitos puede requerir análisis bastantes complejos, por lo que se desarrolló las siguientes matrices, en las que analizaremos la relación con cada uno de los ámbitos. Utilizaremos la nomenclatura definida previamente (ver Tabla 4.2) para realizar la descripción de las 6 combinaciones de alternativas de matrices que se pueden obtener de las combinaciones de los ámbitos propuestos, que a continuación se detallan (ver Tabla 4.4). El símbolo “ $\leftrightarrow$ ” indica el flujo de información en ambas direcciones.

Tabla 4.4. Matrices de Ámbitos propuestos del modelo de sostenibilidad (fuente: elaboración propia).

Nombre de la Matriz	Secuencia de Ámbitos	Simbología de los Ámbitos
I C&A vs D	Ciclo de Vida &	$C \leftrightarrow A \leftrightarrow D$
	Análisis de Ingeniería	$\Downarrow \Downarrow \Downarrow$
	Dimensiones de Sostenibilidad	$D \leftrightarrow A \leftrightarrow C$
II C&D vs A	Ciclo de Vida &	$C \leftrightarrow D \leftrightarrow A$
	Dimensiones de Sostenibilidad	$\Downarrow \Downarrow \Downarrow$
	Análisis de Ingeniería	$A \leftrightarrow D \leftrightarrow C$
III D&C vs A	Dimensiones de Sostenibilidad &	$D \leftrightarrow C \leftrightarrow A$
	Ciclo de Vida	$\Downarrow \Downarrow \Downarrow$
	Análisis de Ingeniería	$A \leftrightarrow C \leftrightarrow D$
IV D&A vs C	Dimensiones de Sostenibilidad &	$D \leftrightarrow A \leftrightarrow C$
	Análisis de Ingeniería	$\Downarrow \Downarrow \Downarrow$
	Ciclo de Vida	$C \leftrightarrow A \leftrightarrow D$
V A&D vs C	Análisis de Ingeniería &	$A \leftrightarrow D \leftrightarrow C$
	Dimensiones de Sostenibilidad	$\Downarrow \Downarrow \Downarrow$
	Ciclo de Vida	$C \leftrightarrow D \leftrightarrow A$
VI A&C vs D	Análisis de Ingeniería &	$A \leftrightarrow C \leftrightarrow D$
	Ciclo de Vida	$\Downarrow \Downarrow \Downarrow$
	Dimensiones de Sostenibilidad	$D \leftrightarrow C \leftrightarrow A$

Nota:  $\leftrightarrow$  Relación de información en ambos sentidos

- **Matriz I – CAD:** Matriz que relaciona: fases del ciclo de vida (C), dimensiones de la sostenibilidad (D) con el análisis de ingeniería (A). Esta matriz es útil para definir indicadores donde se prioriza las fases de ciclo de vida y como segundo criterio las dimensiones de sostenibilidad
- **Matriz II - CDA:** Matriz que relaciona: fases del ciclo de vida (C), las dimensiones de sostenibilidad (D) con el análisis de ingeniería (A). Se usa para definir indicadores donde se prioriza las fases de ciclo de vida y se requiere visualizar el análisis de ingeniería.
- **Matriz III - DCA:** Matriz que relaciona: las dimensiones de sostenibilidad (D) las fases del ciclo de Vida (C) y el ámbito del análisis de ingeniería (A). Se prioriza las dimensiones de sostenibilidad y las fases del ciclo de vida.
- **Matriz IV - DAC:** Matriz que relaciona: las dimensiones de sostenibilidad (D) el análisis de ingeniería (A) con las fases del ciclo de vida (C). Se combina las dimensiones de sostenibilidad con el análisis de ingeniería.

- **Matriz V - ADC:** Matriz que relaciona: el análisis de ingeniería (A), las dimensiones de sostenibilidad (D) con las fases del ciclo de vida (C). Es útil este análisis cuando se prioriza indicadores desde el ámbito de ciclo de vida.
- **Matriz VI - ACD:** Matriz que relaciona: el análisis de ingeniería (A), las fases del ciclo de vida (C) con las dimensiones de sostenibilidad (D). Esta matriz es útil cuando se requiere definir indicadores de sostenibilidad.

En la Figura 4.11 se muestran las relaciones de estos ámbitos, las que están expresadas en forma de matrices. Las seis opciones de matrices son de mucha utilidad, ya que se podrá escoger de entre ellas, la que permita expresar de manera más clara la relación y el indicador de sostenibilidad que se quiera analizar.

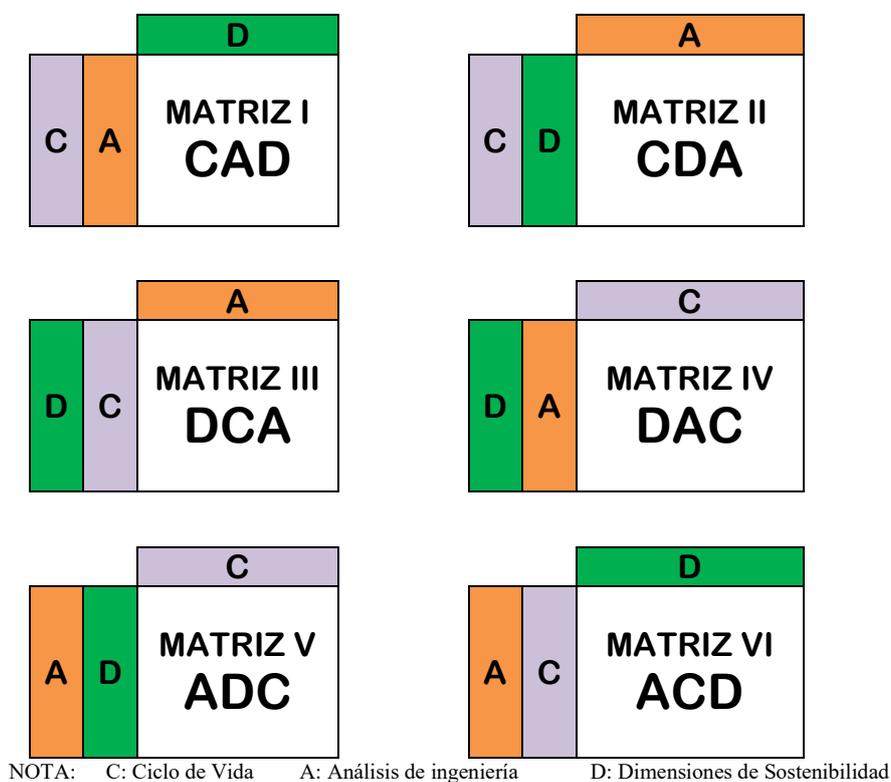


Figura 4.11. Matriz y relación de criterios del Modelo de Sostenibilidad (fuente: elaboración propia).

Los indicadores de sostenibilidad permiten medir el desempeño del proceso, permiten tomar decisiones enfocadas a la mejora del proceso dependiendo el ámbito de análisis. Las formas de clasificar los indicadores de sostenibilidad en la presente tesis doctoral se presentan y desarrollan en los apartados siguientes.

#### 4.5.1. Matriz I - CAD: Ciclo / Análisis de Ingeniería / Dimensión.

La **Matriz I – CAD** se utiliza cuando se requiere un análisis de las *Fases del Ciclo de Vida*, teniendo como criterio los ámbitos de *Análisis de Ingeniería* considerando las *Dimensiones de Sostenibilidad*. Se pueden plantear indicadores en donde el objetivo sea, por ejemplo, mínimo consumo de energía para el proceso ( $\sphericalangle$ ), maximizar la eficiencia del proceso ( $\nearrow$ ) y así cumplir los objetivos sostenibles planteados. Se realizan los siguientes análisis que se detallan a continuación: (ver Tabla 4.5).

Tabla 4.5. Matriz I - CAD: Organización de Indicadores (fuente: elaboración propia).

MATRIZ I - CAD		DIMENSIONES DE SOSTENIBILIDAD		
Ciclo de Vida	Análisis de Ingeniería	Económica	Ambiental	Social
Diseño	Materiales	$I_1$	$I_2$	$I_3$
	Proceso	$I_4$	$I_5$	$I_6$
	Producto	$I_7$	$I_8$	$I_9$
Fabricación	Materiales	$I_{10}$	$I_{11}$	$I_{12}$
	Proceso	$I_{13}$	$I_{14}$	$I_{15}$
	Producto	$I_{16}$	$I_{17}$	$I_{18}$
Uso	Materiales	$I_{19}$	$I_{20}$	$I_{21}$
	Proceso	$I_{22}$	$I_{23}$	$I_{24}$
	Producto	$I_{25}$	$I_{26}$	$I_{27}$
Fin de Vida	Materiales	$I_{28}$	$I_{29}$	$I_{30}$
	Proceso	$I_{31}$	$I_{32}$	$I_{33}$
	Producto	$I_{34}$	$I_{35}$	$I_{36}$

- Para realizar un análisis de la *Dimensión Económica* en las fases de ciclo de vida se consideran las familias de indicadores en diseño  $I_1, I_4, I_7$ , en fabricación  $I_{10}, I_{13}, I_{16}$  en uso  $I_{19}, I_{22}, I_{25}$  y en fin de vida  $I_{28}, I_{31}, I_{34}$  que se relaciona con el Análisis de Ingeniería en los ámbitos de: (Materiales  $\rightarrow$  Proceso  $\rightarrow$  Producto) y sus siglas (MT $\rightarrow$ PR $\rightarrow$ PD).
- Por otro lado, para un análisis de la *Dimensión Ambiental* en las fases del ciclo de vida, se analiza las familias de indicadores en diseño  $I_2, I_5, I_8$  en fabricación  $I_{11}, I_{14}, I_{17}$  en uso  $I_{20}, I_{23}, I_{26}$  y en fin de vida  $I_{29}, I_{32}, I_{35}$  en los ámbitos de (MT $\rightarrow$ PR $\rightarrow$ PD).
- Para una evaluación de la *Dimensión Social*, en las fases del ciclo de vida, se analiza las familias en diseño  $I_3, I_6, I_9$  en fabricación  $I_{12}, I_{15}, I_{18}$  en uso  $I_{21}, I_{24}, I_{27}$  y en fin de vida  $I_{30}, I_{33}, I_{36}$  en los ámbitos de (MT $\rightarrow$ PR $\rightarrow$ PD).

En el sentido horizontal, se puede realizar evaluaciones de las fases del ciclo de vida considerando las dimensiones de sostenibilidad, desde el análisis de ingeniería que examina (MT $\rightarrow$ PR $\rightarrow$ PD) como se muestra en la Tabla 4.6. En el sentido vertical, se prioriza las dimensiones de sostenibilidad.

Tabla 4.6. Matriz I - CAD: Evaluaciones (fuente: elaboración propia).

	Dimensión Económica	Dimensión Ambiental	Dimensión Social	Análisis Horizontal: Evaluación
Diseño	$I_{1,4,7}$	$I_{2,5,8}$	$I_{3,6,9}$	→ De la Fase diseño (MT→PR→PD)
Fabricación	$I_{10,13,16}$	$I_{11,14,17}$	$I_{12,15,18}$	→ De la Fase fabricación (MT→PR→PD)
Uso	$I_{19,22,25}$	$I_{20,23,26}$	$I_{21,24,27}$	→ De la Fase uso (MT→PR→PD)
Fin de Vida	$I_{28,31,34}$	$I_{29,32,35}$	$I_{30,33,36}$	→ De la Fase de fin de vida (MT→PR→PD)
Análisis Vertical Evaluación	↓	↓	↓	
			Dimensión social del ciclo de vida considerando (MT→PR→PD)	
		Dimensión ambiental del ciclo de vida considerando (MT→PR→PD)		
	Dimensión económica del ciclo de vida considerando (MT→PR→PD)			

#### 4.5.2. Matriz II - CDA: Ciclo / Dimensión / Análisis de Ingeniería.

La **Matriz II - CDA** tiene su aplicabilidad cuando se requiere un análisis de las *Fases del Ciclo de Vida* teniendo como criterio las *Dimensiones de Sostenibilidad*, considerando el *Análisis de Ingeniería*. En la Tabla 4.7 se propone la relación de indicadores correspondiente.

Tabla 4.7. Matriz II - CDA: Organización de Indicadores (fuente: elaboración propia).

MATRIZ II - CDA		ANÁLISIS DE INGENIERÍA		
Ciclo de Vida	Dimensión de Sostenibilidad	Materiales	Proceso	Producto
Diseño	Económica	$I_1$	$I_4$	$I_7$
	Ambiental	$I_2$	$I_5$	$I_8$
	Social	$I_3$	$I_6$	$I_9$
Fabricación	Económica	$I_{10}$	$I_{13}$	$I_{16}$
	Ambiental	$I_{11}$	$I_{14}$	$I_{17}$
	Social	$I_{12}$	$I_{15}$	$I_{18}$
Uso	Económica	$I_{19}$	$I_{22}$	$I_{25}$
	Ambiental	$I_{20}$	$I_{23}$	$I_{26}$
	Social	$I_{21}$	$I_{24}$	$I_{27}$
Fin de Vida	Económica	$I_{28}$	$I_{31}$	$I_{34}$
	Ambiental	$I_{29}$	$I_{32}$	$I_{35}$
	Social	$I_{30}$	$I_{33}$	$I_{36}$

- Para realizar un análisis del *material* en las fases del ciclo de vida se considera las familias de indicadores en diseño  $I_1, I_2, I_3$  en fabricación  $I_{10}, I_{11}, I_{12}$  en uso  $I_{19}, I_{20}, I_{21}$  y en fin de vida  $I_{28}, I_{29}, I_{30}$  que se relacionan con las dimensiones de sostenibilidad (Económica → Ambiental → Social) (EC→AM→SO).
- Por otro lado, para el análisis del *proceso* en las fases del ciclo de vida, analizamos las familias de indicadores en diseño  $I_4, I_5, I_6$  en fabricación  $I_{13}, I_{14}, I_{15}$  en uso  $I_{22}, I_{23}, I_{24}$  y en fin de vida  $I_{31}, I_{32}, I_{33}$  en los ámbitos de las dimensiones de sostenibilidad (EC→AM→SO)
- Y para una evaluación del *producto* en las fases del ciclo de vida, se analiza los indicadores de las familias en diseño  $I_7, I_8, I_9$  en fabricación  $I_{16}, I_{17}, I_{18}$  en uso  $I_{25}, I_{26}, I_{27}$  en fin de vida  $I_{34}, I_{35}, I_{36}$  en los ámbitos de las dimensiones de sostenibilidad (EC→AM→SO).

En el sentido horizontal, se realiza evaluaciones de las fases del ciclo de vida en la que se considera los ámbitos del análisis de ingeniería desde la perspectiva de las dimensiones de sostenibilidad (EC→AM→SO) (Tabla 4.8). En el sentido vertical, se prioriza el análisis de ingeniería del proceso.

Tabla 4.8. Matriz II - CDA: Evaluaciones (fuente: elaboración propia).

	↓ Materiales	↓ Proceso	↓ Producto	↓ Análisis Horizontal Evaluación:
Diseño	→ $I_{1,2,3}$	$I_{4,5,6}$	$I_{7,8,9}$	→ De la fase de diseño (EC→AM→SO).
Fabricación	→ $I_{10,11,12}$	$I_{13,14,15}$	$I_{16,17,18}$	→ De la fase fabricación (EC→AM→SO).
Uso	→ $I_{19,20,21}$	$I_{22,23,24}$	$I_{25,26,27}$	→ De la fase uso (EC→AM→SO)
Fin de Vida	→ $I_{28,29,30}$	$I_{31,32,33}$	$I_{34,35,36}$	→ De la fase fin de vida (EC→AM→SO)
Análisis Vertical Evaluación:	↓	↓	↓	Del producto en las fases de vida, en las dimensiones de sostenibilidad (EC→AM→SO).
	↓	↓	↓	Del proceso en las fases del ciclo de vida, en las dimensiones de sostenibilidad (EC→AM→SO).
	↓	↓	↓	De materiales en las fases del ciclo de vida, en las dimensiones de sostenibilidad (EC→AM→SO).

#### 4.5.3. Matriz III - DCA: Dimensión / Ciclo / Análisis de Ingeniería.

La **Matriz III - DCA** tiene su aplicabilidad cuando se requiere un análisis desde el ámbito de las *Dimensiones de Sostenibilidad* teniendo como criterio las fases del *Ciclo de Vida* considerando en las que se requiere un *Análisis de Ingeniería* (Tabla 4.9).

Tabla 4.9. Matriz III - DCA: Organización de Indicadores (fuente: elaboración propia).

MATRIZ III - DCA		ANÁLISIS DE INGENIERÍA		
Dimensiones de Sostenibilidad	Ciclo de Vida	Materiales	Proceso	Producto
Económica	Diseño	$I_1$	$I_4$	$I_7$
	Fabricación	$I_{10}$	$I_{13}$	$I_{16}$
	Uso	$I_{19}$	$I_{22}$	$I_{25}$
	Fin de Vida	$I_{28}$	$I_{31}$	$I_{34}$
Ambiental	Diseño	$I_2$	$I_5$	$I_8$
	Fabricación	$I_{11}$	$I_{14}$	$I_{17}$
	Uso	$I_{20}$	$I_{23}$	$I_{26}$
	Fin de Vida	$I_{29}$	$I_{32}$	$I_{35}$
Social	Diseño	$I_3$	$I_6$	$I_9$
	Fabricación	$I_{12}$	$I_{15}$	$I_{18}$
	Uso	$I_{21}$	$I_{24}$	$I_{27}$
	Fin de Vida	$I_{30}$	$I_{33}$	$I_{36}$

- Para un análisis de la perspectiva de *análisis de ingeniería* en lo que corresponde a *materiales* de las diferentes dimensiones de sostenibilidad se consideran las familias de indicadores en lo económico  $I_1, I_{10}, I_{19}, I_{28}$  en lo ambiental  $I_2, I_{11}, I_{20}, I_{29}$  y en lo social  $I_3, I_{12}, I_{21}, I_{30}$  que se relaciona con las fases del ciclo de vida (Diseño → Fabricación → Uso → Fin de vida) (DI→FA→US→FV).
- Por otro lado, para un análisis del *proceso* en las dimensiones de sostenibilidad se analiza las familias de indicadores en lo económico  $I_4, I_{13}, I_{22}, I_{31}$  en lo ambiental  $I_5, I_{14}, I_{23}, I_{32}$  y en lo social  $I_6, I_{15}, I_{24}, I_{33}$  en los ámbitos de (DI→FA→US→FV).
- Y para un análisis del *producto*, en las dimensiones de sostenibilidad, se consideran los indicadores de las familias en lo económico  $I_7, I_{16}, I_{25}, I_{34}$  en lo ambiental  $I_8, I_{17}, I_{26}, I_{35}$  y en lo social  $I_9, I_{18}, I_{27}, I_{36}$  en los ámbitos de (DI→FA→US→FV).

En el sentido horizontal, se puede realizar evaluaciones de las diferentes *dimensiones de sostenibilidad*, en las que se considera las fases del ciclo de vida (DI→FA→US→FV). para cada componente del *análisis de ingeniería* detallados a continuación (ver Tabla 4.10). En el sentido vertical se prioriza el criterio del *análisis de ingeniería*.

Tabla 4.10. Matriz III - DCA: Evaluaciones (fuente: elaboración propia).

	Materiales	Proceso	Producto	Análisis Horizontal Evaluación:
Económica	$I_{1,10,19,28}$	$I_{4,13,22,31}$	$I_{7,16,25,34}$	De la dimensión Económica desde el ámbito industrial. (DI→FA→US→FV).
Ambiental	$I_{2,11,20,29}$	$I_{5,14,23,32}$	$I_{8,17,26,35}$	De la dimensión Ambiental desde el ámbito industrial. (DI→FA→US→FV).
Social	$I_{3,12,21,30}$	$I_{6,15,24,33}$	$I_{9,18,27,36}$	De la dimensión Social desde el ámbito industrial. (DI→FA→US→FV).
Análisis Vertical Evaluación	↓	↓	↓	Del producto en las dimensiones de sostenibilidad considerando las fases del ciclo de vida (DI→FA→US→FV).
	↓	↓		Del proceso en las dimensiones de sostenibilidad considerando las fases del ciclo de vida (DI→FA→US→FV).
	↓			De los materiales en las dimensiones de sostenibilidad considerando las fases del ciclo de vida (DI→FA→US→FV).

#### 4.5.4. Matriz IV - DAC: Dimensión / Análisis de Ingeniería / Ciclo.

La **Matriz IV- DAC** tiene su aplicabilidad cuando se requiere un análisis desde la perspectiva de las *Dimensiones de Sostenibilidad*, teniendo como criterio el *Análisis de Ingeniería* considerando las fases del *Ciclo de Vida*. En la Tabla 4.11 se detalla cómo se establece:

Tabla 4.11. Matriz IV - DAC: Organización de Indicadores (fuente: elaboración propia).

MATRIZ IV - DAC		CICLO DE VIDA			
Dimensiones	Análisis de Ingeniería	Diseño	Fabricación	Uso	Fin de Vida
Económica	Materiales	$I_1$	$I_{10}$	$I_{19}$	$I_{28}$
	Proceso	$I_4$	$I_{13}$	$I_{22}$	$I_{31}$
	Producto	$I_7$	$I_{16}$	$I_{25}$	$I_{34}$
Ambiental	Materiales	$I_2$	$I_{11}$	$I_{20}$	$I_{29}$
	Proceso	$I_5$	$I_{14}$	$I_{23}$	$I_{32}$
	Producto	$I_8$	$I_{17}$	$I_{26}$	$I_{35}$
Social	Materiales	$I_3$	$I_{12}$	$I_{21}$	$I_{30}$
	Proceso	$I_6$	$I_{15}$	$I_{24}$	$I_{33}$
	Producto	$I_9$	$I_{18}$	$I_{27}$	$I_{36}$

- Para un análisis de la fase de diseño en las dimensiones de sostenibilidad se consideran las familias de indicadores en lo económico  $I_1, I_4, I_7$  en lo ambiental  $I_2, I_5, I_8$  y en lo social  $I_3, I_6, I_9$  que se relacionan con el análisis de ingeniería en los ámbitos (Materiales  $\rightarrow$  Proceso  $\rightarrow$  Producto) (MT $\rightarrow$ PR $\rightarrow$ PD).
- Para un análisis desde la fase de fabricación de las dimensiones de sostenibilidad analizaremos las familias de indicadores en lo económico  $I_{10}, I_{13}, I_{16}$  en lo ambiental  $I_{11}, I_{14}, I_{17}$  y en lo social  $I_{12}, I_{15}, I_{18}$  en los ámbitos (MT $\rightarrow$ PR $\rightarrow$ PD).
- Para un análisis desde la fase de uso desde la perspectiva desde las dimensiones de sostenibilidad se consideran los indicadores de las familias en lo económico  $I_{19}, I_{22}, I_{25}$  en lo ambiental  $I_{20}, I_{23}, I_{26}$  y en lo social  $I_{26}, I_{21}, I_{24}, I_{27}$  en los ámbitos (MT $\rightarrow$ PR $\rightarrow$ PD).
- Y para una evaluación de la fase de fin de vida en las dimensiones de sostenibilidad se consideran los indicadores de las familias en lo económico  $I_{28}, I_{31}, I_{34}$ , en lo ambiental  $I_{29}, I_{32}, I_{35}$  y en lo social  $I_{30}, I_{33}, I_{36}$  en los ámbitos (MT $\rightarrow$ PR $\rightarrow$ PD).

En el sentido horizontal, se puede realizar evaluaciones de las diferentes dimensiones de sostenibilidad considerando las fases del ciclo de vida desde el análisis de ingeniería en los ámbitos de (MT $\rightarrow$ PR $\rightarrow$ PD) como se muestra en la Tabla 4.12. En sentido vertical se prioriza las etapas del ciclo de vida.

Tabla 4.12. Matriz IV – DAC: Evaluaciones (fuente: elaboración propia).

	Diseño ↓	Fabricación ↓	Uso ↓	Fin de Vida ↓	Análisis Horizontal Evaluación: ↓
Económica	$I_{1,4,7}$	$I_{10,13,16}$	$I_{19,22,25}$	$I_{28,31,34}$	→ Económica del ciclo de vida (MT $\rightarrow$ PR $\rightarrow$ PD).
Ambiental	$I_{2,5,8}$	$I_{11,14,17}$	$I_{20,23,26}$	$I_{29,32,35}$	→ Ambiental del ciclo de vida (MT $\rightarrow$ PR $\rightarrow$ PD).
Social	$I_{3,6,9}$	$I_{12,15,18}$	$I_{21,24,27}$	$I_{30,33,36}$	→ Social del ciclo de vida (MT $\rightarrow$ PR $\rightarrow$ PD).
Análisis Vertical Evaluación:	↓	↓	↓	↓	De la fase de fin de vida en las dimensiones de sostenibilidad considerando (MT $\rightarrow$ PR $\rightarrow$ PD).
	↓	↓	↓	↓	De la fase de uso de las dimensiones de sostenibilidad considerando (MT $\rightarrow$ PR $\rightarrow$ PD).
	↓	↓	↓	↓	De la fase de fabricación de las dimensiones de sostenibilidad considerando (MT $\rightarrow$ PR $\rightarrow$ PD).
	↓	↓	↓	↓	De la fase de diseño de las dimensiones de sostenibilidad considerando (MT $\rightarrow$ PR $\rightarrow$ PD).

#### 4.5.5. Matriz V - ADC: Análisis de Ingeniería / Dimensión / Ciclo.

La **Matriz V - ADC** se utiliza cuando se requiere un *Análisis de Ingeniería* teniendo como criterio las *Dimensiones de Sostenibilidad* y considerando las fases de *Ciclo de vida*. En esta matriz los indicadores del análisis de ingeniería como los de proceso se encuentran agrupados y su análisis es versátil (ver Tabla 4.13).

Tabla 4.13. Matriz V – ADC: Organización de Indicadores (fuente: elaboración propia).

MATRIZ V - ADC		CICLO DE VIDA			
Análisis de Ingeniería	Dimensión de Sostenibilidad	Diseño	Fabricación	Uso	Fin de Vida
Materiales	Económica	$I_1$	$I_{10}$	$I_{19}$	$I_{28}$
	Ambiental	$I_2$	$I_{11}$	$I_{20}$	$I_{29}$
	Social	$I_3$	$I_{12}$	$I_{21}$	$I_{30}$
Proceso	Económica	$I_4$	$I_{13}$	$I_{22}$	$I_{31}$
	Ambiental	$I_5$	$I_{14}$	$I_{23}$	$I_{32}$
	Social	$I_6$	$I_{15}$	$I_{24}$	$I_{33}$
Producto	Económica	$I_7$	$I_{16}$	$I_{25}$	$I_{34}$
	Ambiental	$I_8$	$I_{17}$	$I_{26}$	$I_{35}$
	Social	$I_9$	$I_{18}$	$I_{27}$	$I_{36}$

- Para realizar un análisis de la fase de diseño en el análisis de ingeniería se consideran las familias de indicadores en lo que corresponde a materiales/insumos  $I_1, I_2, I_3$  al proceso  $I_4, I_5, I_6$  y al producto  $I_7, I_8, I_9$  en los ámbitos de las dimensiones de sostenibilidad (Económica → Ambiental → Social) (EC→AM→SO).
- Para un análisis de la fase de fabricación en el análisis de ingeniería se considera las familias de indicadores en lo que corresponde a materiales/insumos  $I_{10}, I_{11}, I_{12}$  al proceso  $I_{13}, I_{14}, I_{15}$  y al producto  $I_{16}, I_{17}, I_{18}$  en los ámbitos de las dimensiones de sostenibilidad (EC→AM→SO).
- Para un análisis de la fase de uso en el análisis de ingeniería se consideran los indicadores de las familias en lo que corresponde a materiales/insumos  $I_{19}, I_{20}, I_{21}$ , al proceso  $I_{22}, I_{23}, I_{24}$  y al producto  $I_{25}, I_{26}, I_{27}$  en los ámbitos de las dimensiones de sostenibilidad (EC→AM→SO).
- Para un análisis de la fase de fin de vida en el análisis de ingeniería se consideran los indicadores en lo que corresponde a materiales/insumos  $I_{28}, I_{29}, I_{30}$  al proceso  $I_{31}, I_{32}, I_{33}$  y al producto  $I_{34}, I_{35}, I_{36}$  en los ámbitos de las dimensiones de sostenibilidad (EC→AM→SO).

En el sentido horizontal, se puede realizar evaluaciones del análisis de ingeniería considerando las dimensiones de sostenibilidad en las fases del ciclo de vida en los ámbitos (EC→AM→SO) como se especifica en la Tabla 4.14. En sentido vertical se prioriza las etapas del ciclo de vida.

Tabla 4.14. Matriz V - ADC: Evaluaciones (fuente: elaboración propia).

	Diseño	Fabricación	Uso	Fin de Vida	Análisis Horizontal. Evaluación:
Materiales	$I_{1,2,3}$	$I_{10,11,12}$	$I_{19,20,21}$	$I_{28,29,30}$	→ De los materiales en las fases del ciclo de vida (EC→AM→SO).
Proceso	$I_{4,5,6}$	$I_{13,14,15}$	$I_{22,23,24}$	$I_{31,32,33}$	→ Del proceso en las fases del ciclo de vida (EC→AM→SO).
Producto	$I_{7,8,9}$	$I_{16,17,18}$	$I_{25,26,27}$	$I_{34,35,36}$	→ Del producto en las fases del ciclo de vida (EC→AM→SO).
Análisis Vertical Evaluación	↓	↓	↓	↓	De la fase de fin de vida en el Análisis de Ingeniería considerando (EC→AM→SO).
	↓	↓	↓	↓	De la fase de uso en el Análisis de Ingeniería considerando (EC→AM→SO).
	↓	↓	↓	↓	De la fase de fabricación en el Análisis de Ingeniería considerando (EC→AM→SO).
	↓	↓	↓	↓	De la fase de diseño en el Análisis de Ingeniería considerando (EC→AM→SO).

#### 4.5.6. Matriz VI - ACD: Análisis de Ingeniería / Ciclo / Dimensión.

La **Matriz VI - ACD** tiene su aplicabilidad cuando se requiere un *Análisis de Ingeniería*, teniendo como criterio las fases del *Ciclo de Vida* considerando las *Dimensiones de Sostenibilidad* en el cual se considera fases del ciclo de vida. En la Tabla 4.15 se plantea:

Tabla 4.15. Matriz VI – ACD: Organización de Indicadores (fuente: elaboración propia).

MATRIZ VI - ACD		DIMENSIONES DE SOSTENIBILIDAD		
Análisis de Ingeniería	Ciclo de Vida	Económica	Ambiental	Social
Materiales	Diseño	$I_1$	$I_2$	$I_3$
	Fabricación	$I_{10}$	$I_{11}$	$I_{12}$
	Uso	$I_{19}$	$I_{20}$	$I_{21}$
	Fin de Vida	$I_{28}$	$I_{29}$	$I_{30}$
Proceso	Diseño	$I_4$	$I_5$	$I_6$
	Fabricación	$I_{13}$	$I_{14}$	$I_{15}$
	Uso	$I_{22}$	$I_{23}$	$I_{24}$
	Fin de Vida	$I_{31}$	$I_{32}$	$I_{33}$
Producto	Diseño	$I_7$	$I_8$	$I_9$
	Fabricación	$I_{16}$	$I_{17}$	$I_{18}$
	Uso	$I_{25}$	$I_{26}$	$I_{27}$
	Fin de Vida	$I_{34}$	$I_{35}$	$I_{36}$

- Para un análisis de la dimensión económica desde los diferentes ámbitos de ingeniería propuestos se consideran las familias de indicadores en el ámbito de materiales  $I_1, I_{10}, I_{19}, I_{28}$  de proceso  $I_4, I_{13}, I_{22}, I_{21}$  y de producto  $I_7, I_{16}, I_{25}, I_{34}$  en los ámbitos de las fases del ciclo de vida “Diseño → Fabricación→ Uso → Fin de vida” (DI→FA→US→FV).
- Para un análisis desde la dimensión ambiental de los ámbitos de la ingeniería propuestos se considera las familias de indicadores en el ámbito de materiales  $I_2, I_{11}, I_{20}, I_{29}$  de proceso  $I_5, I_{14}, I_{23}, I_{32}$  de producto  $I_8, I_{17}, I_{26}, I_{35}$ . en los ámbitos de las fases del ciclo de vida (DI→FA→US→FV).
- Para un análisis de la dimensión social de los ámbitos del proceso industrial se consideran los indicadores de las familias en el ámbito de materiales  $I_3, I_{12}, I_{21}, I_{30}$  de proceso  $I_6, I_{15}, I_{24}, I_{33}$  de producto  $I_9, I_{18}, I_{27}, I_{36}$  en los ámbitos de las fases del ciclo de vida (DI→FA→US→FV).

En el sentido horizontal, se puede realizar evaluaciones del análisis de ingeniería del proceso considerando las dimensiones de sostenibilidad en las fases del ciclo de vida (DI→FA→US→FV) de lo que se fabrica (ver Tabla 4.16). En sentido vertical se prioriza las dimensiones de sostenibilidad.

Tabla 4.16. Matriz VI - ACD: Evaluaciones (fuente: elaboración propia).

	Económica	Ambiental	Social	Análisis Horizontal Evaluación.
Materiales	$I_{1,10,19,28}$	$I_{2,11,20,29}$	$I_{3,12,21,30}$	De los materiales/insumos desde la perspectiva de las dimensiones de sostenibilidad considerando (DI→FA→US→FV).
Proceso	$I_{4,13,22,21}$	$I_{5,14,23,32}$	$I_{6,15,24,33}$	Del proceso desde las dimensiones de sostenibilidad considerando (DI→FA→US→FV).
Producto	$I_{7,10,19,28}$	$I_{8,17,26,35}$	$I_{9,18,27,36}$	Del producto desde las dimensiones de sostenibilidad considerando (DI→FA→US→FV).
Análisis Vertical Evaluación:	↓	↓	↓	De la dimensión social del análisis de ingeniería considerando las fases de ciclo de vida. (DI→FA→US→FV)
	↓	↓	↓	De la dimensión ambiental del análisis de ingeniería considerando las fases de ciclo de vida (DI→FA→US→FV).
	↓	↓	↓	De la dimensión económica del análisis de ingeniería considerando las fases del ciclo de vida (DI→FA→US→FV).

#### 4.5.7. Relación de Matrices y Familias de indicadores.

Es importante tomar en cuenta que para el análisis de indicadores se requiere seleccionar la matriz de análisis que queremos aplicar. La Tabla 4.17 muestra los ámbitos de análisis que han permitido construir las matrices.

Tabla 4.17. Ámbitos de análisis de la propuesta (fuente: elaboración propia).

Matriz	Ámbito I	Ámbito II	Ámbito III	Relación
I-CAD	Ciclo de Vida	Análisis de Ingeniería	Dimensión Sostenibilidad	I & IV
II-CDA	Ciclo de Vida	Dimensión Sostenibilidad	Análisis de Ingeniería	II & V
III-DCA	Dimensión Sostenibilidad	Ciclo de Vida	Análisis de Ingeniería	III & VI
IV-DAC	Dimensión Sostenibilidad	Análisis de Ingeniería	Ciclo de Vida	IV & I
V-ADC	Análisis de Ingeniería	Dimensión Sostenibilidad	Ciclo de Vida	V & II
VI-ACD	Análisis de Ingeniería	Ciclo de Vida	Dimensión Sostenibilidad	VI & III

Como se muestra en la Figura 4.12, la **Matriz I-CAD** se relaciona con la **Matriz IV-DAC** ya que los grupos de indicadores e índices se ordenan de manera similar entre la **Matriz I** y **Matriz IV** en forma vertical, lo cual facilita su estudio.

		MATRIZ DE ANALISIS					
		I-CAD	II-CDA	III-DCA	IV-DAC	V-ADC	VI-ACD
MATRIZ DE ANALISIS	I-CAD				Grupo de indicadores similares (12)		Índice Dimensiones de sostenibilidad
	II-CDA			Índice Análisis de Ingeniería		Grupos de indicadores similares (12)	
	III-DCA		Índice Análisis de Ingeniería				Grupos de indicadores similares (9)
	IV-DAC	Grupos de indicadores similares (12)				Índice Ciclo de Vida	
	V-ADC		Grupos de indicadores similares (12)		Índice Ciclo de Vida		
	VI-ACD	Índice Dimensiones de Sostenibilidad		Grupos de indicadores similares (9)			

Figura 4.12. Relaciones y Análisis de las Matrices. (fuente: elaboración propia).

En cada una de las 6 matrices, se generan 36 familias de indicadores, las cuales se encuentran distribuidas de acuerdo con lo que se presenta en la Figura 4.13, en la cual hemos suprimido la letra I del indicador para facilitar su identificación. Por ejemplo, en cada una de las matrices, seleccionamos las familias de indicadores  $I_{13}$ ,  $I_{14}$ ,  $I_{15}$  que comprenden la fase de fabricación desde el ámbito del proceso y observamos como se encuentran distribuidas de diferente forma, dependiendo de la matriz que seleccionemos.

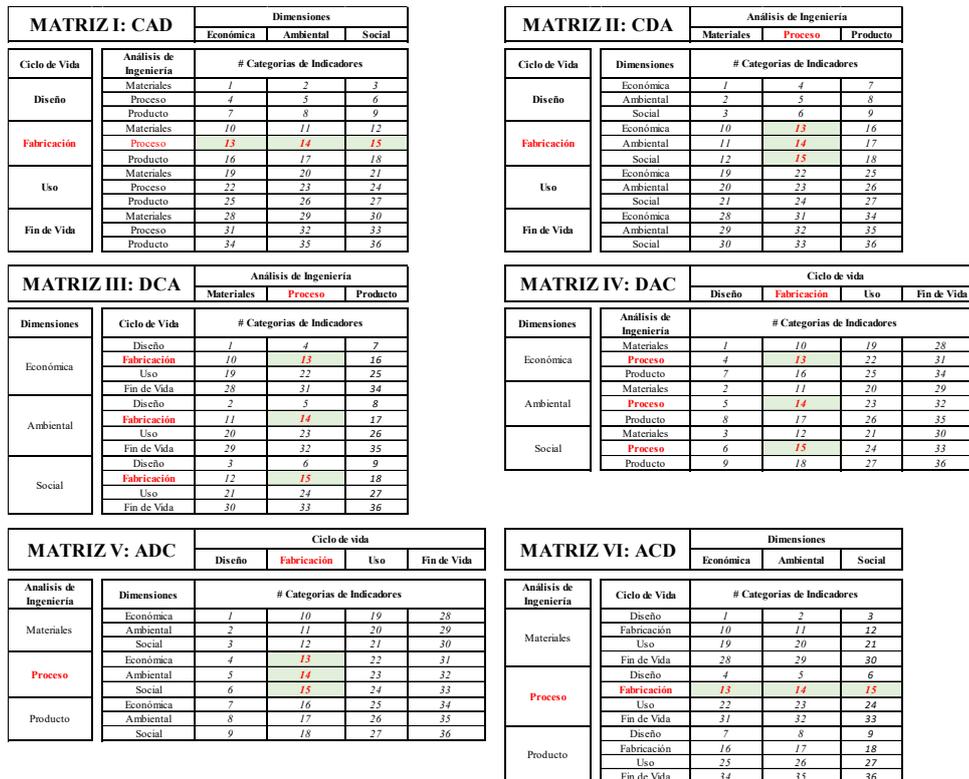


Figura 4.13. Relación entre Indicadores de las Matrices de Análisis (fuente: elaboración propia).

En la Figura 4.14, por ejemplo, se especifica la relación de ámbitos del indicador  $I_1$ .

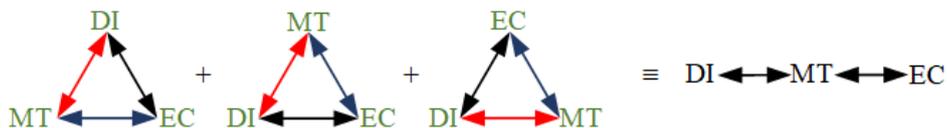


Figura 4.14. Ejemplo de ámbitos de análisis: Indicador  $I_1$ . (fuente: elaboración propia).

Para los demás indicadores, del I<sub>1</sub> al I<sub>36</sub> se especifica su relación utilizando idéntico criterio al anterior mencionado y su codificación se explica como se muestra a continuación (ver Tabla 4.18).

Tabla 4.18. Propuesta de Codificación de Indicadores de Sostenibilidad (fuente: elaboración propia).

<b>I# Familia Diseño</b>	<b>I# Familia Fabricación</b>	<b>I# Familia Uso</b>	<b>I# Familia Fin de Vida</b>
I <sub>1</sub> = DI↔MT↔EC	I <sub>10</sub> = FA↔MT↔EC	I <sub>19</sub> = US↔MT↔EC	I <sub>28</sub> = FV↔MT↔EC
I <sub>2</sub> = DI↔MT↔AM	I <sub>11</sub> = FA↔MT↔AM	I <sub>20</sub> = US↔MT↔AM	I <sub>29</sub> = FV↔MT↔AM
I <sub>3</sub> = DI↔MT↔SO	I <sub>12</sub> = FA↔MT↔SO	I <sub>21</sub> = US↔MT↔SO	I <sub>30</sub> = FV↔MT↔SO
I <sub>4</sub> = DI↔PR↔EC	I <sub>13</sub> = FA↔PR↔EC	I <sub>22</sub> = US↔PR↔EC	I <sub>31</sub> = FV↔PR↔EC
I <sub>5</sub> = DI↔PR↔AM	I <sub>14</sub> = FA↔PR↔AM	I <sub>23</sub> = US↔PR↔AM	I <sub>32</sub> = FV↔PR↔AM
I <sub>6</sub> = DI↔PR↔SO	I <sub>15</sub> = FA↔PR↔SO	I <sub>24</sub> = US↔PR↔SO	I <sub>33</sub> = FV↔PR↔SO
I <sub>7</sub> = DI↔PD↔EC	I <sub>16</sub> = FA↔PD↔EC	I <sub>25</sub> = US↔PD↔EC	I <sub>34</sub> = FV↔PD↔EC
I <sub>8</sub> = DI↔PD↔AM	I <sub>17</sub> = FA↔PD↔AM	I <sub>26</sub> = US↔PD↔AM	I <sub>35</sub> = FV↔PD↔AM
I <sub>9</sub> = DI↔PD↔SO	I <sub>18</sub> = FA↔PD↔SO	I <sub>27</sub> = US↔PD↔SO	I <sub>36</sub> = FV↔PD↔SO

En la Tabla 4.19 planteamos las diferentes opciones de indicadores a presentarse en la propuesta:

Tabla 4.19. Características de los Indicadores de Sostenibilidad (fuente: elaboración propia).

<b>Indicador</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Detalle general</b>
Cuantitativos	↗ Cuantitativo Max.	Maximizar	El máximo valor es mejor. Se busca el mayor valor, su análisis proviene de datos cuantificables.
	↘ Cuantitativo Min.	Minimizar	El mínimo valor es mejor. Se busca el menor valor, su análisis proviene de datos cuantificables
Cualitativos	↗ Cualitativo Max.	Maximizar	El máximo valor es mejor. Se busca el mayor valor, su análisis proviene de datos cualitativos
	↘ Cualitativo Min.	Minimizar	El mínimo valor es mejor. Se busca el menor valor, su análisis proviene de datos cualitativos

#### 4.6. Integración del Modelo de Mecanizado en Entornos Colaborativos

Para desarrollar nuestra propuesta de indicadores en entornos colaborativos, seleccionaremos la Matriz I (Matriz CAD) la cual se alimenta de los criterios de los ámbitos de ciclo de vida, sostenibilidad y del análisis de ingeniería ( ver Figura 4.15) en la que se observa la interacción con el entorno colaborativo, en el cual las decisiones a nivel del proceso de fabricación se registran en el CAM y código G el cual tiene injerencia en la fabricación de la pieza mecanizada. Sin descuidar que hay un trabajo intenso en la planificación de la producción para que se la pueda llevar a cabo, la etapa de diseño juega un papel importante, ya que calcula y simula principalmente trayectorias de mecanizado y tiempos de corte.

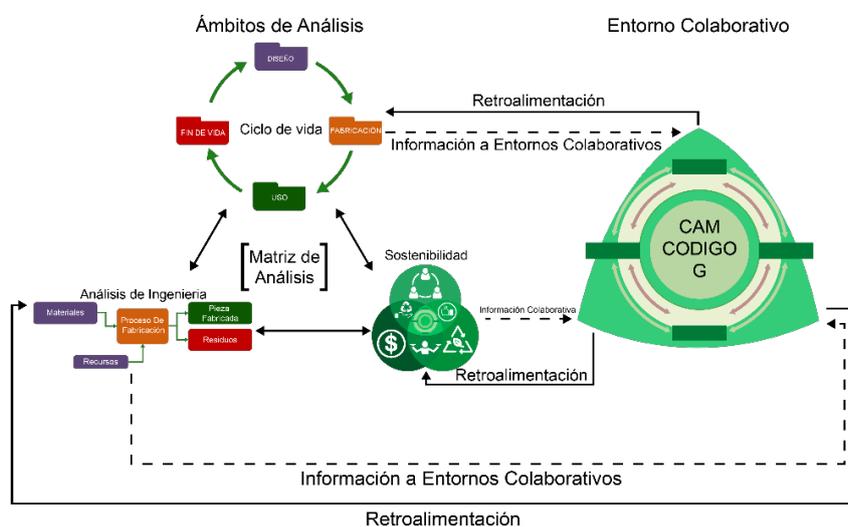


Figura 4.15. Integración de Ámbitos de Análisis y Sostenibilidad. (fuente: elaboración propia).

En la figura anterior (Figura 4.15) se muestra el esquema simplificado para el proceso de mecanizado, que resume los diferentes ámbitos de la propuesta y que facilite su entendimiento, pero en su manera más amplia debe considerarse el modelo de fabricación sostenible que se detalla en la Figura 4.9, el cual lista a detalle las entradas y salidas, así como los recursos a ser considerados. El uso de plataformas PLM, como por ejemplo 3DEXPERIENCE, permite manejar la información y dar la retroalimentación en tiempo real. Dependiendo del tamaño de la empresa, se podría definir un flujo de información que se desarrolle con el uso de “apps” y redes sociales; en cambio para empresas de menores recursos, se puede desarrollar una aplicación a medida. Las herramientas colaborativas, permiten tener información que se registra a nivel de taller por medios electrónicos, que sea parte de un sistema informático y que permita tener información del proceso en tiempo real y dar soporte a lo que se denomina Industria 4.0.

### 4.7. Propuesta de Indicadores para el Ciclo de Vida

En la elaboración de nuestra propuesta, la matriz seleccionada para realizar los indicadores del ciclo de vida es la Matriz I CAD, y en la Tabla 4.20 se muestra el orden de indicadores que utilizaremos, los cuales los agrupamos de acuerdo con las “Fichas de Indicadores” que van del #01 al #12. Lo que denominamos Fichas, es una manera de agrupar los índices por criterios similares para que se los pueda identificar con facilidad.

Tabla 4.20. Ficha de Codificación de los Indicadores de Sostenibilidad (fuente: elaboración propia).

Ficha de Indicadores	Económico	Ambiental	Social	Grupo
#01 I <sub>DI↔MT</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	I <sub>3</sub>	Diseño ↔ Materiales
#02 I <sub>DI↔PR</sub>	I <sub>4</sub>	I <sub>5</sub>	I <sub>6</sub>	Diseño ↔ Proceso
#03 I <sub>DI↔PD</sub>	I <sub>7</sub>	I <sub>8</sub>	I <sub>9</sub>	Diseño ↔ Producto
#04 I <sub>FA↔MT</sub>	I <sub>10</sub>	I <sub>11</sub>	I <sub>12</sub>	Fabricación ↔ Materiales
#05 I <sub>FA↔PR</sub>	I <sub>13</sub>	I <sub>14</sub>	I <sub>15</sub>	Fabricación ↔ Proceso
#06 I <sub>FA↔PD</sub>	I <sub>16</sub>	I <sub>17</sub>	I <sub>18</sub>	Fabricación ↔ Producto
#07 I <sub>US↔MT</sub>	I <sub>19</sub>	I <sub>20</sub>	I <sub>21</sub>	Uso ↔ Materiales
#08 I <sub>US↔PR</sub>	I <sub>22</sub>	I <sub>23</sub>	I <sub>24</sub>	Uso ↔ Proceso
#09 I <sub>US↔PD</sub>	I <sub>25</sub>	I <sub>26</sub>	I <sub>27</sub>	Uso ↔ Producto
#10 I <sub>FV↔MT</sub>	I <sub>28</sub>	I <sub>29</sub>	I <sub>30</sub>	Fin de Vida ↔ Materiales
#11 I <sub>FV↔PR</sub>	I <sub>31</sub>	I <sub>32</sub>	I <sub>33</sub>	Fin de Vida ↔ Proceso
#12 I <sub>FV↔PD</sub>	I <sub>34</sub>	I <sub>35</sub>	I <sub>36</sub>	Fin de Vida ↔ Producto

Cabe indicar que los indicadores pueden estar compuestos de varios niveles y subniveles de medición, los cuales se agrupan y se totalizan. La cantidad de variables a analizar dependerá de los requerimientos solicitados. En la Figura 4.16 se presenta un ejemplo para el I<sub>1</sub> que podría tener variables que van desde la I<sub>1a</sub> a la I<sub>1@</sub> en la dimensión económica. De igual manera para las demás 36 familias de indicadores.

$$I_1 = f(I_{1@}) = f(I_{1a}, I_{1b}, \dots, I_{1@}) = f \left\{ \begin{array}{l} I_{1a} = \text{Medición } \alpha_{EC} \\ I_{1b} = \text{Medición } \beta_{EC} \\ I_{1c} = \text{Medición } \gamma_{EC} \\ I_{1d} = \text{Medición } \delta_{EC} \\ I_{1e} = \text{Medición } \phi_{EC} \\ I_{1f} = \text{Medición } \omega_{EC} \\ \dots \\ I_{1@} = \text{Medición } \infty_{EC} \end{array} \right\}$$

Figura 4.16. Ejemplo de agrupación de subniveles del Indicador I<sub>1</sub>. (fuente: elaboración propia).

4.7.1. Indicadores en Fase de Diseño.

La propuesta de indicadores para el mecanizado en la fase de diseño se muestra en la Tabla 4.21. En muchos casos se puede disponer de ecuaciones experimentales, bases de datos y estándares del proceso productivo. En esta tabla el símbolo “\*” representa que los indicadores por lo general son pronosticados, estimados o simulados y que tiene una fuente de datos o se soportan con la ayuda del software de diseño o de fabricación.

Tabla 4.21. Propuesta de Indicadores de mecanizado - Fase: Diseño (fuente: elaboración propia).

Etapa	Nombre del Indicador	Siglas	Unidad ejemplo	Indicador		Fuente de Datos
				Familia	Tipo	
Materiales #01	Coste de Materiales*	DI.MT.C <sub>M</sub>	€ ; £ ; \$ ;	↗I <sub>1</sub> ;I <sub>2</sub> ;I <sub>3</sub>	K	@
	Tipo de Materiales*	DI.MT.T <sub>M</sub>	Opción	↗I <sub>1</sub> ;I <sub>2</sub> ;I <sub>3</sub>	K	@
	Propiedades de Material*	DI.MT.P <sub>R</sub>	#	↗I <sub>1</sub> ;I <sub>2</sub> ;I <sub>3</sub>	K	@
	Funcionalidad	DI.MT.F <sub>U</sub>	%	↗I <sub>1</sub> ;I <sub>2</sub> ;I <sub>3</sub>	K	@
	Integridad Superficial*	DI.MT.I <sub>S</sub>	#	↗I <sub>1</sub> ;I <sub>2</sub> ;I <sub>3</sub>	K	@
	Requerimientos Mecánicos*	DI.MT.R <sub>M</sub>	&	↗I <sub>1</sub> ;I <sub>2</sub> ;I <sub>3</sub>	K	@
	Perdidas por corte*	DI.MT.P <sub>C</sub>	% ; kg	↗I <sub>1</sub> ;I <sub>2</sub> ;I <sub>3</sub>	K	@
Diseño Proceso* #02	Coste de diseño*	DI.PR.C <sub>CAL</sub>	€ ; £ ; \$ ;	↘I <sub>4</sub> ;I <sub>5</sub> ;I <sub>6</sub>	K	@
	Coste de Material/Insumos*	DI.PR.MT <sub>CAL</sub>	€ ; £ ; \$ ;	↘I <sub>4</sub> ;I <sub>5</sub> ;I <sub>6</sub>	K	@
	Tiempo de Mecanizado*	DI.PR.TM <sub>CAM</sub>	s ; min	↘I <sub>4</sub> ;I <sub>5</sub> ;I <sub>6</sub>	K	@
	Tasa Eliminación de Material*	DI.PR.TEM <sub>CAM</sub>	cm <sup>3</sup> /s	↗I <sub>4</sub> ;I <sub>5</sub> ;I <sub>6</sub>	K	@
	Estrategia de Mecanizado*	DI.PR.ES <sub>CAM</sub>	# opción	↗I <sub>4</sub> ;I <sub>5</sub> ;I <sub>6</sub>	K	@
	Fuerza requerida*	DI.PR.F <sub>CAL</sub>	N	↘I <sub>4</sub> ;I <sub>5</sub> ;I <sub>6</sub>	K	@
	Potencia requerida*	DI.PR.P <sub>CAL</sub>	kWh	↗I <sub>4</sub> ;I <sub>5</sub> ;I <sub>6</sub>	K	@
	Consumo Energía*	DI.PR.E <sub>CAL</sub>	kWh	↗I <sub>4</sub> ;I <sub>5</sub> ;I <sub>6</sub>	K	@
Análisis Seguro de Trabajo*	DI.PR.AST	&	↗I <sub>4</sub> ;I <sub>5</sub> ;I <sub>6</sub>	K	@	
Producto* #03	Coste unitario producto*	DI.PR.C <sub>CAL</sub>	€ ; £ ; \$ ;	↘I <sub>7</sub> ;I <sub>8</sub> ;I <sub>9</sub>	K	@
	Funcionalidad*	DI.PD.Fu	#	↗I <sub>7</sub> ;I <sub>8</sub> ;I <sub>9</sub>	K	@
	Volumen*	DI.PR.Vo	m <sup>3</sup>	↗I <sub>7</sub> ;I <sub>8</sub> ;I <sub>9</sub>	K	@
	Superficie*	DI.PR.Su	m <sup>2</sup>	↗I <sub>7</sub> ;I <sub>8</sub> ;I <sub>9</sub>	K	@
	Requerimientos de uso*	DI.PR.Re	#	↗I <sub>7</sub> ;I <sub>8</sub> ;I <sub>9</sub>	K	@

Nota: \*; Calculado o Simulado utilizando formulas u Ordenador, K: Indicador Cuantitativo; Q Indicador Cualitativo, &: Varias unidades; @ Bases de datos o Catálogos y Normas de Referencia; ↗ Valor máximo es mejor; ↘ Valor mínimo es mejor

#### 4.7.2. Indicadores en Fase de Fabricación.

La matriz que utilizamos para el análisis es la **Matriz I - CAD** y para ser más didáctico en la evaluación del modelo, a los 9 indicadores principales que corresponden a fabricación, los agruparemos en 3 grupos principales que se describen en la Figura 4.17 y que se explica a continuación.

$$\text{Fabricación} \left\{ \begin{array}{l} \text{Material} \left\{ \begin{array}{l} \text{Económica} \\ \text{Ambiental} \\ \text{Social} \end{array} \right. \\ \text{Proceso} \left\{ \begin{array}{l} \text{Económica} \\ \text{Ambiental} \\ \text{Social} \end{array} \right. \\ \text{Producto} \left\{ \begin{array}{l} \text{Económica} \\ \text{Ambiental} \\ \text{Social} \end{array} \right. \end{array} \right. \left. \begin{array}{l} I_{FA \leftrightarrow MT \leftrightarrow EC} \equiv I_{10} \\ I_{FA \leftrightarrow MT \leftrightarrow AM} \equiv I_{11} \\ I_{FA \leftrightarrow MT \leftrightarrow SO} \equiv I_{12} \\ I_{FA \leftrightarrow PR \leftrightarrow EC} \equiv I_{13} \\ I_{FA \leftrightarrow PR \leftrightarrow AM} \equiv I_{14} \\ I_{FA \leftrightarrow PR \leftrightarrow SO} \equiv I_{15} \\ I_{FA \leftrightarrow PD \leftrightarrow EC} \equiv I_{16} \\ I_{FA \leftrightarrow PD \leftrightarrow AM} \equiv I_{17} \\ I_{FA \leftrightarrow PD \leftrightarrow SO} \equiv I_{18} \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} I_{10} \\ I_{11} \\ I_{12} \\ I_{13} \\ I_{14} \\ I_{15} \\ I_{16} \\ I_{17} \\ I_{18} \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} I_{FA \leftrightarrow MT} \\ I_{FA \leftrightarrow PR} \\ I_{FA \leftrightarrow PD} \end{array} \right\} I_{FA}$$

Figura 4.17. Indicadores del Modelo de Sostenibilidad – Fase: Fabricación. (fuente: elaboración propia).

Los Indicadores  $I_{10}$  al  $I_{18}$  pueden contener indicadores de nivel inferior que deben ser totalizados de ser el caso. Se utiliza la simbología  $I_{10a}, I_{10b}, \dots, I_{10z}$  dependiendo los indicadores que se analicen.

La presente Tesis doctoral se enfoca principalmente en la etapa de fabricación, con un análisis del proceso de mecanizado en las tres dimensiones de sostenibilidad y que corresponde a los indicadores  $I_{13}$   $I_{14}$   $I_{15}$ . En la Figura 4.18 se muestra el flujo de información para mejorar la sostenibilidad en la fase de ciclo de vida, medida en el proceso.

Los roles colaborativos, planteados en la Figura 4.3 son los que proveen el flujo de información y lo retroalimentan. Cabe indicar que la propuesta de flujo de indicadores se puede aplicar en todos los 36 grupos de indicadores. Para la Fase de fabricación en lo que corresponde al proceso tenemos:

- $I_{FA \leftrightarrow MT}$  relaciona los indicadores de las familias  $I_{10}, I_{11}, I_{12}$  (Tabla 4.22), y para facilitar se los agrupa en la ficha de indicadores 04.
- $I_{FA \leftrightarrow PR}$  relaciona los indicadores de las familias  $I_{13}, I_{14}, I_{15}$  (Tabla 4.23), y para facilitar se los agrupa en la ficha de indicadores 05.
- $I_{FA \leftrightarrow PD}$  relaciona los indicadores de las familias  $I_{16}, I_{17}, I_{18}$  (Tabla 4.24), y para facilitar se los agrupa en la ficha de indicadores 06.

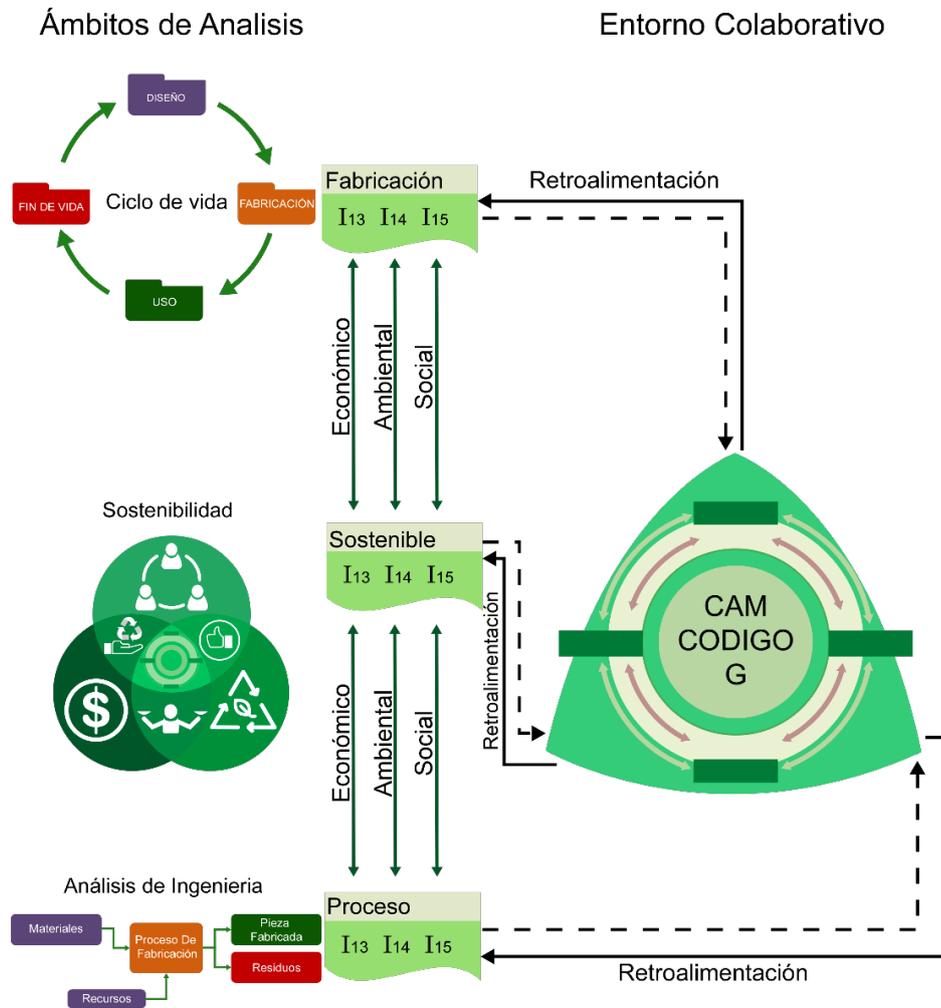


Figura 4.18. Flujo de Información Fase: Fabricación-Proceso. (fuente: elaboración propia).

Los ámbitos que se están analizando, requieren de información que se va generando por los diferentes colaboradores que intervienen en el proceso de fabricación, la cual es tabulada y a la vez es compartida. También la información puede ser visualizada y analizada por otros colaboradores, los cuales pueden emitir sus criterios para una retroalimentación. Es de esa manera como el entorno colaborativo apalanca el modelo de fabricación.

Tabla 4.22. Índice  $I_{FA \leftrightarrow MT}$ : Fase de Fabricación - Materiales (fuente: elaboración propia).

<b><math>I_{FA \leftrightarrow MT}</math></b>		
<b>FABRICACIÓN &amp; MATERIAL &amp; (ECONÓMICA / AMBIENTAL / SOCIAL)</b>		
<i>Fase del Ciclo de Vida</i> <b>Fabricación</b>	<i>Análisis de Ingeniería</i> <b>Material</b>	
Nombre del Grupo de Indicadores	En la fase de fabricación se considera los materiales e insumos necesarios para la fabricación del producto que serán medidos desde las dimensiones de sostenibilidad.	
<i>Dimensiones de Sostenibilidad</i>		
<b>Económica</b>	<b>Ambiental</b>	<b>Social</b>
<b><math>I_{10}</math></b>	<b><math>I_{11}</math></b>	<b><math>I_{12}</math></b>
<u>Familia del Indicador:</u> Coste de fabricar el material (Económico)	<u>Familia del Indicador:</u> Impacto de fabricar el material (Ambiental)	<u>Familia del Indicador:</u> Labor de fabricar el material (Social)
<u>Código:</u> FA ↔ MT ↔ EC	<u>Código:</u> FA ↔ MT ↔ AM	<u>Código:</u> FA ↔ MT ↔ SO
<u>Tipo de Indicador:</u> Cuantitativo	<u>Tipo de Indicador:</u> Cuantitativo	<u>Tipo de Indicador:</u> Cuantitativo / Cualitativo
<u>Definición:</u> Determinar los costes de las materias primas, insumos, facilidades y recursos que van a ser utilizados en la elaboración de la pieza.	<u>Definición:</u> Determinar los impactos ambientales, de los materiales e insumos que van a ser utilizados en la elaboración de la pieza.	<u>Definición:</u> Determinar las condiciones laborales y sociales de la elaboración de los materiales e insumos que van a ser utilizados en la elaboración de la pieza.
<u>Objetivo:</u> Evaluar los costes de la fabricación de los materiales / insumos.	<u>Objetivo:</u> Evaluar el impacto ambiental de la fabricación de los materiales / insumos.	<u>Objetivo:</u> Evaluar las condiciones laborales de los colaboradores de los materiales / insumos.
<u>Unidad de medida:</u> € ; \$ ; £ ; ¥	<u>Unidad de medida:</u> Kg; %; Kg de CO <sub>2</sub> eq	<u>Unidad de medida:</u> %
<u>Ejemplo Indicadores Típicos (material):</u> I <sub>10a</sub> Coste Fabricar Insumos I <sub>10b</sub> Coste Fabricar Ensayo I <sub>10c</sub> Coste Fabricar Logística I <sub>10d</sub> Coste Fabricar Preparar I <sub>10e</sub> Coste Fabricar Planear I <sub>10f</sub> Coste Fabricar Ingeniería .....	<u>Ejemplo Indicadores Típicos (material):</u> I <sub>11a</sub> Impacto Fabricar Insumos I <sub>11b</sub> Impacto Evaluar Insumos I <sub>11c</sub> Impacto Logística Insumos I <sub>11d</sub> Impacto Preparar Insumos .....	<u>Ejemplo Indicadores Típicos (material):</u> I <sub>12a</sub> Labor Fabricar Insumos I <sub>12b</sub> Labor Fabricar Ensayos I <sub>12c</sub> Labor Fabricar Logística I <sub>12d</sub> Labor Fabricar Preparar .....
<u>Optimización:</u> Coste: ↘ Cuantitativo Min. Ganancia: ↗ Cuantitativo Max.	<u>Optimización:</u> Impacto ↘ Cuantitativo Min.	<u>Optimización:</u> Labor ↗ Cualitativo Max.
<u>Documentos Referenciales:</u> Bases de datos de costes Referencias bibliográficas Listas de precios	<u>Documentos Referenciales:</u> Bases de datos Impactos Referencias bibliográficas Estudios de Impactos Ambientales	<u>Documentos Referenciales:</u> Bases de datos y referencias bibliográficas que contengan información del clima laboral y estrategias de la fabricación de los materiales.

Tabla 4.23. Índice  $I_{FA \leftrightarrow PR}$ : Fase de Fabricación - Proceso (fuente: elaboración propia).

<b><math>I_{FA \leftrightarrow PR}</math></b>		
<b>FABRICACIÓN &amp; PROCESO &amp; (ECONÓMICA / AMBIENTAL / SOCIAL)</b>		
<i>Fase del Ciclo de Vida</i> <b>Fabricación</b>	<i>Análisis de Ingeniería</i> <b>Proceso</b>	
Nombre del Grupo de Indicadores	En la fase de fabricación se consideran los procesos necesarios para la elaboración del producto que serán medidos desde las dimensiones de sostenibilidad.	
<i>Dimensiones de Sostenibilidad</i>		
<b>Económica</b>	<b>Ambiental</b>	<b>Social</b>
<b>Familia del Indicador:</b> Coste de realizar el proceso (Económico)	<b>Familia del Indicador</b> Impacto de realizar el proceso (Ambiental)	<b>Familia del Indicador</b> Labor de realizar el proceso (Social)
<b>Código:</b> FA↔PR↔EC	<b>Código:</b> FA↔PR↔AM	<b>Código:</b> FA↔PR↔SO
<b>Tipo de Indicador:</b> Cuantitativo	<b>Tipo de Indicador:</b> Cuantitativo	<b>Tipo de Indicador:</b> Cualitativo / Cuantitativo
<b>Definición:</b> Determinar los costes de realizar el proceso de fabricación.	<b>Definición:</b> Determinar los impactos ambientales, de realizar el proceso.	<b>Definición:</b> Determinar los impactos laborales y sociales de realizar el proceso.
<b>Objetivo:</b> Evaluar los costes del proceso de fabricación al elaborar los diferentes elementos.	<b>Objetivo:</b> Evaluar el impacto ambiental de realizar el proceso de fabricación.	<b>Objetivo:</b> Evaluar el desempeño del colaborador, en las condiciones del proceso de producción, el clima laboral y la cultura de la empresa.
<b>Unidad de medida:</b> € ; \$ ; £ ; ¥	<b>Unidad de medida:</b> Kg ; % ; Kg de CO <sub>2</sub> eq	<b>Unidad de medida:</b> %
<b>Indicadores Típicos (proceso):</b> I <sub>13a</sub> Coste Fabricar Material I <sub>13b</sub> Coste Fabricar Ensayos I <sub>13c</sub> Coste Fabricar Logística I <sub>13d</sub> Coste Fabricar Preparar I <sub>13e</sub> Coste Fabricar Planear I <sub>13f</sub> Coste Fabrica Ingeniería .....	<b>Indicadores Típicos (proceso):</b> I <sub>14a</sub> Impacto Fabricar Material I <sub>14b</sub> Impacto Fabricar Ensayos I <sub>14c</sub> Impacto Fabricar Logística I <sub>14d</sub> Impacto Fabricar Preparar .....	<b>Indicadores Típicos (proceso):</b> I <sub>15a</sub> Productividad I <sub>15b</sub> Relaciones con los demás I <sub>15c</sub> Habilidades individuales I <sub>15d</sub> Flexibilidad de rotación I <sub>15e</sub> Puntualidad .... I <sub>15h</sub> Ambiente de trabajo
<b>Optimización:</b> Coste: ↘ Cuantitativo Min. Ganancia: ↗ Cuantitativo Max.	<b>Optimización:</b> Impacto ↘ Cuantitativo Min.	<b>Optimización:</b> Inclusión ↗ Cualitativo Max.
<b>Documentos Referenciales:</b> Bases de datos de costes Referencias bibliográficas Listas de precios	<b>Documentos Referenciales:</b> Bases de datos Impactos Referencias bibliográficas Estudios de Impactos Ambientales	<b>Documentos Referenciales:</b> Bases de datos y referencias bibliográficas que contengan evaluaciones del proceso de fabricación y en general del ambiente en donde se desarrolla el proceso productivo.

Tabla 4.24. Índice  $I_{FA \leftrightarrow PR}$ : Fase de Fabricación - Producto (fuente: elaboración propia).

$I_{FA \leftrightarrow PR}$		
<b>FABRICACIÓN &amp; PRODUCTO &amp; (ECONÓMICA / AMBIENTAL / SOCIAL)</b>		
<i>Fase del Ciclo de Vida</i> <b>Fabricación</b>	<i>Análisis de Ingeniería</i> <b>Producto</b>	
Nombre de la familia de Indicadores	En la fase de fabricación se considera las características de la pieza fabricada.	
<i>Dimensiones de Sostenibilidad</i>		
<b>Económica</b>	<b>Ambiental</b>	<b>Social</b>
$I_{16}$	$I_{17}$	$I_{18}$
<b>Nombre del Indicador:</b> Coste de fabricar el producto (económico)	<b>Nombre del Indicador</b> Impacto de fabricar el producto (ambiental)	<b>Nombre del Indicador</b> Labor de fabricar el producto (social)
<b>Código:</b> FA↔PD↔EC	<b>Código:</b> FA↔PD↔AM	<b>Código:</b> FA↔PD↔SO
<b>Tipo de Indicador:</b> Cuantitativo	<b>Tipo de Indicador:</b> Cuantitativo	<b>Tipo de Indicador:</b> Cualitativo / Cuantitativo
<b>Definición:</b> Determinar los costes del producto fabricado	<b>Definición:</b> Determinar los impactos ambientales, del producto fabricado.	<b>Definición:</b> Determinar los impactos laborales y sociales del producto fabricado.
<b>Objetivo:</b> Evaluar los costes del producto fabricado, en cada una de sus etapas.	<b>Objetivo:</b> Evaluar el impacto ambiental del producto fabricado en cada una de sus etapas.	<b>Objetivo:</b> Evaluar el impacto laboral de fabricar el producto.
<b>Unidad de medida:</b> € ; \$ ; £ ; ¥	<b>Unidad de medida:</b> Kg ; % ; Kg de CO <sub>2</sub> eq	<b>Unidad de medida:</b> %
<b>Indicadores Típicos (producto):</b> I <sub>16a</sub> Coste Fabricar Material I <sub>16b</sub> Coste Fabricar Ensayos I <sub>16c</sub> Coste Fabricar Logística I <sub>16d</sub> Coste Fabricar Preparar I <sub>16e</sub> Coste Fabricar Planear I <sub>16f</sub> Coste Fabricar Ingeniería	<b>Indicadores Típicos (producto):</b> I <sub>17a</sub> Impacto Fabricar Material I <sub>17b</sub> Impacto Fabricar Ensayos I <sub>17c</sub> Impacto Fabricar Logística I <sub>17d</sub> Impacto Fabricar Preparar .....	<b>Indicadores Típicos (producto):</b> I <sub>18a</sub> Labor Fabricar Material I <sub>18b</sub> Labor Fabricar Ensayos I <sub>18c</sub> Labor Fabricar Logística I <sub>18d</sub> Labor Fabricar Preparar .....
<b>Optimización:</b> Coste: ↘ Cuantitativo Min. Ganancia: ↗ Cuantitativo Max.	<b>Optimización:</b> Impacto ↘ Cuantitativo Min.	<b>Optimización:</b> Inclusión ↗ Cualitativo Max.
<b>Documentos Referenciales:</b> Bases de datos de costes Referencias bibliográficas Listas de precios	<b>Documentos Referenciales:</b> Bases de datos Impactos Referencias bibliográficas Estudios de Impactos Ambientales	<b>Documentos Referenciales:</b> Bases de datos y referencias bibliográficas que contengan evaluaciones del producto elaborado por parte del personal que lo fabrica.

La propuesta general de indicadores en la fase de fabricación (ver Tabla 4.25) se detalla a continuación:

Tabla 4.25. Propuesta de Indicadores de mecanizado - Fase: Fabricación (fuente: elaboración propia).

Etapa	Nombre del Indicador	Siglas	Unidades (ejemplo)	Indicador Familia	Tipo	Fuente de Datos
Materiales #04	Coste Material/insumo					
	Plan de Corte de Material	FA.MA.Pc	und	$\searrow$ I <sub>10</sub> I <sub>11</sub> I <sub>12</sub>	K	@
	Mermas de corte	FA.MA.Mc	Kg	$\searrow$ I <sub>10</sub> I <sub>11</sub> I <sub>12</sub>	K	@
	Estrategias de Mecanizado	FA.MA.Es	und	$\searrow$ I <sub>10</sub> I <sub>11</sub> I <sub>12</sub>	K	@
	Tasa de eliminación de Material	FA.PR.T <sub>EM</sub>	m <sup>3</sup> /s	$\nearrow$ I <sub>13</sub>	K	@
	Tiempo de vida por filo	FA.PR.T <sub>VF</sub>	s/filo	$\nearrow$ I <sub>13</sub>	K	@
	Tasa de producción por filo	FA.PR.T <sub>PF</sub>	und/s	$\nearrow$ I <sub>13</sub>	K	@
	Coste de producción por componente	FA.PR.C <sub>PxC</sub>	€/und ; \$/und	$\searrow$ I <sub>13</sub>	K	@
	Consumo de Energía	FA.PR.C <sub>E</sub>	kWh	$\searrow$ I <sub>13</sub> ; $\searrow$ I <sub>14</sub>	K	@
	Temperatura de Corte	FA.PR.T <sub>C</sub>	°C; °F	$\searrow$ I <sub>13</sub> ; $\searrow$ I <sub>14</sub>	K	@
	Consumo refrigerante	FA.PR.C <sub>R</sub>	l ; m <sup>3</sup>	$\searrow$ I <sub>14</sub>	K, Q	@
	Emissiones de CO <sub>2</sub>	FA.PR.E <sub>C</sub>	kg CO <sub>2</sub>	$\searrow$ I <sub>14</sub>	K	@
	Productividad	FA.PR.P <sub>C</sub>	%	$\nearrow$ I <sub>15a</sub>	K, Q	@
	Relaciones laborales	FA.PR.R <sub>C</sub>	%	$\nearrow$ I <sub>15b</sub>	K, Q	@
	Habilidades	FA.PR.H <sub>C</sub>	%	$\nearrow$ I <sub>15c</sub>	K, Q	@
Proceso #05	Puntualidad	FA.PR.P <sub>C</sub>	%	$\nearrow$ I <sub>15d</sub>	K, Q	@
	Soporte empleador	FA.PR.S <sub>A</sub>	%	$\nearrow$ I <sub>15e</sub>	K, Q	@
	Satisfacción Total	FA.PR.S <sub>T</sub>	%	$\nearrow$ I <sub>15f</sub>	K, Q	@
	Ambiente Trabajo	FA.PR.A <sub>P</sub>	%	$\nearrow$ I <sub>15g</sub>	K, Q	@
	Ayuda Empleadores	FA.PR.A <sub>E</sub>	%	$\nearrow$ I <sub>15h</sub>	K, Q	@
	Requerimientos Colaboradores	FA.PR.RC <sub>C</sub>	%	$\nearrow$ I <sub>15i</sub>	K, Q	@
	Coste limpieza	FA.PD.C <sub>L</sub>	€ ; \$	$\searrow$ I <sub>16</sub>	K, Q	@
	Coste almacenamiento	FA.PD.C <sub>A</sub>	€ ; \$	$\searrow$ I <sub>16</sub>	K, Q	@
	Coste Control Calidad	FA.PD.C <sub>C</sub>	€ ; \$	$\searrow$ I <sub>16</sub>	K, Q	@
	Tiempo de obsolescencia	FA.PD.T <sub>O</sub>	años	$\searrow$ I <sub>17</sub>	K, Q	@
	Materiales de limpieza	FA.PD.M <sub>L</sub>	und	$\searrow$ I <sub>17</sub>	K, Q	@
	Integridad Superficial	FA.PD.I <sub>S</sub>	varias	$\nearrow$ $\searrow$ $\nearrow$ I <sub>16</sub>	K, Q	@
	Control dimensional	FA.PD.C <sub>D</sub>	mm; $\mu$ m	$\searrow$ I <sub>16</sub>	K, Q	@
	Rugosidad Superficial.	FA.PD.R <sub>a</sub>	$\mu$ m	$\searrow$ I <sub>17</sub>	K, Q	@
	Producto # 06					

Nota: \*; Calculado o Simulado utilizando formulas u Ordenador; K; Indicador Cuantitativo; Q Indicador Cualitativo; &; Varias unidades; @ Bases de datos o Catálogos y Normas de Referencia;  $\nearrow$  Valor máximo es mejor;  $\searrow$  Valor mínimo es mejor,  $\nearrow$   $\searrow$   $\nearrow$  Tendencia

#### 4.7.3. Indicadores en Fase de Uso.

En lo que respecta al uso, resumimos los indicadores generales que pueden contener otros de nivel inferior (ver Tabla 4.26). Esta fase puede ser analizada a profundidad por el cliente/usuario y dependerá de las condiciones de operación y mantenimiento en las que se utilice. A continuación, mencionamos algunos ejemplos de indicadores en esta fase.

Tabla 4.26. Propuesta de Indicadores de mecanizado - Fase: Uso (fuente: elaboración propia).

Etapa	Nombre del Indicador	Siglas	Unidad (ejemplo)	Indicador		Fuente de Información
				Familia	Tipo	
Uso	Material #07	Fungibles	US.MT.Fu.	# ; %	↗I <sub>19</sub> ;I <sub>20</sub> ;I <sub>21</sub>	K @
	Proceso #08	Recambios (repuestos)	US.MT.Re	#;%	↗I <sub>22</sub> ;I <sub>23</sub> ;I <sub>24</sub>	K @
	Producto #09	Consumo de energía	US.MT.Ce	kWh; %	↗I <sub>25</sub> ;I <sub>26</sub> ;I <sub>27</sub>	K @
		Mantenimiento	US.MT.Mt	# ; %	↗I <sub>25</sub> ;I <sub>26</sub> ;I <sub>27</sub>	K @

Nota: \*; Calculado o Simulado utilizando formulas u ordenador, K: Indicador Cuantitativo; Q Indicador Cualitativo, &: Varias unidades; @ Bases de datos o Catálogos y Normas de Referencia; ↗ Valor máximo es mejor; ↘ Valor mínimo es mejor

#### 4.7.4. Indicadores en Fase de Fin de vida.

Consideramos de igual manera indicadores generales para las actividades de fin de vida (material, proceso, producto) que deben desarrollarse y que pueden apalancar estrategias empresariales a ser usadas como una ventaja competitiva (ver Tabla 4.27). Cada uno de nosotros, como usuarios del producto, tenemos una responsabilidad compartida con el proveedor del producto o del servicio, el cual dependerá del grado de conciencia ambiental que tengamos.

Tabla 4.27. Propuesta de Indicadores de mecanizado - Fase: Fin de vida (fuente: elaboración propia).

Etapa	Nombre del Indicador	Siglas	Unidad (ejemplo)	Indicador		Fuente de Información
				Familia	Tipo	
Finde Vida	Material #10	Reciclaje	FV.MT.Re	kg ; %	↗I <sub>28</sub> ;I <sub>29</sub> ;I <sub>30</sub>	K @
	Proceso # 11	Remanufactura	FV.PD.Rm	kg ; %	↗I <sub>31</sub> ;I <sub>32</sub> ;I <sub>33</sub>	K @
		Reducción	FV.PR.Rd	kg ; %	↗I <sub>34</sub> ;I <sub>35</sub> ;I <sub>36</sub>	K @
	Producto # 12	Reutilizar	FV.PR.Ru	kg ; %	↗I <sub>34</sub> ;I <sub>35</sub> ;I <sub>36</sub>	K @
		Reciclar	FV.PR.Rc	kg ; %	↗I <sub>34</sub> ;I <sub>35</sub> ;I <sub>36</sub>	K @
		Rediseño	FV.PR.Rñ	kg ; %	↗I <sub>34</sub> ;I <sub>35</sub> ;I <sub>36</sub>	K @
		Recuperada	FV.PR.Rp	kg ; %	↗I <sub>34</sub> ;I <sub>35</sub> ;I <sub>36</sub>	K @
Remanufactura	FV.PR.Rm	kg ; %	↗I <sub>34</sub> ;I <sub>35</sub> ;I <sub>36</sub>	K @		

Nota: \*; Calculado o Simulado utilizando formulas u ordenador, K: Indicador Cuantitativo; Q Indicador Cualitativo, &: Varias unidades; @ Bases de datos o Catálogos y Normas de Referencia; ↗ Valor máximo es mejor; ↘ Valor mínimo es mejor

### 4.8. Ponderación de Indicadores

De las matrices descritas anteriormente, y dependiendo del análisis que se requiera se selecciona una de las seis que se han planteado, las cuales se encuentran codificadas de la I a la VI. Se selecciona la que facilite el análisis que estemos realizando.

#### 4.8.1. Ponderación de Indicadores Matriz I - Fases del Ciclo de Vida.

Dentro de estos macro indicadores, se tiene niveles de análisis que dependerán de la delimitación del análisis que definamos, ya que de las 36 familias que se describen en el modelo completo (I<sub>1</sub> a la I<sub>36</sub>) en la Figura 4.19 y Figura 4.20 se encuentra la propuesta inicial de pesos ponderados (balanceados e iniciales) bajo los criterios de la Matriz I, también pueden ser analizados en cada una de las fases del ciclo de vida (ver Tabla 4.28).

Tabla 4.28. Pesos ponderados Iniciales - Matriz I (4 Fases) (fuente: elaboración propia).

Total, Matriz	De Fase del Ciclo de Vida I <sub>XX</sub>	De Perspectiva de proceso de producción Industrial I <sub>YY</sub>	De Dimensión de Sostenibilidad I <sub>ZZ</sub>	De Medición I <sub>#</sub>
100%	$\frac{100}{4} = 25\%$	$\frac{100}{3} = 33.33\%$	$\frac{100}{3} = 33.33\%$	$\frac{100}{36} = 2.78\%$
Donde: I <sub>XX</sub> : Corresponde a I <sub>DI</sub> , I <sub>FA</sub> , I <sub>US</sub> , I <sub>FV</sub> I <sub>YY</sub> : Corresponde a I <sub>MT</sub> , I <sub>PR</sub> , I <sub>PD</sub> I <sub>ZZ</sub> : Corresponde a I <sub>EC</sub> , I <sub>AM</sub> , I <sub>SO</sub> I <sub>#</sub> : En forma individual de I <sub>1</sub> a I <sub>36</sub>				

INDICADOR	PESO	PESOS CICLO DEVIDA				PESOS PERSPECTIVA PROCESO			PESOS DIMENSION SOSTENIBILIDAD		
		DISEÑO	FABRICACION	USO	FIN DEVIDA	MATERIAL	PROCESO	PRODUCTO	ECONOMICA	AMBIENTAL	SOCIAL
		100.0%				100.0%			100%		
	100.0%	25.0%	25.0%	25.0%	25.0%	33.3%	33.3%	33.3%	33.3%	33.3%	33.3%
DI	MT EC 1	2.78%	2.78%			2.78%			2.78%		
	AM 2	2.78%	2.78%			2.78%			2.78%		
	SO 3	2.78%	2.78%			2.78%			2.78%		
	PR EC 4	2.78%	2.78%			2.78%			2.78%		
	AM 5	2.78%	2.78%			2.78%			2.78%		
	SO 6	2.78%	2.78%			2.78%			2.78%		
	PD EC 7	2.78%	2.78%			2.78%			2.78%		
	AM 8	2.78%	2.78%			2.78%			2.78%		
	SO 9	2.78%	2.78%			2.78%			2.78%		
FB	MT EC 10	2.78%	2.78%			2.78%			2.78%		
	AM 11	2.78%	2.78%			2.78%			2.78%		
	SO 12	2.78%	2.78%			2.78%			2.78%		
	PR EC 13	2.78%	2.78%			2.78%			2.78%		
	AM 14	2.78%	2.78%			2.78%			2.78%		
	SO 15	2.78%	2.78%			2.78%			2.78%		
	PD EC 16	2.78%	2.78%			2.78%			2.78%		
	AM 17	2.78%	2.78%			2.78%			2.78%		
	SO 18	2.78%	2.78%			2.78%			2.78%		
US	MT EC 19	2.78%	2.78%	2.78%		2.78%			2.78%		
	AM 20	2.78%	2.78%	2.78%		2.78%			2.78%		
	SO 21	2.78%	2.78%	2.78%		2.78%			2.78%		
	PR EC 22	2.78%	2.78%	2.78%		2.78%			2.78%		
	AM 23	2.78%	2.78%	2.78%		2.78%			2.78%		
	SO 24	2.78%	2.78%	2.78%		2.78%			2.78%		
	PD EC 25	2.78%	2.78%	2.78%		2.78%			2.78%		
	AM 26	2.78%	2.78%	2.78%		2.78%			2.78%		
	SO 27	2.78%	2.78%	2.78%		2.78%			2.78%		
FV	MT EC 28	2.78%	2.78%		2.78%	2.78%			2.78%		
	AM 29	2.78%	2.78%		2.78%	2.78%			2.78%		
	SO 30	2.78%	2.78%		2.78%	2.78%			2.78%		
	PR EC 31	2.78%	2.78%		2.78%	2.78%			2.78%		
	AM 32	2.78%	2.78%		2.78%	2.78%			2.78%		
	SO 33	2.78%	2.78%		2.78%	2.78%			2.78%		
	PD EC 34	2.78%	2.78%		2.78%	2.78%			2.78%		
	AM 35	2.78%	2.78%		2.78%	2.78%			2.78%		
	SO 36	2.78%	2.78%		2.78%	2.78%			2.78%		
PESOS INICIALES REFERENCIALES		25.0%	25.0%	25.0%	25.0%	33.3%	33.3%	33.3%	33.3%	33.3%	33.3%
		100.0%				100.0%			100%		

Figura 4.19. Pesos Ponderados Iniciales - Matriz I: I<sub>1</sub> a I<sub>36</sub> (fuente: elaboración propia).

INDICADOR	PESO	PESOS CICLO DEVIDA				PESOS PERSPECTIVA PROCESO			PESOS DIMENSION SOSTENIBILIDAD										
		DISEÑO	FABRICACION	USO	FIN DEVIDA	MATERIAL	PROCESO	PRODUCTO	ECONOMICA	AMBIENTAL	SOCIAL								
		100,0%				100,0%			100%										
	100,0%	25,0%	25,0%	25,0%	25,0%	33,3%	33,3%	33,3%	33,3%	33,3%	33,3%								
DI	MT EC 1	8,33%	25,0%	25,0%	25,0%	8,33%	33,3%	33,3%	2,78%	2,78%	2,78%								
	AM 2								2,78%										
	SO 3								2,78%										
	PR EC 4	8,33%				25,0%	25,0%		25,0%	8,33%	33,3%	33,3%	2,78%	2,78%	2,78%				
	AM 5												2,78%						
	SO 6												2,78%						
	PD EC 7	8,33%								25,0%	25,0%		25,0%	8,33%	33,3%	33,3%	2,78%	2,78%	2,78%
	AM 8																2,78%		
	SO 9																2,78%		
FB	MT EC 10	8,33%	25,0%	25,0%	25,0%			8,33%						33,3%	33,3%		2,78%	2,78%	2,78%
	AM 11																2,78%		
	SO 12																2,78%		
	PR EC 13	8,33%				25,0%	25,0%	25,0%	8,33%			33,3%		33,3%			2,78%	2,78%	2,78%
	AM 14																2,78%		
	SO 15																2,78%		
	PD EC 16	8,33%							25,0%	25,0%	25,0%	8,33%	33,3%			33,3%	2,78%	2,78%	2,78%
	AM 17																2,78%		
	SO 18																2,78%		
US	MT EC 19	8,33%	25,0%	25,0%	25,0%							8,33%	33,3%		33,3%		2,78%	2,78%	2,78%
	AM 20																2,78%		
	SO 21																2,78%		
	PR EC 22	8,33%				25,0%	25,0%	25,0%				8,33%	33,3%	33,3%			2,78%	2,78%	2,78%
	AM 23																2,78%		
	SO 24																2,78%		
	PD EC 25	8,33%							25,0%	25,0%	25,0%	8,33%	33,3%			33,3%	2,78%	2,78%	2,78%
	AM 26																2,78%		
	SO 27																2,78%		
FV	MT EC 28	8,33%	25,0%	25,0%	25,0%							8,33%	33,3%		33,3%		2,78%	2,78%	2,78%
	AM 29																2,78%		
	SO 30																2,78%		
	PR EC 31	8,33%				25,0%	25,0%	25,0%				8,33%	33,3%	33,3%			2,78%	2,78%	2,78%
	AM 32																2,78%		
	SO 33																2,78%		
	PD EC 34	8,33%							25,0%	25,0%	25,0%	8,33%	33,3%			33,3%	2,78%	2,78%	2,78%
	AM 35																2,78%		
	SO 36																2,78%		
PESOS INICIALES REFERENCIALES		25,0%	25,0%	25,0%	25,0%							33,3%	33,3%		33,3%		33,3%	33,3%	33,3%
		100,0%										100,0%			100%				

Figura 4.20. Pesos Ponderados Iniciales - Matriz I: Ambitos (fuente: elaboración propia).

#### 4.8.2. Recomendaciones de ponderaciones de la Fase de Fabricación.

Sobresale el grupo de indicadores I<sub>10</sub> a I<sub>18</sub>, ya que corresponden a la fase del ciclo de vida, fase de fabricación, sobre la cual se desarrolla el modelo y específicamente sobre la familia de indicadores I<sub>13</sub> I<sub>14</sub> I<sub>15</sub>. En la Tabla 4.29 se muestra la recomendación de las ponderaciones iniciales.

Tabla 4.29. Pesos ponderados Iniciales – Fase: Fabricación (fuente: elaboración propia).

De Fase del Ciclo de Fabricación I <sub>FA</sub>	De Análisis de Ingeniería de Proceso Industrial I <sub>PR</sub>	De Dimensiones de Sostenibilidad I <sub>EC</sub> , I <sub>AM</sub> , I <sub>SO</sub>	De Medición I <sub>#</sub>
100%	$\frac{100}{3} = 33.33\%$	$\frac{100}{3} = 33.33\%$	$\frac{100}{9} = 11.11\%$

En la Figura 4.21, por ejemplo, se presenta la agrupación de los Sub-índices que podrían conformar la familia de indicadores I<sub>l</sub>, en donde se muestra que podría tener diferentes mediciones de los parámetros evaluados. Este criterio se aplica para las familias de indicadores de I<sub>1</sub> a I<sub>36</sub>. Los indicadores definidos y las ponderaciones

establecidas, se las calcula por el método de la teoría de grises, que se explicó en el apartado 3.4.3.

INDICADOR			PESO	PESOS CICLO DE VIDA	PESOS PERSPECTIVA PROCESO			PESOS DIMENSION SOSTENIBILIDAD		
				FABRICACION	MATERIAL	PROCESO	PRODUCTO	ECONOMICA	AMBIENTAL	SOCIAL
			<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>			<b>100%</b>		
			100,0%	33,3%	33,3%	33,3%	33,3%	33,3%	33,3%	
FB	MT	EC 10	11,11%	33,33%	33,33%			11,11%		
		AM 11	11,11%						11,11%	
		SO 12	11,11%							11,11%
	PR	EC 13	11,11%	33,33%		33,33%		11,11%		
		AM 14	11,11%						11,11%	
		SO 15	11,11%							11,11%
	PD	EC 16	11,11%	33,33%			33,33%	11,11%		
		AM 17	11,11%						11,11%	
		SO 18	11,11%							11,11%
<b>PESOS INICIALES REFERENCIALES</b>				100,0%	33,3%	33,3%	33,3%	33,3%	33,3%	
				<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>			<b>100%</b>		

Figura 4.21. Pesos Ponderados Iniciales - Fase: Fabricación. (fuente: elaboración propia).

Cabe indicar, que estos pesos ponderados son referenciales y pueden ser una propuesta inicial, en nuestros análisis y estudios, y pueden ser redefinidos o propuestos de acuerdo con la importancia que se le asigne en el equipo colaborativo a cada indicador.

## **4.9. Conclusiones**

Los trabajos analizados durante la revisión del estado del arte contienen aportaciones importantes de las optimizaciones y mejoras para determinadas operaciones de mecanizado, con un material específico, una herramienta determinada y condiciones de corte que permiten desarrollar propuestas de sostenibilidad que son atractivas. Sin embargo, se evidencia la falta una estructura organizada de los indicadores alrededor a las dimensiones de desarrollo sostenible y las fases del ciclo de vida.

Es por ello por lo que, en este capítulo, se ha definido un modelo aplicado para la fabricación sostenible, combinando los distintos ámbitos, como son: las Dimensiones de Desarrollo Sostenible, las fases del *Ciclo de Vida*, y los criterios de *Análisis de Ingeniería* desde distintas perspectivas.

Esto nos ha permitido generar unas combinaciones de los tres ámbitos que se reflejan en una serie de matrices, en concreto 6, y que nos permiten organizar los conjuntos o las familias de indicadores ( $I_1$  a  $I_{36}$ ) para abordar la recopilación de datos.

Este estudio puede ser tan amplio como se quiera, por lo que se requiere delimitarlo, y es así como la propuesta planteada se centrará en analizar la fase de fabricación del ciclo de vida. Específicamente, se realizará una aportación para el proceso de mecanizado. Para esta fase analizamos las dimensiones de sostenibilidad (indicadores económicos, ambientales y sociales) y las distintas perspectivas de ingeniería. Sin embargo, la gran mayoría de indicadores al final pueden expresarse en términos económicos, ya que todas las actividades tienen un coste asociado.

Para los indicadores planteados del proceso de mecanizado, se elabora una propuesta de fichas de indicadores que puede ser desarrollada a profundidad dependiendo el campo de acción que se requiera analizar.

Debido a la gran cantidad de indicadores que se pueden obtener y para la validación experimental, seleccionaremos aquellos que son más interesantes desde el ámbito del diseño e ingeniería de fabricación, sin desmerecer futuras aportaciones que consideren los criterios de otros campos de ingeniería.

La propuesta de ponderaciones que se presentó es referencial, y nos da una idea inicial del peso o importancia que le podemos asignar a cada uno de los indicadores propuestos. Por otro lado, cabe indicar que dependiendo del análisis que se requiera, se puede asignar ponderaciones predefinidas.

En relación con la propuesta presentada del marco de sostenibilidad que se explica mediante el diagrama de proceso de mecanizado, se puede indicar que es un aporte en el cual se pueden generar campos de estudio y de trabajos futuros dentro del campo de sostenibilidad.

# Capítulo 5

---

—

# Capítulo 5

## Validación

### Experimental

#### 5.1. Introducción.

Para realizar la validación de la propuesta realizada, en esta disertación se plantea la realización experimental con varios casos de estudio basándonos en el *Modelo Marco para la Fabricación Sostenible* desarrollado en el capítulo 4. Para ello desarrollaremos la **Etapa 8 y 9** de la propuesta con cuatro casos de estudio aplicados que buscan verificar la sostenibilidad en operaciones de mecanizado prismático.

Partimos de la premisa planteada en esta disertación que propone que es posible generar un modelo de evaluación de sostenibilidad en procesos de arranque de viruta que permita mejorar el ciclo de vida del producto y que considere el uso de los entornos colaborativos. La Figura 5.1 muestra la propuesta de experimentos propuestos y para cada caso se evalúa el modelo de fabricación de arranque de viruta, considerando diferentes situaciones que se dan a nivel industrial. Los casos aquí analizados, se explican con toda la información en las publicaciones que se han generado dentro de esta investigación doctoral y que forman parte de los trabajos desarrollados.

Si bien existe una amplia gama de indicadores que se encuentran planteados en la bibliografía revisada, nos enfocaremos en los que se muestran en la Tabla 5.1 en donde el *Objetivo De Sostenibilidad (ODS)* se enfocará al indicador evaluado y podrá tener como meta: a)  $\nearrow$  que significa “que el máximo valor es el que se busca”, b)  $\searrow$  cuando “el mínimo valor es el que se busca” y c)  $\nearrow\searrow$  “tendencia” cuando se requiera un punto específico. Se presenta un resumen de cada caso de estudio, los cuales se explicarán a detalle en los siguientes subcapítulos.

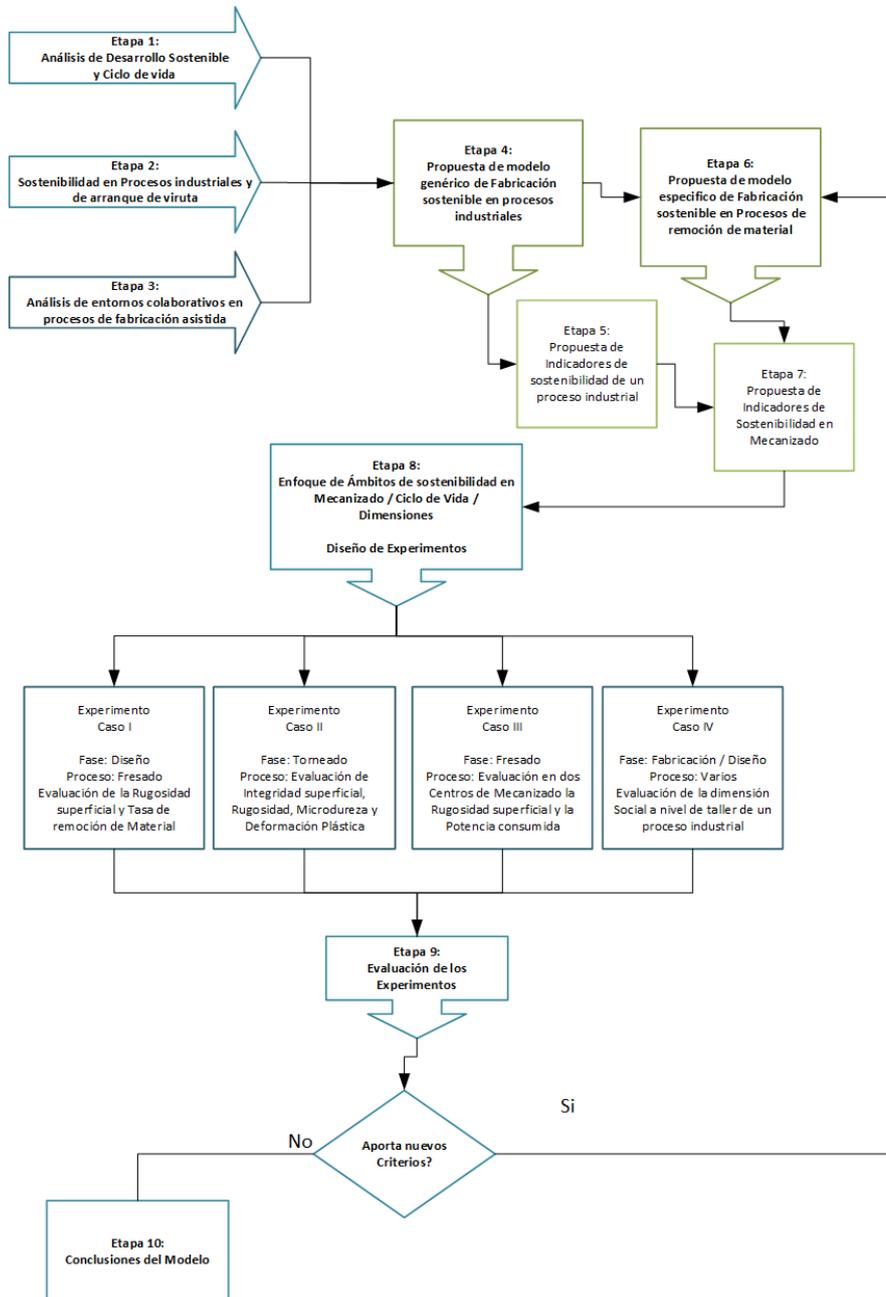


Figura 5.1. Propuesta de experimentos para el modelo de fabricación presentado (fuente: elaboración propia).

Tabla 5.1. Experimentos Propuestos: Casos de Estudio (fuente: elaboración propia).

Fase	Caso	Perspectiva	Proceso & Operación	Material	Equipo	Indicador Evaluado	ODS	
DISEÑO	I	Proceso	Fresado Superficies Planas	AISI 1045 (F-114)	G	Tasa de Eliminación de Material	I <sub>4</sub> ↗	
					G	Tiempo de Mecanizado	I <sub>4</sub> ↘	
	FABRICACIÓN	II	Producto	Torneado Cilindrado	AISI 1018	R	Rugosidad	I <sub>16</sub> ↗ ↘ ↗
						R	Microdureza	I <sub>16</sub> ↗ ↘ ↗
						R	Superficie Metalográfica	I <sub>16</sub> ↗ ↘ ↗
						R	Rendimiento Mecánico	I <sub>16</sub> ↗ ↘ ↗
R						Deformación Plástica	I <sub>16</sub> ↗ ↘ ↗	
G						Rugosidad Superficial	I <sub>16</sub> ↗ ↘ ↗	
III	Producto	Fresado Superficies Planas	AISI 1045 (F-114)	G	Consumo de Energía	I <sub>14</sub> ↘		
	Proceso			D				
IV	Material / Producto / Proceso	Torneado / Fresado	AISI 1045 (F-114) AISI 1018	T	Indicadores Sostenibles en dimensión social	I <sub>15</sub> ↗		
Nota:		G = Centro de Mecanizado CNC - Gentiger BT16 R = Torno CNC Romi C420			D = Centro de mecanizado CNC - Deckel Maho T = Todos los equipos de CNC del Taller			
		↗ "el máximo valor es mejor"		↘ "el mínimo valor es mejor"		↗ ↘ ↗ "tendencia"		

Utilizaremos la **Matriz I-CAD** (Ciclo/ Análisis de Ingeniería /Dimensiones) descrito en el apartado 4.5.1 que es la que nos permitirá centrarnos en el análisis del proceso de fabricación. Esta nos permitirá definir una Metodología para determinar Indicadores de Sostenibilidad.

Utilizaremos como referencia para la evaluación del modelo los pasos descritos en el método científico experimental, el cual lo desarrollaremos para cada uno de los experimentos (casos) planteados. El esquema de los diferentes pasos se muestra en la Figura 5.2 (UNAM, 2016) y un detalle se resume en la Tabla 5.2.

Los 7 pasos descritos serán desarrollados en cada uno de los experimentos (casos), bajo la consideración que los hemos desarrollado usando diferentes equipos y centros de mecanizado, en diferentes condiciones.

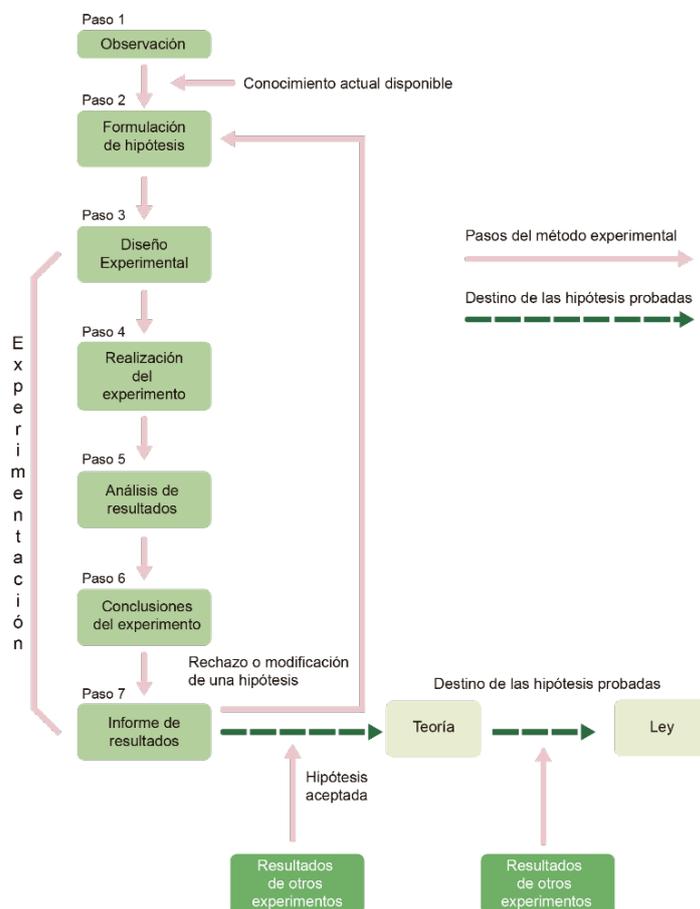


Figura 5.2. Pasos del método científico experimental (fuente: elaboración propia).

Tabla 5.2. Pasos del Método experimental (fuente: elaboración propia).

Pasos	Detalle
1	Observación de modelos sostenibles: Se realiza una revisión de modelos y propuestas existentes en la bibliografía.
2	Formulación de hipótesis: Se parte de la hipótesis general
3	Diseño Experimental: Se define el objetivo del experimento, métodos y criterios de valoración y materiales & equipos a utilizarse
4	Realización del experimento
5	Análisis de Resultados
6	Conclusiones del experimento
7	Informe de resultados en entornos colaborativos

## 5.2. Materiales y Equipos del desarrollo experimental.

Para el desarrollo de la parte experimental se ha utilizado máquinas herramientas que disponen de control numérico CNC. La Tabla 5.3 resume los materiales y equipos utilizados en los casos experimentales. En los apartados que se presentan a continuación, se detalla el uso de cada insumo en el experimento específico.

Tabla 5.3. Materiales y equipos para los Casos de estudio (fuente: elaboración propia).

Insumo	Caso	Descripción	Detalle
<b>Material</b>	I III	Acero	F114 (AISI 1045)
	II		AISI 1018
<b>Equipos</b>	I III	Centro de Mecanizado	Gentiger
	II	Torno CNC	Romi C420
<b>Herramienta</b>	I III	Mitsubishi-Tools	Herramienta: VPX300R 4004SA32SA Inserto: LOGU1207080PNER-M (MP6120)
	II	Sandvik-Coromant	DNMG 150608 - PM4325
<b>Software</b>	I III	CAD/CAM	Autodesk Inventor Profesional 2017
	II		Solidworks
	I a IV	PLM	3DEXPERIENCE
<b>Instrumentos de Medición</b>	II	Durómetro	Duroline M
		Analizador de Metales	Q2 ION
		Microscopio	Olympus GX41
	III	Multímetro	HT920 Multimeter
	II III	Rugosímetro	MitutoyoSJ-210
	III		MitutoyoSJ-201

### 5.2.1. Material para Mecanizar.

En el proceso de mecanizado, el material de la pieza a fabricar tiene diferentes características que están en función de la composición química. De las especificaciones del material, para el acero F114 (F1140) que es un acero al carbono de uso general, su uso se recomienda cuando se requiere resistencias medias de (650 - 800 N/mm<sup>2</sup>) en estado bonificado, el cual sea adecuado para el temple superficial, puede comercializarse bajo otras denominaciones (ver Tabla 5.4) (Equivalent Materials AISI 1045, 2021).

Tabla 5.4. Denominaciones para el material F-114 (ANSI 1045) (fuente: elaboración propia).

UE	España	Alemania		Francia	Italia	USA	Japón
EN	UNE	DIN	STD	NF A35-	UNI	AISI /	JIS
10083	36011-12	17200	N°	552-86	7846	SAE	
C45E	F1140	CK45	1.1191	XC45	C45	SAE1045	S45C

Otro acero que utilizaremos es el AISI 1018, el cual es laminado en frío, el cual tiene buena resistencia mecánica y ductilidad, se caracteriza por que es excelente para soldar y en general tiene mejor maquinabilidad. La Tabla 5.5 muestra la composición química

para los aceros: F-114 (AISI 1045) y AISI 1018 (Equivalent Materials AISI 1018, 2021) que son los que utilizaremos.

Tabla 5.5. Composición química de los materiales seleccionados (fuente: elaboración propia).

Material	Composición Química				
	%C	% Mn	% P	% Si	% S
F-114 (AISI 1045)	0,43 -0,50	0,60 -0,90	-	-	Máx. 0,05
AISI 1018	0,15 -0,20	0,60 -0,90	Max. 0,04	Max. 0,05	-

### 5.2.2. Centros de Mecanizado y Equipos.

Disponemos para la experimentación de tres máquinas herramientas de control numérico: dos centros de mecanizado y un torno CNC. El primero de ellos es el Centro de Mecanizado marca Gentiger tiene su capacidad de recorrido en las direcciones X/Y/Z de 1000/550/500 (mm), con una potencia de 45 kVA y un rango de velocidad de giro en el eje Z de 1-16000 (rpm), tasa de avance rápido de 30 (m/min), conos BT-40, y esta con el controlador Siemens 840D (ver Tabla 5.6).

Tabla 5.6. Centro de Mecanizado Gentiger (fuente: elaboración propia).

	Equipo:	Centro de Mecanizado
	Marca:	Gentiger
	Modelo:	GT 66V-T16B
	Potencia:	45 kVA
	Cono:	BT-40
	Control	Siemens 840 D

Para procesos de torneado, usamos el torno ROMI C420, como observa en la Tabla 5.7, que entre sus características tiene una altura entre puntas de 215 (mm), tiene un diámetro del agujero del husillo de 53 (mm), un rango de velocidades de 4 - 4000 (rpm) y una potencia en su motor principal de 9 (kW). Permite tornear elementos con una longitud admisible sobre la bancada de diámetro 430 (mm), con una distancia entre puntas de 1000 (mm) y un diámetro admisible de 200 (mm) sobre el carro transversal. Utiliza un control Siemens Sinumerik 802D SL.

Tabla 5.7. Torno CNC: Romi C420 (fuente: elaboración propia).

	Equipo:	Torno CNC
	Marca:	Romi
	Modelo:	C420
	Motor Principal:	9 kW
	Diámetro Bancada:	430 mm
	Distancia entre puntas:	1000 mm
	Velocidad de Rotación:	4-4000 rpm
	Control:	Siemens Sinumerik 802D SL

Por otra parte, para el centro de mecanizado Deckel Maho DMC 70V, capacidad de recorrido X/Y/Z de 700/550/500 (mm), potencia de 40 (KVA) y un rango de velocidad de giro del eje z de 1 -15000 (rpm), tasa de avance rápido de 50 (m/min), conos CAT-40 y utiliza controlador TNC 426 Heidenhain (Tabla 5.8).

Tabla 5.8. Centro de mecanizado Deckel Maho (fuente: elaboración propia).

	Equipo:	Centro de Mecanizado
	Marca:	Deckel Maho
	Modelo:	DMC 70V
	Potencia:	40 KVA
	Cono	CAT-40
	Control	TBC 42

### 5.2.3. Herramientas.

Las herramientas que se utilizan pueden ser sólidas o con plaquitas (insertos), las cuales se encuentran descritas en los diferentes manuales, que contienen información técnica y recomendaciones para su uso. La selección depende del material a utilizar y la operación de mecanizado a aplicar. En la Tabla 5.9 se resume las características de la herramienta para procesos de fresado del proveedor Mitsubishi para corte multifuncional en maquinado de alta eficiencia (Mitsubishi Materials, 2019). El inserto correspondiente a la herramienta anterior se muestra en la Tabla 5.10 en donde se detallan las principales características.

Tabla 5.9. Herramienta VPX300R (fuente: elaboración propia).

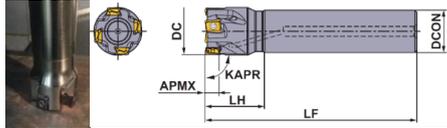
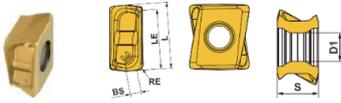
Marca:	Mitsubishi	Insertos	4
Código	VPX300R 4004SA32SA	DC (mm)	40
		DCON (mm)	32
		LF (mm)	125
		LH (mm)	45
		APMX (mm)	11
		KAPR (°)	1.06°

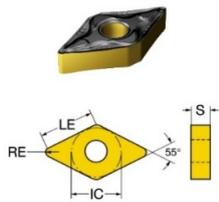
Tabla 5.10. Inserto LOGU12 07080 PNER-M (fuente: elaboración propia).

Marca:	Mitsubishi	L (mm)	12.4
Código:	LOGU12 07080 PNER-M (MP6120)	RE (mm)	0.8
		LE (mm)	11.3
		S (mm)	7
		BS (mm)	2.4
		DI (mm)	4.4

Para los casos experimentales de procesos de torneado, se utiliza la plaquita con código ISO DNMG150608-PM4325 (en ANSI DNMG442-PM-4325). Esta información se

encuentra disponible en la página web del proveedor. En la Tabla 5.11 se muestra la información de la plaquita DNMG 15 06 08 (Sandvik Coromant, 2019).

Tabla 5.11. Inserto DNMG 15 06 08-PM 4325 (fuente: elaboración propia).

	Tamaño y forma de la Plaquita	DN1506
	Diámetro de círculo Inscrito	IC = 12,7 mm
	Longitud Efectiva del círculo	LE = 15,104 mm
	Calidad	4325
	Recubrimiento	CVD TICN+AL203+TIN
	Ángulo de Incidencia Principal	0 °
	Número de Filos	4
	Radio de Punta	RE=0,397 mm
	Grosor de Plaquita	S = 6,35 mm
	Peso del elemento	0.015 kg

#### 5.2.4. Aplicaciones de fabricación asistida por ordenador.

En los diferentes experimentos empleamos software que por su gran versatilidad se utilizan a nivel de diseño y de administración de proyectos de ingeniería. Es así como partiendo del Software CAD/CAM se puede integrar la información generada a plataformas más completas, que incluyen herramientas de trabajo colaborativa. En la Tabla 5.12 se resume el CAD/ CAM que utilizamos para generar los modelos 3D para cada experimento (caso) realizado. Hay que considerar que en el proceso CAD/CAM se debe definir entre otras cosas: la geometría que se va a mecanizar, las herramientas que van a intervenir, las estrategias de mecanizado, los materiales, el centro de mecanizado.

Tabla 5.12. Aplicaciones de Fabricación Asistida por ordenador (fuente: elaboración propia).

Logotipo	Detalle
	<p>Es un software que se utiliza para el diseño asistido por ordenador muy usado en el diseño mecánico de productos. Permite la simulación de un producto y es muy usada en diseños de ingeniería. Genera documentación que puede ser visualizada y simulada. Inventor HSM se utiliza en procesos de mecanizado en 2D y 3D a alta velocidad.</p>
	<p>Es una herramienta colaborativa empresarial, funciona en un entorno basado en la nube. Considera las fases del ciclo de vida y permite trabajar colaborativamente en etapas de diseño, fabricación y en la administración del proyecto de fabricación del producto. Se relaciona muy bien con las actividades de ingeniería.</p>
	<p>Se aplica juntamente con SolidWorks para aplicaciones CNC. Se utiliza para el diseño asistido por ordenador, ya que brinda a los diseñadores y al personal encargado del mecanizado de partes y piezas, altas prestaciones y velocidad, puesto que se encuentra desarrollada en un ambiente de producción integrada.</p>

Todo esto permitirá definir de mejor manera la operación a mecanizar y la simulación del proceso de fabricación. Por ejemplo, en la Figura 5.3 se muestra el CAD/CAM de una superficie a ser fresada, donde se ha definido la herramienta y la trayectoria.

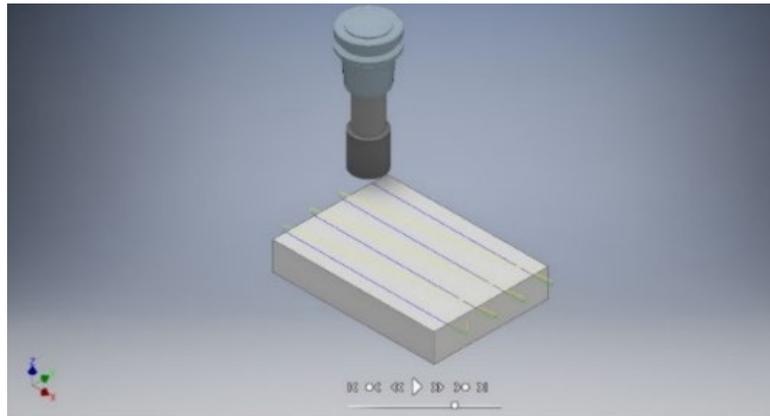


Figura 5.3. Simulación en Inventor CAM del proceso de mecanizado (fuente: elaboración propia).

En la simulación del proceso de fabricación de mecanizado, se considera que una vez generado el CAD se pasa a generar en el CAM, debiendo verificar el post procesador y finalmente la simulación en el controlador respectivo de cada centro de mecanizado. Es importante indicar que se recomienda verificar el recorrido de las trayectorias de la herramienta previo al inicio de los experimentos, para evitar posibles colisiones. En el caso del Inventor CAM, algunas versiones tienen incorporada una versión básica del CIMCO. En la Figura 5.4 se visualiza el Código G y la simulación del movimiento de la herramienta realizado con el editor CNC CIMCO (CIMCO Software, 2018).

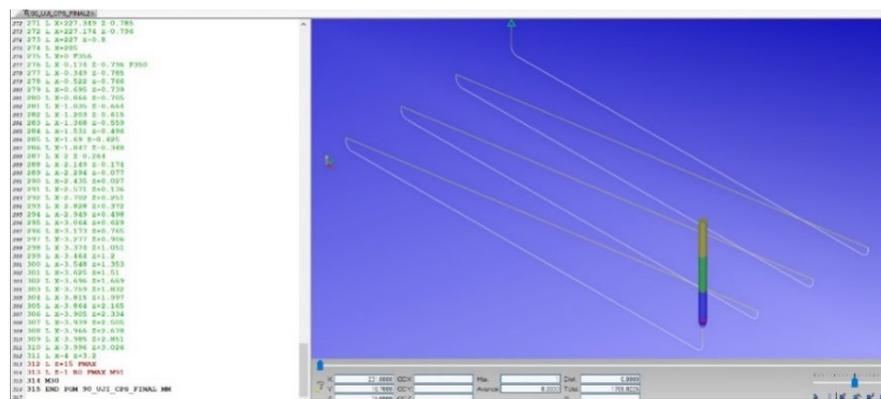


Figura 5.4. Visualización de Trayectoria de la Herramienta y Código G (fuente: Cimco, 2018).

Algunas recomendaciones para verificar el correcto funcionamiento una vez generado el CAM son las siguientes:

- Los parámetros de movimiento de la herramienta se seleccionan de las combinaciones de los experimentos propuestos.
- Con el CAM y con los archivos elaborados en Código G, se realiza una verificación a pie de máquina, en donde se verifica que la información y los archivos escritos estén correctos y se realiza una segunda verificación para que no existan impactos.
- Verificar que el post procesador del software CAD/CAM sea compatible con la versión del software que se dispone en la máquina herramienta, ya que en algunas ocasiones se requiere comprobaciones complementarias.
- Los técnicos responsables del centro de mecanizado realizan un trabajo colaborativo afinando el montaje del material, las herramientas y el CAM.

Para el flujo de información en los diferentes niveles se utiliza la plataforma colaborativa 3DEXPERIENCE®. En la cual cada uno de los colaboradores “Trabajadores” desempeña un Rol específico. En la Figura 5.5 se muestra un ejemplo de la administración de proyectos.

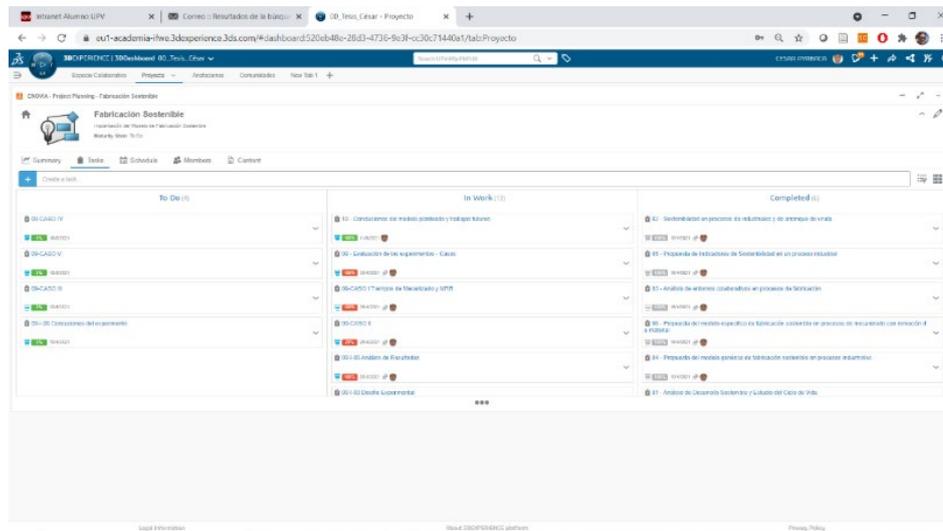


Figura 5.5. Manejo de Entornos colaborativos con 3DEXPERIENCE® (fuente: elaboración propia).

### 5.2.5. Instrumentos de medición.

En cada caso de estudio se define las mediciones a realizarse y dependiendo de su análisis se utilizan los siguientes equipos. Resumiremos brevemente sus características y en cada caso de estudio indicaremos específicamente cual se utiliza. Empezamos con la medición de la dureza, donde se utiliza el durómetro marca Duroline Modelo M, que se muestra en la Tabla 5.13 (Metkon Duroline M Series, 2018).

Tabla 5.13. Durómetro Duroline M (fuente: elaboración propia).

	Equipo:	Durómetro
	Marca:	Duroline
	Modelo:	M
	Rango:	Rango de Carga de 1 a 50kg
	Magnificación para medición:	400x
	Magnificación para medida:	100x

Para realizar el análisis de metales se utiliza el equipo analizador de metales ultra compacto Q2 ION, en la Tabla 5.14 se resume las principales características (Bruker, 2019).

Tabla 5.14. Analizador de Metales Bruker (fuente: elaboración propia).

	Equipo:	Espectrómetro de emisión de chispas
	Marca:	BRUKER
	Modelo:	Q2 ION
	Aplicaciones	Elementos principales y aleaciones
	Voltaje	100 - 240 V (50 -60 Hz)
	Potencia	200W (en medición) 25 W (en espera)

También utilizamos un microscopio metalográfico para el estudio de la integridad superficial, en la Tabla 5.15 se detalla las características del microscopio marca Olympus GX41 (Olympus GX41, 2018b, 2018a).

Tabla 5.15. Microscopio Olympus GX41 (fuente: elaboración propia).

	Equipo:	Microscopio Invertido de Reflexión
	Marca:	Olympus
	Modelo:	GX41
	Aplicaciones:	Microscopio Metalográfico
	Voltaje:	100 - 240 V (50 -60 Hz)
	Potencia:	200W (en medición) 25 W (en espera)

En la Tabla 5.16 se resumen las características de la pinza amperimétrica HT9022. Se debe verificar su instalación en cada uno de los centros de mecanizado, la cual se realiza con el técnico del equipo. El instrumento tiene una herramienta colaborativa que permite la transmisión y recopilación de información en tiempo real, grabando las medidas y generando el perfil de potencia consumida, así como el almacenamiento de los datos para su análisis (Power Meter, 2018).

Tabla 5.16. Pinza Amperimétrica HT9022 (fuente: elaboración propia).

	Equipo:	Pinza Amperimétrica
	Marca:	HT
	Modelo:	HT9022
	Rango DC:	0.5 – 999.9 V
	Exactitud DC:	± (1.0% lectura + 4 dígitos)
	Rango AC:	0,5 hasta 999,9 V
	Exactitud DC:	43-63 Hz: ±1.0% 10-43 Hz, 63-400 Hz: ±3,5%

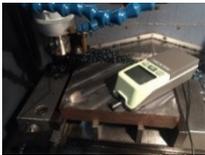
En los experimentos en donde se mide la rugosidad superficial de la pieza mecanizada, se utilizan los equipos descritos. En la Tabla 5.17 se muestra las características del rugosímetro (Mitutoyo SJ-210, 2016).

Tabla 5.17. Rugosímetro Mitutoyo SJ-210 (fuente: elaboración propia).

	Equipo:	Rugosímetro
	Marca:	Mitutoyo
	Modelo:	SJ210
	Longitud de evaluación:	17.5 mm
	Normas de Rugosidad disponibles en el equipo:	JIS'82 / JIS'94 / JIS'01 / ISO'97 / ANSI / VDA

En la Tabla 5.18 se exponen las características del rugosímetro SJ-201. Cabe indicar que en los experimentos desarrollados, se realiza un mapeo de la superficie mecanizada y se efectúa un mínimo de tres mediciones de la rugosidad en cada punto de medición, con esta información se realiza el cálculo estadístico y se determina el valor promedio (Mitutoyo Surf Test SJ210, 2017).

Tabla 5.18. Rugosímetro Mitutoyo SJ-201 (fuente: elaboración propia).

	Equipo:	Rugosímetro
	Marca:	Mitutoyo
	Modelo:	SJ-201
	Longitud de evaluación:	12.5 mm
	Normas de rugosidad disponibles en el equipo:	JIS DIN ISO ANSI

### 5.3. Caso I: Tasa de Eliminación de material y Tiempo de corte.

En la etapa de diseño del producto el uso de Software CAD CAM permite potenciar el uso de centros de mecanizado CNC en los que, en el momento de realizar la programación, la coparticipación colaborativa permitirá incluir los criterios de los materiales utilizados, las herramientas recomendadas y las máquinas CNC disponibles. Los resultados de este caso se presentaron como publicaciones: “Análisis comparativo de estrategias de corte en operaciones de planeado” (Ayabaca & Vila, 2019). y “An Approach to Sustainable Metrics Definition and Evaluation for Green Manufacturing in Material Removal Processes” (Ayabaca & Vila, 2020).

#### 5.3.1. Paso 1 - Caso I: Observación.

De la revisión del estado del arte se evidencia que, para la fabricación de piezas mecanizadas, el uso de un CAD y CAM en la fase de diseño permite obtener superficies complejas, lo cual se ha logrado con el desarrollo de centros de mecanizado CNC de 3 y 5 ejes los cuales brindan las facilidades para realizarlas. Es así como el personal encargado de la fase de diseño debe tener un vasto conocimiento de materiales a utilizar, herramientas disponibles y las características del centro de mecanizado a utilizar.

- **Objetivo de los Indicadores del Caso I: Fresado - Planeado de superficies:**  
Determinar los parámetros de mecanizado con los que se obtiene los menores tiempos de corte y las mayores tasas de eliminación de material.

En la fase de diseño del producto, el evaluar las diferentes opciones que el CAM brinda en el mecanizado de una pieza en operaciones de planeado, depende de las herramientas que se recomiende, en donde los rangos de los parámetros permitirán encontrar la condición que permitirá determinar la menor Tasa de Eliminación de Material (TEM), así como el menor tiempo de mecanizado.

En este caso se evidencia la importancia de tener el diseño y simulación del proceso de mecanizado, ya que se obtienen indicadores que definen la fase de fabricación. En la Tabla 5.19 se resume de forma general el Caso I.

Tabla 5.19. Caso I: Detalles generales del experimento (fuente: elaboración propia).

Fase	Caso	Perspectiva	Proceso & Operación	Material	Equipo CNC	Indicador Evaluado	ODS
DISEÑO	I	Proceso	Fresado Superficies Planas	AISI 1045 (F-114)	G	Tasa de Eliminación de Material	I <sub>4</sub> ↗
					G	Tiempo de Mecanizado	I <sub>4</sub> ↘

Nota: ODS Objetivo de Sostenibilidad: ↗ valor máximo es mejor; ↘ valor mínimo es mejor  
G = Centro de Mecanizado CNC - Gentiger BT16

Desde el enfoque de sostenibilidad en la Figura 5.6 se ha resaltado el campo de análisis del presente Caso I. La generación del CAD / CAM es muy importante ya que actualmente se desarrolla en entornos colaborativos, y con el flujo de información en cada uno de los campos de análisis, alimentan el diseño propuesto, e incluyen el manejo y uso del Código G.

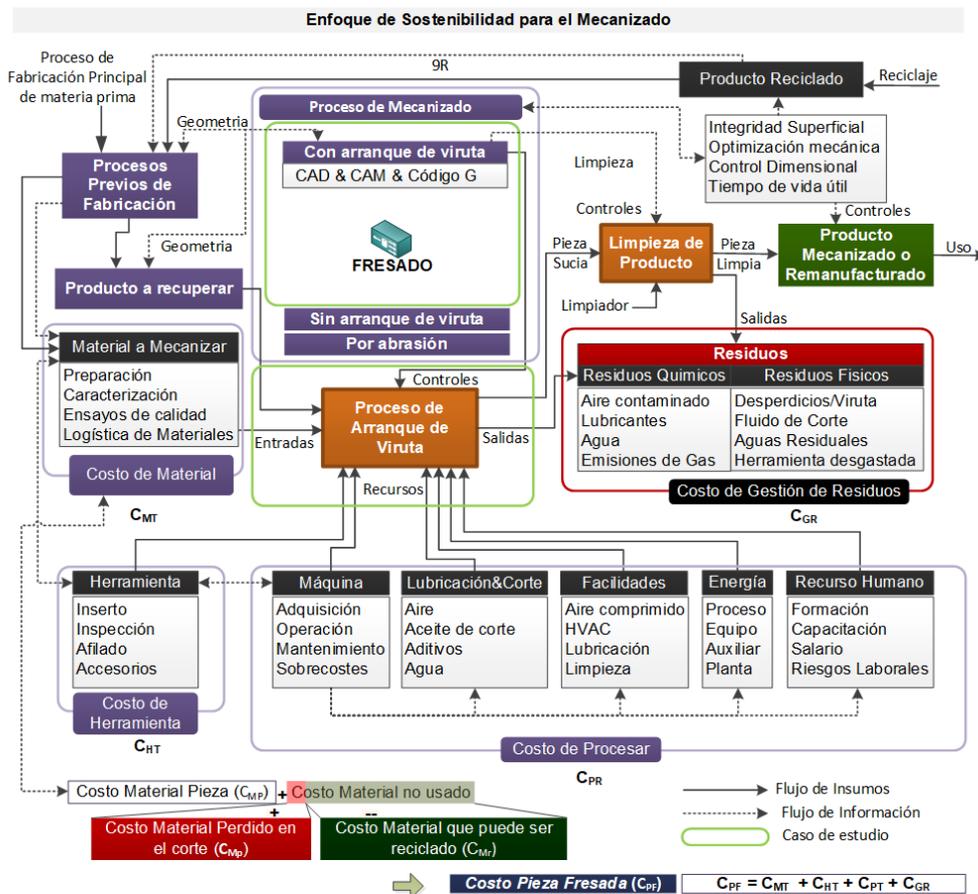


Figura 5.6. Caso I: Enfoque de Sostenibilidad (fuente: elaboración propia).

Los indicadores sostenibles que vamos a evaluar en el Caso I son los determinados en la Tabla 5.20, los cuales se definen en la fase de diseño del ciclo de vida. Cabe indicar que estos indicadores repercuten directamente a la fase de fabricación ya que establecen el tiempo de uso de la máquina, de la herramienta y por ende tiene un efecto importante en

los costos. El indicador que buscaremos es el Indicador de Tasa de Eliminación de Material TEM más alto, es decir “el valor alto es mejor”:

Tabla 5.20. Caso I: Indicadores (fuente: elaboración propia).

Siglas	Indicador	Unidades	Detalle	Objetivo
TEM	Tasa de Eliminación de Material	(cm <sup>3</sup> /min)	Representa la cantidad de material que logra retirarse por unidad de tiempo.	I <sub>4</sub> ↗
TM	Tiempo de mecanizado	(min: s)	Es el tiempo en el cual la herramienta realiza la operación de mecanizado solicitada.	I <sub>4</sub> ↘

### 5.3.2. Paso 2 - Caso I: Formulación de hipótesis de Indicadores.

Para el caso experimental I se ha planteado la siguiente hipótesis:

- **Hipótesis de los Indicadores del Caso I: Fresado - Planeado de superficies:**  
¿Se puede determinar en la etapa de diseño de una pieza mecanizada, los mejores parámetros que permitan obtener el menor tiempo de mecanizado y la mayor tasa de eliminación de material en un proceso de planeado?

### 5.3.3. Paso 3 - Caso I: Diseño experimental Procedimiento.

Para el diseño CAD de la pieza a mecanizar, se consideró el material AISI 1045 de 205x140x36 mm, el centro de mecanizado marca Gentiger GT 16B y la herramienta Mitsubishi VPX300R 4004SA32SA con insertos LOGU1207080PNER-M (MP6120) En la Tabla 5.21 se resume a detalle los materiales y equipos del caso I.

Tabla 5.21. Caso I: Materiales y equipos el experimento (fuente: elaboración propia).

Insumo	Caso	Descripción	Detalle
<b>Material</b>	I	Acero	F114 (AISI 1045) 205x140x36 mm
<b>Equipos</b>	I	Centro de Mecanizado	Gentiger Siemens 840D
<b>Herramienta</b>	I	Mitsubishi Tools	Herramienta: VPX300R 4004SA32SA Inserto: LOGU1207080PNER-M (MP6120) Ø 40 Zc = 4 K = 90 °
<b>Software</b>	I	CAD/CAM	Autodesk Inventor Profesional 2017

De las recomendaciones del fabricante de herramienta Mitsubishi, se establecen los factores de uso de la herramienta, es así como en la Tabla 5.22 se muestran los factores de análisis y niveles que vamos a utilizar en el análisis del caso y para desarrollar los experimentos. Donde:  $p_d$  es la dirección de la pasada, y se tiene tres opciones: 0°, 45°, y 90 ° simbolizado con (A);  $a_p$  profundidad de corte (mm) simbolizado con (B);  $V_c$

velocidad de corte (m/min) simbolizado con (C) y:  $f_z$  avance por diente (mm/diente) simbolizado con (D).

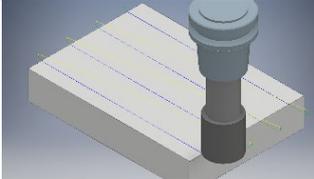
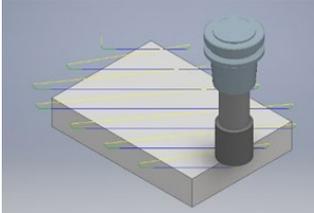
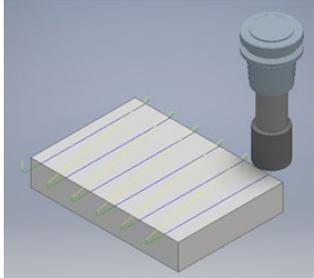
Tabla 5.22. Caso I: Factores de análisis (fuente: elaboración propia).

Factores	Unidades	Niveles			
		1	2	3	
A	$P_d$	°	0	45	90
B	$a_p$	(mm)	0,8	1	1,2
C	$v_c$	(m/min)	140	180	210
D	$f_z$	(mm/diente)	0,08	0,10	0,12

#### 5.3.4. Paso 4 - Caso I: Realización del experimento.

Se configuran las 27 opciones que se describen a continuación utilizando la metodología Taguchi y se realiza el CAD y el CAM para cada experimento. En la Tabla 5.23. se representa las combinaciones, en donde se observa la trayectoria de la herramienta y como se encuentran agrupados en los experimentos.

Tabla 5.23. Caso I: Combinación CAD/CAM de Parámetros (fuente: elaboración propia).

Dirección	CAD/CAM	Experimentos
X-X 0°		1 a 9
X-Y 45°		10 a 18
Y-Y 90°		19 a 27

Se seleccionaron tres direcciones principales, en la dirección X-X = 0°, X-Y = 45°, Y-Y = 90°. En la Tabla 5.24 se muestra los parámetros para realizar las simulaciones CAD/CAM, en total se generarán 27 experimentos.

Tabla 5.24. Caso I: Combinación de Parámetros  $L_{27}$  (fuente: elaboración propia).

Experimento	A Dirección de Pasada $P_d$ (°)	B Profundidad $a_p$ (mm)	C Velocidad $V_c$ (m/min)
1	0	0,8	140
2	0	0,8	180
3	0	0,8	210
4	0	1	140
5	0	1	180
6	0	1	210
7	0	1,2	140
8	0	1,2	180
9	0	1,2	210
10	45	0,8	140
11	45	0,8	180
12	45	0,8	210
13	45	1	140
14	45	1	180
15	45	1	210
16	45	1,2	140
17	45	1,2	180
18	45	1,2	210
19	90	0,8	140
20	90	0,8	180
21	90	0,8	210
22	90	1	140
23	90	1	180
24	90	1	210
25	90	1,2	140
26	90	1,2	180
27	90	1,2	210

En cada una de las opciones del CAM, para las condiciones dadas se determina el tiempo de mecanizado y la tasa de eliminación de material., en la Tabla 5.25 y se presentan los valores para cada experimento.

*Tabla 5.25. Caso I: Factores y Tiempos de Mecanizado (fuente: elaboración propia).*

Experimento	Factor				Tiempo (min:s)
	$p_d$	$a_p$	$n$	$f_z$	
1	0	0,8	1114	0,08	3:42
2	0	0,8	1432	0,10	2:50
3	0	0,8	1671	0,12	2:25
4	0	1,0	1114	0,10	3:14
5	0	1,0	1432	0,12	2:36
6	0	1,0	1671	0,08	2:56
7	0	1,2	1114	0,12	2:56
8	0	1,2	1432	0,08	3:12
9	0	1,2	1671	0,10	2:38
10	45	0,8	1114	0,10	4:25
11	45	0,8	1432	0,12	3:32
12	45	0,8	1671	0,08	4:00
13	45	1,0	1114	0,12	4:00
14	45	1,0	1432	0,08	4:21
15	45	1,0	1671	0,10	3:36
16	45	1,2	1114	0,08	5:03
17	45	1,2	1432	0,10	3:52
18	45	1,2	1671	0,12	3:19
19	90	0,8	1114	0,12	3:25
20	90	0,8	1432	0,08	3:41
21	90	0,8	1671	0,10	3:05
22	90	1,0	1114	0,08	3:45
23	90	1,0	1432	0,10	3:19
24	90	1,0	1671	0,12	2:53
25	90	1,2	1114	0,10	3:45
26	90	1,2	1432	0,12	3:04
27	90	1,2	1671	0,08	3:25

Cabe indicar que para el cálculo de la Tasa de Eliminación de Material TEM, se consideró el volumen efectivo que se retiró y el tiempo de la Tabla 5.26. Con los valores obtenidos procedemos a analizarlos y realizar el análisis de sostenibilidad.

Tabla 5.26. Caso I: Tasa de Eliminación de Material (fuente: elaboración propia).

Experimento	x (mm)	y (mm)	$a_p$ (mm)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Tiempo (s)	TEM (cm <sup>3</sup> /min)
1	205	104	0,8	17,05	138	7,4
2	205	104	0,8	17,05	86	11,9
3	205	104	0,8	17,05	61	16,7
4	205	104	1	21,32	110	11,6
5	205	104	1	21,32	72	17,9
6	205	104	1	21,32	92	13,9
7	205	104	1,2	25,58	92	16,7
8	205	104	1,2	25,58	107	14,3
9	205	104	1,2	25,58	74	20,9
10	205	104	0,8	17,05	110	9,3
11	205	104	0,8	17,05	71	14,4
12	205	104	0,8	17,05	91	11,2
13	205	104	1	21,32	91	14,0
14	205	104	1	21,32	107	12,0
15	205	104	1	21,32	73	17,5
16	205	104	1,2	25,58	137	11,2
17	205	104	1,2	25,58	85	18,0
18	205	104	1,2	25,58	61	25,2
19	205	104	0,8	17,05	98	10,5
20	205	104	0,8	17,05	114	9,0
21	205	104	0,8	17,05	78	13,1
22	205	104	1	21,32	146	8,7
23	205	104	1	21,32	91	14,0
24	205	104	1	21,32	65	19,7
25	205	104	1,2	25,58	117	13,1
26	205	104	1,2	25,58	76	20,2
27	205	104	1,2	25,58	98	15,7

5.3.5. Paso 5 - Caso I: Análisis de Resultados

Una vez realizado los 27 experimentos se procede a tabular los datos y a realizar varios análisis que serán útiles como: el diagrama de cajas, estadística descriptiva, entre otros para lo que desarrollamos diferentes gráficos y tablas explicativas. El diagrama de barras (ver Figura 5.7) nos muestra el tiempo de mecanizado de los 27 experimentos.

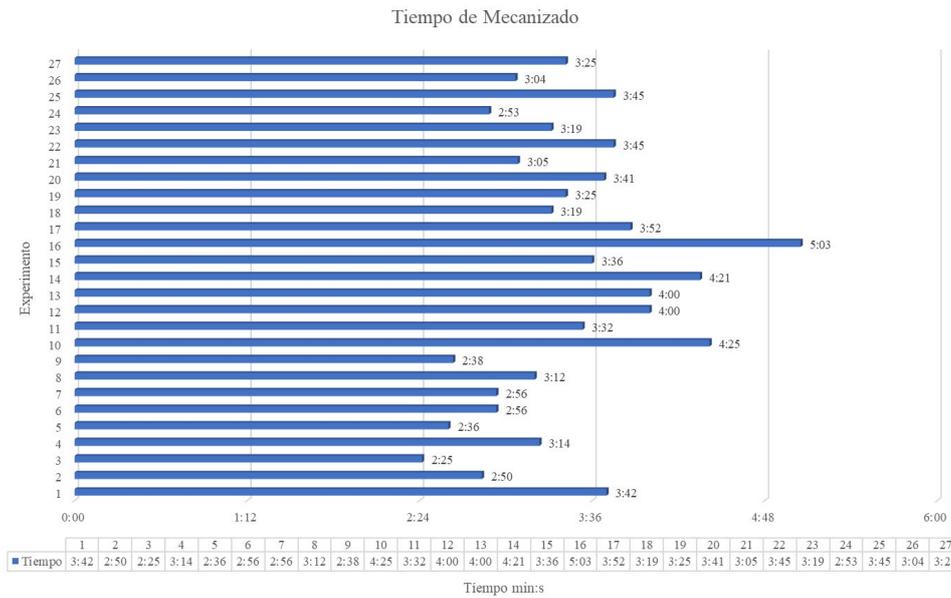


Figura 5.7. Caso I: TM Tiempo de Mecanizado (fuente: elaboración propia).

La Tabla 5.27 muestra las condiciones de mecanizado del caso I experimento #3 con las que se consigue el menor tiempo de mecanizado.

Tabla 5.27. Caso I: Valores de los Parámetros TM  $\sphericalangle$  (fuente: elaboración propia).

Experimento #	$p_d$	$a_p$	$v_c$	$f_z$	Tiempo (min:s)
Caso I-3	0	0,8	1671	0,12	2:25

Por otro lado, realizando el diagrama de cajas y considerando la dirección de la pasada, se ha agrupado a los 27 experimentos en 3 grupos. La Figura 5.8 muestra el comportamiento en donde se observa que cuando la dirección es 0° se obtienen los tiempos menores. Por otro lado, los tiempos mayores se dan cuando la dirección de la pasada es 45°. Con la dirección de pasada de 90° se obtienen tiempos medios.

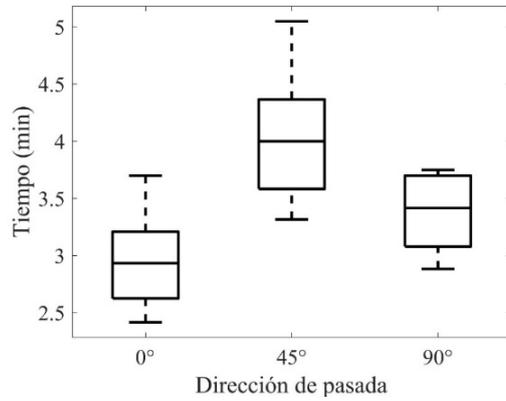


Figura 5.8. Caso I: Diagrama de Bigotes - Tiempo vs Dirección (fuente: elaboración propia).

Por otro lado, en la Figura 5.9 podemos observar que en el Caso I experimento #18 se observa la mayor Tasa de Eliminación de Material TEM.

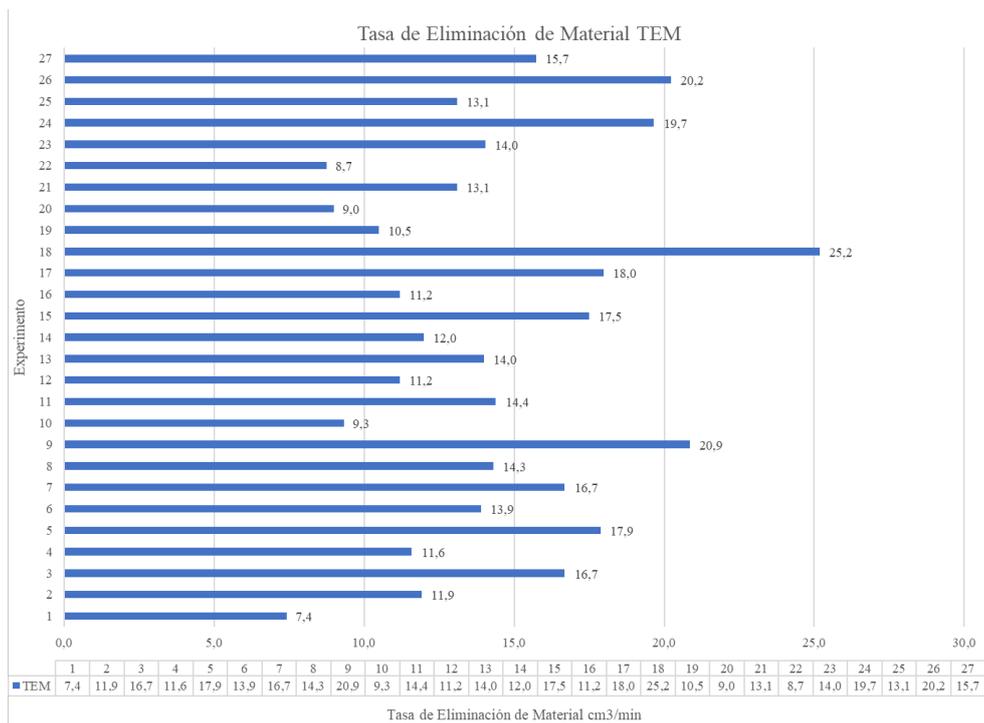


Figura 5.9. Caso I: TEM Tasa de Eliminación de Material (fuente: elaboración propia).

Los valores de los factores en los cuales se alcanza esa condición se resumen en la Tabla 5.28.

Tabla 5.28. Caso I: Factores TEM  $\nearrow$  (fuente: elaboración propia).

Experimento #	$p_d$	$a_p$	$v_c$	$f_z$	TEM (cm <sup>3</sup> /min)
Caso I-18	45	1,2	1671	0,12	25,2

### 5.3.6. Paso 6 - Caso I: Conclusiones del experimento.

Para el primer caso se evalúa el indicador de Tiempo de mecanizado a partir de los tiempos del CAM ( $I_4$  TM<sub>CAM</sub>) y la tasa de eliminación de material ( $I_4$  TEM<sub>CAM</sub>) en el mecanizado de la superficie plana mediante el proceso de fresado. Cabe indicar que se generaron 27 combinaciones por el método de Taguchi con los parámetros de la herramienta. Cabe mencionar que el  $I_4$  que se simula en la fase de diseño, es una referencia para el  $I_{13}$  ya que se encuentran relacionados.

- $I_4 \searrow$  TM<sub>CAM</sub>: para este caso de estudio. las condiciones del experimento 3 permiten determinar el menor tiempo de mecanizado.
- $I_4 \searrow$  TEM<sub>CAM</sub>: se determina como el valor máximo de los experimentos realizados en este caso. Las condiciones del experimento 18 determinan el mayor valor.

Con los resultados individuales podemos realizar una comparación, la cual se muestra en la Tabla 5.29, en donde podemos observar que para cada objetivo de sostenibilidad ODS podríamos tener diferentes condiciones.

Tabla 5.29. Caso I: Factores TM y TEM (fuente: elaboración propia).

Experimento	ODS	Indicador	$p_d$	$a_p$	$v_c$	$f_z$	Valor	Unidades
Caso I-3	$\searrow$ .	$I_4$ TM	0	0.8	1671	0,12	2:25	(min:s)
Caso I-18	$\nearrow$	$I_4$ TEM	45	1,2	1671	0,12	25,2	(cm <sup>3</sup> /min)

### 5.3.7. Paso 7 - Caso I: Informe de resultados en entornos colaborativos.

El caso experimental planteado permite ver dos situaciones que pueden presentarse en un proceso industrial de fabricación por mecanizado: el menor tiempo de mecanizado  $I_4$  TM y la máxima tasa de material removido  $I_4$  TEM. En la Tabla 5.30 y Tabla 5.31 se presentan las estadísticas de cada análisis. De las 27 combinaciones planteadas en este caso experimental, el menor tiempo de mecanizado se establece cuando se realiza el

proceso de mecanizado de superficies planas en la dirección X-X (0°), en esta dirección coincide con la dirección de sujeción de las mordazas, lo que permite establecer menores tiempos de mecanizado. Cabe indicar que en cada condición de análisis la profundidad de corte varía. En la Tabla 5.30 se muestra la estadística del tiempo de mecanizado.

Tabla 5.30. Caso I: Estadística Tiempo de Mecanizado TM (fuente: elaboración propia).

Estadística del Tiempo de Mecanizado TM	0°	45°	90°
Max	03:42	05:03	03:45
Min	<b>02:25</b>	03:19	02:53
Promedio	02:56	04:00	03:22
Desviación estándar	0:23	0:39	0:19
Secuencia de elección	<b>1</b>	3	2

El Indicador antes mencionado se obtiene cuando se máquina en las condiciones que se detallan en la Tabla 5.31.

Tabla 5.31. Caso I: Tiempo de Mecanizado TM (fuente: elaboración propia).

Indicador I <sub>4</sub>	Objetivo	El Menor tiempo es mejor
Tiempo de Mecanizado	Valor máximo	05:03 (min:s)
	Valor mínimo	02:25 (min:s)
	Intervalo de Variación	00:36
Parámetros	$P_d$ (°)	0
	$a_p$ (mm)	0.8
	$n$ (mm)	1671
	$f_z$ (mm)	0,12
	Tiempo (min:s)	<b>2:25</b>
	TEM (cm <sup>3</sup> /min)	16,7

Otro análisis importante en el proceso de mecanizado es la Tasa de Eliminación de Material TEM, y de las 27 condiciones analizadas, la mayor TEM se obtiene en la dirección x-y, es decir a 45°. En la Tabla 5.32 se muestra la estadística de este indicador.

Tabla 5.32. Caso I: Estadística TEM (fuente: elaboración propia).

Estadística de la Tasa de Eliminación de Material I <sub>4</sub> TEM	0°	45°	90°
Max	20,85	<b>25,18</b>	20,21
Min	7,41	9,3	8,73
Promedio	14,58	14,7	13,78
Desviación Estándar	3,98	4,87	4,18
Secuencia de elección	2	<b>1</b>	3

En la Tabla 5.33 se resumen los parámetros y condiciones en los cuales se obtiene este indicador.

Tabla 5.33. Caso I: Tasa de Eliminación de Material TEM (fuente: elaboración propia).

Indicador:	Objetivo	Mayor TEM es mejor
Tasa de Eliminación de Material TEM	Valor máximo	25,18 (cm <sup>3</sup> /min)
	Valor mínimo	7,42 (cm <sup>3</sup> /min)
	Variación	04,21
Parámetros:	$P_d$ (°)	45
	$a_p$ (mm)	1,2
	$n$ (mm)	1671
	$f_z$ (mm)	0,12
	Tiempo (min:s)	3:19
	TEM (cm <sup>3</sup> /min)	<b>25,2</b>

En forma general al evaluar las 27 combinaciones recomendables para los parámetros podemos concluir que se debe tener mucho cuidado en la selección de estos ya que podría seleccionarse mal y esto influiría en otros indicadores como los de costos unitarios del proceso. En la Tabla 5.34 se visualiza, el valor máximo respecto al mínimo es de 2:1 aproximadamente, mientras que en la Tasa de Eliminación de Material es de 3,4:1, aproximadamente.

Tabla 5.34. Caso I: Valores de los Indicadores TM y TEM (fuente: elaboración propia).

Caso 1	$I_4$	$I_4$
	Tiempo (min:s)	TEM (cm <sup>3</sup> /min)
Max	5:03	<b>25,18</b>
Min	<b>2:25</b>	7,42

En la Figura 5.10 se presenta, por ejemplo, una de las simulaciones para el Caso I, que es parte de la información que se maneja en el entorno colaborativo:

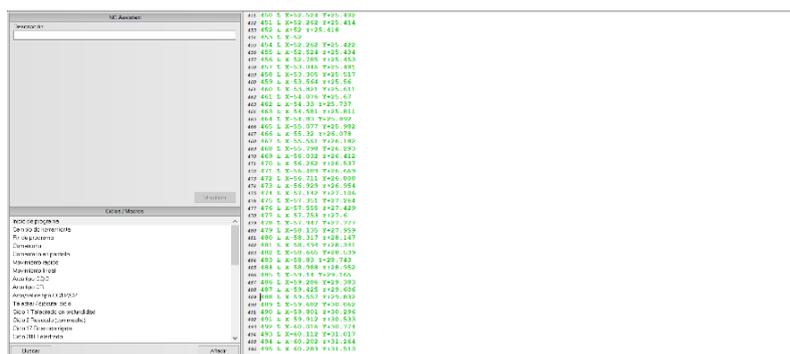


Figura 5.10. Caso I: Simulación de parámetros (fuente: elaboración propia).

Resumiendo, las diferentes habilidades y conocimiento del equipo colaborativo en el presente caso:

- Ingeniero de Materiales: información del material y sus propiedades
- Diseñado CAD CAM: simulaciones requeridas con los parámetros proporcionados en el CAD y genera el CAM.
- Técnico de Operación: Selecciona las herramientas adecuadas y verifica el desgaste de estas.
- Operador de Máquina: con el conocimiento de máquina establece opciones de montaje y recomienda las direcciones de corte aplicables.

## 5.4. Caso II: Evaluación de Integridad superficial.

El análisis de la integridad superficial nos permite determinar, cómo los parámetros de fabricación influyen en características del producto y cuáles son los adecuados para obtenerlos. Los resultados de este caso se presentaron como publicación en congreso, “*The Effect of Machining Surface Integrity of AISI1018*” (Díaz, Vila, Ayabaca, & Calle, 2018) y en una revista, “*Sustainability Analysis of AISI 1018 Turning Operations under Surface Integrity Criteria*” (Vila, Ayabaca, Díaz-Campoverde, & Calle, 2019).

### 5.4.1. Paso 1 - Caso II: Observación.

La integridad superficial de una pieza mecanizada dependerá de los parámetros que se estén aplicando, por lo que su selección adecuada, permitirá establecer y predecir su resultado.

- **Objetivo Caso II: Torneado - Cilindrado:**  
Determinar los parámetros de mecanizado que permitan obtener las mejores propiedades mecánicas, cuando se evalúa la integridad superficial de la pieza al realizar el proceso de cilindrado.

Al realizar el análisis de integridad superficial de una pieza torneada, determinar los parámetros en los cuales se obtiene las mejores propiedades superficiales, tales como: rugosidad, micro dureza, análisis de la superficie metalográfica, análisis del rendimiento mecánico, etc., permitirá garantizar un desempeño óptimo durante su uso y alargar su vida útil.

En este caso de estudio se busca determinar la influencia de los parámetros de fabricación sobre la integridad superficial de la pieza cilindrada en la Tabla 5.35 se resume en forma general el caso II.

Tabla 5.35. Caso II: Detalles Generales del experimento (fuente: elaboración propia).

Fase	Caso	Perspectiva	Proceso & Operación	Material	Equipo	Indicador Evaluado	ODS
FABRICACION	II	Producto	Torneado Cilindrado	AISI 1018	R	Rugosidad	I <sub>16</sub> ↗ ↘ ↗
					R	Microdureza	I <sub>16</sub> ↗ ↘ ↗
					R	Superficie Metalográfica	I <sub>16</sub> ↗ ↘ ↗
					R	Rendimiento Mecánico	I <sub>16</sub> ↗ ↘ ↗
					R	Deformación Plástica	I <sub>16</sub> ↗ ↘ ↗

Nota: ODS Objetivo de Sostenibilidad: ↗ ↘ ↗ “tendencia”, ↗ el máximo valor es mejor, ↘ el mínimo valor es mejor  
R = Torno CNC Romi C420

Desde el enfoque de sostenibilidad en la Figura 5.11 se remarca la parte del modelo que desarrollaremos en el presente caso. Cabe indicar que se requiere la participación colaborativa.

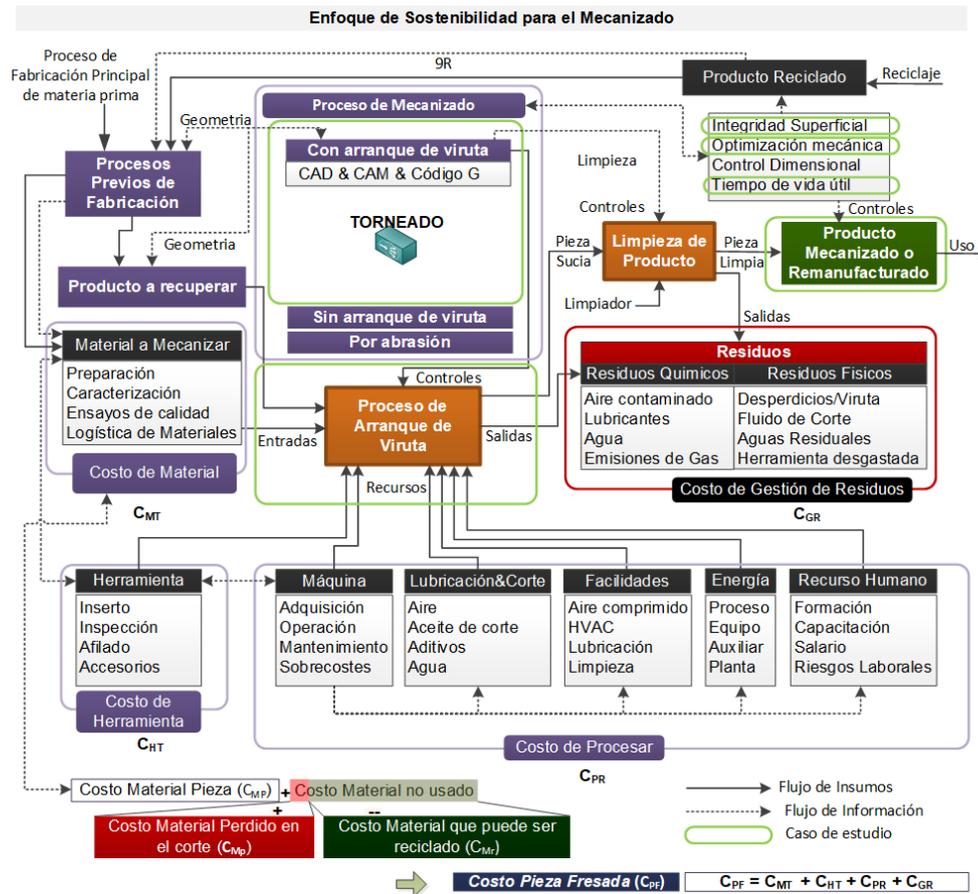


Figura 5.11. Caso II: Enfoque de Sostenibilidad (fuente: Vila, 2019).

Los indicadores que vamos a evaluar son, la rugosidad superficial, microdureza, análisis metalográfico de la superficie, rendimiento mecánico y microscopía electrónica que se describen en la Tabla 5.36, que se evalúan en la fase de fabricación. Es importante mencionar que los indicadores se miden en la superficie de la pieza mecanizada. Depende el requerimiento de diseño en la pieza fabricada, el análisis de las curvas de comportamiento nos permite predecir las propiedades mecánicas que se requiera.

Tabla 5.36. Caso II: Indicadores (fuente: elaboración propia).

Siglas	Indicador	Unidades	Detalle	Objetivo
RA	Rugosidad	( $\mu\text{m}$ )	Curva de comportamiento	I <sub>16a</sub> ↗ ↘ ↗
MD	Microdureza	(HV)	Curva de comportamiento	I <sub>16b</sub> ↗ ↘ ↗
AM	Análisis Metalográfico		Análisis de las curvas de comportamiento	I <sub>16c</sub> ↗ ↘ ↗
RM	Rendimiento mecánico	(imagen)		I <sub>16d</sub> ↗ ↘ ↗
ME	Deformación Plástica			I <sub>16e</sub> ↗ ↘ ↗

#### 5.4.2. Paso 2 - Caso II: Formulación de hipótesis.

Para el caso experimental II se ha planteado la siguiente hipótesis:

- **Hipótesis caso II: Torneado - Cilindrado:**  
¿En la pieza fabricada, al realizar el análisis de integridad superficial, los mejores indicadores de sostenibilidad se obtienen al usar los mismos parámetros de fabricación?

#### 5.4.3. Paso 3 - Caso II: Diseño experimental Procedimiento.

Los experimentos se organizaron para operaciones básicas de torneado debido a un especial interés para mejorar esta parte en el proceso de fabricación. En la Tabla 5.37 se resume los materiales y equipos del Caso II (Díaz, Vila, Ayabaca, & Calle, 2018).

Tabla 5.37. Caso II: Materiales y equipos para los experimentos (fuente: elaboración propia).

Insumo	Caso	Descripción	Detalle
Material	II	Acero	AISI 1018
Equipos	II	Torno CNC	Romi C420
Herramienta	II	Sandvik-Coromant	DNMG 150608 - PM4325
Lubricación	II	Lubricante	Promax Taladrin Valvoline
Software	II	CAD/CAM	Solidworks
Instrumentos de Medición	II	Durómetro	Duroline M
		Analizador de Metales	Q2 ION
		Microscopio	Olympus GX41
		Multímetro	HT920 Multimeter
		Rugosímetro	Mitutoyo SJ-210

Entre las métricas de salida, se evalúa la integridad de la superficie para determinar la calidad de la pieza mecanizada para su correcta funcionalidad. La materia prima caracterizada y seleccionada para este estudio fue el acero AISI 1018 ya que tiene una amplia gama de aplicaciones industriales. La pieza de material de prueba tiene una geometría cilíndrica de diámetro de 25,4 (mm) y una longitud de 70 (mm). La composición química y las propiedades mecánicas se obtuvieron con las técnicas adecuadas para asegurar la validación de la metodología y los resultados a obtener. A través de las pruebas de composición química, la materia prima se clasificó como acero

tratado térmicamente. El equipo de espectrómetro de chispa utilizado para el análisis de metales fue el *Optical Emission Spectrometry* (OES) Q2 ION, de la firma Bruker, con el software OES Elemental Suite. Con base en los parámetros químicos, los resultados confirmaron que el stock crudo pertenece al grupo de acero AISI 1018.

Para definir el conjunto de experimentos, las variables de las operaciones de torneado se modificaron de la siguiente manera (Tabla 5.38) para diseñar dos casos de estudio (tres experimentos en cada caso) Para el Caso II-A, a *velocidad de avance constante*, la profundidad de corte  $a_p$  se estableció como una variable y el parámetro de velocidad de avance  $f_n$  se fijó en 0,2 (mm/rev). La velocidad de rotación  $n$  también se fijó para las tres pruebas. Para el caso II-B, a *profundidad de corte constante*, la velocidad de avance  $f_n$  se consideró como una variable y la profundidad de corte de corte  $a_p$  y la rotación se establecieron a una velocidad fija  $n$ .

Tabla 5.38. Caso II: Diseño de experimentos con rpm constante (fuente: elaboración propia).

	Experimentos Caso II-A			Experimento Caso II-B		
	Tasa de avance constante			Profundidad de corte constante		
Profundidad de corte $a_p$ (mm)	0,5	1	1.5	1	1	1
Tasa de avance $f_n$ (mm/rev)	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5
Velocidad de giro $n$ (rpm)	1200	1200	1200	1200	1200	1200

#### 5.4.4. Paso 4 - Caso II: Desarrollo del experimento.

Para el procedimiento experimental, las principales características del proceso que se consideraron fueron: los parámetros de mecanizado, material de la pieza de trabajo y la herramienta de corte. Las condiciones del experimento fueron para una operación de mecanizado por torneado con refrigerante en emulsión. Como fluido para el trabajo de metales se utilizó Promax Taladrin (aceite claro de Valvoline). La herramienta de corte seleccionada fue la plaquita giratoria DNMG 15 06 08-PM 4325 del fabricante de herramientas Sandvik Coromant. El método experimental consideró una velocidad de husillo fija de 1200 rpm, la profundidad de corte y el avance como variables.

Los experimentos de operaciones de torneado se realizaron en un Torno CNC Romi C420 equipado con un Control Numérico SIEMENES 828D. El proceso y las estrategias de operación fueron definidos y validados con la aplicación SolidCAM. Como parámetro para controlar la integridad superficial, se seleccionó la rugosidad superficial promedio y se midió con el rugosímetro Mitutoyo SJ-210. Para el análisis metalográfico superficial se analizó primero la dureza siguiendo las normas ASTM E407-99 y ASTM E384 con una medida de microdureza Vickers  $HV_{200gf}$ , aplicando la carga correspondiente durante 15 s. La última etapa propuesta por la metodología establece el vínculo entre el proceso de fabricación, la deformación del material y la variación de las propiedades mecánicas como proponen (Pawade, Joshi, & Brahmankar, 2008) y (Agarwal, 2012). En la Figura 5.12 se muestra la configuración experimental del caso II.

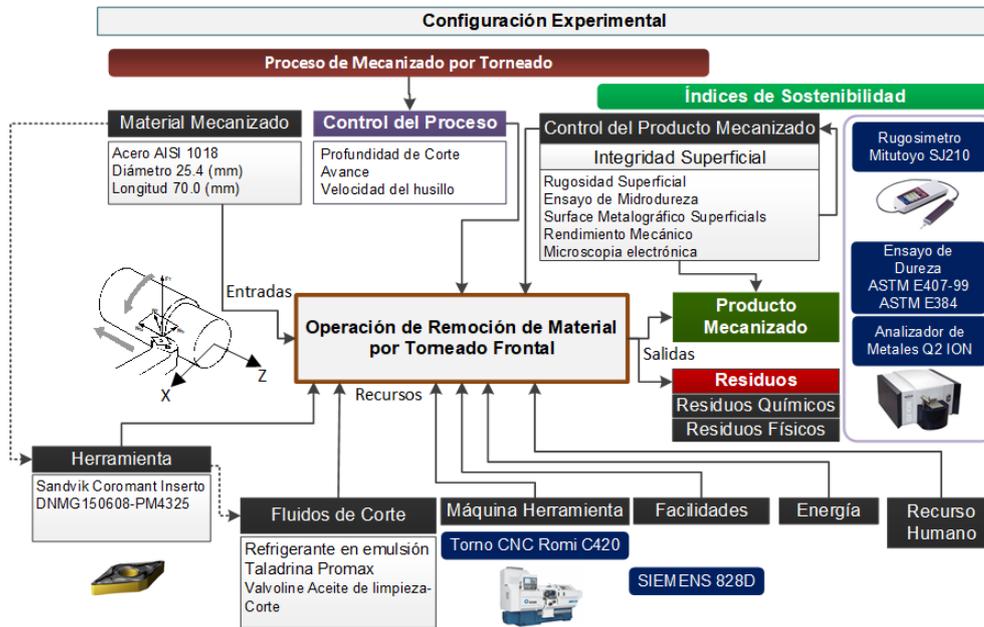


Figura 5.12. Caso II: Configuración Experimental (fuente: Vila, 2019).

El comportamiento mecánico de la microdureza es un parámetro adecuado para calcular el límite elástico  $\sigma_y$  del material (Cahoon, Broughton, & Kutzak, 1971). La relación entre estos parámetros se muestra en la siguiente ecuación (Smith-López, Graciano-Gallego, & Aparicio-Carrillo, 2015). La ecuación 5.1 representa la relación de característica mecánica, donde:

$$\sigma_y = \left(\frac{H}{3}\right) * (0.1)^{(m-2)} \quad \text{Ecuación 5.1}$$

H es la dureza obtenida del ensayo en escala Vickers; m es el coeficiente de endurecimiento por deformación establecido por Meyer, y  $n=(m-2)$  es el coeficiente de dureza por deformación; para aceros al bajo carbono este valor es 0,26 (Schmid & Kalpakjian, 2008). Además, las deformaciones ( $\varepsilon$ ) implicadas en la deformación plástica debidas a las operaciones de mecanizado pueden relacionarse con el límite elástico como se indica en la siguiente ecuación, donde C es un valor constante de 0,801 (Pawade et al., 2008).

$$\ln \sigma_y = \ln C + (m - 2) * \ln (\varepsilon) \quad \text{Ecuación 5.2}$$

$$\varepsilon = e^{\frac{(\ln \sigma_y - \ln C)}{(m-2)}} \quad \text{Ecuación 5.3}$$

Las ecuaciones 5.2 y 5.3 representan, por tanto, el modelo matemático que ayuda a establecer una relación entre las propiedades mecánicas, como el límite elástico, con la deformación y características mecánicas, como el coeficiente de endurecimiento por deformación, y las deformaciones producidas en la región afectada por el mecanizado.

#### 5.4.5. Paso 5 - Caso II: Análisis de Resultados.

Los siguientes párrafos resumen los resultados obtenidos en el caso experimental de estudio del análisis de la integridad superficial debido al mecanizado.

##### 5.4.5.1 Caso II: Análisis de Rugosidad:

Los siguientes resultados exponen la influencia de los parámetros de mecanizado en la rugosidad. La Figura 5.13 muestra que para los experimentos del Caso II-A, existe un valor mínimo de rugosidad cuando la profundidad de corte es de 1 mm, para las otras condiciones de corte, la rugosidad de la superficie maquinada tiende a ser mayor. Con los datos se construye la curva de comportamiento. La tendencia de la rugosidad cuando las profundidades de corte están entre 0,5 a 1 va disminuyendo, teniendo su menor valor cuando es  $a_p=1$  mm, pero a partir de este valor la tendencia va aumentando.

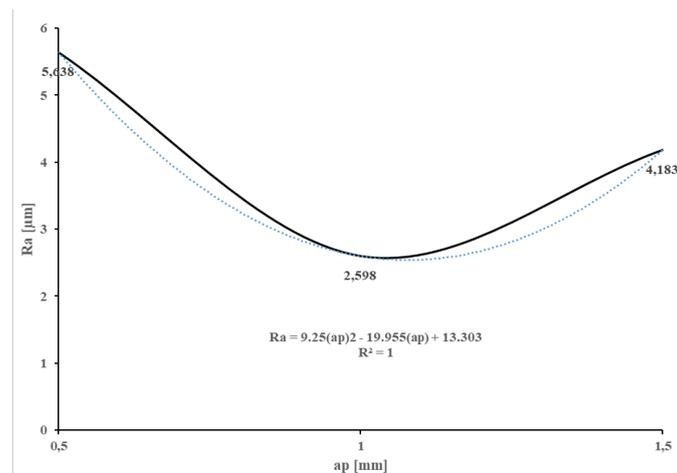


Figura 5.13. Caso II-A: Experimentos de Rugosidad (fuente: Vila 2019).

En la Figura 5.14, para los experimentos del Caso II-B al aumentar el avance durante la operación de corte, la rugosidad de la superficie también aumenta. En el rango seleccionado, la pendiente muestra un aumento, lo que implica que, para aplicaciones de elementos que requieran un mejor acabado superficial, los parámetros producirían una rugosidad mayor. Se genera la curva de comportamiento en función de las condiciones del experimento. Otros estudios (Jayal, Badurdeen, Dillon, & Jawahir, 2010; Pan, Feng, & Liang, 2017) indican que a velocidades de avance inferiores a 0,1 (mm / rev), la calidad de la superficie obtenida es suave y brillante.

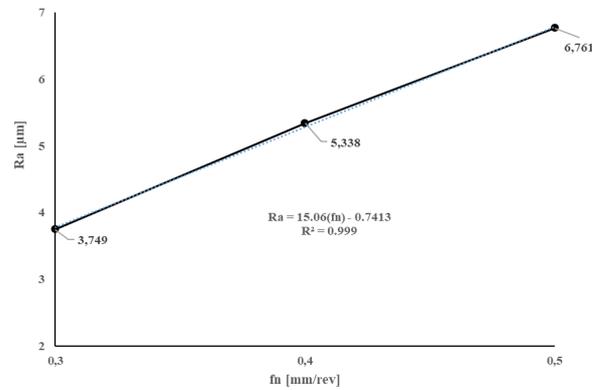


Figura 5.14. Caso II-B: Experimentos de Rugosidad (fuente: Vila,2019).

**5.4.5.2 Caso II: Análisis de Microdureza:** La dureza del material base se evaluó desde la superficie hacia el centro del eje de acero, utilizando la escala de dureza Vickers (“*HV= Hardness Vickers*”). En la Figura 5.15 y en la Figura 5.16 se representa el efecto de la profundidad de corte y avance sobre la microdureza para cada caso analizado. En la Tabla 5.39 y la Tabla 5.40 los valores más altos se obtuvieron con indentaciones realizadas a profundidades menores a 100 (µm) con un valor promedio para el Caso II-A de 232,08 HV<sub>200gf ± 10</sub> y de 229,99 HV<sub>200gf ± 10</sub> para el Caso II-B, correspondiente a la zona de mayor deformación plástica, en adelante la dureza disminuyó hasta obtener una tendencia de alrededor de 198 HV<sub>200gf ± 10</sub>.

Tabla 5.39. Caso II-A: Análisis de Microdureza (fuente: elaboración propia).

Distancia desde la superficie (µm)	CASO II-A Dureza (HV)			Dureza Promedio (HV)
	$a_p = 0,5$ (mm)	$a_p = 1$ (mm)	$a_p = 1,5$ (mm)	
24	233,00	239,50	241,00	232,08
74	228,00	224,00	227,00	
200	197,00	202,20	202,00	
400	198,06	190,10	195,00	197,08
600	199,78	201,10	196,00	
800	196,30	189,38	198,00	

Con  $n=1200$  (rpm) y  $f_n=0,2$  (mm/rev) constantes

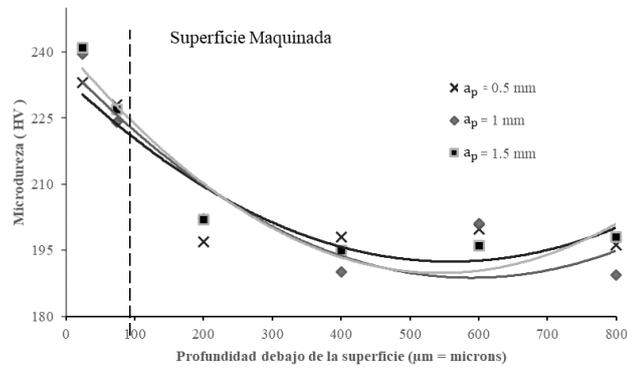


Figura 5.15. Caso II-A: Microdureza en la superficie maquinada (fuente: Vila, 2019).

Tabla 5.40. Caso II-B: Análisis de Microdureza (fuente: elaboración propia).

Distancia desde la superficie (µm)	CASO II-B Dureza (HV)			Dureza Promedio (HV)
	$f_n = 0,3$ (mm/rev)	$f_n = 0,4$ (mm/rev)	$f_n = 0,5$ (mm/rev)	
24	232,96	232,00	244,00	229,99
74	215,00	201,00	255,00	
200	200,00	200,00	200,00	198,33
400	200,00	198,00	201,00	
600	195,00	195,00	199,00	
800	195,00	198,00	199,00	

Con  $n = 1200$  (rpm) y  $a_p = 1$  (mm) constantes

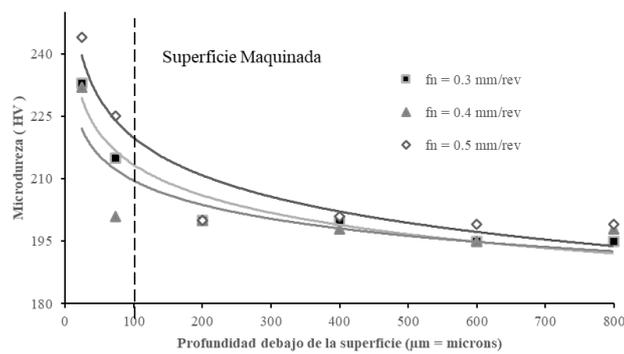


Figura 5.16. Caso II-B: Microdureza en la superficie maquinada (fuente: Vila, 2019).

**5.4.5.3 Caso II: Análisis Metalográfico de la Superficie:** El tamaño de grano del material base se midió antes del mecanizado para determinar la influencia del mecanizado en las variaciones de la microestructura. El tamaño de grano en el área mecanizada y en el centro del eje fue ASTM No 8. La Figura 5.17 muestra las microestructuras cuando se aplicaron los parámetros de los experimentos de los Casos II-A y II-B. Existe una gran deformación provocada por el contacto entre la herramienta de corte y la superficie de la pieza de trabajo. Los granos de ferrita (color claro) y perlita (color oscuro) se alargan en la dirección de corte y la deformación plástica produce un endurecimiento inducido, que aumenta la microdureza en la superficie mecanizada al aumentar la profundidad de corte y la velocidad de avance, con lo que se evidencia la influencia de los parámetros en cada caso experimental.

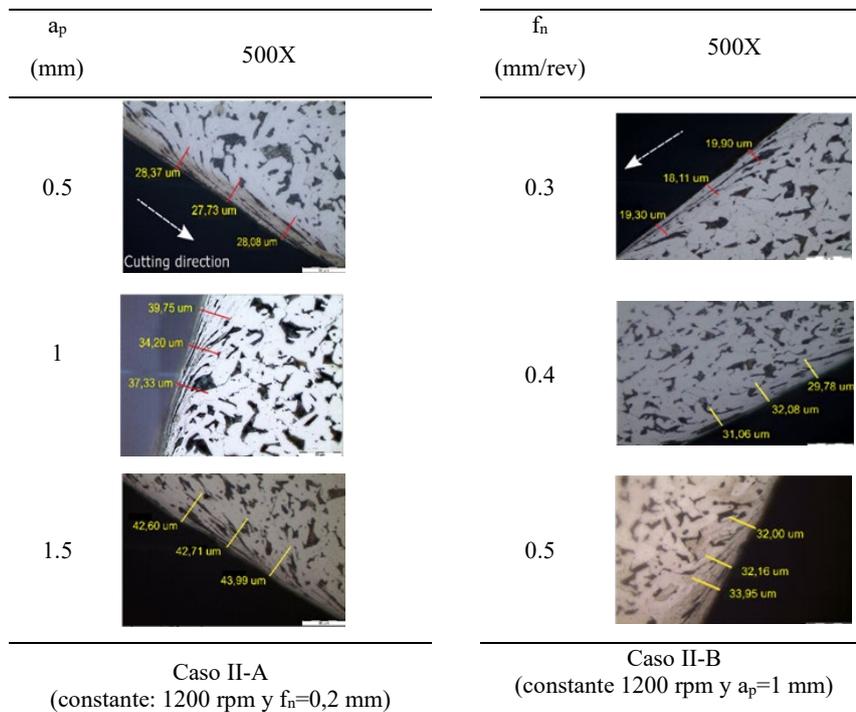


Figura 5.17. Caso II-A y Caso II-B: Dureza Superficial (fuente: Vila, 2019).

**Caso II-A:** La Tabla 5.41 muestra la deformación plástica inducida en el material por el contacto de la herramienta de corte con la pieza de trabajo durante el mecanizado de la superficie. Es posible determinar que al aumentar la profundidad de corte en pasos de 0,5 (mm), también aumenta el grosor de la capa de deformación plástica.

Tabla 5.41. Caso II-A: Deformación Plástica (fuente: elaboración propia).

$a_p$ (mm)	Medida	Deformación Plástica ( $\mu\text{m}$ )	Promedio deformación Plástica ( $\mu\text{m}$ )
0,5	#1	28,37	28,06
	#2	27,73	
	#3	28,08	
1,0	#1	39,75	37,09
	#2	34,20	
	#3	37,33	
1,5	#1	42,60	43,10
	#2	42,71	
	#3	43,99	

**Caso II-B:** La Tabla 5.42 muestra la deformación plástica inducida en el material debido a la variación en la velocidad de alimentación. Los altos niveles de deformación plástica son un efecto del aumento de este parámetro. Sin embargo, estos valores son menores si se consideran los obtenidos variando la profundidad de corte.

Tabla 5.42. Caso II-B: Deformación Plástica (fuente: elaboración propia).

$f_n$ (mm)	Medida	Deformación Plástica ( $\mu\text{m}$ )	Promedio deformación Plástica ( $\mu\text{m}$ )
0,3	#1	19,90	19,1
	#2	18,11	
	#3	19,30	
0,4	#1	29,78	30,97
	#2	32,08	
	#3	31,06	
0,5	#1	32,00	32,70
	#2	32,16	
	#3	33,95	

**5.4.5.4. Caso II: Propiedades Mecánicas:** El límite elástico, la deformación son propiedades mecánicas obtenidas aplicando los datos experimentales de los ensayos de microdureza en las ecuaciones 5.1, 5.2 y 5.3. En la Tabla 5.43 se muestra los valores para los experimentos del Caso II-A. En la Figura 5.18 se relaciona el límite elástico con la dureza del material para los experimentos del Caso II-A donde se observa que los cambios de la profundidad de corte producen una variación de pendiente positiva. En la gráfica obtenida se observa una tendencia proporcional, es decir, a medida que aumenta la microdureza, también aumenta el límite elástico.

Tabla 5.43. Caso II-A: Microdureza vs Limite de Fluencia (fuente: elaboración propia).

$a_p = 0,5$ (mm)		$a_p = 1$ (mm)		$a_p = 1,5$ (mm)	
(HV)	(Mpa)	(HV)	(Mpa)	(HV)	(Mpa)
233,00	418,56	239,50	430,23	241,00	432,93
228,00	409,58	224,00	402,39	227,00	407,78
197,00	353,89	202,20	363,22	202,00	362,87
198,06	355,79	190,10	341,49	195,00	350,30
199,78	358,88	201,1	361,25	196,00	352,09
196,30	352,63	189,38	340,19	198,00	355,68

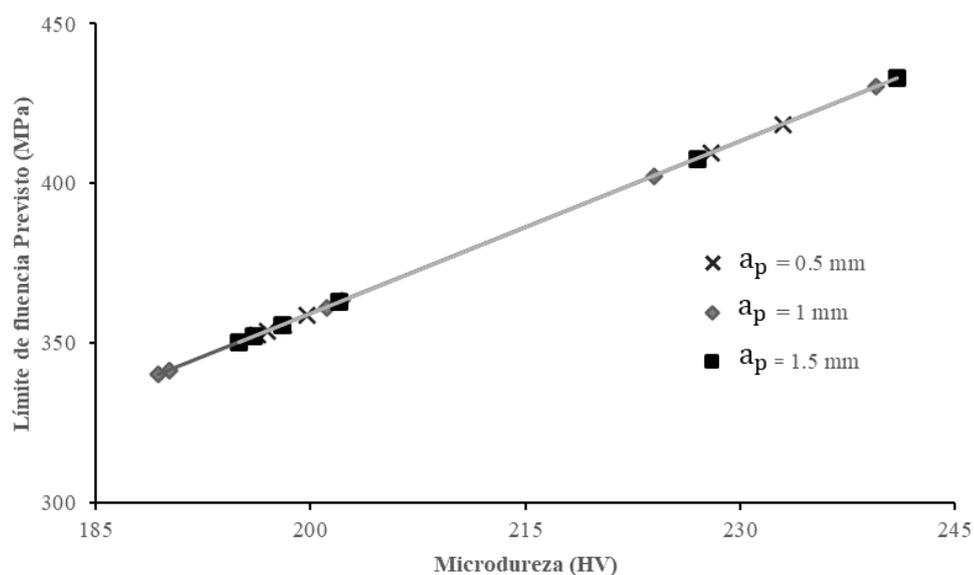


Figura 5.18. Caso II-A: Microdureza vs Limite de Fluencia (fuente: Vila, 2019).

De igual manera para los experimentos del Caso II-B, en la Tabla 5.44 y en la Figura 5.19 se muestra el comportamiento de las propiedades mecánicas, cuando varía el avance.

Tabla 5.44. Caso II-B: Microdureza vs Limite de Fluencia (fuente: elaboración propia).

$f_n = 0,3$ (mm/rev)		$f_n = 0,4$ (mm/rev)		$f_n = 0,5$ (mm/rev)	
(HV)	(Mpa)	(HV)	(Mpa)	(HV)	(Mpa)
232,96	418,20	232,00	416,48	244,00	438,02
215,00	385,96	201,00	360,83	255,00	403,91
200,00	359,03	200,00	359,03	200,00	359,03
200,00	359,03	198,00	355,44	201,00	360,83
195,00	350,06	195,00	350,06	199,00	357,24
195,00	350,06	198,00	355,44	199,00	357,24

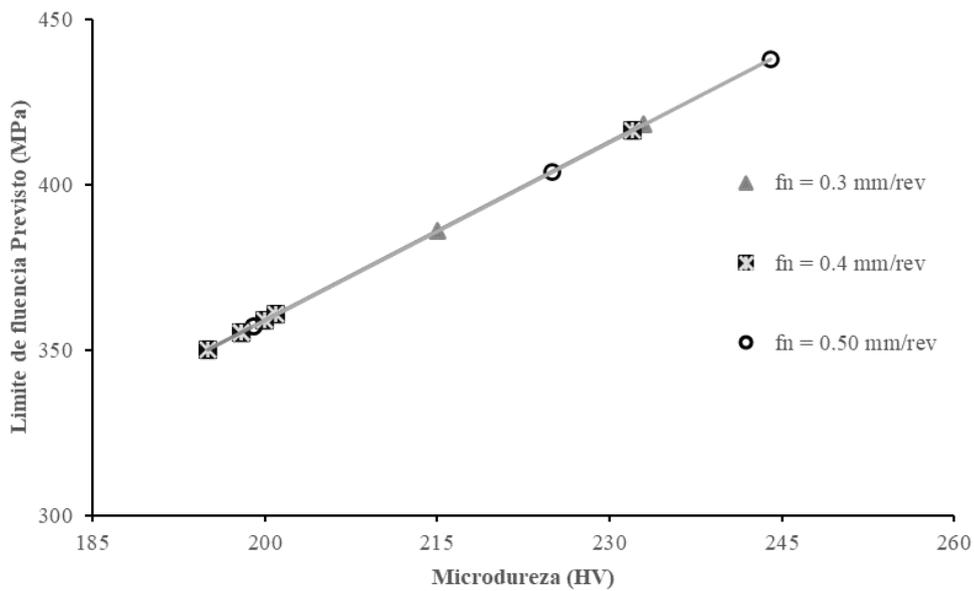


Figura 5.19. Caso II-B: Microdureza vs Limite de Fluencia (fuente: Vila, 2019).

**5.5.5.5 Caso II: Microscopia electrónica:** La calidad y textura de la superficie se realizaron mediante análisis SEM “Scanning Electron Microscopy”. La Figura 5.20 muestra la generación de marcas y microgrietas en la superficie mecanizada, generadas por el desplazamiento de la herramienta de corte al separar la viruta. Las fotografías mostradas corresponden al Caso II-A donde se varia la profundidad de corte.

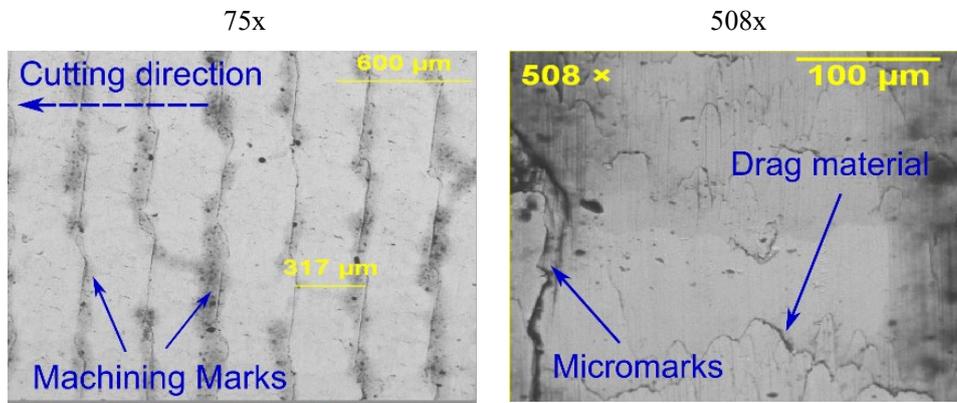


Figura 5.20. Caso II: SEM - Avance longitudinal de la herramienta de corte (fuente: Vila, 2019).

#### 5.4.6. Paso 6 - Caso II: Conclusiones del experimento.

Los casos analizados, evidencian que la combinación de los parámetros de corte para el proceso de torneado del acero AISI 1018 permiten predecir la integridad de la superficie en las operaciones de mecanizado, para lo cual se obtiene las curvas de tendencia del grupo de indicadores de la familia  $I_{16}$   $\nearrow \searrow \nearrow$ , en el rango de uso de la herramienta.

#### Rugosidad Superficial:

- En los experimentos del Caso II-A, para el rango de profundidad de corte  $a_p$  de 0,5 (mm) a 1 (mm), la rugosidad de la superficie se va reduciendo, aproximadamente en un 50%. En  $a_p=1$  (mm) tiene su mínimo valor ( $R_a= 2,598 \mu m$ ) y en el rango de 1 (mm) a 1,5 (mm) se va incrementando la rugosidad. Una regresión exponencial de segundo grado define su comportamiento.
- En los experimentos del Caso II-B, en el rango del avance de 0,3 -0,5 (mm/rev) observamos que tiene la influencia lineal, dando como resultado una línea de regresión de pendiente positiva.

#### Microdureza:

La variación del 14,5% de la dureza del material (232 a 198  $HV_{200gr}$ ) en la superficie de la pieza mecanizada en el experimental Caso II, se debe a dos causas principales:

- En primer lugar, la operación de mecanizado provoca una micro deformación plástica superficial que modifica la condición superficial inicial del material.
- En segundo lugar, el efecto directo sobre las fases de ferrita y perlita, que también se deforman, provocan en esta región un desplazamiento y acumulación de dislocaciones que aumentan el límite elástico, la resistencia mecánica y, por tanto, la microdureza.

#### **Deformación Plástica:**

- La deformación plástica en la superficie de la pieza mecanizada está muy influenciada por la profundidad de corte. (II-A) El estudio mostró un aumento de límite de fluencia debido a la zona de deformación plástica cuyo espesor se encuentra en el rango de 28,06 a 43,1 ( $\mu\text{m}$ ). Para el caso II-B del parámetro velocidad de alimentación se tiene una reducción del espesor de la zona de deformación plástica del 29,4% 19,1 a 32,7 ( $\mu\text{m}$ ).

#### **Microscopia electrónica:**

- Se observa marcas de mecanizado que no son críticas, y que se pueden considerar cuando se realice el análisis de posibles fallas del material, y el elemento fabricado ya se encuentre en uso, para lo cual dependerá de las condiciones de trabajo.

Si bien este estudio, presenta los resultados preliminares de un potencial estudio amplio de sostenibilidad en el proceso de mecanizado de AISI 1018, se deben realizar algunos trabajos futuros para incrementar el conocimiento en este tema, con el fin de predecir posibles causas de fallas de la superficie mecanizada por las condiciones operativas del proceso.

#### **5.4.7. Paso 7 - Caso II: Informe de resultados en entornos colaborativos.**

Encontrar las condiciones de operación que minimicen los fallos en la superficie mecanizada de la pieza, y permitan analizar la integridad superficial, ayudará a predecir fallas futuras y aumentar la vida útil de las piezas fabricadas, para lo cual conocer las curvas de comportamiento y de tendencia de indicadores de la familia  $I_{16}$  será una ventaja competitiva de calidad y producción. Hay que recordar que se verifica el rango de uso de la herramienta, ya que se utiliza los valores de los parámetros que recomienda el fabricante, para sacar conclusiones.

El cumplimiento de los requisitos del fabricante incluye cumplir las tolerancias dimensionales del diseño, el acabado superficial, la dureza de la superficie del material que se requiera y otras consideraciones que permitan fabricar piezas de mejor calidad.

En este caso II, el desarrollo de pruebas y experimentos requiere el aporte significativo del rol colaborativo “Ingeniero/a de Materiales”, ya que el análisis de la integridad superficial de la pieza mecanizada permite conocer las causas de posibles fallos posteriores a la fabricación del elemento, las cuales podrían deberse a una planificación inadecuada del proceso o una mala selección de parámetros de mecanizado. Esto puede llevarnos a no cumplir con las condiciones de calidad y tiempo de vida útil del elemento fabricado.

Los procesos de mecanizado industrial como el torneado y el fresado, deben definir adecuadamente las herramientas de corte y los mejores parámetros de proceso que se aplican, para asegurar la sostenibilidad del proceso y de los productos que se fabrican. El flujo de información se apalanca con el uso de entornos colaborativos y sus

plataformas 3DEXPERIENCE, en donde se maneja de forma digital el flujo de información.

En la Figura 5.21 se presenta para el Caso II, el Torno utilizado en el desarrollo experimental de los casos de estudio:



*Figura 5.21. Caso II: Uso del Torno Romi-C420 (fuente: elaboración propia).*

El equipo colaborativo en el Caso II desarrolla las actividades:

- **Ingeniero de Materiales:** prueba y testea las piezas fabricadas con los equipos adecuados, sus resultados permiten relacionar los parámetros de corte. Adicional elabora e investiga las curvas de comportamiento de los materiales a ser utilizados.
- **Diseñador CAD CAM:** dispone de las curvas de comportamiento de propiedades mecanizas. Le permite afinar los resultados de las simulaciones y validarlas.
- **Técnico de Operación:** verifica el estado de herramientas de corte y emite sus comentarios y experiencias para las condiciones de operación seleccionadas.
- **Operador de Máquina:** establece que parámetros deben ser afinados para lograr las condiciones requeridas y genera los diferentes archivos en el postprocesador.

### 5.5. Caso III: Evaluación en diferentes centros de mecanizado.

En el momento de fabricar una pieza mecanizada, la selección del centro de mecanizado que brinde las mejores condiciones debe realizarse tomando los criterios de sostenibilidad. El presente caso muestra los criterios y las experimentaciones que han permitido seleccionar el centro de mecanizado más adecuado. Los resultados de este caso se presentaron en la publicación, “Comparative study of Sustainability Metrics for Face Milling AISI 1045 in different Machining Centers” (Ayabaca, Vila, & Abellán-Nebot, 2019).

#### 5.5.1. Paso 1 - Caso III: Observación.

Una planta o taller industrial, puede disponer de varias opciones de equipos para mecanizar una pieza, para lo cual debe analizar y seleccionar la que le permite alcanzar la calidad solicitada y que consuma menor energía.

- **Objetivo Caso III:** Fresado - Planeado de superficies en diferentes equipos: Verificar si indiferentemente del centro de mecanizado en el que se mecaniza una pieza, se obtiene el mismo indicador sostenible de rugosidad superficial o de consumo de energía.

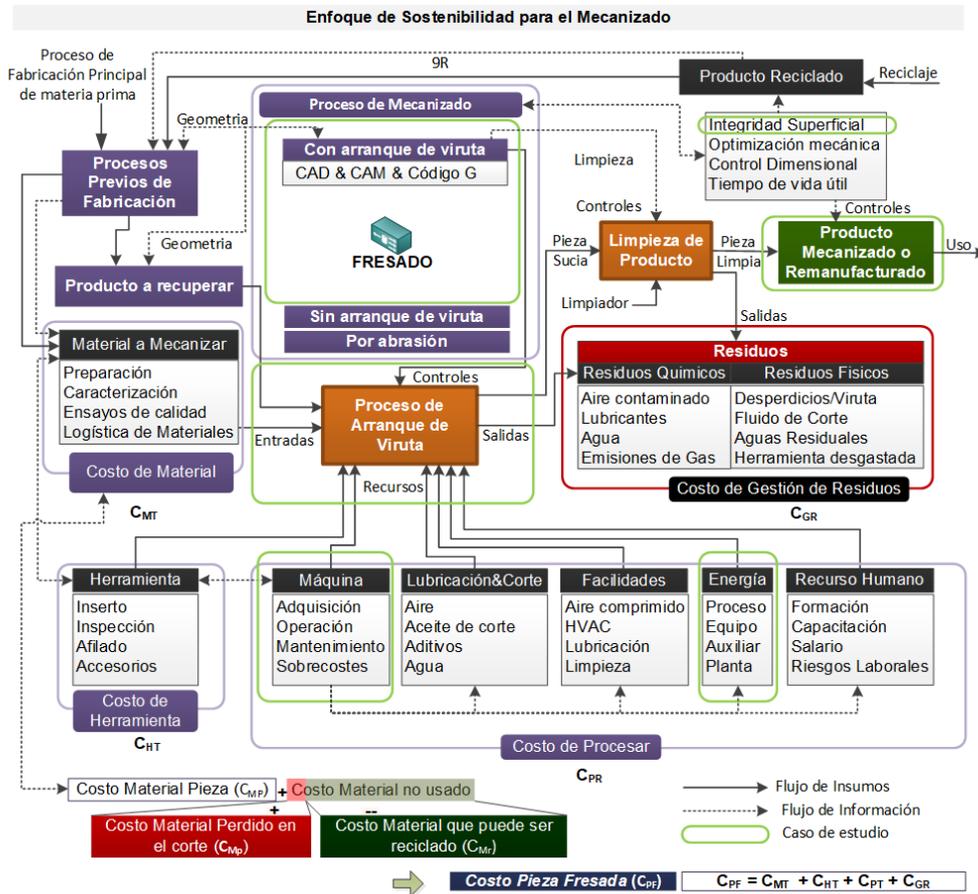
Al mecanizar una pieza, podemos disponer de varias alternativas de centros de mecanizado en los que se la puede fabricar, así que determinar en el que se consiga el mejor indicador de rugosidad superficial y de consumo de energía, permitirá garantizar la calidad de la pieza y minimizar los costes de fabricación.

Este caso presenta una situación que puede suscitarse en cualquier momento en una empresa industrial. En la Tabla 5.45 se muestran los detalles generales del caso experimental en donde el menor valor  $\searrow$  es el que se busca.

Tabla 5.45. Caso III: Detalles generales del experimento (fuente: elaboración propia).

Fase	Caso	Perspectiva	Proceso & Operación	Material	Equipo	Indicador Evaluado	ODS
FABRICACION	III	Producto	Fresado Superficies Planas	AISI 1045 (F-114)	G	Rugosidad Superficial	I <sub>16</sub> $\searrow$
					D		
		Proceso	D	G	Consumo de Energía	I <sub>14</sub> $\searrow$	
				D			
Nota: G = Centro de Mecanizado CNC - Gentiger BT16      D = Centro de mecanizado CNC - Deckel Maho $\nearrow$ el máximo valor es mejor $\searrow$ el mínimo valor es mejor							

En la Figura 5.22 se resalta el análisis de este caso III. La selección adecuada puede conllevar ahorros de varios indicadores que se encuentran relacionados con la rugosidad superficial de la pieza mecanizada, así como de la energía que se requiere.



NOTA:

9R = Reducir Reutilizar Reciclar Revalorizar Redistribuir Relacionar Resiliencia Reevaluación Reestructuración

Figura 5.22. Caso III: Enfoque de análisis de Sostenibilidad (fuente: elaboración propia).

Los indicadores que vamos a evaluar en el caso III son los definidos en la Tabla 5.46, los cuales se definen en la fase de fabricación del ciclo de vida, considerando el proceso y el producto.

Tabla 5.46. Caso III: Indicadores (fuente: elaboración propia).

Siglas	Indicador	Unidades	Detalle	Objetivo
R <sub>aM1</sub>	Rugosidad	( $\mu\text{m}$ )	Rugosidad Superficial (equipo 1)	I <sub>16</sub> ↘
R <sub>aM2</sub>	Rugosidad	( $\mu\text{m}$ )	Rugosidad Superficial (equipo 2)	I <sub>16</sub> ↘
CE <sub>M1</sub>	Consumo de Energía	(kWh)	Consumo Energético (equipo 1)	I <sub>14</sub> ↘
CE <sub>M2</sub>	Consumo de Energía	(kWh)	Consumo Energético (equipo 2)	I <sub>14</sub> ↘

### 5.5.2. Paso 2 - Caso III: Formulación de hipótesis.

Para el caso experimental III se ha planteado la siguiente hipótesis.

- **Hipótesis caso III: Fresado - Planeado de superficies en diferentes equipos:**  
¿En la fase de Fabricación, mecanizar la misma pieza en diferentes centros de mecanizado permitirá obtener los mismos indicadores de sostenibilidad si se están usando los mismos parámetros?

### 5.5.3. Paso 3 - Caso III: Diseño experimental Procedimiento.

Disponemos de dos centros de mecanizado con sus instalaciones en las cuales se va a realizar los mismos experimentos. En la Tabla 5.47 se detalla los materiales y equipos para el caso III (Ayabaca, Vila, & Abellán-Nebot, 2019).

Tabla 5.47. Caso III: Materiales y equipos para los experimentos (fuente: elaboración propia).

Insumo	Caso	Descripción	Detalle
<b>Material</b>	III	Acero	F114 (AISI 1045)
<b>Equipos</b>	III	Centro de Mecanizado Centro de Mecanizado	Gentiger GT16B Deckel Maho
<b>Herramienta</b>	III	Mitsubishi Tools	Herramienta: VPX300R 4004SA32SA Inserto: LOGU1207080PNER-M (MP6120)
<b>Software</b>	III	CAD/CAM	Autodesk Inventor Profesional 2017
<b>Instrumentos de Medición</b>	III	Multímetro Rugosímetro Rugosímetro	HT920 Multimeter Mitutoyo SJ-210 Mitutoyo SJ-201

Es importante mencionar que, en el proceso de fresado, los parámetros que se definen consideran principalmente: a) material a mecanizar b) la herramienta a utilizar (la cual es generalmente recomendada por el fabricante de la herramienta, por lo que es necesario el uso de catálogos para definir los rangos de trabajo) y c) el centro de mecanizado seleccionado, con la capacidad de cumplir con los valores sugeridos en el catálogo de herramientas. El diseñador CAD/CAM, en base a su experiencia, define los parámetros de mecanizado. En la Figura 5.23 se presenta el diseño experimental.

Se conforman los 27 experimentos ( $L_{27}$ ) sugeridos por el método Taguchi, de los cuales se seleccionan aquellos con mejor calidad de rugosidad superficial y el mínimo consumo de energía. En Tabla 5.48 se muestra los factores y niveles de análisis. En la Tabla 5.49 se muestran las 27 combinaciones.

En la recolección de datos experimentales de energía consumida, utilizamos el multímetro HT 9022 en cada uno de los centros de mecanizado, el cual permite registrar y grabar las mediciones durante el periodo de funcionamiento.

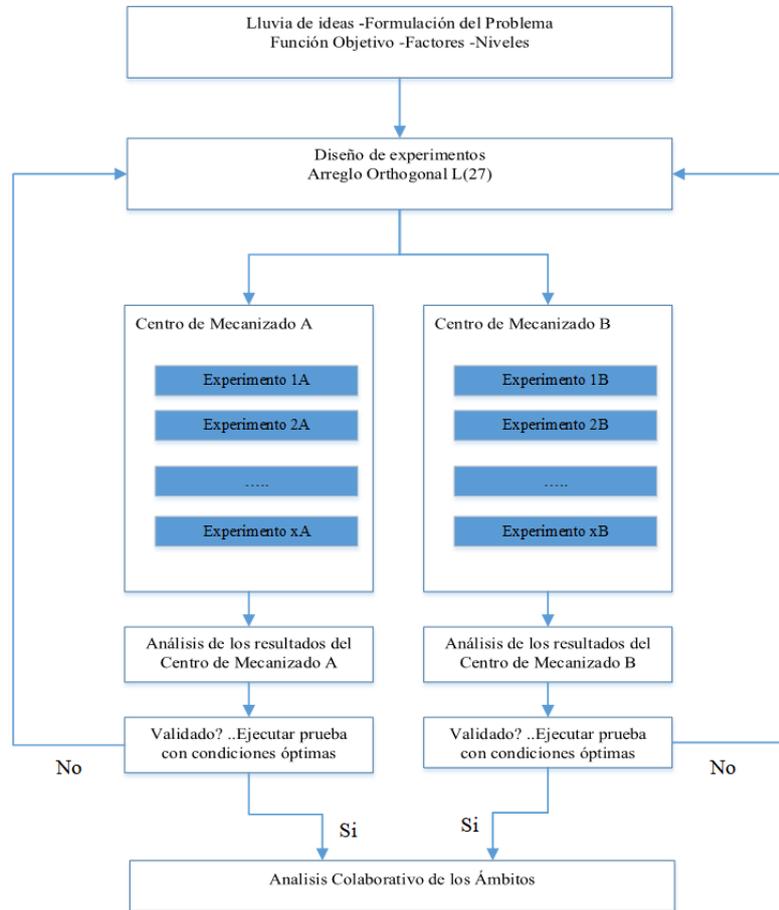


Figura 5.23. Caso III: Diseño experimental (fuente: elaboración propia).

Para la recolección de datos experimentales de la rugosidad de la superficie, se utilizó el medidor de rugosidad Mitutoyo SJ201 para la Máquina A (Caso III-A) y el SJ210 para la Máquina B (Caso III-B) (ver Figura 5.24 y Figura 5.25 respectivamente).

Tabla 5.48. Caso III: Factores y Niveles (fuente: elaboración propia).

Factores	Unidades	Niveles			
		1	2	3	
Dirección de pasada	$p_d$	$^\circ$	0	45	90
Profundidad de corte	$a_p$	mm	0,8	1	1,2
Velocidad de corte	$v_c$	m/min	140	180	210
Avance por diente	$f_z$	mm/diente	0,08	0,10	0,12

Tabla 5.49. Caso III: Combinaciones de Factores (fuente: elaboración propia).

N	$p_d$	$a_p$	$v_c$	$f_z$
1	0	0,8	140	0,08
2	0	0,8	180	0,1
3	0	0,8	210	0,12
4	0	1	140	0,1
5	0	1	180	0,12
6	0	1	210	0,08
7	0	1,2	140	0,12
8	0	1,2	180	0,08
9	0	1,2	210	0,1
10	45	0,8	140	0,1
11	45	0,8	180	0,12
12	45	0,8	210	0,08
13	45	1	140	0,12
14	45	1	180	0,08
15	45	1	210	0,1
16	45	1,2	140	0,08
17	45	1,2	180	0,1
18	45	1,2	210	0,12
19	90	0,8	140	0,12
20	90	0,8	180	0,08
21	90	0,8	210	0,1
22	90	1	140	0,08
23	90	1	180	0,1
24	90	1	210	0,12
25	90	1,2	140	0,1
26	90	1,2	180	0,12
27	90	1,2	210	0,08



(a)



(b)

Figura 5.24. Caso III-A: Mediciones (a) Potencia (b) Rugosidad (fuente: elaboración propia).



(a)



(b)

Figura 5.25. Caso III-B: Mediciones (a) Potencia (b) Rugosidad (fuente: elaboración propia).

Para determinar cómo influyen los parámetros y su efecto sobre el consumo de energía (potencia) y la rugosidad superficial, se utiliza el análisis de varianza como herramienta estadística que permite determinar la significancia de los parámetros considerados. En este caso, se analizan dos centros de mecanizado (A=Gentiger y B=Deckel Maho) mediante ANOVA y se determinan los niveles óptimos de los factores para poder compararlos. También se analiza la señal ruido radio  $SN$ . (Ecuación 5.4)

$$\frac{s}{N} = -10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad \text{Ecuación 5.4}$$

#### 5.5.4. Paso 4 - Caso III: Desarrollo del experimento.

Para cada uno de los centros de mecanizado, se desarrollan 27 experimentos con los parámetros antes indicados. Se desarrolla el CAD/ CAM, se validan los archivos post procesados escritos en código G y se realiza las mediciones experimentales de la potencia eléctrica consumida, y la rugosidad superficial para cada experimento. Por ejemplo, para el caso III -A, en la Figura 5.26 se muestran fotografías de las diferentes direcciones de mecanizado en el centro de mecanizado A (Gentiger).

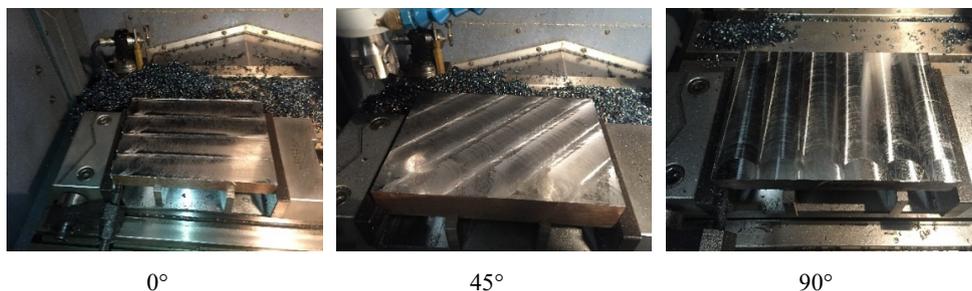


Figura 5.26. Caso III: Direcciones de mecanizado: 0°; 45°; 90° (fuente: elaboración propia).

En la Tabla 5.50 las combinaciones y los resultados para el Caso III-A, en donde los datos experimentales mostrados son promedio para los valores de potencia. Para las mediciones de rugosidad se realiza un mapeo en la superficie mecanizada y se considera el valor promedio.

Tabla 5.50. Caso III-A: Resultados Centro de Mecanizado A (fuente: elaboración propia).

N	$p_d$	$a_p$	$v_c$	$f_z$	I <sub>14</sub> (Potencia)		I <sub>16</sub> (Rugosidad)	
					P <sub>mean</sub> kWh	S/N	S <sub>mean</sub> $\mu_m$	S/N
1	0	0,8	140	0,08	3,3933	-10,613	0,71	2,880
2	0	0,8	180	0,1	2,8289	-9,032	0,98	-0,172
3	0	0,8	210	0,12	3,1744	-10,034	0,55	5,102
4	0	1	140	0,1	2,8322	-9,043	1,48	-3,498
5	0	1	180	0,12	3,2244	-10,169	1,02	-0,191
6	0	1	210	0,08	3,1433	-9,948	0,60	3,806
7	0	1,2	140	0,12	3,2189	-10,154	1,56	-3,983
8	0	1,2	180	0,08	2,9989	-9,553	0,77	1,702
9	0	1,2	210	0,1	3,5033	-10,890	0,72	2,719
10	45	0,8	140	0,1	3,7244	-11,421	2,22	-6,938
11	45	0,8	180	0,12	3,0078	-9,565	1,84	-5,317
12	45	0,8	210	0,08	2,8656	-9,145	1,65	-4,390
13	45	1	140	0,12	2,9811	-9,488	2,08	-6,350
14	45	1	180	0,08	2,9033	-9,258	1,97	-6,022
15	45	1	210	0,1	3,2467	-10,229	1,63	-4,272
16	45	1,2	140	0,08	2,8400	-9,066	1,82	-5,217
17	45	1,2	180	0,1	3,2544	-10,250	1,93	-5,740
18	45	1,2	210	0,12	3,7267	-11,426	1,39	-2,849
19	90	0,8	140	0,12	3,6589	-11,267	1,26	-2,187
20	90	0,8	180	0,08	2,8656	-9,144	1,04	-0,419
21	90	0,8	210	0,1	2,8956	-9,235	0,90	0,752
22	90	1	140	0,08	2,8956	-9,235	1,57	-3,930
23	90	1	180	0,1	2,7967	-8,933	0,95	0,354
24	90	1	210	0,12	3,1756	-10,036	1,02	-0,277
25	90	1,2	140	0,1	2,8033	-8,954	1,57	-3,980
26	90	1,2	180	0,12	3,1889	-10,073	1,22	-1,706
27	90	1,2	210	0,08	3,5933	-11,110	1,19	-1,567

Las mismas consideraciones se tomaron en cuenta para realizar las 27 combinaciones en el centro de mecanizado B, Deckel Maho, (Caso III-B), en donde se volvieron a generar las 27 combinaciones.

En la Tabla 5.51 se muestra los valores experimentales para el centro de mecanizado B (Deckel Maho). La colaboración del personal técnico que opera el equipo es de vital importancia para verificar que los archivos que contienen el Cogido G funcionen correctamente en cada equipo.

Tabla 5.51. Caso III-B: Resultados Centro de Mecanizado B (fuente: elaboración propia).

N	$p_d$	$a_p$	$v_c$	$f_z$	I <sub>14</sub> (Potencia)		I <sub>16</sub> (Rugosidad)	
					P <sub>mean</sub> kWh	S/N	S <sub>mean</sub> $\mu_m$	S/N
1	0	0,8	140	0,08	4,8822	-13,77	2,81	-9,016
2	0	0,8	180	0,1	5,0611	-14,08	1,97	-6,033
3	0	0,8	210	0,12	5,2556	-14,41	2,06	-6,356
4	0	1	140	0,1	5,2022	-14,32	2,06	-6,273
5	0	1	180	0,12	5,4100	-14,66	1,94	-5,827
6	0	1	210	0,08	5,1800	-14,29	1,54	-3,818
7	0	1,2	140	0,12	5,5589	-14,90	1,96	-5,860
8	0	1,2	180	0,08	5,2367	-14,38	1,72	-4,735
9	0	1,2	210	0,1	5,4811	-14,78	1,42	-3,237
10	45	0,8	140	0,1	5,0700	-14,10	2,91	-9,337
11	45	0,8	180	0,12	5,1800	-14,29	1,05	-0,399
12	45	0,8	210	0,08	4,9589	-13,91	0,83	1,568
13	45	1	140	0,12	5,3711	-14,60	3,34	-10,545
14	45	1	180	0,08	5,1289	-14,20	1,36	-2,677
15	45	1	210	0,1	5,3511	-14,57	1,47	-3,417
16	45	1,2	140	0,08	5,2711	-14,44	2,47	-7,943
17	45	1,2	180	0,1	5,4467	-14,72	1,70	-4,688
18	45	1,2	210	0,12	5,6989	-15,12	1,69	-4,562
19	90	0,8	140	0,12	7,3978	-17,38	2,33	-7,458
20	90	0,8	180	0,08	7,5067	-17,51	1,64	-4,308
21	90	0,8	210	0,1	7,2022	-17,15	1,33	-2,824
22	90	1	140	0,08	7,7233	-17,76	2,45	-7,845
23	90	1	180	0,1	7,4133	-17,40	2,11	-6,594
24	90	1	210	0,12	7,6867	-17,71	1,01	-0,098
25	90	1,2	140	0,1	7,6600	-17,68	2,86	-9,113
26	90	1,2	180	0,12	7,7267	-17,76	2,21	-6,945
27	90	1,2	210	0,08	7,6333	-17,66	1,20	-2,030

Con la información generada en cada experimento procedemos a realizar los análisis que se describen en el siguiente apartado.

### 5.5.5. Paso 5 - Caso III: Análisis de Resultados.

Resumiendo, los análisis ANOVA (Roy, 2001) de los dos centros de mecanizado, la Tabla 5.52 resume los cálculos de los valores F para la energía consumida (potencia) y la rugosidad para el centro de mecanizado A ( Caso III-A) y la Tabla 5.53 para el centro de mecanizado B ( Caso III-B).

Tabla 5.52. Caso III-A: Análisis centro de Mecanizado A (fuente: elaboración propia).

Fuente	GD	Centro de Mecanizado A Gentiger GTB 16			
		Potencia		Rugosidad	
		F	Prob>F	F	Prob>F
$p_d$	2	0,476	0,6429	39,7342	0,0003
$a_p$	2	3,8298	0,0848	0,8924	0,4578
$v_c$	2	5,1518	0,0498	12,0893	0,0079
$f_z$	2	3,8687	0,0833	0,6125	0,5727
$p_d * a_p$	(4)	Pooled	-	Pooled	-
$p_d * v_c$	(4)	Pooled	-	Pooled	-
$a_p * v_c$	(4)	Pooled	-	Pooled	-
Error	6				
Total	26				

GD. Grado de Libertad, F Prob> P. F,  $F_{0.05,2,6} = 5,1433$ ,  $F_{0.05,2,6} = 4,5337$

Tabla 5.53. Caso III-B: Análisis Centro de Mecanizado B (fuente: elaboración propia).

Fuente	GD	Deckel Maho			
		Potencia		Rugosidad	
		F	Prob>F	F	Prob>F
$p_d$	2	39,7342	0,0003	0,1487	0,8649
$a_p$	2	0,8924	0,4578	0,0481	0,9534
$v_c$	2	12,0893	0,0079	38,2880	0,0004
$f_z$	2	0,6125	0,5727	1,2388	0,3545
$p_d * a_p$	(4)	Pooled	-	Pooled	-
$p_d * v_c$	(4)	Pooled	-	Pooled	-
$a_p * v_c$	(4)	Pooled	-	Pooled	-
Error	6				
Total	26				

GD. Grado de Libertad, F Prob> P. F,  $F_{0.05,2,6} = 5,1433$ ,  $F_{0.05,2,6} = 4,5337$

Analizaremos cada centro de mecanizado individualmente, primero representando gráficamente el análisis y luego los datos tabulados. Para el Centro de Mecanizado Gentiger (Máquina A), la Figura 5.27 muestra el análisis de cada variable del análisis de potencia consumida.

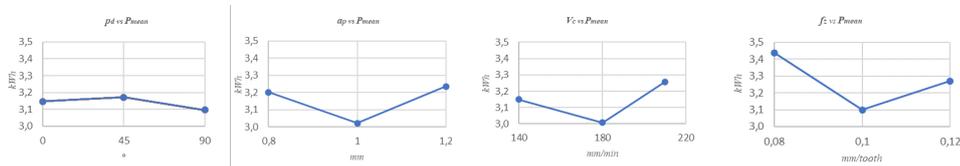


Figura 5.27. Caso III-A: Efecto de la potencia consumida - Gentiger (fuente: elaboración propia).

La Tabla 5.54 presenta los resultados para el análisis del consumo de energía para el centro de mecanizado Gentiger.

Tabla 5.54. Caso III-A: ANOVA potencia consumida (fuente: elaboración propia).

Nivel	Dirección de Pasada $p_d$ °	Profundidad de Corte $a_p$ mm	Velocidad de Corte $v_c$ $\frac{m}{min}$	Avance por Diente $f_z$ $\frac{mm}{tooth}$
1	3,1464	3,2016	3,1498	3,4374
2	3,1722	3,0221	3,0077	3,0984
3	3,0970	3,2364	3,2583	3,2710
Delta	0,0752	0,2143	0,2506	0,3390
Rank	4	2	3	1
$P_{mean}$	3,1386			

En la Figura 5.28 se presenta el análisis de rugosidad superficial para el centro de mecanizado Gentiger



Figura 5.28. Caso III-A: Efecto de la rugosidad superficial - Gentiger (fuente: elaboración propia).

La Tabla 5.55 presenta el análisis de la rugosidad superficial en el centro de mecanizado Gentiger.

Tabla 5.55. Caso III-A: ANOVA Rugosidad Superficial (fuente: elaboración propia).

Nivel	Dirección de Pasada $p_d$ °	Profundidad de Corte $a_p$ mm	Velocidad de Corte $v_c$ $\frac{m}{min}$	Avance por diente $f_z$ $\frac{mm}{tooth}$
1	0,9313	1,3750	1,5841	1,4158
2	1,8352	1,3670	1,3011	1,3737
3	1,1902	1,3507	1,0715	1,3379
Delta	0,9039	0,0243	0,5126	0,0779
Rank	1	4	2	3
$P_{mean}$	1,3189			

Para el centro de mecanizado Deckel Maho, la Figura 5.29 muestra el análisis de cada variable cuando se analiza el consumo de energía (potencia).

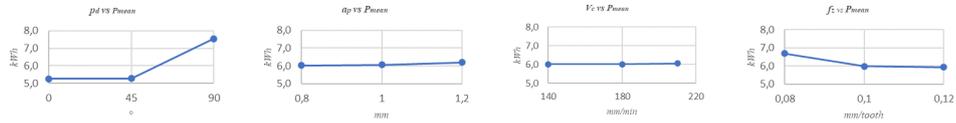


Figura 5.29. Caso III-B: Efecto de la potencia consumida - Deckel Maho (fuente: elaboración propia).

La Figura 5.30 representa el análisis de rugosidad para el centro de mecanizado Deckel Maho.



Figura 5.30. Caso III-B: Efecto de la rugosidad superficial - Deckel Maho (fuente: elaboración propia).

### 5.5.6. Paso 6 - Caso III: Conclusiones del experimento.

Inicialmente podríamos realizar un análisis considerando variables bastante obvias como el tiempo de mecanizado, pero es importante considerar la robustez de la máquina que vamos a utilizar y la calidad del producto obtenido, entre otros parámetros importantes.

En el presente estudio, para demostrar las ventajas e inconvenientes, se realizaron 27 experimentos en cada uno de los centros de mecanizado. La Tabla 5.56 resume las condiciones en las que se obtienen los mejores indicadores para los centros de mecanizado analizados.

Tabla 5.56. Caso III: Resumen de parámetros para cada Centro de Mecanizado (fuente: elaboración propia).

	I <sub>14</sub>		I <sub>16</sub>	
	Mínimo Consumo de Energía		Mínima Rugosidad Superficial	
	Máquina A Gentiger 2,79 kWh	Máquina B Deckel Maho 4,88 kWh	Máquina A Gentiger R <sub>a</sub> =0,55	Máquina B Deckel Maho R <sub>a</sub> =0,83
$p_d$	90	0	0	45
$a_p$	1,0	0,8	0,8	0,8
$v_c$	180	140	210	210
$f_z$	0,10	0,08	0,12	0,08

En donde se observa que, para cada centro de mecanizado, se tiene diferentes parámetros de optimización. Para obtener la menor rugosidad la recomendación es utilizar el centro de mecanizado A, que también tiene el mínimo consumo de energía.

La diferencia de los valores de los indicadores puede deberse a los sistemas de enfriamiento y lubricación que tiene cada centro de mecanizado, diferente dispositivo de amarre, el archivo post procesado o a alguna condición de mantenimiento de la máquina.

Cabe destacar que la relación entre centro de mecanizado, herramienta, material y geometría a mecanizar influye en la vida útil de la herramienta. Los experimentos realizados se desarrollaron controlando que el desgaste de la herramienta esté dentro de lo que especifican las normas.

#### **5.5.7. Paso 7 - Caso III: Informe de resultados en entornos colaborativos.**

La relación entre el material a mecanizar, la geometría de la superficie a fresar se complementa con la selección de la herramienta y el centro de mecanizado en el que se va a fabricar la pieza. Todas estas consideraciones se combinan para establecer los parámetros más adecuados como son: el avance, profundidad, velocidad de corte los cuales deben estar de acuerdo con la calidad del producto requerido. Se presentan los parámetros que se deben aplicar cuando el requisito de sostenibilidad se centra en el menor consumo energético, considerando la mejor rugosidad superficial. Para lo cual debe seleccionarse entre dos centros de mecanizado. A partir de los experimentos llevados a cabo en los dos centros de mecanizado podemos decir:

- a) Si el objetivo sostenible es el consumo mínimo de energía: Para el centro de mecanizado Gentiger, el análisis de varianza muestra la significancia F del factor de velocidad de corte  $v_c$ , mientras que para el centro de mecanizado Deckel Maho la significancia F considera la dirección de la pasada  $p_d$ , la profundidad de corte  $a_p$  y el avance por diente.
- b) Si el objetivo sostenible es la rugosidad superficial: Para el centro de mecanizado Gentiger, el análisis de varianza muestra que la significancia depende de la velocidad de corte  $v_c$  y la dirección de la pasada  $p_d$ , mientras que para el centro de mecanizado Deckel Maho, la significancia F muestra que depende de la profundidad de corte  $a_p$ , la dirección del paso  $p_d$ , la velocidad de corte  $v_c$ , avance.

La Tabla 5.56 que presentamos anteriormente, resume los parámetros en los que se pueden obtener los valores mínimos de energía consumida (Potencia) y rugosidad superficial. Estos valores se pueden incorporar a la programación de los Códigos G, para cumplir con los objetivos sostenibles establecidos.

En el desarrollo de las mejores condiciones de mecanizado, el desafío de ser más competitivo hace necesario que la evaluación experimental de procesos sea una herramienta importante para encontrar las mejores condiciones. La realización de los experimentos de este estudio nos permite describir una metodología para encontrar las

mejores condiciones. La realización de los experimentos de este estudio nos permite describir una metodología para encontrar las mejores condiciones, que dependerán de las características de la máquina herramienta en la que se lleve a cabo.

A la hora de seleccionar el centro de mecanizado, entre otras consideraciones, es necesario tener en cuenta la robustez de la máquina, así como los sistemas auxiliares e instalaciones que la componen. Entre las consideraciones importantes se encuentra el estado de mantenimiento, el sistema de fondeo y amarre entre los que complementan la evaluación.

El trabajo futuro podría determinar la relación de factores y su influencia, siempre considerando que la relación del material, la geometría a mecanizar, la herramienta seleccionada y la máquina herramienta a utilizar, nos permita encontrar los parámetros de avance, profundidad y velocidad, entre las más principales. En la Figura 5.31 se presenta el uso de la plataforma 3DEXPERIENCE:

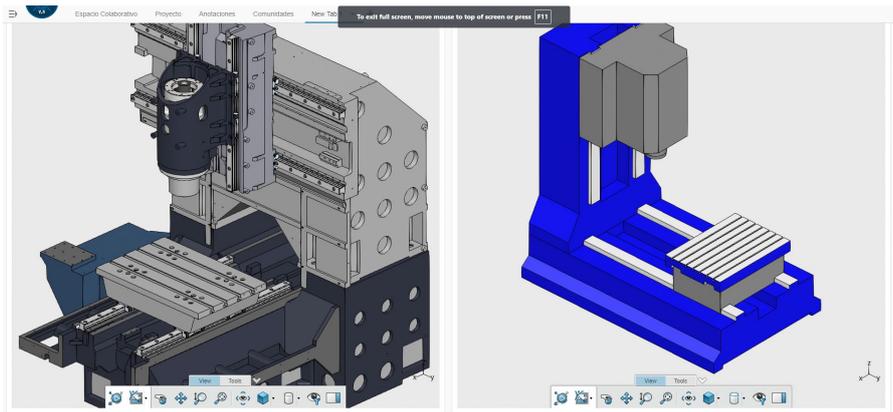


Figura 5.31. Caso III: Uso de 3DEXPERIENCE Simulación (fuente: elaboración propia).

El equipo colaborativo podría tener en cuenta las siguientes actividades:

- Ingeniero de Materiales: recomienda los rangos de parámetros para el proceso y tabula propiedades como rugosidad, entre otras.
- Diseñador CAD CAM: realiza el CAD /y el CAM de cada experimento.
- Técnico de Operación: realiza las mediciones en cada centro de mecanizado y da soporte al técnico.
- Operador de Máquina: conoce las particularidades de cada centro de mecanizado y el postprocesador.

## 5.6. Casos IV: Evaluación de Dimensión social.

El presente caso de estudio evalúa la dimensión social en una unidad productiva a nivel de taller, es decir estamos analizando la familia de indicadores  $I_{15}$ , y tomaremos como herramienta metodología el PHVA descrito en el apartado 3.3.2 y el Análisis Relacional Gris detallado en el apartado 3.3.3. Los resultados de este caso se presentaron en dos publicaciones que es parte del trabajo doctoral: “Assessment of the Sustainability Social Dimension in Machining through Grey Relational Analysis” (Ayabaca & Vila, 2018a) y “Diagnóstico de la Dimensión social de la sostenibilidad en procesos de Mecanizado Mediante el análisis relacional Gris” (Ayabaca & Vila, 2018b).

### 5.6.1. Paso 1 - Caso IV: Observación.

Para este caso se selecciona en una empresa mediana, el taller de fabricación de partes y piezas mecanizadas, compuesta de 5 colaboradores, más supervisores, jefe de departamento e ingeniero de fabricación, en la que se requiere implementar mejoras.

- **Objetivo Caso V: Torneado & Fresado & Perforado-Dimensión social:**  
Evaluar los indicadores de dimensión social ( $I_{15}$ ), a nivel de taller, antes y después de realizar mejoras que involucran los criterios de sostenibilidad.

De la propuesta descrita en el apartado 3.2.4 por Bhanot (Bhanot, Rao, & Deshmukh, 2016), se seleccionan los siguientes indicadores como se muestra en la Tabla 5.57 clasificados en tres grupos:

Tabla 5.57. Caso IV: Indicadores (fuente: elaboración propia basado en propuesta de Bhanot).

Fase	Grupo Indicadores	INDICADOR	ODS
FABRICACION	S0-01 a S0-08 Evaluación al Colaborador	$I_{15a}$ - SO-01: Productividad	$I_{15a}$ ↗
		$I_{15b}$ -SO-02: Relaciones con los demás	$I_{15b}$ ↗
		$I_{15c}$ -SO-03: Habilidades individuales	$I_{15c}$ ↗
		$I_{15d}$ -SO-04: Flexibilidad de rotación de turnos	$I_{15d}$ ↗
		$I_{15e}$ -SO-05: Puntualidad en el trabajo	$I_{15e}$ ↗
		$I_{15f}$ -SO-06: Soporte de la alta dirección	$I_{15f}$ ↗
		$I_{15g}$ -SO-07: Satisfacción laboral	$I_{15g}$ ↗
		$I_{15h}$ -SO-08: Ambiente de trabajo	$I_{15h}$ ↗
	S0-09: Grado de Apoyo	$I_{15i}$ -SO-09.1: Conciencia sobre fabricación sostenible	$I_{15i}$ ↗
		$I_{15j}$ -SO-09.2: Actualización tecnológica	$I_{15j}$ ↗
		$I_{15k}$ -SO-09.3: Apoyo financiero	$I_{15k}$ ↗
	S0-10: Requisitos Reglamentarios	$I_{15l}$ -SO-10.1: Calidad requerida de los productos	$I_{15l}$ ↗
		$I_{15m}$ -SO-10.2: Política de gestión de residuos	$I_{15m}$ ↗
		$I_{15n}$ -SO-10.3: Política de conservación de energía	$I_{15n}$ ↗
		$I_{15o}$ -SO-10.4: Flexibilidad de rotación en el trabajo	$I_{15o}$ ↗
$I_{15p}$ -SO-10.5: Salud e higiene personal		$I_{15p}$ ↗	

**Grupo 1.** Indicadores orientados a evaluar al colaborador en temas de productividad, habilidades, así como puntualidad, la evaluación la realizan los encargados o supervisores del personal. Se consideran los indicadores del SO-01 al SO-05 ( $I_{15a}$  al  $I_{15e}$ ). También se evalúa la percepción del colaborador en su grado de satisfacción y el clima laboral en Indicadores SO-06 a SO-08 ( $I_{15f}$  al  $I_{15h}$ ).

**Grupo 2.** Indicadores que miden el grado de apoyo al colaborador en la empresa, el clima laboral, grado de satisfacción, se evalúa por auditor externo SO-09 ( $I_{15i}$  al  $I_{15k}$ ).

**Grupo 3.** El cumplimiento de reglamentos que el colaborador debe cumplir se evalúa por medio de un auditor externo y corresponde a la categoría S-10 ( $I_{15l}$  al  $I_{15p}$ ).

En la Figura 5.32 se resalta el análisis del enfoque del Caso IV.

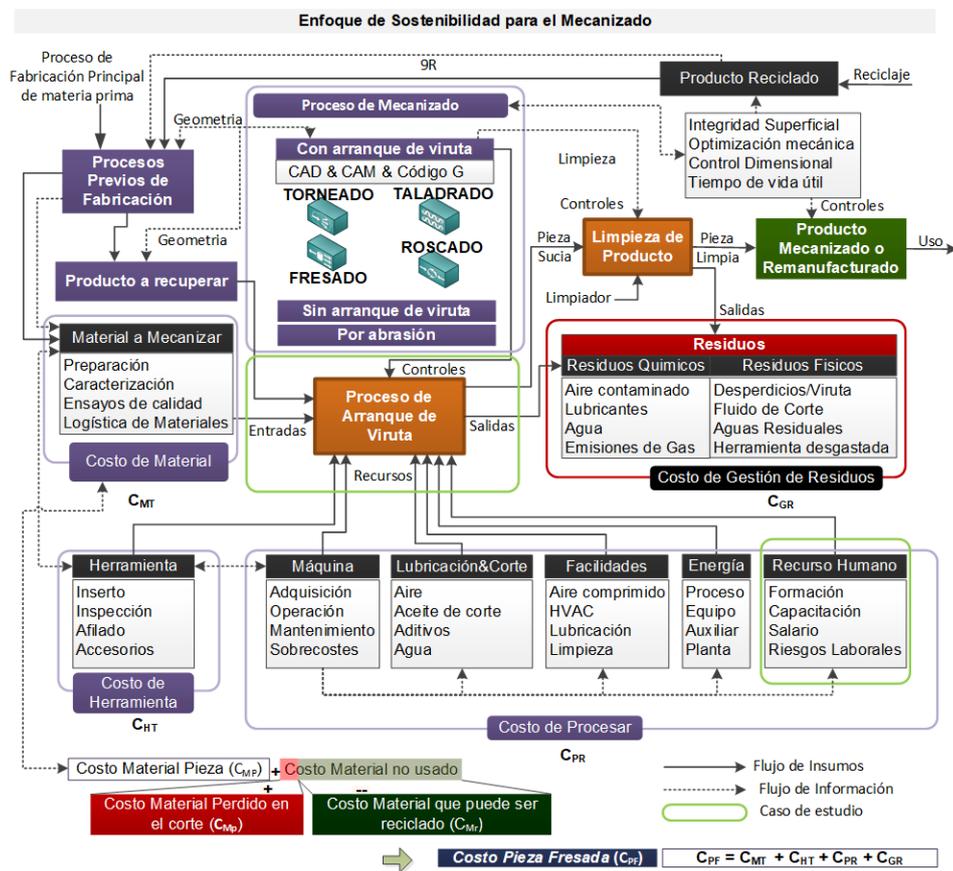


Figura 5.32. Caso IV: Enfoque de análisis de sostenibilidad (fuente: elaboración propia).

Se recomienda que la evaluación se realice utilizando la escala Likert (Wu, 2007), que propone valores de 0 a 5, donde 0 es el menor valor y 5 es el máximo valor que se le puede asignar en su respuesta. Después de asignar un peso ponderado a cada uno de los indicadores se utilizará el Teoría de Grises que se detalló en el apartado 3.3.3.

#### **5.6.2. Paso 2 - Caso IV: Formulación de hipótesis.**

Para el caso experimental IV se ha planteado la siguiente hipótesis

- **Hipótesis caso IV: Torneado & Fresado & Perforado-Dimensión social:**  
¿Se puede mejorar la evaluación de sostenibilidad de la dimensión social en una empresa pequeña, a nivel de taller (5 Colaboradores), después de un plan de mejora continua?

#### **5.6.3. Paso 3 – Caso IV: Diseño experimental Procedimiento.**

Utilizaremos los indicadores definidos en la sección anterior, para desarrollar las etapas del ciclo P-H-V-A, que se detalla a continuación:

**Etapa 1 -Planificar:** Partimos de una evaluación inicial de los tres grupos de indicadores seleccionados lo que nos permite proponer un plan de mejora continua, de acuerdo con la metodología PHVA, se establecen metas, objetivos a mejorar para tener una línea base de análisis.

**Etapa 2 -Hacer:** se realizan las actividades del plan de mejora, se establece un periodo de un año, en el que se desarrolla los puntos descritos en el plan.

**Etapa 3 -Verificar:** una vez cumplido el periodo establecido, se realiza la evaluación final y se compara con la inicial. Se mide los objetivos planteados.

**Etapa 4 -Actuar:** se verifica la efectividad de las acciones planteadas, y los nuevos indicadores servirán para iniciar nuevamente un ciclo de mejora.

La evaluación obtenida se compartirá de manera colaborativa. Hay que indicar que tanto para la evaluación inicial y la final se utilizara la metodología de Análisis de Grises

#### **5.6.4. Paso 4 - Caso IV: Desarrollo del experimento.**

Se agenda una reunión para realizar una lluvia de ideas en las cuales se plantean y se realizan las siguientes actividades:

**Etapa 1-Planificar:** Para la evaluación inicial se generan los formularios para la recopilación de datos. El encargado de planta, genera los documentos de evaluación y los distribuye a los evaluados y a los evaluadores (se utiliza la plataforma 3DEXPERIENCE). Con esta información se genera el plan de mejora continua inicial y se recopila la información que se detalla en la Tabla 5.58.

Tabla 5.58. Caso IV: Plan de Mejora Dimensión Social (fuente: elaboración propia).

PROBLEMA PARA MEJORAR	OBJETIVO	METAS	INDICADORES DIMENSION SOCIAL	ESTRATEGIAS	ACTIVIDADES
Baja productividad	Aumentar la cantidad de piezas mecanizadas	> 85%	I <sup>15a</sup> SO-01: Productividad	Implementar buenas prácticas de Fabricación	Mantenimiento preventivo de equipos Renovación de equipos CNC
Malta relación entre trabajadores	Trabajar en equipo	> 85%	I <sup>15a</sup> SO-2: Relaciones con los demás	Buen clima laboral	Mejorar relaciones Interpersonales Reuniones de clima de trabajo fraterno
Facilidad de uso de máquinas herramientas	Capacitar en CAD CAM	> 85%	I <sup>15a</sup> SO-3: Habilidades individuales	Incorporación de tecnología de producción	Adiestramiento en manejo de equipos Cursos de relaciones interpersonales
Poco conocimiento de todos los equipos del taller	Utilizar todas las máquinas herramientas del taller	> 85%	I <sup>15a</sup> SO-4: Flexibilidad de rotación de turnos	Reducir los costos de ausentismo	Flexibilidad para cumplir tareas y objetivos Plan de Rotación en equipos de taller
Ausentismo del personal en horas o días	Disminuir el ausentismo del personal	> 85%	I <sup>15a</sup> SO-5: Puntualidad en el trabajo	Incentivos por puntualidad	Cambio de Horarios de trabajo Compensación de horas
Cumplimiento de presupuesto de acuerdo con plan	Interactuar con la alta dirección de la organización	> 85%	I <sup>15a</sup> SO-6: Soporte de la alta dirección	Garantizar la disponibilidad de recursos	Realizar planes de mejora anuales Presupuestar implementación de mejoras
Baja realización profesional	Aumentar el grado de compromiso dentro de la organización	> 85%	I <sup>15a</sup> SO-7: Satisfacción laboral	Reconocimiento por actividades	Reconocimiento a las actividades Plan de incentivos
Ambiente laboral exigente	Generar clima laboral seguro y confiable	> 85%	I <sup>15a</sup> SO-8: Ambiente de trabajo	Mantener un espacio de trabajo limpio y ordenado	Adecuar LAY OUT Señalética y codificación
Desconocimiento de fabricación sostenible	Instruir al personal en fabricación Sostenible	> 85%	I <sup>15a</sup> SO-09.1 Conciencia sobre fabricación sostenible	Educación sobre temas sostenibles	Capacitación en sostenibilidad Capacitación en entornos colaborativos
Falta de manejo equipos CNC	Personal capacitado en herramientas CAD/CAM	> 85%	I <sup>15a</sup> SO-09.2 Actualización tecnológica	Capacitación permanente	Capacitación en CAM CAE Capacitación en herramientas de corte
Facilidad de préstamos en la organización	Facilitar préstamos internos en caso de emergencias	> 85%	I <sup>15a</sup> SO-09.3 Apoyo financiero	Plan de Incentivos	Políticas de ahorro Plan de ahorro caja común
Mejorar los requerimientos de calidad	Mejorar calidad de los productos	> 85%	I <sup>15a</sup> SO-10.1 Calidad requerida de los productos	Mejorar los instrumentos de medición	Calibración de máquinas Rool Bar Calibración de equipos de medición.
Clasificación de viruta y herramienta gastada	Correcta recolección y clasificación de residuos generados	> 85%	I <sup>15a</sup> SO-10.2 Política de gestión de residuos	Clasificar antes de la disposición final de los residuos	Recolección y clasificación de residuos Uso adecuado de los recursos por proceso
Desperdicio de energía en las actividades	Disminuir el consumo de energía eléctrica	> 85%	I <sup>15a</sup> SO-10.3 Política de conservación de energía	Promover el uso de tecnologías limpias	Concientización en el uso de energía Definición de Indicadores Energéticos
Poca rotación en el uso de equipos	Disponer de un equipo multidisciplinario	> 85%	I <sup>15a</sup> SO-10.4 Flexibilidad de rotación en el trabajo	Flexibilidad y trabajos por objetivos	Cambio de horario Programación de turnos
Uso del teléfono móvil cuando está trabajando	Garantizar la salud personal	> 85%	I <sup>15a</sup> SO-10.5 Salud e higiene personal	Motivar al cuidado del recurso humano	Capacitación en SSO Dotar de botiquin de primeros auxilios

Se designa el presupuesto y las estrategias de cada problema, así como un responsable que en este caso es el ingeniero de fabricación como proyecto piloto.

Para realizar la evaluación, es importante definir los pesos o ponderaciones de cada uno de los indicadores, ya que de acuerdo con la metodología de evaluación se debe definir para su cálculo.

Del grupo de 16 indicadores se le ha asignado un peso de 6,25% ( $100/16=6,25$ ) a cada uno. Si consideramos el peso acumulado para cada grupo de indicadores tenemos en el Grupo 1 un peso acumulado del 50%: el Grupo 2 con un peso acumulado de 18,75% y el Grupo 3 con un peso acumulado de 31,25%. en la Tabla 5.59 se muestra las ponderaciones para los indicadores.

Tabla 5.59. Caso IV: Ponderaciones Indicadores Dimensión Social (fuente: elaboración propia).

Grupo	INDICADOR SOCIAL	Peso Indicador %	Peso Grupo %	Peso Total %
<b>SO-01 a SO-08</b> <b>Evaluación al Colaborador</b>	<i>I15a</i> - SO-01	6,25%	50.00%	100%
	<i>I15b</i> -SO-02	6,25%		
	<i>I15c</i> -SO-03	6,25%		
	<i>I15d</i> -SO-04	6,25%		
	<i>I15e</i> -SO-05	6,25%		
	<i>I15f</i> -SO-06	6,25%		
	<i>I15g</i> -SO-07	6,25%		
	<i>I15h</i> -SO-08	6,25%		
<b>SO-09: Apoyo Dirección</b>	<i>I15i</i> -SO-09.1	6,25%	18.75%	100%
	<i>I15j</i> -SO-09.2	6,25%		
	<i>I15k</i> -SO-09.3	6,25%		
<b>SO-10: Requisitos Reglamentarios</b>	<i>I15l</i> -SO-10.1	6,25%	31.25%	100%
	<i>I15m</i> -SO-10.2	6,25%		
	<i>I15n</i> -SO-10.3	6,25%		
	<i>I15o</i> -SO-10.4	6,25%		
	<i>I15p</i> -SO-10.5	6,25%		

Siguiendo las recomendaciones de la escala de Likert, las evaluaciones se realizan siguiendo una escala de 0 a 5, donde 0 es el mínimo valor evaluado y 5 es el máximo valor evaluado. La participación colaborativa permite establecer los problemas a mejorar, así como sus objetivos, metas y estrategias, y también las actividades que se establecen. Para facilitar el cálculo de las evaluaciones, se tomó el valor máximo de cada evaluación, como se muestra en las evaluaciones inicial y final siguiente.

La forma de cálculo se la puede programar en MATLAB o en una hoja de Cálculo dependiendo la cantidad y complejidad de los Colaboradores evaluados y de quien realice la evaluación. Se calcula el indicador GRG *Grado Relacional Gris*, para cada indicador, así como la evaluación total. En la Tabla 5.60 y Tabla 5.61 se detalla la evaluación inicial y su calificación.

Tabla 5.60. Caso IV: Evaluación Inicial - Dimensión Social (elaboración propia basado en propuesta de Bhanot).

INDICADOR SOCIAL	C #1	C #2	C #3	C #4	C #5	Calificado por:
I <sub>15a</sub> -SO-01: Productividad	4,00	4,00	4,00	5,00	4,00	Jefe de Departamento
	3,00	4,00	4,00	4,00	3,00	Ingeniero 1
	4,00	4,00	4,00	5,00	4,00	Max ↗
I <sub>15b</sub> -SO-02: Relaciones con los demás	4,00	5,00	5,00	5,00	4,00	Jefe de Departamento
	3,00	5,00	4,00	4,00	3,00	Ingeniero 1
	4,00	5,00	5,00	5,00	4,00	Max ↗
I <sub>15c</sub> -SO-03: Habilidades individuales	4,00	4,00	4,00	5,00	4,00	Jefe de Departamento
	3,00	3,00	4,00	5,00	3,00	Ingeniero 1
	4,00	3,00	4,00	5,00	4,00	Max ↗
I <sub>15d</sub> -SO-04: Flexibilidad de rotación de turnos	3,00	5,00	3,00	4,00	3,00	Jefe de Departamento
	3,00	3,00	4,00	4,00	3,00	Ingeniero 1
	3,00	5,00	4,00	4,00	3,00	Max ↗
I <sub>15e</sub> -SO-05: Puntualidad en el trabajo	4,00	3,00	4,00	4,00	4,00	Jefe de Departamento
	3,00	3,00	2,00	4,00	4,00	Ingeniero 1
	4,00	3,00	4,00	4,00	4,00	Max ↗
I <sub>15f</sub> -SO-06: Soporte de alta dirección	3,00	4,00	3,00	4,00	4,00	Calificado por los mismos Colaboradores
I <sub>15g</sub> -SO-07: Satisfacción laboral	3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	
I <sub>15h</sub> -SO-08: Ambiente laboral	3,00	4,00	4,00	3,00	3,00	
I <sub>15i</sub> -SO-09.1: Conciencia sobre Fabricación sostenible	2,00	3,00	2,00	4,00	3,00	
I <sub>15j</sub> -SO-09.2: Actualización Tecnológica	3,00	3,00	4,00	4,00	3,00	
I <sub>15k</sub> -SO-09.3: Apoyo Financiero	3,00	3,00	2,00	3,00	3,00	
I <sub>15l</sub> -SO-10.1: Calidad requerida de los productos	3,00	3,00	4,00	5,00	4,00	Auditor 1
	4,00	4,00	5,00	5,00	4,00	Auditor 2
	4,00	4,00	5,00	5,00	4,00	Max ↗
I <sub>15m</sub> -SO-10.2 Política de Gestión de residuos	3,00	3,00	3,00	4,00	3,00	Auditor 1
	4,00	2,00	3,00	4,00	4,00	Auditor 2
	4,00	3,00	3,00	4,00	4,00	Max ↗
I <sub>15n</sub> -SO-10.3 Política de Conservación de Energía	4,00	2,00	4,00	4,00	3,00	Auditor 1
	3,00	2,00	3,00	4,00	3,00	Auditor 2
	4,00	2,00	4,00	4,00	3,00	Max ↗
I <sub>15o</sub> -SO-10.4 Flexibilidad de Rotación en el trabajo	3,00	2,00	4,00	4,00	3,00	Auditor 1
	4,00	3,00	3,00	5,00	4,00	Auditor 2
	4,00	3,00	4,00	5,00	4,00	Max ↗
I <sub>15p</sub> -SO-10.5 Salud e higiene personal	3,00	3,00	3,00	4,00	3,00	Auditor 1
	4,00	5,00	5,00	3,00	4,00	Auditor 2
	4,00	5,00	05,00	4,00	4,00	Max ↗

C #: Colaborador evaluado

Se recopila información y se la tabula utilizando las ecuaciones descritas en el apartado 3.4.3. para el cálculo se puede utilizar algún software que permita programar las operaciones.

Tabla 5.61. Caso IV: Indicadores Iniciales de la dimensión Social (elaboración propia basado en propuesta de Bhanot).

INDICADOR	C #1	C #2	C #3	C #4	C #5	I <sub>15#</sub> (GRG)
I <sub>15a</sub> - SO-01	0,500	0,667	0,667	0,667	0,667	0,633
I <sub>15b</sub> -SO-02	0,667	0,667	0,667	0,667	0,667	0,667
I <sub>15c</sub> -SO-03	0,667	0,500	0,667	0,667	0,500	0,600
I <sub>15d</sub> -SO-04	0,500	0,500	0,667	0,667	0,400	0,547
I <sub>15e</sub> -SO-05	0,500	0,500	0,500	0,500	0,667	0,533
I <sub>15f</sub> -SO-06	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500
I <sub>15g</sub> -SO-07	0,500	0,500	0,500	0,500	0,667	0,533
I <sub>15h</sub> -SO-08	0,400	0,500	0,400	0,400	0,400	0,420
I <sub>15i</sub> -SO-09.1	0,333	0,333	0,333	0,400	0,333	0,347
I <sub>15j</sub> -SO-09.2	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333
I <sub>15k</sub> -SO-09.3	0,400	0,333	0,400	0,333	0,333	0,360
I <sub>15l</sub> -SO-10.1	0,667	0,667	1,000	1,000	0,667	0,800
I <sub>15m</sub> -SO-10.2	0,500	0,400	0,400	0,500	0,500	0,460
I <sub>15n</sub> -SO-10.3	0,500	0,400	0,500	0,500	0,500	0,480
I <sub>15o</sub> -SO-10.4	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500
I <sub>15p</sub> -SO-10.5	0,400	0,400	0,500	0,500	0,400	0,440
<b>I<sub>15</sub> Indicador Inicial</b>						<b>0,51</b>

C #: Colaborador evaluado

**Etapa 2 -Hacer:** Se ejecuta el plan de mejoras; en donde se define el problema a mejorar, el objetivo, las metas, que indicadores de la dimensión social se mide, las estrategias y actividades a desarrollar. Se establece como responsable al encargado del Taller que es el Ingeniero de fabricación y se le dota del presupuesto y en un tiempo de un año se desarrollan las actividades con la participación de los colaboradores.

**Etapa 3-Verificar:** Una vez cumplido el plazo establecido, se realiza una evaluación final de este primer ciclo PHVA, en la Tabla 5.62 se presenta los resultados de la evaluación y en la Tabla 5.63 se calcula los indicadores finales después de las actividades de mejora. La Figura 5.33 muestra de manera gráfica el diagrama de radar de la mejora después de la implementación del plan.

**Etapa4-Actuar:** Estandarizar: se verifica que han existido avances en los indicadores planteados, y que todavía no se alcanza el objetivo del 85% por lo cual planteada. Se distribuye los informes mediante los espacios colaborativos de la plataforma 3DEXPERIENCE. Adicionalmente se realiza dos ayudas visuales que se ubican en los cuadros informativos y en los entornos colaborativos de la empresa

Tabla 5.62. Caso IV: Evaluación Final - Dimensión Social (elaboración propia basado en propuesta de Bhanot).

INDICADOR SOCIAL	C #1	C #2	C #3	C #4	C #5	Calificado por:
I <sub>15a</sub> -SO-01: Productividad	4,00	4,00	4,00	5,00	4,00	Jefe de Departamento
	3,00	4,00	4,00	4,00	3,00	Ingeniero 1
	4,00	4,00	4,00	5,00	4,00	Max ↗
I <sub>15b</sub> -SO-02: Relaciones con los demás	4,00	5,00	5,00	5,00	4,00	Jefe de Departamento
	3,00	5,00	4,00	4,00	4,00	Ingeniero 1
	4,00	5,00	5,00	5,00	4,00	Max ↗
I <sub>15c</sub> -SO-03: Habilidades individuales	4,00	4,00	4,00	5,00	4,00	Jefe de Departamento
	3,00	3,00	4,00	5,00	3,00	Ingeniero 1
	4,00	4,00	4,00	5,00	4,00	Max ↗
I <sub>15d</sub> -SO-04: Flexibilidad de rotación de turnos	3,00	5,00	3,00	4,00	3,00	Jefe de Departamento
	3,00	3,00	4,00	4,00	3,00	Ingeniero 1
	3,00	5,00	4,00	4,00	3,00	Max ↗
I <sub>15e</sub> -SO-05: Puntualidad en el trabajo	4,00	3,00	4,00	4,00	4,00	Jefe de Departamento
	3,00	3,00	2,00	4,00	4,00	Ingeniero 1
	4,00	3,00	4,00	4,00	4,00	Max ↗
I <sub>15f</sub> -SO-06: Soporte de alta dirección	3,00	4,00	3,00	4,00	4,00	Calificado por los mismos Colaboradores
I <sub>15g</sub> -SO-07: Satisfacción laboral	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	
I <sub>15h</sub> -SO-08: Ambiente laboral	3,00	4,00	4,00	3,00	3,00	
I <sub>15i</sub> -SO-09.1: Conciencia sobre fabricación sostenible	2,00	3,00	2,00	4,00	3,00	
I <sub>15j</sub> -SO-09.2: Actualización Tecnológica	3,00	3,00	4,00	4,00	3,00	
I <sub>15k</sub> -SO-09.3: Apoyo Financiero	3,00	3,00	2,00	3,00	3,00	
I <sub>15l</sub> -SO-10.1: Calidad requerida de los productos	3,00	3,00	4,00	5,00	5,00	
	4,00	4,00	5,00	5,00	5,00	Auditor 2
	4,00	4,00	5,00	5,00	5,00	Max ↗
I <sub>15m</sub> -SO-10.2 Política de Gestión de residuos	3,00	3,00	3,00	4,00	3,00	Auditor 1
	4,00	2,00	3,00	4,00	4,00	Auditor 2
	4,00	3,00	3,00	4,00	4,00	Max ↗
I <sub>15n</sub> -SO-10.3 Política de Conservación de Energía	4,00	2,00	4,00	4,00	3,00	Auditor 1
	3,00	2,00	3,00	4,00	3,00	Auditor 2
	4,00	2,00	4,00	4,00	3,00	Max ↗
I <sub>15o</sub> -SO-10.4 Flexibilidad de Rotación en el trabajo	3,00	2,00	4,00	4,00	3,00	Auditor 1
	4,00	3,00	3,00	5,00	4,00	Auditor 2
	4,00	3,00	4,00	5,00	4,00	Max ↗
I <sub>15p</sub> -SO-10.5 Salud e higiene personal	3,00	3,00	3,00	4,00	3,00	Auditor 1
	4,00	5,00	5,00	3,00	4,00	Auditor 2
	4,00	5,00	5,00	4,00	4,00	Max ↗

C #: Colaborador evaluado

Tabla 5.63. Caso IV: Indicadores Finales de la Dimensión Social (elaboración propia basado en propuesta de Bhanot).

INDICADOR	C #1	C #2	C #3	C #4	C #5	I <sub>15</sub> (GRG)
I <sub>15a</sub> - SO-01	0,600	0,600	0,600	1,000	0,600	0,680
I <sub>15b</sub> -SO-02	0,600	1,000	1,000	1,000	0,600	0,840
I <sub>15c</sub> -SO-03	0,600	0,600	0,600	1,000	0,600	0,680
I <sub>15d</sub> -SO-04	0,429	1,000	0,600	0,600	0,429	0,611
I <sub>15e</sub> -SO-05	0,600	0,429	0,600	0,600	0,600	0,566
I <sub>15f</sub> -SO-06	0,429	0,600	0,429	0,600	0,600	0,531
I <sub>15g</sub> -SO-07	0,600	0,600	0,600	0,600	0,600	0,600
I <sub>15h</sub> -SO-08	0,429	0,600	0,600	0,429	0,429	0,497
I <sub>15i</sub> -SO-09.1	0,333	0,429	0,333	0,600	0,429	0,425
I <sub>15j</sub> -SO-09.2	0,429	0,429	0,600	0,600	0,429	0,497
I <sub>15k</sub> -SO-09.3	0,429	0,429	0,333	0,429	0,429	0,410
I <sub>15l</sub> -SO-10.1	0,600	0,600	1,000	1,000	1,000	0,840
I <sub>15m</sub> -SO-10.2	0,600	0,429	0,429	0,600	0,600	0,531
I <sub>15n</sub> -SO-10.3	0,600	0,333	0,600	0,600	0,429	0,512
I <sub>15o</sub> -SO-10.4	0,600	0,429	0,600	1,000	0,600	0,646
I <sub>15p</sub> -SO-10.5	0,600	1,000	1,000	0,600	0,600	0,760
<b>I<sub>15</sub> Indicador Final</b>						<b>0,602</b>

C #: Colaborador evaluado

Se documenta y se realiza un análisis de los indicadores que tiene los menores valores con el objetivo de mejorar.

### 5.6.5. Paso 5 - Caso IV: Análisis de Resultados.

El análisis realizado de indicador por indicador, nos permite determinar los mejores y los que tienen opción de mejora. De la evaluación realizada y que se muestra en la Tabla 5.64 se observa que la implementación de estrategias de seguridad y salud ocupacional tiene un 32% de mejora, seguido por la mejora de las relaciones con los demás colaboradores (17,3%) la actualización tecnológica (16,4%). Entre los que no mejoraron mucho se tiene, el soporte de la alta dirección 3,1% puntualidad en el trabajo 3,2% y la implementación de políticas de gestión de residuos 3,2%.

Todas estas observaciones, recomendaciones y mejoras se las comunica y se las comparte para la definición del nuevo plan de mejoras. Se establece como prioritario enfocar las mejoras en: Apoyo financiero (41%), Conciencia de fabricación sostenible, (42,5%), actualización tecnológica y ambiente propicio para el trabajo (50%) tienen menor evaluación global, para lo cual se toma medidas correctivas.

Tabla 5.64. Caso IV: Evaluación Comparativa de la Dimensión Social (fuente: elaboración propia).

	CODIGO	INDICADORES SOCIALES		I15 INICIAL	I15 FINAL	$\Delta$	
Grado Apoyo Requisitos Reglamentarios	I15a-SO-01	Productividad	%	63,3	68,0	4,7	↗
	I15b-SO-02	Relaciones con los demás	%	66,7	84,0	17,3	↗
	I15c-SO-03	Habilidades del Colaborador	%	60,0	68,0	8,0	↗
	I15d-SO-04	Flexibilidad de rotación de turnos	%	54,7	61,1	6,5	↗
	I15e-SO-05	Puntualidad en el trabajo	%	53,3	56,6	3,2	↗
	I15f-SO-06	Soporte de la alta dirección	%	50,0	53,1	3,1	↗
	I15g-SO-07	Satisfacción laboral	%	53,3	60,0	6,7	↗
	I15h-SO-08	Ambiente de Trabajo	%	42,0	49,7	7,7	↗
	I15i-SO-09.1	Conciencia de fabricación sostenible	%	34,7	42,5	7,8	↗
	I15j-SO-09.2	Actualización tecnológica	%	33,3	49,7	16,4	↗
	I15k-SO-09.3	Apoyo financiero	%	36,0	41,0	5,0	↗
	I15l-SO-10.1	Calidad requerida de los productos	%	80,0	84,0	4,0	↗
	I15m-SO-10.2	Política de gestión de residuos	%	46,0	53,1	7,1	↗
	I15n-SO-10.3	Política de conservación de Energía	%	48,0	51,2	3,2	↗
	I15o-SO-10.4	Flexibilidad de rotación en el trabajo	%	50,0	64,6	14,6	↗
I15p-SO-10.5	Salud e higiene personal	%	44,0	76,0	32,0	↗	
<b>I15 INDICADOR SOCIAL</b>			<b>%</b>	<b>51,0</b>	<b>60,2</b>	<b>9,21</b>	<b>↗</b>

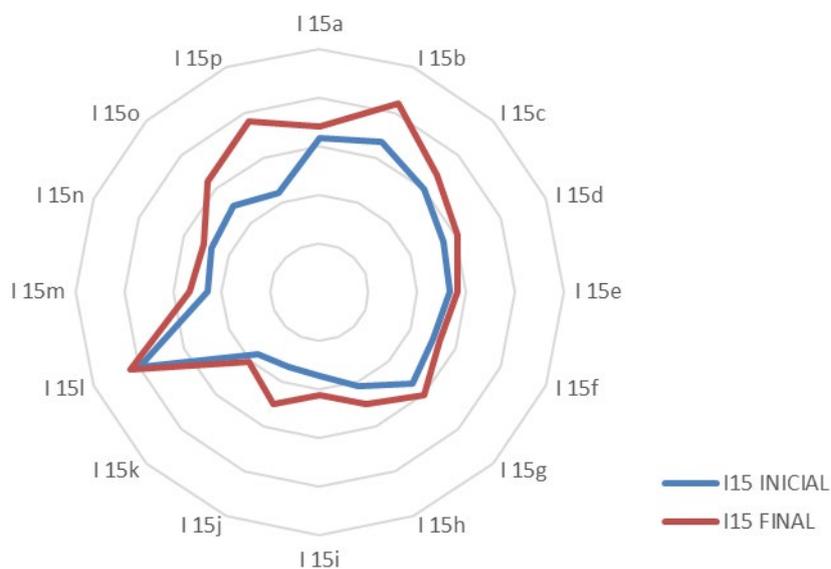


Figura 5.33. Caso IV: Radar de la Dimensión Social - Mejora (fuente: elaboración propia).

#### **5.6.6. Paso 6 - Caso IV: Conclusiones del experimento.**

La mejora continua en la dimensión social es un aspecto que no hay que descuidar. El ámbito social muchas veces refuerza el compromiso de sacar mejores productos. La elaboración de planes de mejora, su implementación y seguimiento, permiten mejorar las actividades internas, de tal manera que se genera una empatía con lo que se hace y se desarrolla mejoras que muchas veces no se las considera. Pudimos identificar ideas que nacen de los propios colaboradores y que van en beneficio de las actividades productivas y los indicadores de la familia I<sub>15</sub>.

Los tópicos de sostenibilidad a nivel de taller requieren ser reforzados, ya que se encontró opciones de mejora. El uso de tecnología que apunte las comunicaciones internas en todos los niveles se mejora con el uso de las plataformas colaborativas, ya que permite tener en tiempo real las notificaciones e información.

La evaluación inicial nos permitió definir nuestra línea base para la implementación de mejoras con un valor inicial de 51% y después de la implementación de las mejoras tenemos una evaluación del 60.2% lo que evidencia una mejora del 9.2% en el periodo de implementación. La Tabla 5.64 y la Figura 5.33 que se presentaron en el apartado anterior, resumen los resultados obtenidos.

El método de cálculo que se utiliza y que tiene un gran potencial es el “Análisis Relacional Gris”, ya que permite manejar indicadores cuantitativos y cualitativos, tanto para la dimensión social como para las demás. Al interior de la organización evaluada, el clima laboral, y las relaciones entre colaboradores mejora.

La metodología PHVA también se verifica que es aplicable juntamente con sistemas de valoración y evaluación de cálculo de indicadores como la del “Análisis Relacional Gris”.

#### **5.6.7. Paso 7 - Caso IV: Informe de resultados en entornos colaborativos.**

Es importante que los planes de trabajo y las mejoras se las comparta y se las difunda, por lo que el uso de ayudas visuales que se ubican en los cuadros informativos de la empresa y que es de fácil acceso para los colaboradores, como los “Dashboards” presenten los resultados obtenidos (Figura 5.34 y Figura 5.35), es importante que sean fáciles de entender, y se aguilita mucho más cuando pueden ser parte de un proyecto que se lo maneje en la plataforma colaborativa 3DEXPERIENCE.

Este primer “Dashboard”, presenta la información de las evaluaciones iniciales y finales, así como referencia el objetivo planteado a alcanzar por la organización.

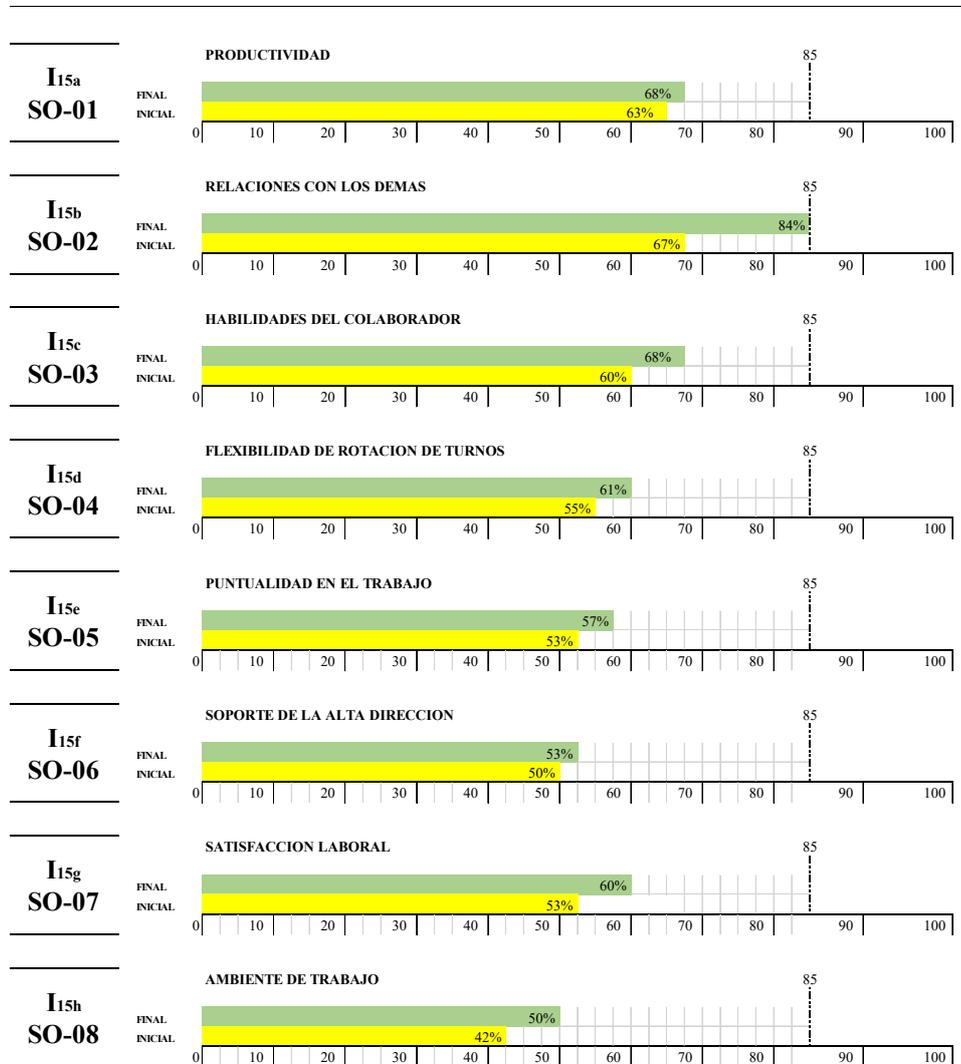


Figura 5.34. Caso IV: Dashboard-a Indicadores de Dimensión Social (fuente: elaboración propia).

Las evaluaciones finales, nuevamente pueden ser el objetivo inicial para un nuevo periodo. Para el caso evaluado se observa que todavía se debe implementar mejoras, ya que los indicadores todavía no alcanzan el objetivo del 85% planteado inicialmente.

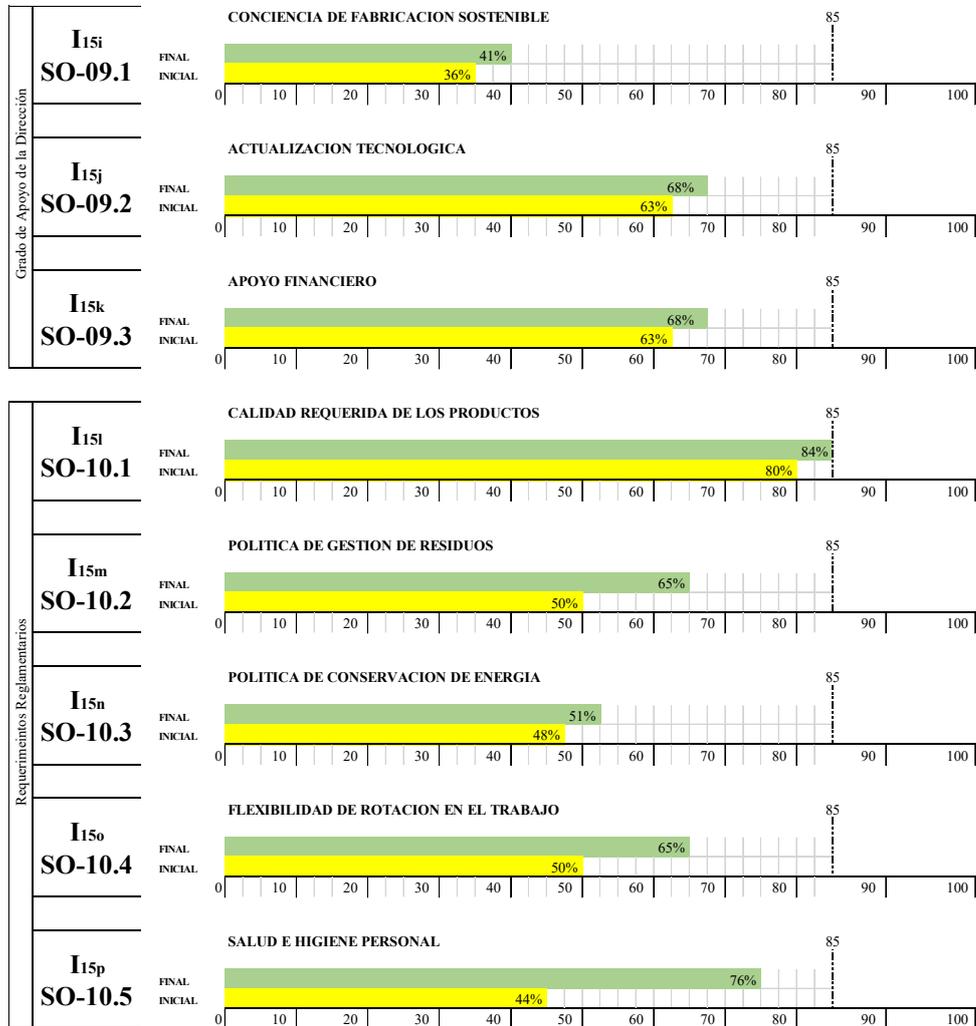


Figura 5.35. Caso IV: Dashboard-b Indicadores de Dimensión Social (fuente: elaboración propia).

El manejo de la información en los entornos colaborativos puede contener información de utilizada, por ejemplo, en la Figura 5.36 se muestra el manejo de documentación colaborativa que es utilizada por medio de la plataforma 3DEXPERIENCE. Entre las consideraciones mínimas de la participación colaborativa y las aportaciones de cada miembro del equipo colaborativo para este caso de estudio de la dimensión social:

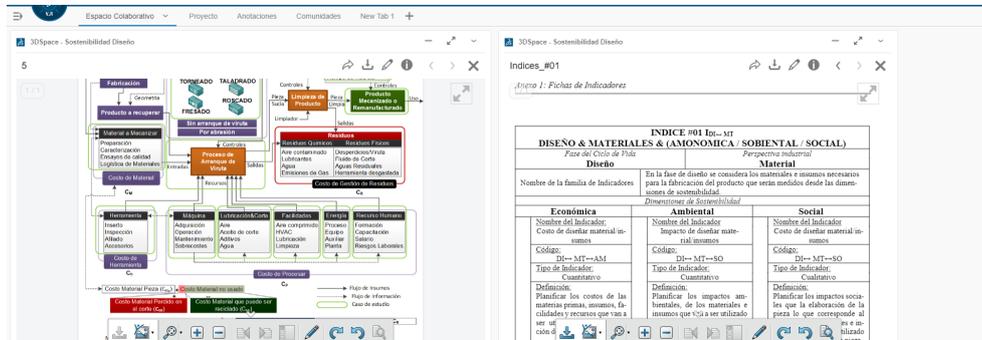


Figura 5.36. Caso IV: Documentación Colaborativa en 3DEXPERIENCE (fuente: elaboración propia).

En algunos casos se requiere la participación de un auditor externo, con la experticia necesaria para asesorar en temas de la dimensión social.

Para este caso, la participación de los colaboradores se puede resumir:

- **Ingeniero de Materiales:** debe conocer al personal a su cargo y motivar para que desarrollen las actividades en las mejores condiciones. En muchos casos es el responsable del proceso productivo y debe tener la capacidad de evaluar a sus compañeros.
- **Diseñador CAD/CAM:** debe tener la habilidad de conocer la interacción que hay entre las máquinas que tiene su empresa y el personal. También puede ser responsable de evaluar a sus compañeros.
- **Técnico de Operación:** Se encarga de la logística de herramientas, verificación y calibración de herramientas.
- **Operador de Máquina:** al ser directamente el responsable de implementar el proceso productivo, sus recomendaciones deben ser tomadas en cuenta. La capacitación permanente en nuevas tecnologías es importante.

## **5.7. Conclusiones.**

De la aplicación de los múltiples experimentos se observa que los conceptos de fabricación sostenible se los puede aplicar para lograr las mejores requeridas.

A nivel de producto nos permiten mejorar el cumplimiento de los requerimientos del cliente, siendo el trabajo de investigación y desarrollo necesario y fundamental para lograr la mejora continua. En el caso de mecanizado por arranque de viruta, las opciones son diversas.

A nivel de proceso, las evaluaciones de sostenibilidad permiten identificar mejoras estratégicas. A nivel de fábrica, la digitalización y la sensorización en el campo de mecanizado permitirá reforzar la implementación de la denominada Industria 4.0 en donde los datos y la información estratégica se vuelve vital. Los diferentes indicadores calculados, tienen una influencia sobre otros indicadores, ya que se relacionan de muchas maneras, es el caso de los indicadores de las familias I<sub>4</sub> y I<sub>16</sub>, que influyen sobre los indicadores I<sub>14</sub> I<sub>15</sub> I<sub>16</sub>.

Cabe indicar que las nuevas generaciones de Ingenieros, profesionales que son parte del proceso productivos pueden implementar estrategias.

La Figura 5.37 resume las experiencias mostradas en los diferentes experimentos y casos, en donde podemos ver que la metodología aplicada es efectiva y permite implementar los desafíos de la sostenibilidad.



*Figura 5.37. Esquema de Análisis de Fabricación Sostenible Colaborativa (fuente: elaboración propia).*

# Capítulo 6

---

—

# Capítulo 6

## Conclusiones y Trabajos Futuros

### 6.1. Conclusiones.

La definición de un marco conceptual que facilite la comprensión de modelos de fabricación sostenible es de vital importancia, ya que permite establecer criterios unificados para la evaluación de las diferentes actividades desde diversos puntos de vista para la mejora continua.

La hipótesis planteada inicialmente, que es posible establecer una contribución relativa a la fabricación sostenible en el sector metalmecánico, que estructure el conocimiento y realice aportaciones a una producción más limpia, ha permitido desarrollar con solidez la presente disertación realizando una aportación académica.

Para elaborar la tesis se consideraron tres puntos de vista “*Dimensiones de sostenibilidad*”, “*Fases del ciclo de vida del producto*” y “*Perspectivas de análisis de ingeniería*”, que han permitido desarrollar los ámbitos de estudio, base de la propuesta de esta disertación, que se ha particularizado para evaluar el proceso de mecanizado por arranque de viruta.

Estos tres ámbitos integrados de manera colaborativa permiten manejar el flujo de información que generan los actores del proceso productivo y agilizar su retroalimentación, mejorando su documentación y los tiempos de respuesta.

Del análisis del estado del arte en fabricación sostenible se detectó que existen muchos trabajos, pero ninguno de ellos alineado íntegramente con los *Objetivos de Desarrollo*

*Sostenible*, ni con perspectivas de integrarlo a entornos colaborativos con vistas a entornos de Industria 4.0.

Por otra parte, en el estudio del estado de la cuestión en el campo de arranque de viruta, se han encontrado muchas aportaciones que indican realizar aportaciones a la “sostenibilidad” a través de una mejora o de una optimización, ya sea de la máquina herramienta, de la herramienta, del material o de la estrategia de diseño que se aplica. Sin embargo, no se encontraron contribuciones que integrasen todos los aspectos, siendo el análisis del ámbito social el menos analizado. Entendemos que, para realizar una aportación correcta en la dimensión de sostenibilidad, debe contemplar la combinación de que sea “soportable” (Ambiental y Social), “viable” (Ambiental y Económico) y “equitativo” (Social y Económico).

Por otra parte, también hay contribuciones desde el ámbito de análisis del proceso de fabricación, en donde el cuidado de los recursos y materias primas complementan la idea de la sostenibilidad, pero no especifican en qué fase del ciclo de vida lo está realizando, ya que muchas de las investigaciones se centran en las materias primas o materiales, evaluar el proceso o en el producto que se está fabricando. Por tanto, ha sido necesario realizar una intervención que integrase todos los aspectos antes mencionados y que permita especificar en qué etapa del ciclo de vida queremos evaluar.

Para los nuevos entornos colaborativos orientados a la implantación del concepto de Industria 4.0, se les recomienda considerar que todo el modelo propuesto pueda integrarse a una plataforma de ingeniería colaborativa, ya que las plataformas colaborativas de gestión del ciclo de vida del producto han facilitado el despliegue de entornos de ingeniería concurrente, pero es necesario particularizar.

En este sentido una aportación concreta de la tesis doctoral es proporcionar el enfoque de sostenibilidad para el proceso de arranque de viruta, el cual se detalla en el capítulo 4 de la propuesta del modelo de fabricación sostenible. Su utilidad es la base para definir la interacción de la sostenibilidad, partiendo de términos generales de un proceso industrial y después de manera específica para el proceso de arranque de viruta, con lo que se cumple el objetivo O1 “*Definir un modelo de fabricación sostenible marco y particularizarlo en procesos y operaciones de arranque de viruta*”.

En un inicio puede parecer compleja la interpretación de las matrices presentadas en la propuesta, pero como segunda contribución de esta tesis se proporcionan los criterios de agrupación, que simplifican el análisis y que facilitan el entendimiento. Se han definido seis matrices y treinta y seis grupos o familias de indicadores ( $I_1, \dots, I_{36}$ ) que resultan de la integración de los ámbitos planteados inicialmente.

En este sentido los diferentes casos experimentales planteados como validación y expuestos en el capítulo 5, tuvieron por objetivo caracterizar la influencia de los parámetros del proceso de arranque de viruta y entender cómo el modelo de fabricación sostenible es soportado con los entornos colaborativos, como una estrategia de fabricación sostenible, cumpliendo el objetivo O2 “*Caracterizar la influencia de los*

*parámetros del proceso en la sostenibilidad y definir las estrategias de fabricación sostenible*”. Finalmente, se plantearon varios casos de análisis mediante experimentación aplicada en diversas situaciones.

En el caso experimental I, en el mecanizado de superficies planas, el uso de aplicaciones de fabricación asistida por ordenador permite no sólo la generación del código máquina si no, además, facilitan la colaboración entre operador y planificador de procesos, que deben conocer el comportamiento de la máquina herramienta, las herramientas de corte y el material a utilizar. Una correcta selección de los parámetros de fabricación (avance, profundidad de corte, velocidad del husillo, etc.) puede validarse si previamente se han definido los indicadores, desde distintas perspectivas, para que la toma de datos sea la necesaria.

Así un indicador analizado es la tasa de eliminación de material, para la cual se determina las condiciones en las que su valor es el máximo, aumentando principalmente la productividad. Hay que mencionar que existen indicadores relacionados que se simulan en la fase de diseño, pero se miden instrumentalmente en la fase de fabricación, es así como el determinar el menor tiempo de fabricación conlleva por ejemplo el menor consumo de energía y, por tanto, el menor coste de fabricación.

En el caso experimental II, se busca determinar el comportamiento de las propiedades del producto cuando es sometido al proceso de mecanizado. La utilidad de los análisis de integridad superficial y el relacionarlos con los parámetros del proceso, permite pronosticar los valores de calidad de la pieza fabricada y su influencia en cada fase del ciclo de vida. Rugosidad, microdureza y en general el análisis de la superficie, permite conocer el efecto en la superficie del material y sacar conclusiones útiles. Por ejemplo, si se requiere el valor máximo de una propiedad analizada, se determina los parámetros a los que se los obtiene, y es así como esta información permite definir los parámetros y calcular los indicadores que retroalimentan y mejoran el proceso. Un criterio similar se realizaría si lo solicitado es el mínimo valor de la propiedad. Por otra parte, la obtención de curvas de comportamiento o de tendencia, permite predecir las propiedades y los parámetros a los cuales se obtiene, lo que es una ventaja estratégica en un proceso de producción.

En el caso experimental III, se analizan los criterios que deben tomarse en cuenta para la selección adecuada de la máquina herramienta desde el punto de vista de consumo de energía y rugosidad de la pieza fabricada. En el experimento se comparó dos máquinas herramientas diferentes usando el mismo tipo de herramienta de corte y los mismos parámetros. El diseño del experimento planteó 27 posibles opciones de combinaciones de los parámetros de acuerdo con la metodología Taguchi, con los que se estableció la menor rugosidad “ $R_a$ ”, el menor consumo de energía (potencia eléctrica) y se determinó que los indicadores obtenidos son diferentes en cada centro de mecanizado, ya que cada equipo tiene diferente robustez. Es decir, en los análisis elaborados, se evidencia que la relación: material, herramienta y máquina herramienta, se los debe realizar para cada configuración.

En el último caso de estudio, en el caso experimental IV, se evaluó la mejora de indicadores en la dimensión social de la sostenibilidad. Se realizó una evaluación inicial y se determinaron las opciones de mejora con criterios de sostenibilidad a nivel de taller. Después de implementar mejoras, se realiza una nueva evaluación y se determina la mejora que se ha alcanzado. Se utilizó el criterio del ciclo de mejora continua y como método de cálculo la Teoría de Grises, realizando la evaluación de indicadores que pueden ser cuantitativos y/o cualitativos.

Todos los casos de estudio presentan situaciones reales para la evaluación de la sostenibilidad y pretenden contribuir a establecer los pilares para una correcta evaluación de la sostenibilidad en los procesos de arranque de viruta, cumpliendo el objetivo O3 “*Contribuir a establecer los pilares de la sostenibilidad en los procesos de arranque de viruta*”.

Finalmente, en cada uno de los casos, y cómo herramienta de apoyo, se ha tratado de utilizar un entorno colaborativo, aunque solo sea a título inicial previo, para poder establecer las bases para el desarrollo de trabajos futuros.

En el desarrollo de los casos experimentales, la colaboración del personal involucrado en cada una de las fases las labores, permite una retroalimentación de información que al ser canalizada de una manera oportuna permite mejoras en la toma de decisiones del proceso. En las plataformas colaborativas, los roles de: ingeniero de materiales, diseñador CAD/CAM, técnico de operación, operador de maquinaria, como se indicó en la Figura 4.3 para la fase de fabricación elaboración permite tomar las mejores decisiones y apoyar los mejores criterios.

## 6.2. Publicación de resultados de la investigación doctoral.

Las contribuciones de esta investigación, las cuales se resumen en esta memoria, se pueden destacar en cinco áreas principales:

### **Proyectos de Investigación derivados:**

Proyecto Interno Semilla 16-15 “*Estudio y Caracterización de la Integridad Superficial de Elementos fabricados y maquinados con arranque de viruta en equipos CNC*”. Escuela Politécnica Nacional EPN (Quito-Ecuador).

Proyecto Interno Semilla 16-22 “*Determinación de la Vida Útil de la plaquita CNMG 120408 PM en Torneado CNC*”. Escuela Politécnica Nacional EPN (Quito-Ecuador).

### **Contribuciones en Revistas Indexadas:**

Ayabaca, C., Vila, C.: “*An Approach to Sustainable Metrics Definition and Evaluation for Green Manufacturing in Material Removal Processes*”. *Materials* 2020, 13,373; doi:10.3390/ma13020373 (2020).

Ayabaca, C., Vila, C., Abellán-Nebot, J. “*Comparative study of Sustainability Metrics for Face Milling AISI 1045 in different Machining Centers*”. *Procedia Manufacturing* 2019,41, 523-530. (2019).

Vila, C., Ayabaca, C., Torres, R., Gutiérrez, S., Meseguer, A., Yang, X. “*Analysis of different Tool Patch Strategies for Free Form Machining with Computer Aided Surface Milling Operations*”. *Procedia Manufacturing* 2019,41, 843-850. (2019).

Vila, C., Ayabaca, C., Diaz, C., Calle, O. “*Sustainability Analysis of AISI 1018 Turning Operations under Surface Integrity Criteria*”. *Sustainability* 2019, 11, 4786; doi:10.3390/su11174786 (2019).

### **Contribuciones en revision Revistas Indexadas:**

Ayabaca, C., Vila, C. “*Sustainability evaluation in machining processes using the triple perspective criteria*”. *Journal of Cleaner Production* (en revisión).

### **Contribuciones en Revistas no indexadas:**

Ayabaca, C., Vila, C. “*Diagnóstico de la Dimensión social de la sostenibilidad en procesos de Mecanizado Mediante el análisis relacional Gris*”. *3C Tecnología* DOI: <http://dx.doi.org/10.17993/3ctecno.2018.v7n1e25.61-78> (2018).

**Contribuciones en Congresos Nacionales e Internacionales:**

Ayabaca, C., Vila, C. “*Análisis comparativo de estrategias de corte en operaciones de planeado*”. Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica CIBIM (2019) ISBN 978-958-52438-6-6. (Cartagena-Colombia).

Ayabaca, C., Vila, C., Abellán-Nebot, J. “*Comparative study of Sustainability Metrics for Face Milling AISI 1045 in different Machining Centers*”. Proceedings of 8<sup>th</sup> Manufacturing Engineering Society International Conference MESIC, (2019) Procedia Manufacturing 2019,41, 523-530. (Madrid-España).

Vila, C., Ayabaca, C., Gutiérrez, S., Meseguer, A., Torres, R., “*Analysis of different Tool Patch Strategies for Free Form Machining with Computer Aided Surface Milling Operations*”. Proceedings of 8<sup>th</sup> Manufacturing Engineering Society International Conference MESIC (2019). Procedia Manufacturing 2019,41, 843-850. (Madrid-España).

Ayabaca, C., Vila, C. “*Diseño de un Sistema de Indicadores para Operaciones de Fresado orientado a la evaluación de parámetros de sostenibilidad en entornos de industria 4.0*”. XXII Congreso Nacional Ingeniería Mecánica CNIM (2018). (Madrid-España).

Díaz, C., Vila, C., Ayabaca, C., Calle, C. “*The Effect of Machining Surface Integrity of AISI1018*”. XIII Congreso de ciencia y Tecnología ESPE (2018). ISSN:1393-4663. (Quito-Ecuador).

Ayabaca, C., Vila, C. “*Assessment of the Sustainability Social Dimension in Machining through Grey Relational Analysis*”. IEEE International Conference on Engineering Technology and Innovation (ICE/ITMC) (2018). Electronic ISBN: 978-1-5386-1469-3 DOI: 10.1109/ICE.2018.8436247 (Stuttgart-Alemania).

Ayabaca, C., Vila, C. “*Diagnóstico de la dimensión social de sostenibilidad en procesos de mecanizado mediante el Análisis Relacional Gris*”. I Congreso Internacional Online sobre economía empresa y sociedad (2018). Vol. 7-1, DOI: <http://dx.doi.org/10.17993/3ctecno.2018.v7n1e25>, ISSN:2254-4143 7. (Valencia - España).

### 6.3. Contribuciones de la investigación.

Las contribuciones de la presente tesis permiten reforzar los conceptos del modelo de fabricación sostenible y realizar aportaciones en la definición de indicadores específicos que ayuden a supervisar el proceso.

La primera aportación es la individualización del modelo de actividad para los procesos de arranque de viruta. En este modelo, se define las entradas, los controles, los recursos y los habilitadores del proceso de fabricación por mecanizado para definir los indicadores generales, técnicos y de sostenibilidad.

La segunda aportación es el análisis tripe y el planteamiento de 6 matrices de análisis que combinan el triple criterio. Los tres ámbitos analizados son: 1) Dimensiones de Sostenibilidad, 2) Ciclo de vida y 3) Análisis Industrial, los cuales son útiles ya que pueden ser analizados dependiendo de la priorización del ámbito de análisis que se requiera. Se han diseñado y presentado 6 matrices, cada una de las cuales tiene 36 grupos de indicadores. Se puede observar que, dependiendo la priorización de la perspectiva de análisis, se selecciona la más adecuada, tal y como se desarrolló en el capítulo 4 de la propuesta.

Para la evaluación del modelo de fabricación seleccionamos de los 36 grupos de indicadores, algunos para los casos experimentales que corresponden a los grupos #13, #14 y #15 (I<sub>13</sub>, I<sub>14</sub>, I<sub>15</sub>). Se ha destacado a estos tres grupos, para los que se presenta una propuesta básica de indicadores. Cabe indicar que los Indicadores del grupo I<sub>14</sub> (ambientales) no se han desarrollado con profundidad ya que la disertación se centra más en los directamente relacionados con la ingeniería de fabricación. También es importante indicar que, con este modelo propuesto, los indicadores se pueden definir de forma organizada para las diferentes fases del ciclo de vida del producto.

Como tercera aportación podemos resaltar, que se han realizado una serie de recomendaciones para la ponderación de indicadores de sostenibilidad, en el modelo de fabricación de procesos de arranque de viruta. Aquí cabe indicar que depende de la definición del campo de acción que se requiera evaluar. Se presentan una serie de valores recomendados para una evaluación inicial.

Finalmente, la cuarta aportación radica en la aproximación al uso de las plataformas colaborativas en cuyos entornos se va a trabajar en el futuro y que va a facilitar la toma de decisiones, para lo cual es importante si previamente se ha establecido bien los indicadores que deben tomarse y la información a compartirse.

#### **6.4. Trabajos y Líneas de Investigación a futuro.**

La presente tesis doctoral no es más que el inicio de unas líneas de investigaciones que van a ser prioritarias en las próximas décadas. Las condiciones de trabajo deberán ser analizadas y reestructuradas en breves espacios de tiempo y no solo para entornos de arranque de viruta sino para otros procesos, tecnologías y técnicas de conformado. Es por ello por lo que se abren campos de investigación en distintas direcciones como los nombrados a continuación:

- Desarrollo de nuevos modelos de fabricación sostenible. Aplicados a distintas tecnologías de conformado considerando, además, los costes del procesado y los costes de sostenibilidad.
- Análisis de sostenibilidad de aspectos sociales en operaciones de conformado. El cuidado de la salud del personal técnico a nivel de taller, por el uso y la manipulación de sustancias lubricantes y herramientas es también un campo para investigar.
- Uso y conformado de nuevos materiales. La materia prima y el creciente desarrollo de nuevos materiales requiere la caracterización de los parámetros de los procesos de fabricación que permitirá obtener las mejores calidades de producto y proceso desde distintas perspectivas.
- Análisis en el diseño para fabricación sostenible en geometrías y operaciones de conformado determinadas. Entendemos que serán necesarios estudios sobre la fabricación por mecanizado de geometrías complejas para minimizar el impacto ambiental, así como buscar las estrategias de mecanizado y diseños optimizados que se requerirán en los análisis de sostenibilidad.
- Análisis de operaciones de mecanizado con la minimización del uso de elementos contaminantes. Investigaciones complementarias en los sistemas de lubricación en el mecanizado son de vital importancia debido a consideraciones ambientales y económicas las cuales recomiendan determinar la mínima cantidad de lubricación manteniendo la mejor calidad de la pieza fabricada.
- Optimización de la selección de herramientas. Con el impulso actual que tiene la Industria 4.0 la sensorización a nivel de máquina permitirá realizar estudios de la influencia de la vibración de la herramienta, así como el análisis de la temperatura de corte, determinar condiciones de lubricación y predecir tiempo de vida de la herramienta.
- Integración en plataformas colaborativas de gestión del ciclo de vida del producto. Sugerir incorporar más formatos de informes de sostenibilidad, de indicadores y de análisis de sostenibilidad en las plataformas que gestionan el análisis de ciclo de vida del producto, que permitirá analizar la sostenibilidad en las fases de diseño y verificar durante la fabricación.

Estos ámbitos de estudio o trabajos futuros son una muestra de lo que aún queda por realizar, entre otros, a raíz de los resultados obtenidos con esta disertación.

# Referencias

---

—

# Referencias

- Agarwal, N. (2012). Surface roughness modeling with machining parameters (speed, feed & depth of cut) in CNC milling. *MIT International Journal of Mechanical Engineering*, 2(1), 55–61.
- Akbar, F., Mativenga, P. T., & Sheikh, M. A. (2007). An investigation of the tool-chip interface temperature and heat partition in high-speed machining of AISI/SAE 4140 steel with TiN-coated tool. *Proceedings of the 35th International MATADOR 2007 Conference*. [https://doi.org/10.1007/978-1-84628-988-0\\_48](https://doi.org/10.1007/978-1-84628-988-0_48)
- Albertí, J., Balaguera, A., Brodhag, C., & Fullana-i-Palmer, P. (2017). Towards life cycle sustainability assessment of cities. A review of background knowledge. *Science of the Total Environment*, Vol. 609. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.179>
- Antolín, R., Delgado, J., & Montiel, I. (2016). Deconstructing corporate sustainability: a comparison of different stakeholder metrics. *Journal of Cleaner Production*, 136. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.111>
- Ashby, M. (2013). Life-cycle assessment: details and difficulties. In M. Ashby (Ed.), *Materials and the Environment: Eco-informed Material Choice: Second Edition* (p. 55). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385971-6.00003-8>.
- Ayabaca, C., & Vila, C. (2018a). Assessment of the Sustainability Social Dimension in Machining Through Grey Relational Analysis. *2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation, ICE/ITMC 2018 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/ICE.2018.8436247>

- Ayabaca, C., & Vila, C. (2018b). Diagnóstico De La Dimensión Social De Sostenibilidad En Procesos De Mecanizado Mediante El Análisis Relacional Gris. *3C Tecnología\_Glosas de Innovación Aplicadas a La Pyme*, 7(1), 61–78. <https://doi.org/10.17993/3ctecno.2018.v7n1e25.61-78>
- Ayabaca, C., Vila, C., & Abellán-Nebot, J. (2019). Comparative study of Sustainability Metrics for Face Milling AISI 1045 in different Machining Centers. In C. Barajas, J. Caja, R. Calvo, P. Maresca, & T. Palacios (Eds.), *8th Manufacturing Engineering Society International Conference MESIC 2019* (p. 133). ETSI Aeronáutica y del Espacio, UPM, Madrid.
- Ayabaca, C., & Vila, C. (2019). Análisis comparativo de estrategias de corte en operaciones de planeado. *XIV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica (CIBIM 2019)*, Cartagena, Colombia, 119-125
- Ayabaca, C., & Vila, C. (2020). An Approach to Sustainable Metrics Definition and Evaluation for Green Manufacturing in Material Removal Processes. *Materials (Switzerland)*, 13(2), 373. <https://doi.org/10.3390/ma13020373>
- Badurdeen, F., & Jawahir, I. S. (2017). Strategies for Value Creation Through Sustainable Manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.002>
- Bellés, J. (2016). *Desarrollo y optimización de recubrimientos de aleación MCrAlY con dispersión de cargas cerámicas obtenidos por proyección térmica sostenible para aplicaciones de resistencia a oxidación a altas temperaturas*. Universitat Jaume I de Castellón (Spain).
- Benedicto, E., Carou, D., & Rubio, E. M. (2017). Technical, Economic and Environmental Review of the Lubrication/Cooling Systems Used in Machining Processes. *Procedia Engineering*, 184, 99–116. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.075>
- Berger, R. (2016). La transformación digital, qué es y qué supone. *España 4.0 El Reto de La Transformación Digital de La Economía, Mayo*, 10–16. Retrieved from [www.rolandberger.com](http://www.rolandberger.com)
- Bhanot, N., Rao, P. V., & Deshmukh, S. G. (2015). Sustainable Manufacturing: An Interaction Analysis for Machining Parameters using Graph Theory. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 189, 57–63. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.03.192>
- Bhanot, N., Rao, P. V., & Deshmukh, S. G. (2016a). An Assessment of Sustainability for Turning Process in an Automobile Firm. *Procedia CIRP*, 48, 538–543. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.024>
- Bhanot, N., Rao, P. V., & Deshmukh, S. G. (2016b). An integrated sustainability assessment framework: a case of turning process. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 18(5), 1475–1513. <https://doi.org/10.1007/s10098-016-1130-2>

- Bhanot, N., Rao, P. V., & Deshmukh, S. G. (2017). An integrated approach for analysing the enablers and barriers of sustainable manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, *142*, 4412–4439. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.123>
- Borland, H., Ambrosini, V., Lindgreen, A., & Vanhamme, J. (2016). Building Theory at the Intersection of Ecological Sustainability and Strategic Management. *Journal of Business Ethics*, *135*(2), 293–307. <https://doi.org/10.1007/s10551-014-2471-6>
- Bruker. (2019). Bruker Q2-ION Optical. Retrieved 3 May 2019, from <https://www.bruker.com/products/x-ray-diffraction-and-elemental-analysis/optical-emission-spectrometry/q2-ion.html>
- Brundtland, G. (1987). Our Common Future—Call for Action. *Environmental Conservation*. <https://doi.org/10.1017/s0376892900016805>
- Cahoon, J. R., Broughton, W. H., & Kutzak, A. R. (1971). The determination of yield strength from hardness measurements. *Metallurgical Transactions*, *2*(7). <https://doi.org/10.1007/BF02913433>
- Cassen, R. H. (1987). Our common future: report of the World Commission on Environment and Development. *International Affairs*. <https://doi.org/10.2307/2621529>
- Ceschin, F., & Gaziulusoy, I. (2016). Evolution of design for sustainability: From product design to design for system innovations and transitions. *Design Studies*, *47*. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2016.09.002>
- Chang, D., Lee, C. K. M., & Chen, C. H. (2014). Review of life cycle assessment towards sustainable product development. *Journal of Cleaner Production*, *83*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.050>
- Chetan, Ghosh, S., & Venkateswara Rao, P. (2015). Application of sustainable techniques in metal cutting for enhanced machinability: A review. *Journal of Cleaner Production*, *100*, 17–34. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.039>
- CIMCO Software. (2018). *CIMCO CNC Program Editor*. Retrieved from <https://www.cimco.com/download/public>
- Contreras, J. D., Garcia, J. I., & Díaz Pastrana, J. D. (2017). Developing of industry 4.0 applications. *International Journal of Online Engineering*, *13*(10). <https://doi.org/10.3991/ijoe.v13i10.7331>
- Cook, N. H. (1973). Tool Wear and Tool Life. *Journal of Engineering for Industry*, *95*(4), 931–938. <https://doi.org/10.1115/1.3438271>
- Dahmus, J. B., & Gutowski, T. G. (2004). An environmental analysis of machining. *American Society of Mechanical Engineers, Manufacturing Engineering Division, MED*. <https://doi.org/10.1115/IMECE2004-62600>

- Dambhare, S., Deshmukh, S., Borade, A., Digalwar, A., & Phate, M. (2015). Sustainability issues in turning process: A study in Indian machining industry. *Procedia CIRP*, 26, 379–384. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.07.092>
- Dassault Systemes. (2021). 3DEXPERIENCE. Retrieved 2 January 2021, from 3DEXPERIENCE Edu Data Model Walkthrough website: <https://eduspace.3ds.com/CompanionManager>
- De los Rios, I. C., & Charnley, F. J. S. (2017). Skills and capabilities for a sustainable and circular economy: The changing role of design. *Journal of Cleaner Production*, 160. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.130>
- De Man, J. C., & Strandhagen, J. O. (2017). An Industry 4.0 Research Agenda for Sustainable Business Models. *Procedia CIRP*, 63. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.315>
- De Ron, A. J. (1998). Sustainable production: The ultimate result of a continuous improvement. *Int. J. Production Economics*, 56–57(98), 99–110. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(98\)00005-X](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(98)00005-X)
- Demeke, B., Ingwersen, W. W., Weisbrod, A. V., Ceja, M., & Weber, B. (2018). Green Net Value Added as a sustainability metric based on life cycle assessment: An application to Bounty® paper towel. *Journal of Cleaner Production*, 170. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.246>
- Deming, W. (2018). *Out of the Crisis* MIT Press (MIT Press, Ed.).
- Diaz, C., Vila, C., Ayabaca, C., & Calle, O. (2018). The Effect of Machining on Surface Integrity of AISI 1018. *Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE*, 13(1). <https://doi.org/10.24133/cctespe.v13i1.838>
- Dong, Y., & Hauschild, M. Z. (2017). Indicators for Environmental Sustainability. *Procedia CIRP*, 61. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.173>
- Dornfeld, D. (2012). Green manufacturing and resiliency. *SMT Surface Mount Technology Magazine*, 27(10), 32–36.
- Dornfeld, D. (2013). Green manufacturing: Fundamentals and applications. In *Green Manufacturing: Fundamentals and Applications* (Vol. 9781441960). <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6016-0>
- Dornfeld, D. A. (2014). Moving towards green and sustainable manufacturing. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*, 1(1), 63–66. <https://doi.org/10.1007/s40684-014-0010-7>
- Dyllick, T., & Rost, Z. (2017). Towards true product sustainability. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 162. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.189>
- Eastwood, M. D., & Haapala, K. R. (2015). A unit process model based methodology to assist product sustainability assessment during design for manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 108, 54–64. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.105>

- Ellen MacArthur Foundation. (2012). Towards a Circular Economy - Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition. In *Greener Management International*.
- Ellen McArthur Foundation. (2021). Universal circular economy policy goals. In *Ellen MacArthur Foundation*. Retrieved from [www.ellenmacarthurfoundation.org](http://www.ellenmacarthurfoundation.org)
- Equivalent Materials AISI 1018. (2021). *AISI 1018*. Retrieved from <https://equivalentmaterials.com/materials/aisi-1018>
- Equivalent Materials AISI 1045. (2021). *AISI 1045*. Retrieved from <https://equivalentmaterials.com/materials/aisi-1045>
- Erol, S., Jäger, A., Hold, P., Ott, K., & Sihm, W. (2016). Tangible Industry 4.0: A Scenario-Based Approach to Learning for the Future of Production. *Procedia CIRP*, 54. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.162>
- Fagor, A. (2017). El ITRI y Fagor Automation desarrollarán SOFTWARE INTELIGENTE para aplicaciones que mejoren el rendimiento y la seguridad del proceso de mecanizado. *4.0 Industry Nuevas Fórmulas Para Mejorar La Productividad y La Eficiencia*, 3, 16–17. Retrieved from [http://www.fagorautomation.com/downloads/boletines/es/magazine\\_3.pdf](http://www.fagorautomation.com/downloads/boletines/es/magazine_3.pdf)
- Fargani, H., Cheung, W. M., & Hasan, R. (2016). An Empirical Analysis of the Factors That Support the Drivers of Sustainable Manufacturing. *Procedia CIRP*, 56. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.10.096>
- Gamage, J., & DeSilva, A. (2015). Assessment of research needs for sustainability of unconventional machining processes. *Procedia CIRP*, 26, 385–390. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.07.096>
- Gamage, J., DeSilva, A., Chantzis, D., & Antar, M. (2017). Sustainable machining: Process energy optimisation of wire electrodischarge machining of Inconel and titanium superalloys. *Journal of Cleaner Production*, 164, 642–651. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.186>
- Garbie, I. H. (2014). An analytical technique to model and assess sustainable development index in manufacturing enterprises. *International Journal of Production Research*, 52(16), 4876–4915. <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.893066>
- Garretson, I. C., Mani, M., Leong, S., Lyons, K. W., & Haapala, K. R. (2016). Terminology to support manufacturing process characterization and assessment for sustainable production. *Journal of Cleaner Production*, 139, 986–1000. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.103>
- Goindi, G. S., & Sarkar, P. (2017). Dry machining: A step towards sustainable machining – Challenges and future directions. *Journal of Cleaner Production*, 165, 1557–1571. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.235>
- GRI. (2020). Global Reporting Initiative. Retrieved March 7, 2020, from <https://www.globalreporting.org/>

- Gunda, R., Reddy, N., & Kishawy, H. (2016). A Novel Technique to Achieve Sustainable Machining System. *Procedia CIRP*, 40, 30–34. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.045>
- Gupta, K., Laubscher, R. F., Davim, J. P., & Jain, N. K. (2016). Recent developments in sustainable manufacturing of gears: A review. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 112. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.133>
- Gupta, M., Sood, P., Singh, G., & Sharma, V. (2017). Sustainable machining of aerospace material – Ti (grade-2) alloy: Modeling and optimization. *Journal of Cleaner Production*, 147, 614–627. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.133>
- Haapala, K. R., Zhao, F., Camelio, J., Sutherland, J. W., Skerlos, S. J., Dornfeld, D. A., ... Clarens, A. F. (2011). A review of engineering research in sustainable manufacturing. *ASME 2011 International Manufacturing Science and Engineering Conference, MSEC 2011*, 2, 599–619. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-82455192661&partnerID=40&md5=c71f22649e1ce0fd2fc904c33fe20417>
- Hartini, S., & Ciptomulyono, U. (2015). The Relationship between Lean and Sustainable Manufacturing on Performance: Literature Review. *Procedia Manufacturing*, 4(Iess), 38–45. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.11.012>
- Hay, L., Duffy, A., & Whitfield, R. I. (2014). The Sustainability Cycle and Loop: Models for a more unified understanding of sustainability. *Journal of Environmental Management*, Vol. 133. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.11.048>
- Hegab, H. A., Darras, B., & Kishawy, H. A. (2018). Towards sustainability assessment of machining processes. *Journal of Cleaner Production*, 170, 694–703. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.197>
- Helleno, A. L., de Moraes, A. J. I., Simon, A. T., & Helleno, A. L. (2017). Integrating sustainability indicators and Lean Manufacturing to assess manufacturing processes: Application case studies in Brazilian industry. *Journal of Cleaner Production*, 153, 405–416. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.072>
- Huang, A., & Badurdeen, F. (2017). Sustainable Manufacturing Performance Evaluation: Integrating Product and Process Metrics for Systems Level Assessment. *Procedia Manufacturing*, 8(October 2016), 563–570. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.072>
- Humphrey, S., Papadopoulos, H., Linke, B., Maiyya, S., Vijayaraghavan, A., & Schmitt, R. (2014). Power measurement for sustainable high-performance manufacturing processes. *Procedia CIRP*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.041>
- IEMA. (2014a). *From waste to resources. Implementing Sustainable Resource Management in Your Business - HOW DID WE GET HERE? The Transition to Resource Management*. Retrieved from [www.iema.net/rm](http://www.iema.net/rm)

- 
- IEMA. (2014b). *From waste to resources. Implementing Sustainable Resource Management in Your Business - RESOURCE CYCLING Managing material flows so they replenish supply*. Retrieved from [www.iema.net/rm](http://www.iema.net/rm)
- ISO 14001. (2015). *ISO 14001:2015 Environmental management systems — Requirements with guidance for use*. Retrieved from <https://www.iso.org/standard/60857.html>
- ISO 14031. (2013). *ISO 14031:2013 Environmental management — Environmental performance evaluation — Guideline*. Retrieved from <https://www.iso.org/standard/52297.html>
- ISO 14040. (2006). *ISO 14040:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*. Retrieved from <https://www.iso.org/standard/37456.html>
- ISO 26000. (2010). *ISO 26000:2010 Guidance on social responsibility*. In *International Organization for Standardization*. Retrieved from <https://www.iso.org/standard/42546.html>
- ISO 45001. (2018). *ISO 45001: 2018 Occupational health and safety management systems -- Requirements with guidance for use*. Retrieved from <https://www.iso.org/standard/63787.html>
- ISO 9001. (2015). *ISO 9001:2015 Quality management systems - Requirements*. Retrieved from <https://www.iso.org/standard/62085.html>
- ISO 9001. (2015). *ISO 9001:2015 Quality management systems - Requirements*. Retrieved from <https://www.iso.org/standard/62085.html>
- Jassim, A. K. (2016). Using Sustainable Manufacturing Process to Produce Solid Shaft from Al - Zn Alloys Chips and Copper Chips without Melting. *Procedia CIRP*, 40. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.039>
- Jawahir, I., Puleo, D., & Schoop, J. (2016). Cryogenic Machining of Biomedical Implant Materials for Improved Functional Performance, Life and Sustainability. *Procedia CIRP*, 46, 7–14. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.133>
- Jayal, A. D., Badurdeen, F., Dillon, O. W., & Jawahir, I. S. (2010). Sustainable manufacturing: Modeling and optimization challenges at the product, process and system levels. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2(3), 144–152. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2010.03.006>
- Jin, M., Tang, R., Ji, Y., Liu, F., Gao, L., & Huisingh, D. (2017). Impact of advanced manufacturing on sustainability: An overview of the special volume on advanced manufacturing for sustainability and low fossil carbon emissions. *Journal of Cleaner Production*, 161. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.101>
- Joung, C., Carrell, J., Sarkar, P., & Feng, S. (2013). Categorization of indicators for sustainable manufacturing. *Ecological Indicators*, 24, 148–157. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.05.030>

- Kadam, G., & Pawade, R. (2017). Surface integrity and sustainability assessment in high-speed machining of Inconel 718 – An eco-friendly green approach. *Journal of Cleaner Production*, 147, 273–283. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.104>
- Kaku, I. (2017). Is Seru a Sustainable Manufacturing System? *Procedia Manufacturing*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.093>
- Kluczek, A. (2017). An Overall Multi-criteria Approach to Sustainability Assessment of Manufacturing Processes. *Procedia Manufacturing*, 8, 136–143. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.016>
- Kopac, J. (2009). Achievements of sustainable manufacturing by machining. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 34(2), 180–187.
- Kurilova, J., Lindkvist, L., & Sundin, E. (2015). Towards facilitating circular product life-cycle information flow via remanufacturing. *Procedia CIRP*, 29. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.162>
- Laso, J., Margallo, M., Fullana, P., Bala, A., Gazulla, C., Irabien, A., & Aldaco, R. (2017). Introducing life cycle thinking to define best available techniques for products: Application to the anchovy canning industry. *Journal of Cleaner Production*, 155. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.040>
- Latif, H. H., Gopalakrishnan, B., Nimbarte, A., & Currie, K. (2017). Sustainability index development for manufacturing industry. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 24, 82–95. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2017.01.010>
- Lee, S., Ryu, K., & Shin, M. (2017). The Development of Simulation Model for Self-reconfigurable Manufacturing System Considering Sustainability Factors. *Procedia Manufacturing*, 11. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.226>
- Lewis H., G. J., Al., Lewis, H., Gertsakis, J., Grant, T., Morelli, N., & Sweatman, A. (2007). *Design + environment: A global guide to Designing Greener Goods.* (1<sup>st</sup> ed) Routledge, 14.
- Li, C., Tang, Y., Cui, L., & Li, P. (2015). A quantitative approach to analyze carbon emissions of CNC-based machining systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 26(5). <https://doi.org/10.1007/s10845-013-0812-4>
- Lim, W. (2017). Inside the sustainable consumption theoretical toolbox: Critical concepts for sustainability, consumption, and marketing. *Journal of Business Research*, 78. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2017.05.001>
- Linke, B., & Dornfeld, D. (2012). Application of axiomatic design principles to identify more sustainable strategies for grinding. *Journal of Manufacturing Systems*, 31(4), 412–419. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2012.07.007>
- Linke, B., Corman, G., Dornfeld, D., & Tönissen, S. (2013). Sustainability indicators for discrete manufacturing processes applied to grinding technology. *Journal of Manufacturing Systems*, 32(4). <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2013.05.005>

- Lu, T., & Jawahir, I. (2015). Metrics-based sustainability evaluation of cryogenic machining. *Procedia CIRP*, 29, 520–525. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.067>
- Lu, T., Gupta, A., Jayal, A. D., Badurdeen, F., Feng, S. C., Dillon, O. W., & Jawahir, I. S. (2011). A Framework of Product and Process Metrics for Sustainable Manufacturing. In *Advances in Sustainable Manufacturing*. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-20183-7\\_48](https://doi.org/10.1007/978-3-642-20183-7_48)
- Luqmani, A., Leach, M., & Jesson, D. (2017). Factors behind sustainable business innovation: The case of a global carpet manufacturing company. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 24. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2016.10.007>
- Manda, B. M. K., Bosch, H., Karanam, S., Beers, H., Bosman, H., Rietveld, E., ... Patel, M. K. (2016). Value creation with life cycle assessment: An approach to contextualize the application of life cycle assessment in chemical companies to create sustainable value. *Journal of Cleaner Production*, 126. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.020>
- Mani, M., Johansson, B., Lyons, K. W., Sriram, R. D., & Ameta, G. (2013). Simulation and analysis for sustainable product development. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(5). <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0538-0>
- Mani, M., Madan, J., Lee, J. H., Lyons, K. W., & Gupta, S. K. (2014). Sustainability characterisation for manufacturing processes. *International Journal of Production Research*, 52(20). <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.886788>
- McDonough, W., Braungart, M., Anastas, P. T., & Zimmerman, J. B. (2003). Applying the Principles of Green Engineering to Cradle-to-Cradle Design. *Environmental Science and Technology*, Vol. 37. <https://doi.org/10.1021/es0326322>
- Mesa, J., Esparragoza, I., & Maury, H. (2018). Developing a set of sustainability indicators for product families based on the circular economy model. *Journal of Cleaner Production*, 196. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.131>
- Metkon Duroline M Series. (2018). *Hardness Testing Duroline M series*. Retrieved from <https://www.metkon.com/Products-Details/5/240/237/duroline-m1/>
- Mitsubishi Materials. (2019). Mitsubishi Materials Solid End Mills. Retrieved December 3, 2018, from <https://n9.cl/f34bw>
- Mitutoyo SJ-210. (2016). *Mitutoyo Portable Surface Roughness Tester SurfTest SJ-210 SERIES*. Retrieved from [https://www.mitutoyo.com/wp-content/uploads/2015/08/SurfTest\\_SJ210.pdf](https://www.mitutoyo.com/wp-content/uploads/2015/08/SurfTest_SJ210.pdf)
- Mitutoyo Surf Test SJ210. (2017). *Mitutoyo Surface Measurement SurfTest SJ-201 / SJ-301*. Retrieved from [http://allmetech.com/images/brosuri/mitutoyo/SurfTest\\_SJ201\\_SJ301\\_PRE\\_rugozimetre.pdf](http://allmetech.com/images/brosuri/mitutoyo/SurfTest_SJ201_SJ301_PRE_rugozimetre.pdf)

- Moldavska, A. (2016). Model-based Sustainability Assessment - An Enabler for Transition to Sustainable Manufacturing. *Procedia CIRP*, 48. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.059>
- Moldavska, A., & Welo, T. (2017). The concept of sustainable manufacturing and its definitions: A content-analysis based literature review. *Journal of Cleaner Production*, 166, 744–755. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.006>
- Mutingi, M., Dube, P., & Mbohwa, C. (2017). A Modular Product Design Approach for Sustainable Manufacturing in A Fuzzy Environment. *Procedia Manufacturing*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.060>
- NIST. (2018). NIST Sustainable Manufacturing Indicator Repository (SMIR). Retrieved May 2, 2020, from National Institute of Standards and Technology website: <https://www.nist.gov/services-resources/software/sustainable-manufacturing-indicator-repository-smir>
- Ogbemhe, J., Mpofu, K., & Tlale, N. S. (2017). Achieving Sustainability in Manufacturing Using Robotic Methodologies. *Procedia Manufacturing*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.056>
- Olympus GX41. (2018a). Olympus GX41. Manual Microscopio Metalográfico.
- Olympus GX41. (2018b). *OLYMPUS GX41 Compact Inverted Metallurgical Microscope*.
- Overcash, M. (2009). Unit process life cycle inventory for product manufacturing operations [Article]. *Proceedings of the ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference 2009, MSEC2009*, 1, 49–55. <https://doi.org/10.1115/MSEC2009-84065>
- Pan, Z., Feng, Y., & Liang, S. Y. (2017). Material microstructure affected machining: A review. *Manufacturing Review*, 4. <https://doi.org/10.1051/mfreview/2017004>
- Panda, B., Paul, S. C., Hui, L. J., Tay, Y. W. D., & Tan, M. J. (2017). Additive manufacturing of geopolymer for sustainable built environment. *Journal of Cleaner Production*, 167. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.165>
- Parada, M., Osseweijer, P., & Posada, J. (2017). Sustainable biorefineries, an analysis of practices for incorporating sustainability in biorefinery design. *Industrial Crops and Products*, 106. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.08.052>
- Pawade, R. S., Joshi, S. S., & Brahmankar, P. K. (2008). Effect of machining parameters and cutting edge geometry on surface integrity of high-speed turned Inconel 718. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(1). <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.08.004>
- Peralta, M., Marcos, M., & Aguayo, F. (2017). On the sustainability of machining processes. Proposal for a unified framework through the triple bottom-line from an understanding review. *Journal of Cleaner Production*, 142, 3890–3904. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.071>

- Peralta, M., Marcos, M., Aguayo, F., Lama, J., & Córdoba, A. (2015). Sustainable Fractal Manufacturing: A New Approach to Sustainability in Machining Processes. *Procedia Engineering*, 132, 926–933. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.579>
- Power Meter. (2018). *HT Instruments HT9022 Power Quality Logger Clamp Meter with Bluetooth*. Retrieved from <https://www.powermeterstore.com/product/ht-instruments-ht9022-power-quality-logger-clamp-meter-with-bluetooth> Item. 2013
- Pozo, D. (2016). La Empresa Digital : camino hacia Industria 4 . 0. Retrieved 3 March 2019, from <https://docplayer.es/45885343-La-empresa-digital-camino-hacia-industria-4-0.htm>
- Premarathne, H. D. P., Kulatunga, A. K., Ekanayake, S. B., & Miyanadeniya, D. M. W. S. B. (2017). Value Creation towards Sustainable Manufacturing using Non-Formal and Lifelong Learning Methods. *Procedia Manufacturing*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.074>
- Priarone, P. C., & Ingarao, G. (2017). Towards criteria for sustainable process selection: On the modelling of pure subtractive versus additive/subtractive integrated manufacturing approaches. *Journal of Cleaner Production*, 144. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.165>
- Pusavec, F., Deshpande, A., Yang, S., M'Saoubi, R., Kopac, J., Dillon, O. W., & Jawahir, I. S. (2014). Sustainable machining of high temperature Nickel alloy - Inconel 718: Part 1 - Predictive performance models. *Journal of Cleaner Production*, 81, 255–269. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.040>
- Pusavec, F., Deshpande, A., Yang, S., M'Saoubi, R., Kopac, J., Dillon, O. W., & Jawahir, I. S. (2015). Sustainable machining of high temperature Nickel alloy - Inconel 718: Part 2 - Chip breakability and optimization. *Journal of Cleaner Production*, 87(1), 941–952. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.085>
- Pusavec, F., Krajnik, P., & Kopac, J. (2010). Transitioning to sustainable production - Part I: application on machining technologies. *Journal of Cleaner Production*, 18(2). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.08.010>
- Pusavec, F., Kramar, D., Krajnik, P., & Kopac, J. (2010). Transitioning to sustainable production – part II: evaluation of sustainable machining technologies. *Journal of Cleaner Production*, 18(12), 1211–1221. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.01.015>
- Qin, J., Liu, Y., & Grosvenor, R. (2016). A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and beyond. *Procedia CIRP*, 52. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.08.005>
- Rajurkar, K. P., Hadidi, H., Pariti, J., & Reddy, G. C. (2017). Review of Sustainability Issues in Non-Traditional Machining Processes. *Procedia Manufacturing*, 7, 714–720. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.12.106>

- Raoufi, K., Haapala, K. R., Jackson, K. L., Kim, K. Y., Kremer, G. E. O., & Psenka, C. E. (2017). Enabling Non-expert Sustainable Manufacturing Process and Supply Chain Analysis During the Early Product Design Phase. *Procedia Manufacturing*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.100>
- Rauch, E., Dallinger, M., Dallasega, P., & Matt, D. T. (2015). Sustainability in manufacturing through distributed manufacturing systems (DMS). *Procedia CIRP*, 29, 544–549. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.01.069>
- Renning, F., Luminosu, C. T., & Draghici, A. (2016). Service Provision in the Framework of Industry 4.0. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 221. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.05.127>
- RICOH. (2019). RICOH - Driving Sustainability for Our Future. Retrieved 15 April 2021, from Ricoh website: <https://www.rioh.com/sustainability/>
- Rödger, J. M., Bey, N., & Alting, L. (2016). The Sustainability Cone – A holistic framework to integrate sustainability thinking into manufacturing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 65(1), 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.033>
- Roy, R. (2001). Design of Experiments and the Taguchi Approach. In *Design of Experiments Using the Taguchi Approach*. John Wiley & Sons, Inc.
- Salido, M. A., Escamilla, J., Barber, F., & Giret, A. (2017). Rescheduling in job-shop problems for sustainable manufacturing systems. *Journal of Cleaner Production*, 162. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.002>
- Sánchez, C. (2021). Economía Circular. Retrieved 29 October 2020, from <https://metasystemdesign.com/economia-circular>
- Sandvik Coromant. (2019). Machining formulas and definitions Milling formulas and definitions. Retrieved May 3, 2019, from Sandvik Coromant website: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/machining-formulas-definitions/pages/milling.aspx>
- Schmid, A., Löwer, M., Katzwinkel, T., Schmidt, W., Siebrecht, J., Feldhusen, J., ... Rey, J. (2016). Life Cycle of Multi Technology Machine Tools-Modularization and Integral Design. *Procedia CIRP*, 50. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.017>
- Schmid, S., & Kalpakjian, S. (2008). Manufactura, Ingeniería y Tecnología. Quinta Edición. In *PEARSON EDUCACIÓN*.
- Sekulic, D. P., Nehete, R., Yu, C. N., & Fu, H. (2014). An energy sustainability metric. *Energy*, 74(C). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.078>
- Shankar, M., Kannan, D., & Udhaya, P. (2017). Analyzing sustainable manufacturing practices – A case study in Indian context. *Journal of Cleaner Production*, 164. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.097>

- Shin, S., Woo, J., & Rachuri, S. (2017). Energy efficiency of milling machining: Component modeling and online optimization of cutting parameters. *Journal of Cleaner Production*, 161, 12–29. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.013>
- Singh, S., Ramakrishna, S., & Gupta, M. K. (2017). Towards zero waste manufacturing: A multidisciplinary review. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 168. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.108>
- Smith-López, D. J., Graciano-Gallego, C. A., & Aparicio-Carrillo, G. N. (2015). An empirical method for the estimation of yield strength on bonds and strands of expanded metal meshes. *Revista Facultad de Ingeniería*, 1(74).
- Solidworks. (2019). *Guía de diseño sostenible -Evaluación cualitativa del ciclo de vida*.
- Stock, T., & Seliger, G. (2016). Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 40. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.129>
- Tao, F., Wang, Y., Zuo, Y., Yang, H., & Zhang, M. (2016). Internet of Things in product life-cycle energy management. *Journal of Industrial Information Integration*, 1. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2016.03.001>
- Uhlmann, E., Thom, S., & Ehrlicke, M. (2017). Application of Spindle Speed Increaser as Sustainable Solution to Upgrade Machine Tools. *Procedia Manufacturing*, 8(October 2016), 680–685. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.087>
- UNAM. (2016). El Método Experimental. Retrieved 10 January 2018, from Colegio de Ciencias Humanidades. Universidad Nacional Autónoma de México website: [https://www.wiki.cch.unam.mx/Lectura\\_El\\_método\\_experimental](https://www.wiki.cch.unam.mx/Lectura_El_método_experimental)
- United Nations. (2015). Objetivos de Desarrollo Sostenible. Retrieved May 2, 2020, from <http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- United Nations. (2017). The Sustainable Development Goals Report. *United Nations Publications*. <https://doi.org/10.18356/3405d09f-en>
- United Nations. (2018). United Nations Global Compact. Retrieved May 6, 2020, from [https://www.pactomundial.org/wp-content/uploads/2018/02/Flyer-New-Strategy-GC-2018\\_20180126.pdf](https://www.pactomundial.org/wp-content/uploads/2018/02/Flyer-New-Strategy-GC-2018_20180126.pdf)
- Vila, C., Ayabaca, C., Díaz-Campoverde, C., & Calle, O. (2019). Sustainability analysis of AISI 1018 turning operations under surface integrity criteria. *Sustainability (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/su11174786>
- Walsh, R. A., & Cormier, D. R. (2006). Machining and Metalworking Handbook. In *Library*.
- Wang, S., Lu, X., Li, X. X., & Li, W. D. (2015). A systematic approach of process planning and scheduling optimization for sustainable machining. *Journal of Cleaner Production*, 87(C), 914–929. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.008>

- Winroth, M., Almström, P., & Andersson, C. (2016). Sustainable production indicators at factory level. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 27(6), 842–873. <https://doi.org/10.1108/JMTM-04-2016-0054>
- Wu, C.-H. (2007). An Empirical Study on the Transformation of Likert-scale Data to Numerical Scores. *Applied Mathematical Sciences*, 1(58), 2851–2862.
- Wu, H., Lv, K., Liang, L., & Hu, H. (2017). Measuring performance of sustainable manufacturing with recyclable wastes: A case from China's iron and steel industry. *Omega (United Kingdom)*, 66. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2016.01.009>
- Xu, W., Shao, L., Yao, B., Zhou, Z., & Pham, D. T. (2016). Perception data-driven optimization of manufacturing equipment service scheduling in sustainable manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 41, 86–101. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2016.08.001>
- Yang, S., Talekar, T., Sulthan, M. A., & Zhao, Y. F. (2017). A Generic Sustainability Assessment Model towards Consolidated Parts Fabricated by Additive Manufacturing Process. *Procedia Manufacturing*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.086>
- Zezulka, F., Marcon, P., Vesely, I., & Sajdl, O. (2016). Industry 4.0 – An Introduction in the phenomenon. *IFAC-PapersOnLine*, 49(25), 8–12. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.12.002>
- Zhang, H., Zhu, B., Li, Y., Yaman, O., & Roy, U. (2015). Development and utilization of a Process-oriented Information Model for sustainable manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 37. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2015.05.003>
- Zhang, T., Owodunni, O., & Gao, J. (2015). Scenarios in multi-objective optimisation of process parameters for sustainable machining. *Procedia CIRP*, 26, 373–378. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.07.186>
- Zhao, G. Y., Liu, Z. Y., He, Y., Cao, H. J., & Guo, Y. B. (2017). Energy consumption in machining: Classification, prediction, and reduction strategy. *Energy*, 133, 142–157. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.110>
- Zhou, L., Li, J., Li, F., Meng, Q., Li, J., & Xu, X. (2016). Energy consumption model and energy efficiency of machine tools: A comprehensive literature review. *Journal of Cleaner Production*, 112, 3721–3734. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.093>





UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA