

UNIVERSIDAD  
PANAMERICANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO GENERATIVO DE UN SÓLIDO DE  
REVOLUCIÓN

TESIS QUE PARA OBTENER  
EL GRADO DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA  
PRESENTA

GERARDO GONZÁLEZ DÍAZ

DIRECTOR DE TESIS  
DR. ERNESTO LEONIDES RODRÍGUEZ GONZÁLEZ

Ciudad de México, 2020



---

## **Agradecimientos**

Agradezco al Dr. Ernesto Rodríguez González por las ideas y consejos que dieron dirección y forma al presente trabajo.

Agradezco al Dr. Javier Villarreal Boone empuje y apoyo para la conclusión del presente trabajo.

---

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo a mi esposa Lucy por su inmenso amor, cariño y apoyo.

A mi hijo Matías por las horas cedidas.

A mis padres, por inculcarme los valores adecuados para crecer profesionalmente.

---

## Resumen

El presente caso aborda el diseño de un sólido de revolución para su uso como adaptador en un circuito de alimentación de aire comprimido. El adaptador permitirá conectar un riel de aire de baja fricción a una toma de aire existente. La compañía SK, tomó la responsabilidad de diseñar y producir el adaptador en México, con el objetivo de otorgar una respuesta rápida y de bajo costo al cliente.

El caso nace de la necesidad de diseñar un nuevo producto bajo una metodología de diseño innovadora. La metodología permitió organizar y retroalimentar las fases de planeación, simulación y fabricación del producto entre ellas mismas.

Se concluyó que la utilización de una metodología de diseño basada en el uso de algoritmos generativos, simulación y verificación por computadora, y apoyada por métodos de fabricación aditiva, permite crear un adaptador funcional, ergonómica y mecánicamente resistente, con un gran ahorro en los costos de producción y el tiempo de fabricación total.

A través de analizar el desempeño de diversos materiales sobre las propiedades requeridas en el diseño se determinó que, realizar el modelo en PLA, (ácido poliláctico, por sus siglas en inglés) brindaba un desempeño mayor que el 9% contra el aluminio, y 19% contra el acero, con ahorros respectivos del 44% y 70% del costo de fabricación por pieza.

Paralelamente, la metodología de diseño permitió generar una base de datos de algoritmos y procedimientos con potencial para agilizar una toma de decisiones en problemas futuros de diseño.

---

## Índice de contenido

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>I</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>II</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>III</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDO</b> .....	<b>IV</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>XI</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
OBJETIVO GENERAL.....	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	3
DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO DEL PRESENTE TRABAJO.....	3
<b>CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES</b> .....	<b>6</b>
<b>CAPÍTULO 2 DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN</b> .....	<b>12</b>
DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA .....	12
DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA GENERAL .....	14
DESCRIPCIÓN DE LOS PROBLEMAS ESPECÍFICOS .....	15
DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE DIAGNÓSTICO.....	16
PLANTEAMIENTO DE LA HIPÓTESIS .....	17
<b>CAPÍTULO 3 MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>19</b>
ANTECEDENTES DE LAS METODOLOGÍAS DE DISEÑO .....	19
LA TAXONOMÍA DE PROBLEMAS SEGÚN ULRICH, (ULRICH, 2005).....	21
<i>Descripción de los tipos de problemas según Ulrich</i> .....	23
LÍNEA DE TIEMPO DE LAS METODOLOGÍAS DE DISEÑO.....	25

---

RESUMEN DE LAS METODOLOGÍAS HISTÓRICAS MÁS IMPORTANTES .....	28
<i>Agile Design (Beck, y otros, 2001)</i> .....	28
<i>Bürdek (Bürdek, 2005)</i> .....	29
<i>Cross (Cross, Engineering Design Methods, 2008)</i> .....	30
<i>Design Thinking (Cross, 2011)</i> .....	31
<i>Dixon (Dixon, 1989)</i> .....	32
<i>Hubka y Eder (Hubka &amp; Eder, 1988)</i> .....	33
<i>Munari (Munari, 1983)</i> .....	36
<i>Total Design (Pugh, 1991)</i> .....	37
<i>USIT (Sickafus, 2001)</i> .....	38
<i>VDI 2221 (VDI, 1993)</i> .....	40
TENDENCIAS DE LAS METODOLOGÍAS DE DISEÑO MODERNAS .....	42
<i>Optimización topológica</i> .....	44
<i>Diseño generativo</i> .....	45
<i>Manufactura aditiva</i> .....	46
<i>Algoritmos de análisis y búsqueda</i> .....	49
LOS PROBLEMAS DE SELECCIÓN DE UNA METODOLOGÍA DE DISEÑO.....	51
<b>CAPÍTULO 4 SOLUCIÓN PROPUESTA E IMPLEMENTACIÓN .....</b>	<b>54</b>
RESULTADO DEL ANÁLISIS DE LAS METODOLOGÍAS DE DISEÑO HISTÓRICAS .....	55
PROPUESTA DE SOLUCIÓN PARA UNA METODOLOGÍA DE DISEÑO GENERATIVO .....	59
DESCRIPCIÓN DE LAS FASES PROPUESTAS DE LA METODOLOGÍA DE DISEÑO GENERATIVO .....	61
<i>Análisis de la situación e identificación de necesidades</i> .....	61
<i>Definición del problema y subcomponentes</i> .....	63
<i>Formulación de condiciones iniciales y restricciones</i> .....	65
<i>Construcción del modelo por algoritmos</i> .....	66
<i>Simulación y pruebas de verificación del modelo</i> .....	88

---

---

<i>Análisis de resultados y selección de alternativas</i> .....	89
<i>Análisis de costo / beneficio</i> .....	93
<i>Documentación y aprobación</i> .....	94
<i>Arranque de la producción</i> .....	95
<b>CAPÍTULO 5 RESULTADOS, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN</b> .....	<b>97</b>
<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>102</b>
<b>SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS</b> .....	<b>103</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>104</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>112</b>
<b>ANEXO A DESARROLLO TÉCNICO DE LA SOLUCIÓN</b> .....	<b>114</b>
ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN E IDENTIFICACIÓN DE NECESIDADES .....	114
DEFINICIÓN DEL PROBLEMA Y SUBCOMPONENTES.....	116
FORMULACIÓN DE CONDICIONES INICIALES Y RESTRICCIONES .....	118
CONSTRUCCIÓN DEL MODELO POR ALGORITMOS .....	121
ANÁLISIS DE RESULTADOS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS .....	129
ANÁLISIS DE COSTO / BENEFICIO.....	134
ARRANQUE DE LA PRODUCCIÓN .....	136
<i>Capas</i> .....	136
<i>Diámetro de la nariz de extrusión</i> .....	136
<i>Relleno</i> .....	136
<i>Temperatura de trabajo</i> .....	137
<i>Filamento</i> .....	137
<i>Velocidades de avance</i> .....	137
<i>Tiempo del proceso</i> .....	137
<b>ANEXO B DISEÑO Y ANÁLISIS DE EXPERIMENTO</b> .....	<b>138</b>
DISEÑO DEL ANÁLISIS DEL ELEMENTO FINITO .....	138

---

---

RESULTADO DEL ANÁLISIS DEL ELEMENTO FINITO .....	139
ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA) DE UN SOLO FACTOR.....	142
<i>Consideraciones para el experimento y planteamiento de la hipótesis estadística.....</i>	<i>143</i>
RESULTADO DEL EXPERIMENTO .....	144
INTERPRETACIÓN DEL RESULTADO.....	145
<b>ANEXO C FICHA TÉCNICA DEL FABRICANTE DE PLA.....</b>	<b>146</b>
<b>ANEXO D GLOSARIO DE TÉRMINOS.....</b>	<b>148</b>
ABS.....	148
AGENTE.....	148
AGENTE RACIONAL.....	148
ANISOTROPÍA.....	148
AUXINA.....	149
CAJA NEGRA.....	149
CAJA TRANSPARENTE.....	149
DISEÑO INDUSTRIAL.....	150
ESTRATEGIA.....	151
ESTRATEGIA DE DISEÑO.....	151
ELEMENTO FINITO MÉTODO DE ANÁLISIS POR,.....	151
LOGARITMO NATURAL.....	151
MÉTODO.....	152
MÉTODO DE DISEÑO.....	152
METODOLOGÍA.....	152
METODOLOGÍA CIENTÍFICA.....	152
METODOLOGÍA DE DISEÑO.....	153
PLA.....	153
PROBLEMA PERVERSO.....	153

---

---

PROCESO DE DISEÑO .....	153
PYME.....	154
VON MISES, ESFUERZO DE.....	154
WBS.....	154

---

## Índice de Tablas

Tabla 1. Detalle de los costos de transporte y tiempo de diseño/fabricación .....	10
Tabla 2. Comparativa de etapas entre metodologías de diseño seleccionadas .....	56
Tabla 3. Ejemplo de una matriz de relación .....	90
Tabla 4. Tabla para categorización de propiedades .....	91
Tabla 5. Tabla para identificar el desempeño de un modelo .....	92
Tabla 6. Comparativa de costos entre tres procesos diferentes de fabricación para el mismo adaptador.....	100
Tabla 7. Comparativa de tiempos de fabricación entre tres procesos diferentes de fabricación. ....	101
Tabla 8. Desglose de las propiedades y sus magnitudes correspondientes .....	118
Tabla 9. Matriz de relación entre las propiedades requeridas del adaptador.....	129
Tabla 10. Suma de ponderación y priorización de las propiedades para el diseño .....	130
Tabla 11. Ponderación para identificar el desempeño de cuatro materiales.....	131
Tabla 12. Resultados de aplicar el análisis del elemento finito para tres materiales.....	134
Tabla 13. Parámetros iniciales utilizados para el análisis de elemento finito .....	139
Tabla 14. Análisis de elemento finito realizado en el segmento FD. ....	140
Tabla 15. Análisis de elemento finito realizado en el segmento CF. ....	141
Tabla 16. Resultados obtenidos al aplicar el análisis de elemento finito. ....	142
Tabla 17. Factor “Logaritmo” aplicado en .....	144

---

Tabla 18. Resultados del análisis de varianza. ....	144
Tabla 19. Resumen del modelo. ....	144

---

## Índice de figuras

Figura 1. Imagen del riel con la indicación de dónde se encuentra la entrada de aire .....	7
Figura 2. Vista isométrica y seccionada de la conexión del soplador con el riel .....	8
Figura 3. Imagen de la manguera y entrada del riel de aire que deberán conectarse entre sí.	9
Figura 4. Comparación de costos entre dos procesos de manufactura diferentes .....	13
Figura 5. Fases que la compañía SK requiere llevar a cabo para crear el adaptador .....	15
Figura 6. Pasos de la metodología usada para solucionar el presente trabajo .....	16
Figura 7. Representación gráfica de la taxonomía de problemas según Ulrich .....	22
Figura 8. Línea de tiempo de metodologías de diseño y conceptos fundacionales .....	27
Figura 9. Representación gráfica de la metodología Agile Design .....	29
Figura 10. Representación gráfica de la metodología de Bürdek.....	30
Figura 11. Representación gráfica de la metodología de Cross .....	31
Figura 12. Representación gráfica de la metodología Design Thinking .....	32
Figura 13. Representación gráfica de la metodología de Dixon.....	33
Figura 14. Representación gráfica de la metodología de Hubka y Eder con las cuatro fases que interactúan entre sí .....	35
Figura 15. Representación gráfica de la metodología de Munari.....	36
Figura 16. Representación gráfica de la metodología Total Design.....	38
Figura 17. Representación gráfica de la metodología USIT .....	39
Figura 18. Representación gráfica de la metodología VDI 2221 .....	41

---

Figura 19. Representación gráfica de la metodología de MMPD, la iteración entre las fases no se presenta en la figura aun cuando existe entre ellas. ....	44
Figura 20. Diferencia entre un diseño tradicional (izquierda) y un diseño generativo (derecha). ....	46
Figura 21. Comparación gráfica de un proceso de manufactura por arranque de viruta (A), respecto a la manufactura aditiva (B) .....	47
Figura 22. Diferencia entre un bloque de válvulas maquinado por procesos de arranque de viruta y un bloque hecho por manufactura aditiva .....	48
Figura 23. Esquema de un agente basado en objetivos .....	50
Figura 24. Esquema general de un árbol de búsqueda .....	51
Figura 25. Pasos típicamente encontrados en una metodología de diseño .....	56
Figura 26. Representación gráfica de la tendencia en el uso del modelado y simulación durante el desarrollo del producto .....	58
Figura 27. Representación gráfica de la metodología de diseño generativo propuesta.....	60
Figura 28. Representación gráfica de la metodología Six Thinking Hats .....	61
Figura 29. Representación gráfica del modelo de doble diamante del diseño .....	62
Figura 30. Representación gráfica del proceso de diseño del producto y proceso, pasando por las pruebas de funcionalidad .....	64
Figura 31. Esquema de pasos para desarrollar la construcción del modelo .....	67
Figura 32. Ejemplo de localización tridimensional de los puntos de contacto y restricciones conocidas por el diseñador.....	68
Figura 33. Ejemplo de proyección de los ejes transversales en el plano .....	69

---

Figura 34. Los ejes de las generatrices se proyectan para encontrarse a medio camino, pero la restricción provocará una desviación de la trayectoria .....	70
Figura 35. Ejemplo de una trayectoria curva en el espacio entre los puntos P1 y P2. La curvatura evita interferir con la restricción R1 .....	72
Figura 36. Diagrama de flujo del algoritmo de construcción propuesto para la trayectoria.	74
Figura 37. Pseudocódigo para el proceso de construcción de una trayectoria con base a dos puntos y una posible restricción .....	76
Figura 38. Pseudocódigo para el proceso de suavizado de Savitzky–Golay (1964) sobre una trayectoria .....	77
Figura 39. Comparativa entre dos curvas, la de la derecha como resultado del suavizado de la curva izquierda.....	77
Figura 40. Proyección en un plano del adaptador donde se señala el área potencial de diseño y los puntos de contacto con las trayectorias también potenciales .....	79
Figura 41. Diagrama de flujo del algoritmo de construcción propuesto para la generatriz..	81
Figura 42. Pseudocódigo para la determinación de la curva generatriz sobre una trayectoria .....	83
Figura 43. Proyección en un plano del adaptador con la carga $F_p$ en uno de sus extremos.	84
Figura 44. Trayectoria formada por segmentos no colineales .....	86
Figura 45. Construcción de diámetro interno a través de trasladar el diámetro externo .....	88
Figura 46. Representación gráfica de la etapa de simulación y verificación.....	89
Figura 47. Indicación de los elementos mínimos requeridos para arrancar la producción de un producto .....	96

---

Figura 48. Corte transversal de dos diseños de adaptadores, ambos con la misma funcionalidad. ....	98
Figura 49. Comparación de resistencia mecánica entre dos diseños .....	98
Figura 50. Comparación de costos entre dos procesos de manufactura diferentes .....	100
Figura 51. Gráfica de la distribución muestral de fuerza ejercida por alumnos .....	115
Figura 52. WBS de la situación actual del problema con sus componentes .....	116
Figura 53. Representación gráfica de la interrelación existente entre las propiedades requeridas para el adaptador .....	117
Figura 54. Conector tipo espiga utilizado para la conexión de mangueras de 10mm .....	119
Figura 55. Vista tridimensional y corte longitudinal de la misma, del extremo del adaptador que será conectado a la manguera de 10 mm .....	120
Figura 56. Vista tridimensional y corte longitudinal de la misma, del extremo del adaptador que será conectado a la entrada del riel de aire .....	120
Figura 57. Vista del corte longitudinal de ambos extremos del adaptador alineados sobre el mismo eje. La longitud L1 max, es una restricción dentro del modelo .....	121
Figura 58. Proyección en un plano del adaptador donde se señala el área potencial de diseño y los puntos de contacto con las trayectorias también potenciales .....	121
Figura 59. Proyección en un plano del adaptador con la carga $F_p$ en uno de sus extremos .....	122
Figura 60. Grafica ejemplo del ajuste matemático de una curva para unir dos trayectorias .....	123
Figura 61. Representación gráfica de la búsqueda realizada por el algoritmo .....	124

---

Figura 62. Representación del corte transversal del adaptador, con las variables tomadas para el cálculo del diámetro interno.....	125
Figura 63. Representación del corte transversal del adaptador con el ajuste de las esquinas y ángulo del diámetro interior.....	127
Figura 64. Representación del adaptador en posición vertical, como será impreso .....	128
Figura 65. Comparativa de costos de producción y el desempeño de los materiales seleccionados .....	135
Figura 66. Proyección en un plano del adaptador, con los segmentos a evaluar y con la carga $F_p$ en uno de sus extremos .....	138
Figura 67. Gráfica de intervalos de respuesta para los tratamientos $Ln(-)$ y $Ln(+)$ junto con los valores testigos (sin $Ln$ ). .....	145
Figura 68. Representación gráfica de la caja negra, en ella el proceso de diseño es desconocido .....	149
Figura 69. Representación gráfica de la caja transparente donde existe un proceso secuencial lógico y claro.....	150



## Introducción

El desarrollo del hombre ha estado siempre unido a los objetos (Salinas, 1992), por lo tanto, el establecimiento de las ciencias duras y las ingenierías, son en parte el resultado de querer explicar dichos objetos, así como su estructura, interrelaciones y fenómenos que acontecen alrededor de estos.

Desde Olea y González Lobo (1977), no existe en México un planteamiento actualizado para una metodología de diseño, acorde a las nuevas tecnologías de información y fabricación, que dirijan los esfuerzos de creación de un producto en el área de la ingeniería industrial.

Tampoco existe en México una metodología que integre las áreas de ingeniería industrial con la ingeniería de software, a través de utilizar algoritmos matemáticos, para colaborar con la construcción y optimización de diseños mecánicos de manera autónoma.

De igual forma, a nivel mundial, no existe literatura suficiente o una herramienta informática completa que proponga la construcción generativa de un modelo desde cero, y sin un dominio de referencia, para posteriormente optimizar la topología obtenida, por medio de algoritmos matemáticos. Los trabajos existentes, como la patente obtenida por Krishnapilai (EUA Patente n° US2007/0078634A, 2007), y el módulo 3DXpert del programa Solidworks, perteneciente a la compañía 3D Systems® (2019), enfocan sus esfuerzos solamente en optimizar topología de diseños existentes.

Hasta el momento, solo el proyecto *Dreamcatcher* de la compañía Autodesk® (2019), ha logrado realmente proponer la construcción generativa sin dominios de referencia, a través de la utilización del módulo de diseño generativo perteneciente a su programa FUSION 360® (2019), sin embargo, no deja de ser solo una herramienta informática carente de un procedimiento metodológico completo para el diseño y fabricación del producto.

Ante este escenario, el presente trabajo aporta un avance relevante a las áreas de ingeniería industrial e ingeniería de software, al proponer una metodología de diseño innovadora, con un eje central basado en la tecnología de fabricación por manufactura aditiva, al mismo tiempo que se proponen métodos de construcción y optimización topológica usando algoritmos generativos asistidos por computadora.

Lo anterior podrá tener como efecto secundario la generación de propiedad intelectual en nuestro país, sentando las bases para contar con lineamientos o estándares nacionales que guíen un proceso de diseño generativo.

Para lograr lo anterior, se establece el siguiente objetivo general para el presente trabajo, junto con sus correspondientes objetivos específicos.

### **Objetivo general**

- Determinar una metodología que apoye a la creación, por medio del diseño generativo, de un modelo de adaptador basado en sólido de revolución, usando técnicas de manufactura más eficientes con respecto a las tradicionales.

### **Objetivos específicos**

- Determinar, a través de la investigación de las metodologías de diseño más importantes, una metodología moderna y adecuada para dar solución al problema.
- Obtener y priorizar las propiedades y magnitudes físicas que el diseño requiere cumplir.
- Desarrollar y proponer algoritmos de programación para el proceso de construcción y optimización topológica, enfocados principalmente en el diseño generativo de un sólido de revolución.
- Aplicar la metodología propuesta y realizar el proceso de diseño para obtener un diseño óptimo del adaptador.
- Definir el material de fabricación y condiciones del proceso, que se utilizará para la manufactura del adaptador.

### **Descripción del contenido del presente trabajo**

En el presente trabajo, a través del Capítulo 1, se describe un problema de diseño para la compañía LD en Alemania y su representante SK en México, en donde necesitan crear un nuevo producto y definir el correspondiente proceso de fabricación al menor costo y tiempo posible. Este problema requiere de establecer primero una metodología de trabajo, con un proceso estructurado de solución de problemas, para reducir el tiempo de planeación y ejecución con respecto a un proceso puramente intuitivo.

En el Capítulo 2 se realiza un diagnóstico de la situación, donde se describen los dos problemas identificados, uno referente al diseño del producto y otro referente a la selección

de la metodología que se utilizará. En este capítulo también se plantea la hipótesis sobre la cual estará guiado el desarrollo del presente trabajo.

En el Capítulo 3 se analizan los diferentes tipos de problemas y metodologías históricas de diseño y cómo cada metodología aportó conceptos importantes y aproximaciones diferentes al proceso de diseño, hasta llegar a la modernidad, donde el uso de herramientas informáticas, hacen más eficiente el diseño y verificación tanto del producto, como su proceso correspondiente de manufactura.

En el Capítulo 4 se hace una propuesta, paso por paso, para desarrollar una metodología de diseño generativa, y se desglosan las actividades dentro de cada paso junto con la postulación de algoritmos de construcción y optimización. Dicha metodología se especializa en la solución de los problemas de diseño en los cuerpos de revolución.

En el Capítulo 5 se exponen los resultados del diseño del modelo y se realiza una comparación con un método tradicional de fabricación, como lo es el proceso de manufactura por arranque de viruta. Se explican los beneficios de adoptar la manufactura aditiva para la fabricación del diseño y se hace una comparativa de tiempos y costos de producción.

Las conclusiones confirman la viabilidad de una metodología de diseño generativo para la construcción, optimización y verificación del modelo que, junto con el uso de la manufactura aditiva, permiten una solución innovadora y costo-efectiva contra las metodologías de diseño tradicionales.

Finalmente, en las sugerencias para trabajos futuros, se deja abierta la puerta para continuar con el desarrollo de la metodología, en especial, con los algoritmos de

Metodología de diseño generativo para creación de un sólido de revolución  
construcción generativa, los cuales pueden ser complementados con técnicas existentes de  
solución de problemas de ingeniería en conjunto con métodos de manufactura aditiva.

---

## **Capítulo 1**

### **Antecedentes**

LD es una compañía con más de 150 años de antigüedad, que fabrica equipo para experimentación científica y tecnológica. La oficina matriz está localizada en la ciudad de Colonia, Alemania, y cuenta con una planta de fabricación metalmecánica en la ciudad de Urbach, en el este de Alemania.

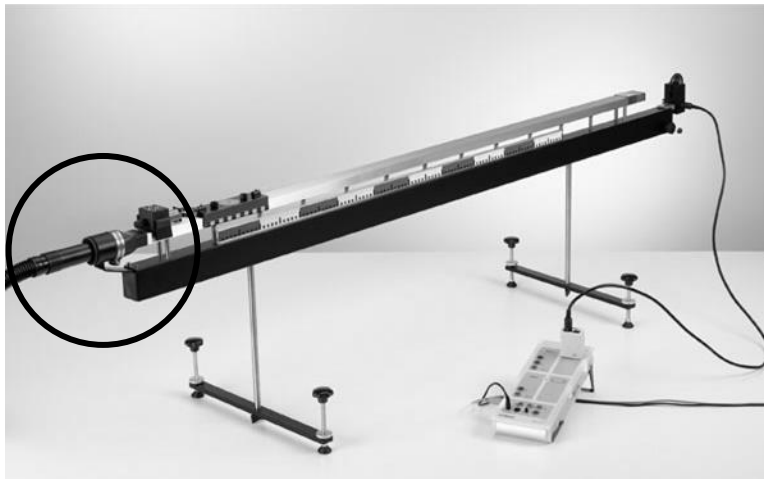
Los equipos que fabrica LD, están hechos para recrear y demostrar las leyes elementales de la Física en un ambiente controlado. Su uso está destinado mayormente al adiestramiento de alumnos en escuelas de educación media superior y superior.

LD tiene una alianza comercial en México con la compañía SK, la cual se encarga de transportar los equipos desde Alemania, instalarlos y brindar la capacitación correspondiente.

Uno de los productos más reconocidos de la compañía LD es el riel de aire de baja fricción, con el cual se llevan a cabo experimentos para demostración de las leyes de Newton. El equipo se compone de un riel de aluminio extruido con una cámara de aire y perforaciones alineadas longitudinalmente que expulsan el aire hacia arriba y crean una contra fuerza a la gravedad. Esta “cama” de aire a lo largo del riel, permite que se desplacen un par de carros de aluminio con muy poca fricción, por lo tanto, se pueden llevar a cabo colisiones entre los carros y toma de mediciones del tiempo y distancia recorrida, sin que la fricción afecte de manera significativa los resultados.

Para que el riel de aire pueda operar, es necesario conectarlo a una fuente de aire que proporciona aire con suficiente presión y caudal para elevar los carros de baja fricción.

En la Figura 1 se puede observar riel y la zona de conexión con la fuente de aire, señalada dentro de un círculo. Esta conexión se realiza a través de una manguera de 25mm y es la forma actual con la que se comercializa el equipo.



**Figura 1. Imagen del riel con la indicación de donde se encuentra la entrada de aire**

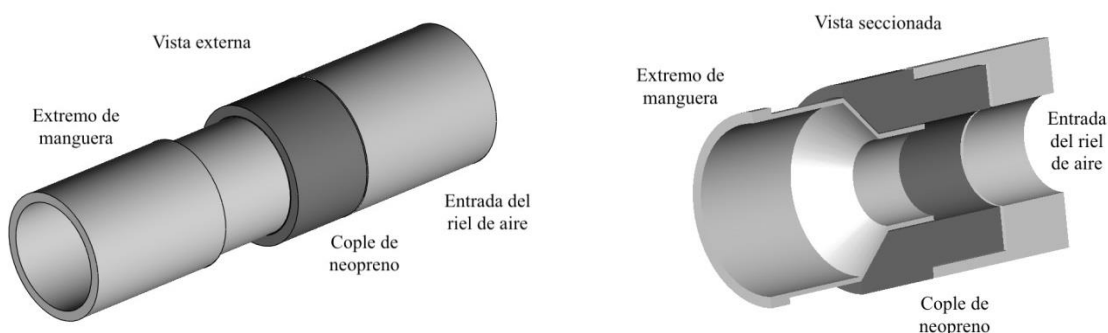
Fuente: Leybold®, recuperado de <https://www.leybold-shop.com/physics/physics-equipment/mechanics>

El soplador suministra el aire al riel a través de una manguera flexible de 25mm de diámetro y 1.2m de longitud. La manguera cuenta con un par de secciones de plástico rígido a los extremos, dichas secciones sirven para manipular la manguera y conectarla a la fuente de poder o el riel. Por hacer una analogía, dicha manguera es muy similar a la utilizada en aspiradoras domésticas.

Una de las terminales de la manguera se debe conectar a la fuente de aire y otra al riel. El riel de aire cuenta con una conexión hembra de neopreno, de 23mm de diámetro interno, que permite el acoplamiento mecánico de la manguera, a través de una

interferencia mecánica entre ambos componentes. La elasticidad del neopreno ayuda a mantener la conexión mecánica por medio de fricción, y mantiene un sello hermético en las juntas para evitar la salida del aire.

En la Figura 2 se puede visualizar de lado izquierdo el acoplamiento de neopreno, cuya función es realizar el sello hermético entre la manguera del soplador y el riel de aire. En la vista seccionada de lado derecho, se puede observar la reducción del diámetro interno del tubo que ayuda a elevar la presión de entrada al riel de aire.



**Figura 2. Vista isométrica y seccionada de la conexión del soplador con el riel**  
Fuente: Elaboración propia.

La compañía LD suministra en conjunto el riel de aire y el soplador, esto debido a que, en muchos laboratorios de física, el suministro de aire comprimido es inexistente, o carece de la presión y flujo mínimo necesario para alimentar el experimento.

Sin embargo, uno de los clientes de LD está próximo a inaugurar 4 nuevos laboratorios de física, por lo que adquirió 32 rieles de aire sin soplador y desea conectar los rieles a un suministro de aire instalado en sus propias mesas de laboratorio. El suministro de aire del laboratorio está compuesto por una espiga de 10 mm de diámetro a la cual se conectará una manguera plástica de 1 m de largo y 10 mm de diámetro. Esta espiga y la

manguera son muy similares a las utilizadas en los suministros de aire comprimido de tipo industrial.

La manguera que el cliente dispone deberá conectarse con la entrada del riel de aire, por lo que el diámetro de 10 mm de la manguera deberá, por vías de un adaptador, crecer a 25 mm.

En la Figura 3 se muestra de lado izquierdo una manguera de 10mm de diámetro y de lado derecho la entrada del riel de 25 mm de diámetro. Se puede ver a simple vista el problema que representa el acoplar ambas formas.



**Figura 3. Imagen de la manguera y entrada del riel de aire que deberán conectarse entre sí**  
Fuente: Elaboración propia.

El adaptador no es un componente comercial hecho por LD y tampoco es un elemento que pueda encontrarse en el mercado a través de un distribuidor. Se trata de un componente hecho a medida para un cliente específico, y aunque la cantidad de adaptadores es pequeña, la importancia del cliente es suficiente como para comprometer a LD y su representante SK en México a ofrecer una solución.

Por lo tanto, el problema se planteó como el diseño y construcción de 32 adaptadores hechos a medida específica del cliente. Sin embargo, este problema

aparentemente sencillo de diseño acarreó problemas secundarios en el camino, problemas llamados de optimización. Estos subproblemas se generan cuando se requiere optimizar los costos de fabricación, el tiempo de entrega o las condiciones ergonómicas de manejo, por dar un ejemplo.

Una de las primeras decisiones tomadas fue la de confirmar si el proceso de diseño se realizaba en México o Alemania. Más allá de las necesidades técnicas, el primer inconveniente que se identificó fue el costo y tiempo que representaba el transporte entre ambos países.

En la tabla 1 se desglosan los factores que tienen impacto sobre el costo y tiempo de entrega del producto. Se puede observar que México tiene una clara ventaja en tiempo y costo cuando se le compara con cualquiera de las dos opciones existentes de transporte desde Alemania.

**Tabla 1. Detalle de los costos de transporte y tiempo de diseño/fabricación**

Actividad	Diseño en México y transporte terrestre dentro de México		Diseño en Alemania y transporte Aéreo desde Alemania		Diseño en Alemania y transporte Marítimo desde Alemania	
	Tiempo (días)	Costo (euros)	Tiempo (días)	Costo (euros)	Tiempo (días)	Costo (euros)
Diseño y fabricación	30		30		30	
Transporte internacional			3	€ 25	25	€ 5
Importación			1	€ 1.22	2	€ 1.22
Transporte nacional al cliente	1	€ 5	1	€ 5	1	€ 5
Total por pieza		€ 5		€ 28.22		€ 11.22
Total del proyecto	31	€ 160	35	€ 903.04	58	€ 359.04

Debido a que la capacidad técnica, los recursos y herramientas disponibles en ambos países son similares, la decisión final de las empresas LD y SK fue de realizar el adaptador en México debido a los evidentes ahorros de tiempo y costo.

Por lo tanto, el primer paso que la empresa SK tomó fue buscar y establecer una metodología de diseño, que ayudara con la solución del problema en México, y sirviera de referencia para posibles futuras situaciones similares.

Como Griffing (1997) mencionó: “la utilización de un proceso estructurado de resolución de problemas ayuda a completar problemas complejos en un tiempo más corto respecto aquellos procesos vagamente estructurados”. Es por lo anterior que la metodología debería de ajustarse también a la capacidad técnica existente de la empresa y considerar su capacidad actual para el diseño y fabricación de un nuevo producto.

---

## Capítulo 2

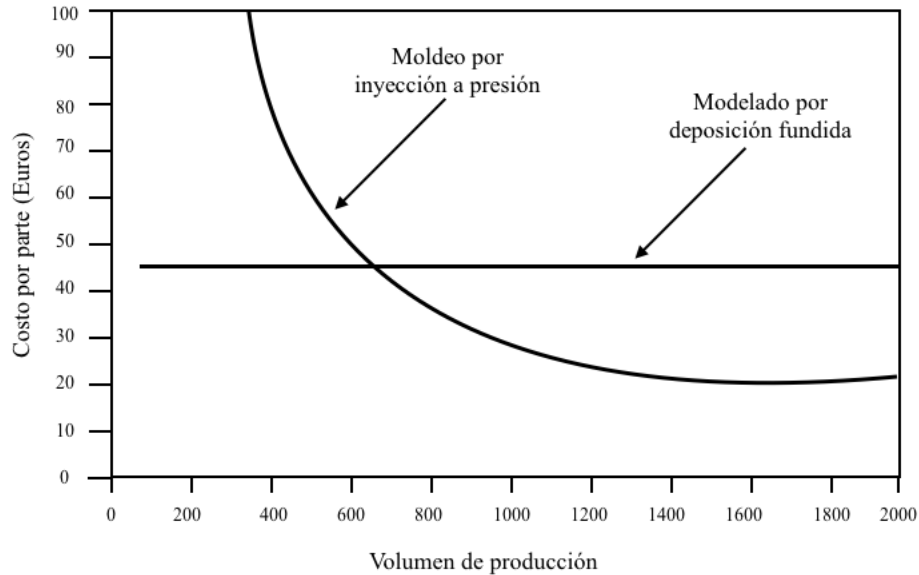
### Diagnóstico de la situación

Como afirma de manera acertada Archer (1967), “los problemas de diseño surgen de una necesidad”. En este caso, la necesidad de contar con un adaptador para acoplar una manguera existente a un riel de aire genera el problema principal. Sin embargo, existe un nivel más profundo relacionado con necesidad de contar con una metodología de diseño que permita guiar y estructurar el proceso de diseño y construcción.

#### Descripción de la realidad problemática

En nuestra actualidad, el costo de lanzar un producto al mercado por medio del uso de la manufactura tradicional es prohibitivo para muchas compañías pequeñas ya que, independientemente de la inversión en el capital de trabajo, los costos para producir un molde o herramientas de trabajo y posteriormente poner a punto las herramientas y métodos de producción, son muy altos en lotes pequeños de piezas cuando se trata de manufactura por arranque de viruta y moldeo por inyección a presión.

Al respecto del moldeo por inyección a presión, en la figura 4, podemos apreciar según el estudio de Hopkinson y Dickens (2003) que, para lotes de producción menores a 660 piezas, el proceso de moldeo por inyección a presión no es un proceso económicamente viable respecto a procesos modernos como lo es la manufactura aditiva, específicamente, el modelado por deposición fundida.



**Figura 4. Comparación de costos entre dos procesos de manufactura diferentes**

Fuente: Elaboración propia en base a Hopkinson & Dickens (2003). Analysis of rapid manufacturing using layer manufacturing processes for production Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 217 (C1) (pág.38). Professional Engineering Publishing.

Para el caso de la manufactura por arranque de viruta, los costos de fabricación recaen en la materia prima, esto debido a la gran cantidad de desperdicio que existe durante el proceso de crear la pieza. Por lo tanto, aunque es factible fabricar lotes pequeños, el costo de producción sigue siendo alto.

Trabajar en una metodología de diseño basada en métodos de producción tradicionales, es una decisión poco adecuada en términos de costo, e inclusive, se corre el riesgo de trabajar en tecnologías y métodos que tienden a desaparecer. Como lo menciona el Instituto de Investigación Industrial, existe un escenario donde “la manufactura tradicional colapsará debajo de la presión de la impresión 3D” (Industrial Research Institute, 2015). Este colapso se podría relacionar con los bajos costos de producción, mayor velocidad para colocar un producto en el mercado y la facilidad para producir productos con geometrías complejas.

La capacidad técnica de la compañía SK es limitada. No cuenta propiamente con un departamento de ingeniería ni grandes capacidades de producción. No puede, por lo tanto, invertir un gran recurso en el desarrollo y producción del producto, ni tampoco esperar largos meses a tener un producto final para su cliente.

SK tampoco puede basar la solución en una metodología compleja y fuera de su alcance técnico. Utilizar una metodología centrada en un proceso de fabricación tradicional, también puede provocar que los métodos y recursos utilizados por la compañía se vuelvan obsoletos a mediano plazo, debido a la penetración cada vez más fuerte de nuevas tecnologías de producción.

### **Descripción del problema general**

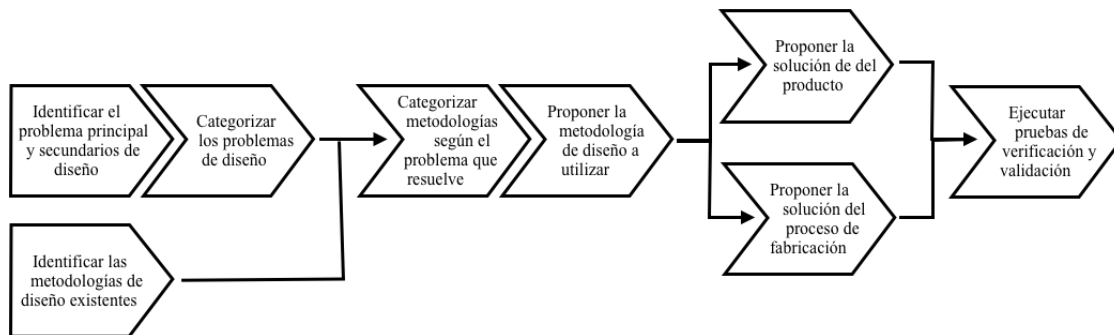
Para la compañía SK, contar con una metodología de diseño adecuada, evitaría en lo posible el uso innecesario de recursos técnicos y humanos dentro de la empresa, como Tyre, Eooinger y Csizinszky (1993) establecieron: “una aproximación sistemática a un problema, lleva a una solución más robusta y de mejor calidad en el mismo tiempo que llevaría realizarlo bajo una aproximación intuitiva”.

Por consecuencia, el problema general que da pie a este trabajo nace del siguiente cuestionamiento:

- ¿Qué metodología permitirá diseñar y fabricar un adaptador, y en general, cualquier sólido de revolución, de una manera óptima y a un costo moderado?

## Descripción de los problemas específicos

En la figura 5 se representa, de manera general, los pasos que la compañía SK requiere seguir para encontrar una metodología de diseño y aplicar la metodología para la creación del adaptador.



**Figura 5. Fases que la compañía SK requiere llevar a cabo para crear el adaptador**

Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, es necesario a lo largo de todas las fases, buscar la respuesta a los siguientes problemas específicos:

- ¿A qué tipo de problema de diseño se enfrenta la compañía SK?
- ¿Qué metodologías de diseño existen para solucionar su problema de diseño?
- ¿Cuál o cuáles metodologías son óptimas para procesos modernos de manufactura con intervención de las herramientas informáticas para simulación de modelos?
- ¿Cuáles serán los pasos que deberán integrar una metodología de diseño para diseñar un modelo?
- ¿Qué componentes matemáticos y de programación (algoritmos), deberá considerar la construcción y optimización de un modelo?

- ¿Cuáles serán las propiedades que el diseño requiere cumplir, de qué forma se debe aplicar la metodología, y cuál será el modelo resultante del diseño?

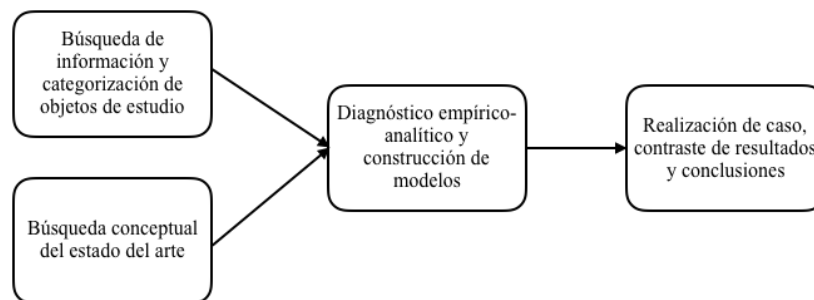
### Descripción del método de diagnóstico

Con el fin de obtener un diagnóstico acertado de los problemas enunciados, se recurrirá a una búsqueda sistematizada de información histórica y la categorización de los objetos de estudio con el fin de encontrar interrelaciones entre ellos. De igual forma se realizará una búsqueda conceptual del estado del arte y se consultará los trabajos al respecto que existen en últimas fechas.

Posteriormente se realizará un diagnóstico empírico-analítico, basado en información histórica recopilada, con el fin de construir una propuesta de solución basada en modelos matemáticos existentes y modelos propios propuestos.

Finalmente, se realizará un caso de estudio, para contrastar y complementar los resultados contra los métodos de fabricación existente, con el fin de encontrar una solución y emitir las conclusiones.

Los anteriores pasos se representan de manera gráfica en la figura 6.



**Figura 6. Pasos de la metodología usada para solucionar el presente trabajo**

Fuente: Elaboración propia.

La solución se tendrá cuando se pueda obtener una representación gráfica de la metodología de diseño generativo, y la descripción de las etapas que la integran, junto con el desarrollo de los algoritmos que deberán utilizarse para construir un sólido de revolución. La metodología de diseño deberá contener por fuerza una etapa de análisis de costo/beneficio, con el fin de optimizar el diseño final.

Por lo tanto, las métricas que nos ayudarán a reconocer si se ha llegado a una solución óptima son las siguientes:

- Diagrama de representación de las fases que componen la metodología de diseño generativo propuesta.
- Descripción de cada una de las fases que componen la metodología de diseño.
- Diagrama de flujo que describan los algoritmos de diseño generativo para construcción de un sólido de revolución.
- Descripción matemática de los modelos usados en los algoritmos.
- Obtención del diseño del adaptador, a través de ejecutar la metodología propuesta.

### **Planteamiento de la hipótesis**

Una vez encontrada una metodología de diseño óptima, se deberá resolver el problema de crear el modelo de adaptador. Este acomodo de los dos problemas ayudará a ir de más a menos en la complejidad del diseño. La intención es encontrar el punto que Rodríguez (1983) identifica como un problema con estado inicial bien definido y estado terminal bien definido, es entonces, que en la definición del problema se encuentra el principio de la solución. En este orden de ideas, se plantea la siguiente hipótesis:

- Los tiempos y costos de fabricación involucrados en el diseño y construcción de un sólido de revolución se pueden reducir, con respecto a los métodos tradicionales de fabricación, al adoptar una metodología de diseño generativo, en conjunto con técnicas de simulación por computadora y manufactura aditiva, sin decremento de las propiedades especificadas para el diseño.

---

## Capítulo 3

### Marco teórico

Con el fin de tener una comprensión completa de las metodologías de diseño históricas, así como de los problemas de diseño que resuelven, también se explicarán las bases de los algoritmos de búsqueda y solución de problemas, y se abordarán las bases de la manufactura aditiva y el diseño generativo. El presente capítulo otorga una recopilación de información que será utilizada como referencia durante el resto de la investigación.

#### **Antecedentes de las metodologías de diseño**

Desde el inicio de los tiempos, las actividades homogéneas y organizadas, han permitido a la humanidad controlar mejor el entorno y sus variables, permitiendo obtener resultados similares en ciclos de trabajo repetitivos. De igual forma, los actos intuitivos de creatividad se fueron racionalizado y estructurando, a través de técnicas y métodos, con el fin de tener reproducibilidad en sus resultados.

En consecuencia, toda actividad transformadora que se puede replicar y controlar, es susceptible de optimizar por vía de retroalimentar en cada ciclo los efectos observados de dicha actividad. Es por esto que los métodos, las estrategias y metodologías, son tan valiosas cuando se integran a una actividad transformadora como es el caso del diseño.

Ante la cantidad de ideas creativas y evolución de los sistemas de fabricación, las metodologías de diseño otorgan estructura a un proceso con un origen empírico e intuitivo como solía ser el diseño. Es por esto que existe la necesidad de revisar las metodologías de

diseño más importantes, con el fin de identificar los pasos que se deberán tomar para emprender un diseño.

El uso de las metodologías de diseño tomó mucha importancia como tal, en los años 60 y 70, paralelamente con el auge de las computadoras. Esto se puede entender debido a que el lenguaje matemático de las últimas permitió la aplicación lógico-científica de los métodos, con el fin de optimizar las soluciones. Si se revisa a detalle las metodologías de diseño históricas, podremos encontrar como idea común la reducción de la complejidad de un problema de diseño.

Como menciona Bürdek (2005), “los encargos cada vez más amplios con los cuales el diseñador tenía que enfrentarse en los años sesenta, hicieron necesario el desarrollo de métodos para analizar toda la diversidad de parámetros de la tarea a realizar” por lo tanto, “los procedimientos racionalistas se adecuaban perfectamente a esta necesidad”.

Sin embargo, quedaba la interrogante que, Olea y González Lobo (1977), plantearon muy correctamente: “La pregunta que muchos se hacen es si puede establecerse un orden o estructurar metodológicamente, una guía para el diseñador en su tarea, toda vez que esta tarea es eminentemente creativa y se relaciona con procesos intuitivos”.

Para responder esta interrogante, es necesario recurrir a lo que Christopher Alexander, considerado para muchos como uno de los padres de la metodología de diseño, tenía previsto, una visión clara de por qué era necesario estructurar el proceso de diseño por medio de una metodología. Los puntos que Alexander señala son los siguientes:

a) Los problemas de diseño se han vuelto demasiado complejos como para tratarlos puramente de forma intuitiva.

b) La cantidad de información requerida para resolver los problemas de diseño ha incrementado tan rápidamente que un diseñador, trabajando solo, podría no conseguir toda la necesaria.

c) Los problemas de diseño emergen con un ritmo mayor a los anteriores, por lo que cada vez menos nuevos problemas pueden resolverse con ayuda de la práctica largamente establecida.

En resumen, la tecnificación e innovación en los procesos industriales, provocó la evolución de las metodologías de diseño hacia el método científico, como lo menciona Bürdek (2005): "...el diseño industrial tuvo que adaptarse a las condiciones cambiantes, es decir, no pudo seguir poniendo en práctica métodos creativos subjetivos y emocionales que procedían de la tradición del diseño artístico, en tanto que la industria empezó a racionalizar cada vez más el proyecto, la construcción y la producción. Por ello los diseñadores industriales se esforzaron obviamente en integrar métodos científicos en el proceso proyectual para poder ser aceptados por la industria como interlocutores serios".

Lo anterior quiere decir que las metodologías que han surgido a lo largo de los años han ido evolucionando en correspondencia con la aparición de nuevas técnicas de fabricación y herramientas informáticas.

### **La taxonomía de problemas según Ulrich, (Ulrich, 2005).**

Antes de revisar las metodologías históricas más importantes, es necesario primero entender los tipos de problemas que existen en el diseño, lo anterior debido a que la mitad de la solución de un problema es conocer el propio problema que se presenta.

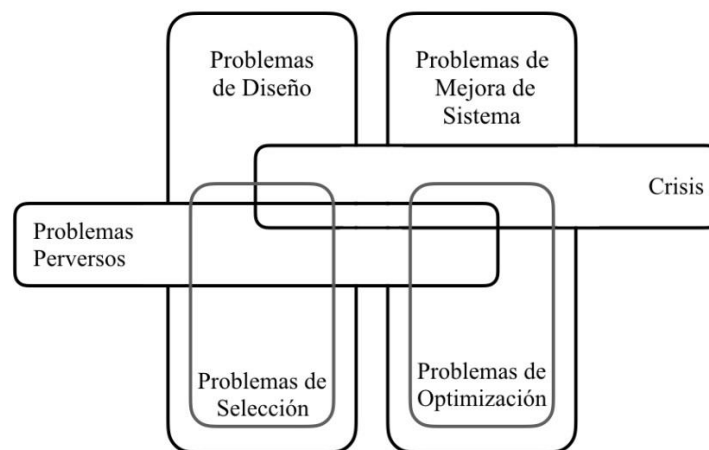
Cuando el diseñador encuentra cierta familiaridad con los atributos de un problema, le es más fácil encontrar una solución óptima al mismo. Es por esto que categorizar un

problema de diseño en base a sus atributos, puede ayudar a encontrar la metodología más adecuada para que nos lleve a la solución óptima.

Pero no se debe pasar por desapercibido que, si todas las metodologías de solución son igualmente adecuadas, entonces, no existe problema; de igual forma, si la metodología de solución más adecuada es obvia desde el principio, nuevamente, no existe problema (Krick, 1962).

La propuesta que realiza Karl T. Ulrich (2005), para clasificar los problemas de diseño de acuerdo a sus atributos, es una guía rápida para ubicar los problemas de acuerdo a sus atributos y permite inferir el tipo de metodología o metodologías que se pueden ocupar para su solución.

En la figura 7 se puede observar que la propuesta de Ulrich se divide en dos grandes grupos y los cuales se diferencian entre sí, por la existencia o ausencia de un producto o modelo final como solución de diseño. Ulrich les llama a estas dos categorías “problemas de diseño y problemas de mejora de sistema”. Las otras cuatro categorías se correlacionan dentro o través de estas dos grandes divisiones.



**Figura 7. Representación gráfica de la taxonomía de problemas según Ulrich**

Fuente: Karl T. Ulrich (2005). Design, Creation of Artifacts in Society (pág. 16). University of Pennsylvania.

## **Descripción de los tipos de problemas según Ulrich**

***Problemas de diseño:*** Se refiere a los problemas en los cuales el diseñador tiene un estado actual y un estado objetivo y debe diseñar una solución para llenar la diferencia entre los dos. Este tipo de problema puede incluir desde el diseño de modelos, hasta el diseño de nuevos procesos, software, negocios, servicios etc. e involucra siempre una fase de generación y selección de alternativas, donde la creatividad se debe hacer presente (Ulrich, 2005, pág. 16).

***Problemas de selección:*** Se refiere a aquellos en los que las alternativas de solución ya están especificadas y el diseñador debe elegir la que resuelva en mayor medida los inconvenientes que presenta el problema. Estos tipos de problemas exigen un gran tiempo de exploración y de definición de los requisitos que las alternativas de solución deben cumplir para poder ser elegidas. Un ejemplo es el proceso de compra de un software en el cual se cuenta con alternativas en el mercado y requerimos elegir la que está más acorde con las necesidades de la empresa (Ulrich, 2005, pág. 16).

***Problemas de mejoramiento de sistemas:*** Está relacionado con el mejoramiento de un sistema o proceso existente. Por ejemplo, tenemos los casos en los que los usuarios de un sitio web no están comprando los productos porque es muy complejo el proceso de compra. El diseñador debe encontrar la forma de que este proceso, que ya existe, sea más amigable para que los usuarios puedan realizar su compra más fácilmente y así incrementar las ventas (Ulrich, 2005, pág. 16).

***Problemas de optimización:*** Se refiere a los problemas en los cuales se debe encontrar la mezcla exacta de variables para cumplir un objetivo. Estos problemas

muchas veces se caracterizan por mejoras graduales mediante prueba y error. Un ejemplo puede ser la fabricación de un producto a un menor costo, el modelo de corte de un molde para minimizar el desperdicio, la reducción de tiempos de un proceso, etc. (Ulrich, 2005, pág. 17).

**Crisis:** Este tipo de problema se debe resolver en muy corto tiempo para minimizar impactos negativos. Puede ser cualquiera de los tipos de problemas anteriores, pero con el agravante de que cada minuto sin la solución, genera pérdidas importantes. Por ejemplo, una empresa con problemas económicos, una persona con una herida grave, un riesgo importante que se materializa en un proyecto, etc. (Ulrich, 2005, pág. 17).

**Problemas complejos o “perversos”:** Son aquellos problemas demasiado complicados como para encontrar una solución definitiva y que incluso definirlos es difícil. Como las crisis, este tipo de problemas puede ser cualquiera de los tipos anteriores. Las soluciones planteadas para estos problemas son generalmente temporales y buscan minimizar daños, pero no se les ve con facilidad una solución final. Ejemplos de estos problemas son la inseguridad, el terrorismo, daños ecológicos, enfermedades graves, etc. (Ulrich, 2005, pág. 17).

La taxonomía de Ulrich brinda una guía para la resolución de problemas de diseño ya que, al categorizarlos, se puede identificar las posibles causas del problema y, por lo tanto, las opciones viables de solución.

Una vez entendido los tipos de problema a los que un diseñador se puede enfrentar, y la fase de diseño donde pueden ser encontrados, es necesario recorrer las metodologías de

diseño históricas, para poder encontrar entre ellas las ventajas y desventajas más

importantes que nos permitan aplicarlas o no al problema de diseño que se presenta.

### **Línea de tiempo de las metodologías de diseño**

Para tener una idea clara de las metodologías de diseño a través del tiempo, su evolución y concatenación entre ellas, se propone la línea de tiempo de la Figura 8. En letras negritas se resaltan aquellos postulados importantes que sirvieron de referencia a futuras generaciones. Las viñetas negras señalan las metodologías de diseño que sobresalieron del resto al presentar un cambio de paradigma o sentar un estándar mundial.

Es necesario tomar en cuenta el tipo de corriente con la que la metodología se identifica: creativa o científica. Para fines prácticos se obviará el repaso de las metodologías de la corriente creativa ya que estas se centran en problemas del tipo sistémicos o de procesos de negocios, mientras que el problema que se presenta en este caso es de diseño de un producto.

Es por lo anterior que se revisará exclusivamente las metodologías de la corriente científica, con el fin de identificar aquellas cuyo procedimiento puede ayudar a encontrar la solución óptima.

En la línea de tiempo de la Figura 8, se podrá observar el momento donde fue creada la metodología y su autor. La línea de tiempo pretende resaltar solamente las metodologías más importantes a través de la historia, aquellas cuya propuesta ha sido ejemplo para otras o cuyos autores han establecido una referencia para cambios trascendentales en el diseño.

Se podrá observar en la línea de tiempo de la Figura 8, que en la parte superior se ubican las metodologías cuyo postulado se basa en un proceso creativo de solución de

problemas y donde se promueve el uso de herramientas intuitivas para el análisis de los mismos, mientras que, complementariamente en la parte inferior de la línea de tiempo, se encuentran aquellas metodologías que atacan el problema desde el método científico, racionalizando y comprobando las propuestas de solución.

Esta división de metodologías en corrientes de pensamiento no es totalmente rigurosa ya que existen metodologías basadas en la creatividad que tienen un origen científico o viceversa, inclusive, hay corrientes que comparten un origen común o utilizan métodos de otra corriente para complementar su postulado.

Lo que denota esta división entre metodologías, es el modo en que el diseñador interactúa con el proceso de diseño, así entonces, la corriente creativa confía en el diseñador para determinar los pasos a tomar hacia la solución, mientras que la corriente científica confía en los métodos como hilo conductor del diseñador hacia un proceso sistematizado de solución.

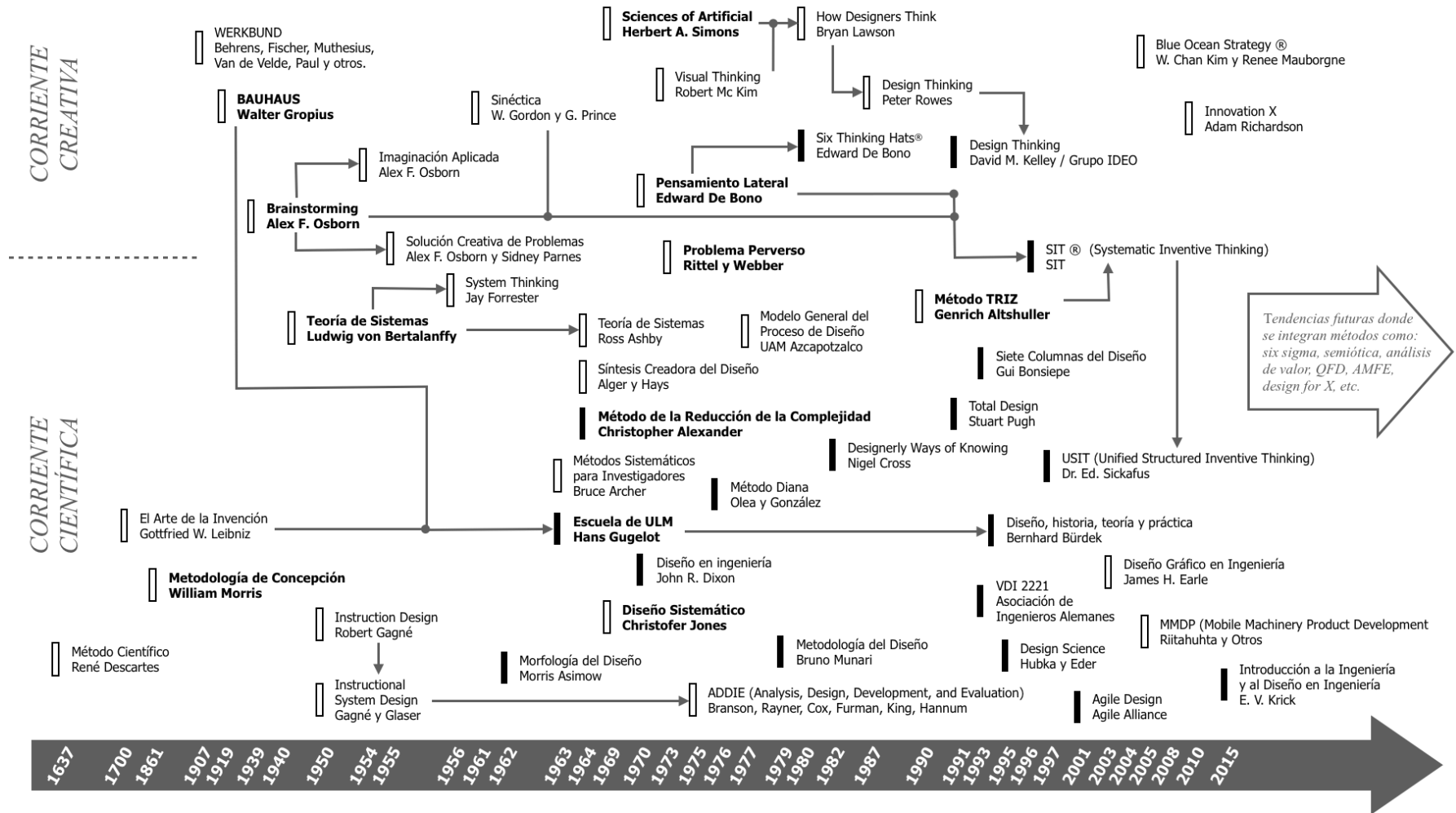


Figura 8. Línea de tiempo de metodologías de diseño y conceptos fundamentales

Fuente: Elaboración propia.

Otra particularidad que podemos observar en la línea de tiempo de la figura 8, es que durante la década de los años sesenta y setenta, existió un gran auge en la propuesta de metodologías de diseño, este fenómeno se debió a uso de las computadoras como herramientas de apoyo en el diseño. Las metodologías que aparecieron durante este periodo sirvieron como piedra fundacional y referencia para el desarrollo de metodologías modernas durante los años noventa y el los del dos mil.

### **Resumen de las metodologías históricas más importantes**

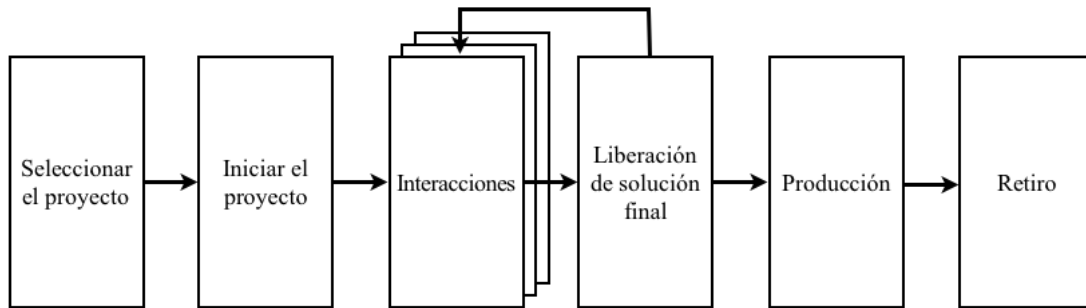
A continuación, se enlista las metodologías más populares a través de la historia, con el fin de conocer sus principios y las ventajas o desventajas de cada una de ellas. Este resumen permite tener una visión general de las metodologías y ayuda a categorizar su aplicación, según el tipo de problema que resuelve y la forma en que el diseñador se aproxima al proceso de solución.

#### **Agile Design (Beck, y otros, 2001).**

**Idea principal:** Es un método que ataca el problema en pequeños incrementos, donde la tarea inicial es suficiente para que el diseñador comience a trabajar en lapsos de tiempo de una y hasta cuatro semanas. El diseño puede estar vagamente definido al comienzo y se permiten múltiples interacciones en su construcción hasta obtener la versión para producción.

**Ventajas:** Fomenta el trabajo de equipo y por lo tanto la colaboración y comunicación. Los pequeños incrementos de tareas permiten una ágil adaptación al cambio, inclusive, cuando emergen nuevos requerimientos del problema o el entorno.

**Desventajas:** La metodología fue creada primordialmente para el desarrollo de software, aunque se ha podido adaptar a otros sistemas. La participación del cliente es necesaria dentro del equipo de trabajo para adaptar el diseño en cada interacción.



**Figura 9. Representación gráfica de la metodología Agile Design**

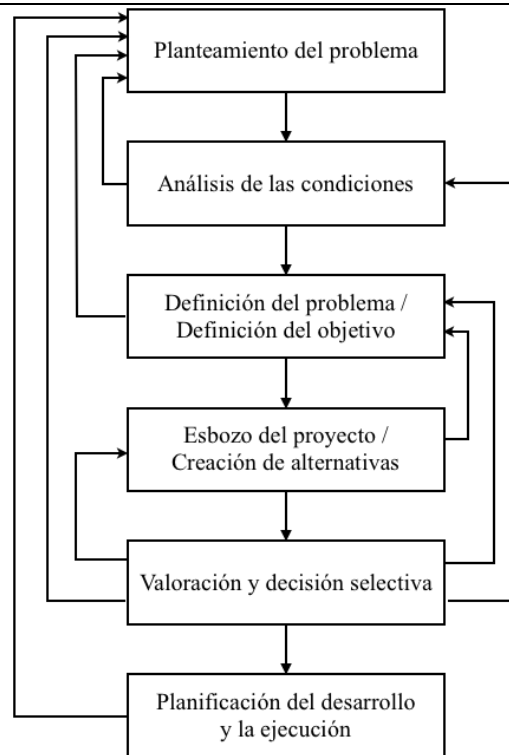
Fuente: Elaboración propia en base a [http://www.nwlink.com/~donclark/design/design\\_models.html](http://www.nwlink.com/~donclark/design/design_models.html)

**Bürdek (Bürdek, 2005).**

**Idea principal:** Es una metodología no-lineal en donde el diseñador tiene la libertad de moverse entre las etapas. En cada etapa se recurre a la verificación de la información y su propia retroalimentación.

**Ventajas:** Con esta metodología se sentaron los fundamentos para una visión científica del proceso de diseño, aplicando algunos aspectos del pensamiento de Leibniz.

**Desventajas:** Debido a la verificación de información en cada paso, el tiempo para llegar a una solución apropiada es largo.



**Figura 10. Representación gráfica de la metodología de Bürdek**

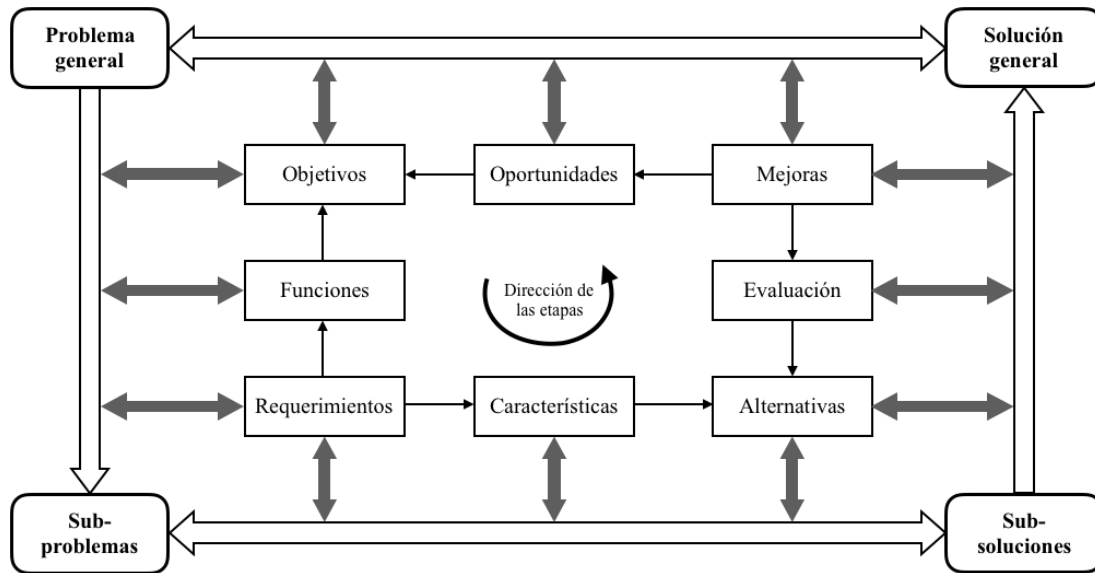
Fuente: Bernhard E. Bürdek (2002). Diseño, Historia, teoría y práctica del diseño industrial (pág. 161). Editorial Gustavo Gili.

### **Cross (Cross, Engineering Design Methods, 2008).**

**Idea principal:** Desglosa el problema principal en subproblemas para analizar cada uno por separado y proponer sub-soluciones siguiendo un método de ocho etapas: establecimiento de objetivos, funciones, requerimientos y características de los problemas, establecimiento, evaluación y mejora de alternativas, y la identificación de oportunidades adicionales relevantes a los problemas en cuestión. Al final, las sub-soluciones se sintetizan en una solución general.

**Ventajas:** Permite visualizar la complejidad del proceso cuando se desglosa el problema en pequeños problemas y facilita la solución al atacar las pequeñas soluciones.

**Desventajas:** El problema debe estar bien identificado para poder dividirlo y cubrir todas las soluciones, ya que, en caso de omitir un detalle, se omitirá una sub-solución y, en consecuencia, la síntesis de la solución general estará incompleta.



**Figura 11. Representación gráfica de la metodología de Cross**

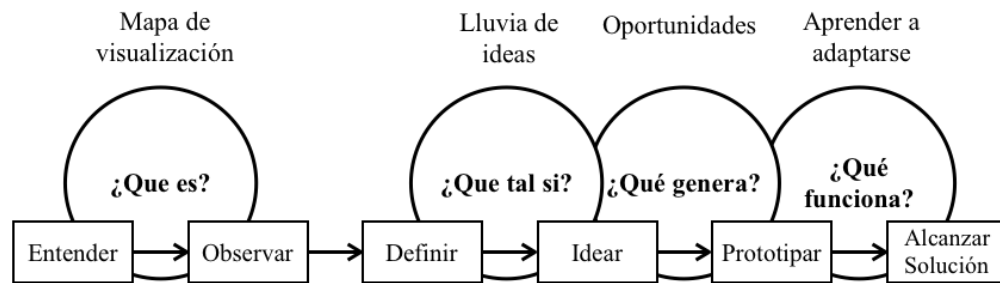
Fuente: Kevin Adams (2015). *Non-functional Requirements in Systems Analysis and Design* (pág. 28). Springer International Publishing.

### **Design Thinking (Cross, 2011).**

**Idea principal:** Utiliza la creatividad y el pensamiento divergente para visualizar y describir problemas complejos que pueden inclusive carecer de estructura, con el fin de entenderlos y proyectar una aproximación convergente hacia la solución.

**Ventajas:** A diferencia de un método científico, esta metodología toma en cuenta la relación del estado emocional del consumidor con respecto al problema. El pensamiento divergente y la interacción no secuencial de pasos producen resultados no esperados que pueden llegar a transformar un paradigma.

**Desventajas:** Esta metodología le da un gran peso a la experiencia del diseñador para construir una solución y requiere la retroalimentación del cliente en todo el proceso. Esta metodología es mayormente utilizada en procesos de negocio y temas sociales.



**Figura 12. Representación gráfica de la metodología Design Thinking**

Fuente: Elaboración propia en base a [http://www.nwlink.com/~donclark/design/design\\_models.html](http://www.nwlink.com/~donclark/design/design_models.html)

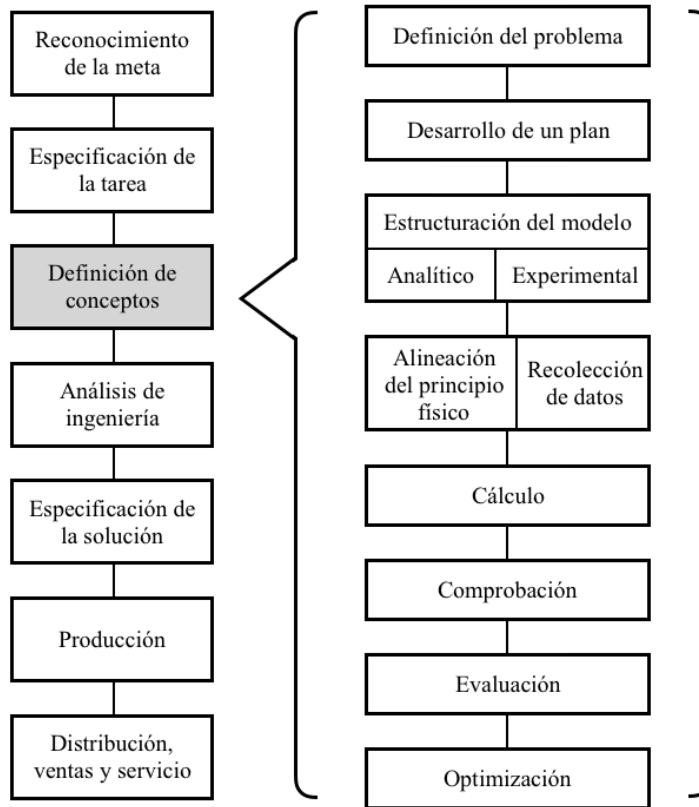
### **Dixon (Dixon, 1989).**

**Idea principal:** La metodología comienza con un análisis detallado del objetivo o meta general para detallar tareas más específicas que estén alineadas con dicha meta general. Posteriormente se recurre a la experiencia del diseñador para proponer una idea nueva o antigua de solución del problema, la cual, debe someterse a un análisis científico que permita construir un modelo para comprobar de manera numérica su viabilidad. Finalmente, el diseñador debe representar la solución en términos de producción.

**Ventajas:** La metodología de Dixon es muy útil en el rediseño u optimización de productos ya que usa la experiencia pasada del diseñador, con problemáticas pasadas de diseños existentes. Esto lo vuelve una tarea en cierto grado rutinaria que ayuda a agilizar la solución.

**Desventajas:** Requiere que el diseñador tenga una amplia experiencia y que los problemas de diseño sean similares entre sí. En caso de nuevos diseños, se requerirá una

gran dosis de imaginación e inventiva, cuyas habilidades pondrían en conflicto al diseñador acostumbrado a la repetitividad usada en problemas similares a diseños existentes.



**Figura 13. Representación gráfica de la metodología de Dixon**

Fuente: Elaboración propia en base a <http://www.ingenieria.unam.mx/~guiaindustrial/disenoinfo/3/6.htm>

### **Hubka y Eder (Hubka & Eder, 1988)**

**Idea principal:** La metodología consta de cuatro fases compuestas por seis pasos que van del concepto hacia la elaboración de los dibujos para ensamble. Cada uno de los pasos conlleva una etapa de evaluación y mejora a través de una retroalimentación global que puede realizarse en cualquiera de las fases.

**Ventajas:** Su metodología está fuertemente orientada al proceso. Es una metodología muy detallada para la generación sistémica de productos a través de conceptos

técnicos como sus características o valores. Describe una teoría de sistemas técnicos estructurada que ayuda al diseñador a hallar relaciones y jerarquías entre los objetos de diseño que ayudan a encontrar soluciones cuando una aproximación intuitiva resulta inefectiva.

***Desventajas:*** Es una metodología no apta para un desarrollo donde el diseñador requiera de un proceso artístico o una aproximación intuitiva para diseñar un producto, o donde la solución tenga un componente de valor intangible. Es necesario tener un conocimiento profundo sobre la teoría de sistemas técnicos para poder aplicar esta metodología.

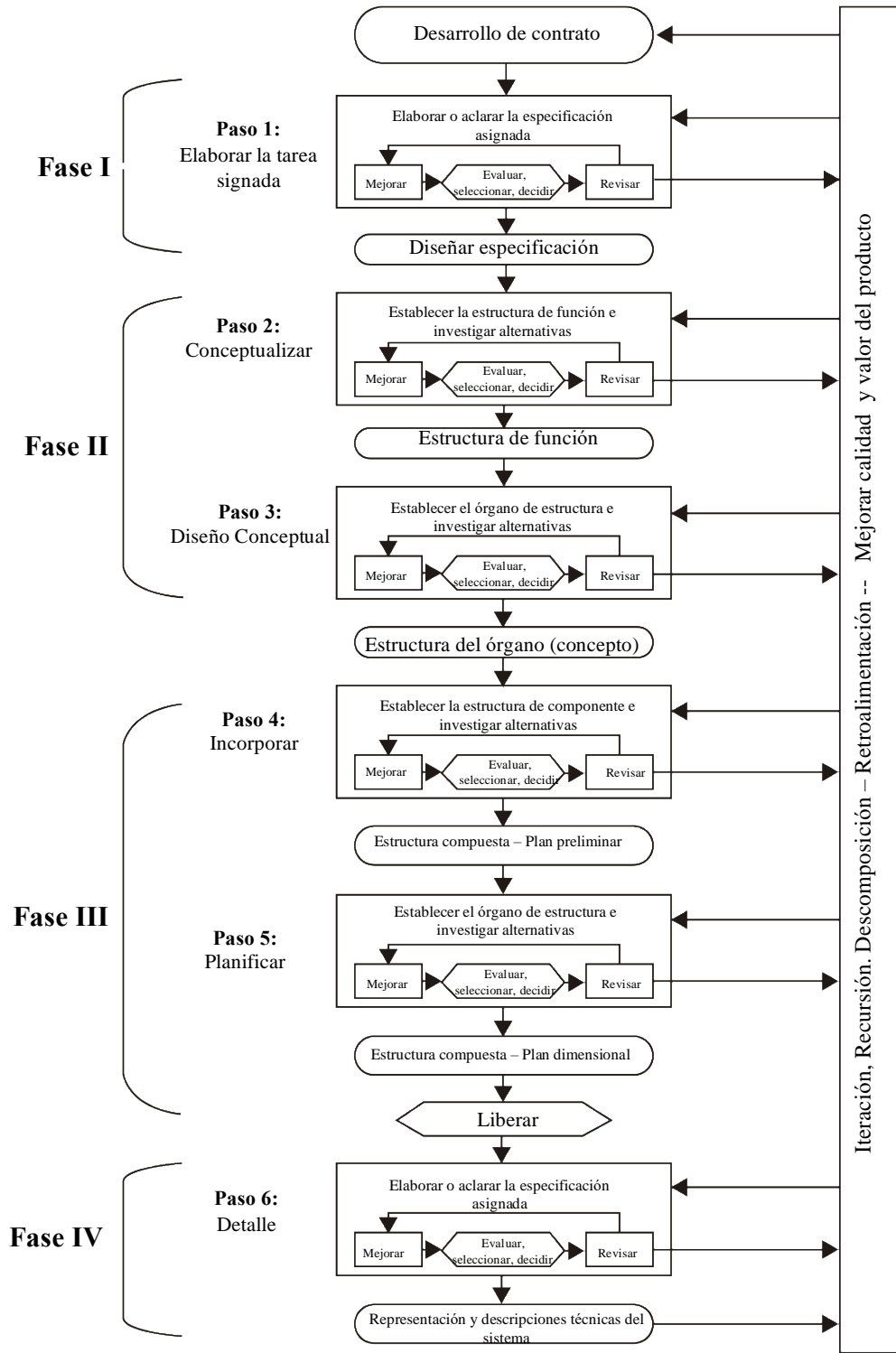


Figura 14. Representación gráfica de la metodología de Hubka y Eder con las cuatro fases que interactúan entre sí

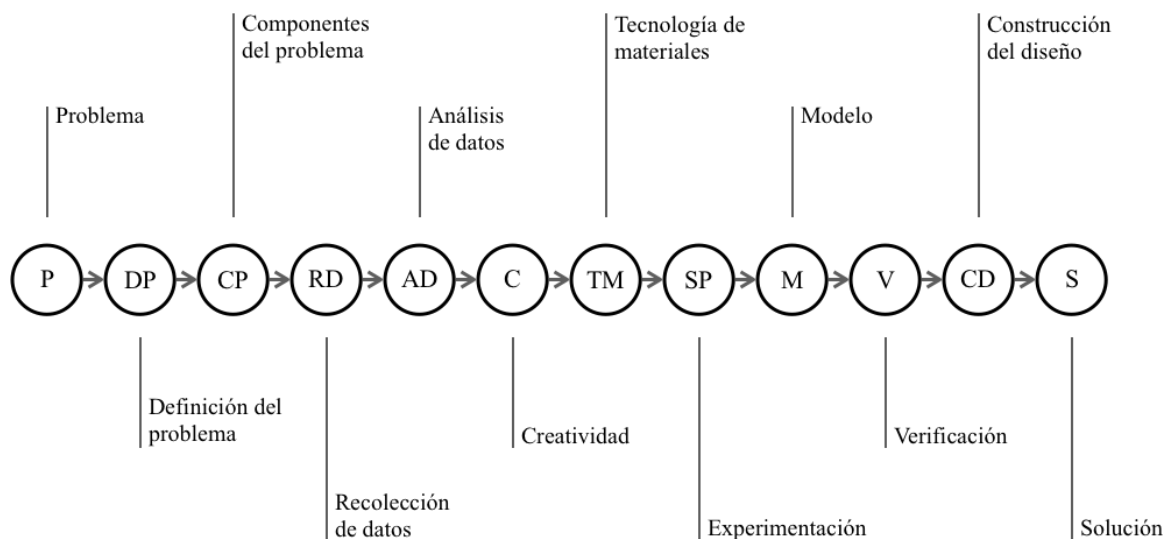
Fuente: Kevin Adams (2015). Non-functional Requirements in Systems Analysis and Design (pág. 31). Springer International Publishing.

**Munari (Munari, 1983).**

**Idea principal:** La metodología que propone consiste en una serie de pasos dispuestos en un orden lógico pero flexible, esto es, el diseñador podrá modificar el orden a conveniencia. Así mismo, incluye una fase de creatividad que reemplaza a la idea intuitiva de origen subjetivo y propone contener la creatividad dentro de límites derivados del propio análisis de los datos del problema.

**Ventajas:** Es una metodología bien estructurada y sencilla de llevar a cabo, que obliga al diseñador a investigar y documentar antes de adentrarse a la etapa creativa. Otorga mucho peso al proceso creativo del propio diseñador.

**Desventajas:** No es aplicable a la resolución de problemas sistémicos ni procesos complejos, su enfoque es más bien hacia bienes de producción o problemas inherentemente creativos como, por ejemplo, el diseño gráfico.



**Figura 15. Representación gráfica de la metodología de Munari**

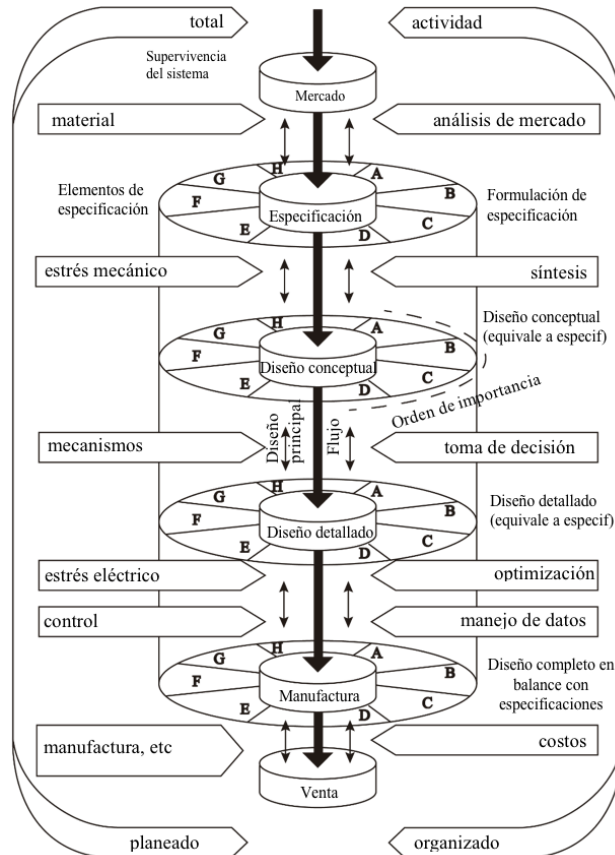
Fuente: Bruno Munari (1983). Como nacen los objetos (pág. 30). Editorial Gustavo Gil.

**Total Design (Pugh, 1991)**

**Idea principal:** Utiliza un acercamiento holístico al problema mediante el uso de equipos multidisciplinarios y busca que tanto los factores técnicos como no-técnicos estén incluidos dentro de la actividad de diseño. Se compone de un núcleo descriptivo del proceso de diseño, seguido por una fase de especificación del diseño; la tercera fase contiene las entradas de métodos o técnicas que son independientes del proceso de diseño; y la cuarta fase, incluye las entradas de las tecnologías y disciplinas requeridas específicamente por el proceso de diseño.

**Ventajas:** Es una metodología estructurada, sistémica y muy completa para trabajar en nuevos diseños. Integra los factores comerciales, científicos e industriales relacionados con el producto.

**Desventajas:** Su enfoque es rigurosamente estructurado y sistematizado, no hay mucho espacio para la creatividad o inventiva del diseñador. Requiere forzosamente de la integración de equipos multidisciplinarios de diseño.



**Figura 16. Representación gráfica de la metodología Total Design**

Fuente: Stuart Pugh (1991). Total Design: Integrated Methods for Successful Product Engineering (pág. 7). Editorial Addison-Wesley.

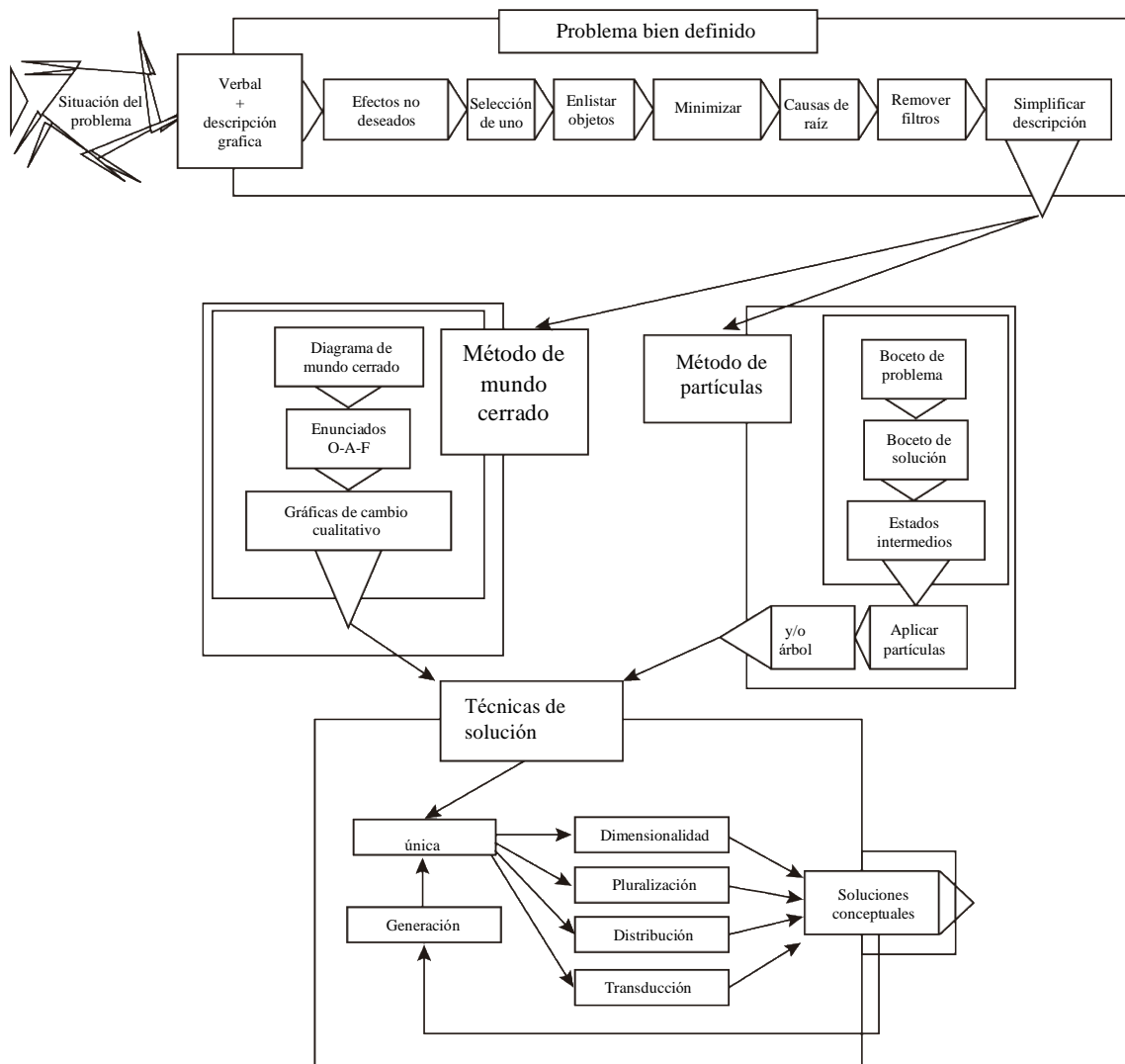
**USIT (Sickafus, 2001).**

**Idea principal:** Es una metodología que evoluciona del SIT, agregando más herramientas y estrategias para optimizar su utilización en la industria automotriz. Utiliza componentes unificadores basados en objetos, atributos y funciones. Adicionalmente, en esta metodología “se dedica un esfuerzo considerable a construir eficientemente un problema bien definido” (Sickafus, 2001).

**Ventajas:** Es una metodología probada y ampliamente usada en la industria automotriz.

Estructura la definición del problema para evitar pasar por alto situaciones que afecten el diseño, de esta manera, restringe una propuesta de solución apresurada.

**Desventajas:** Requiere que previamente se haya explorado y agotado posibles soluciones de diseño a través de una metodología convencional y sobre la cual, se inicie el proceso de lluvia de ideas. También requiere que el diseñador cuente con una profunda experiencia con solución de problemas pasados.



**Figura 17. Representación gráfica de la metodología USIT**

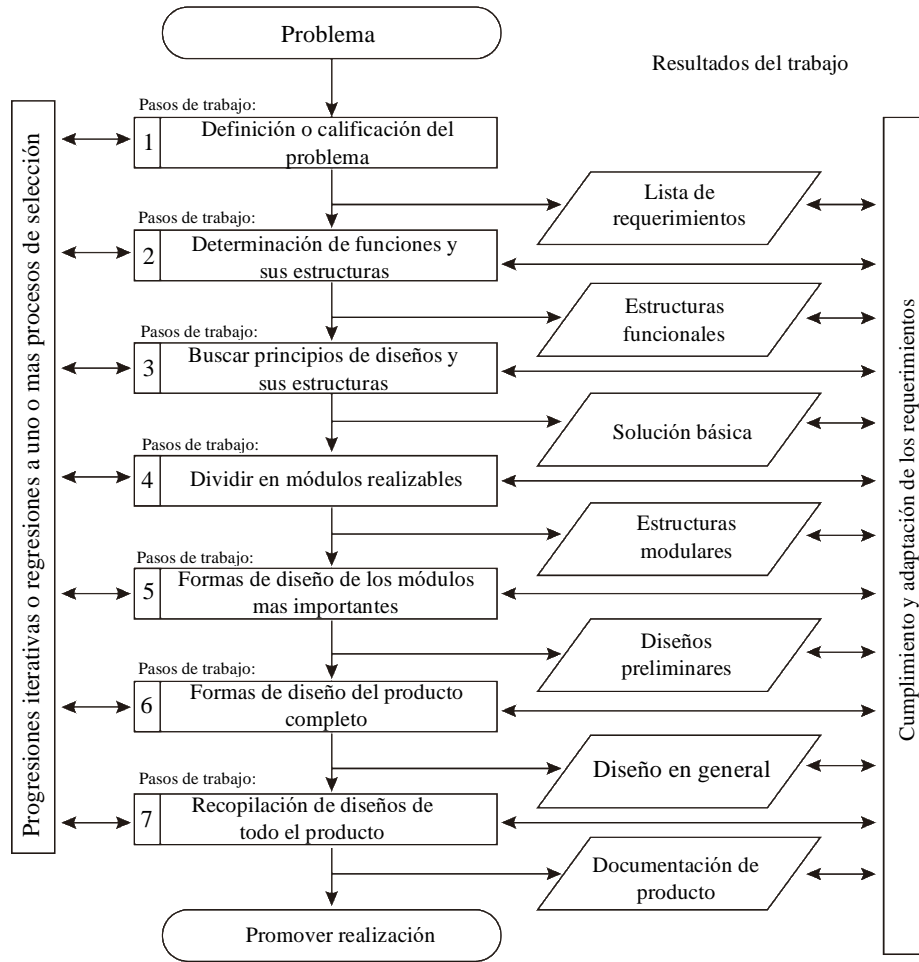
Fuente: Ed N. Sickafus (2001). Unified Structured Inventive Thinking an Overview (pág. 13). Ntelleck, LLC.

**VDI 2221 (VDI, 1993).**

**Idea principal:** Más que una metodología, son lineamientos estandarizados para el diseño sistemático y metódico de sistemas técnicos y productos establecidos por el instituto VDI en Alemania. Estos lineamientos se componen de un proceso de siete etapas y proponen el análisis y evaluación en cada etapa, de las posibles soluciones. Dichas etapas no son necesariamente secuenciales, pudiendo el diseñador regresar en cualquier momento a cualquiera de ellas.

**Ventajas:** Propone un procedimiento sistemático para analizar el problema general y descomponerlo en subproblemas que permitan encontrar sub-soluciones para combinarlas una solución general.

**Desventajas:** Aunque puede utilizarse para la creación de un producto, su mayor utilidad se encuentra en el rediseño o mejora de un producto existente.



**Figura 18. Representación gráfica de la metodología VDI 2221**

Fuente: VDI-Fachbereich Produktentwicklung und Mechatronik (1993). VDI-Richtlinie: VDI 2221 Methodik zum Entwickeln und Konstruieren Technischer Systeme und Produkte. Verein Deutscher Ingenieure.

Las metodologías anteriormente descritas sirven como punto de referencia para un análisis posterior y ayudan a visualizar los puntos en común entre ellas. Sin embargo, es necesario también abordar las metodologías que en los últimos años se han creado a partir del uso más recurrente de las tecnologías de la información.

## **Tendencias de las metodologías de diseño modernas**

Simón (1969), anticipó el surgimiento de una sola disciplina que iba a reunir los esfuerzos de organizaciones y profesionistas, involucrados en diseñar cursos de acción en disciplinas técnicas e industriales.

En tiempos recientes se han desarrollado nuevas tendencias en las metodologías de diseño a medida que los procesos de manufactura han evolucionado.

Estas tendencias han aparecido debido a que, a finales de la década de 1980, la mecatrónica, con sus componentes mecánicos, de fluidos, eléctricos, electrónicos y de software, se hizo cada vez más popular entre los investigadores. “Actualmente, el área de objetos considerados se ha ampliado a sistemas *adaptónicos* e incluso inteligentes, que reconocen y evalúan su entorno de forma independiente, y adaptan su comportamiento de forma autónoma y orientada a objetivos” (Birkhofer, 2011, pág. 5).

Y aunque los fundamentos del diseño en ingeniería no han sufrido muchos cambios en los últimos años, las metodologías de diseño sí, siendo las metodologías “históricas” rebasadas cuando el objeto de estudio fue más allá de un producto y del proceso de transformación en general. Por lo tanto, “la metodología de diseño se amplió con hallazgos, modelos y procedimientos de otras ciencias, como teoría de sistemas, cibernética, ciencia económica, informática y psicología, para convertirse en un modelo de proceso y una ciencia que define la acción” (Mortensen, 1997).

En los últimos años, las herramientas de diseño han evolucionado proporcionalmente al poder de procesamiento de las máquinas. La simulación de los productos, su funcionalidad y comportamiento en diversos escenarios, se ha vuelto una buena práctica que antecede al inicio de la fabricación. En un estudio hecho por Riitahuhta,

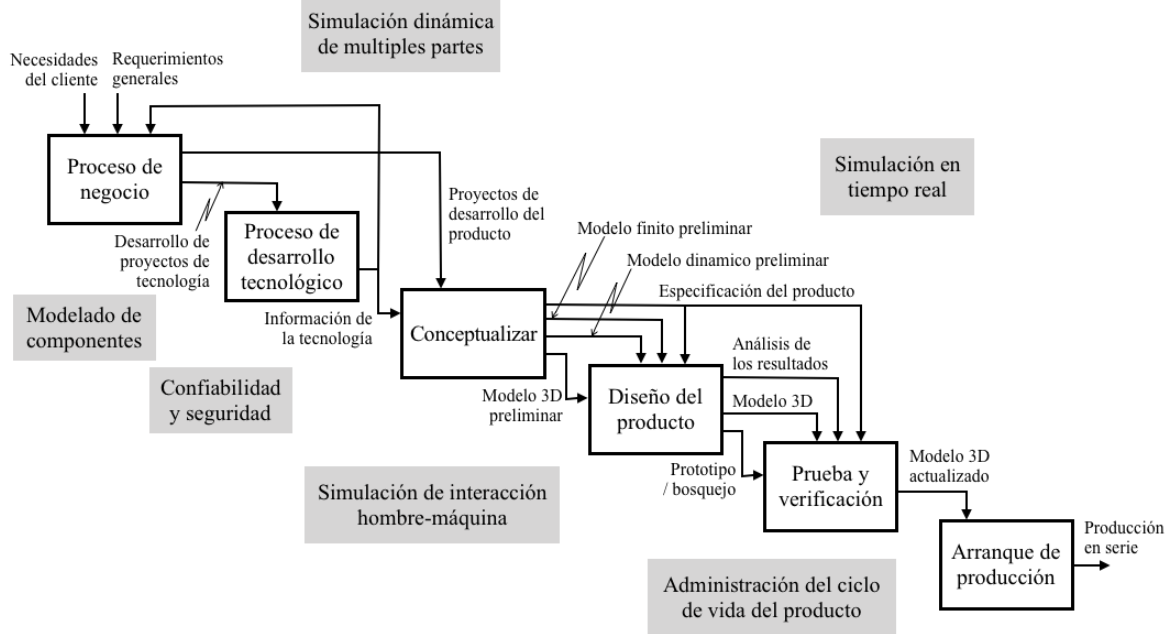
Sääski y Salonen (2005), se recopila la experiencia en el proceso de desarrollo de productos de compañías globales de maquinaria móvil de trabajo, y presentan un modelo interesante, que sintetiza el uso de las herramientas virtuales en el desarrollo de productos orientados al cliente. A continuación, se describe dicho modelo.

**Mobile Machinery Product Development (MMDP)** (Riitahuhta, Sääski, & Salonen, 2005).

**Idea principal:** Está dividida en seis fases, donde se propone comenzar con un caso de negocios en la primera fase para entonces, en la segunda fase, comenzar con el desarrollo tecnológico, y a su vez, retroalimentar la primera fase con la información recolectada. Estas dos primeras fases son el eje central de la metodología y dan pauta a las fases posteriores en donde se ocupa de manera extensiva el modelado, verificación y prototipado por computadora previo y durante el proceso de la producción.

**Ventajas:** Es una metodología basada en una investigación de campo que recopiló el tipo de métodos de diseño utilizados por las empresas líderes en la fabricación de maquinaria móvil. De los resultados de las entrevistas, y mediante una colaboración académica e industrial, se sintetizó esta metodología para el desarrollo de productos. Toma ventaja de la simulación por computadora para la construcción y prueba de los modelos.

**Desventajas:** “No es una metodología óptima para el desarrollo de software o un negocio de internet donde es necesario incluir un principio de innovación abierta” (Chesbrough, 2003). Es más bien una metodología orientada hacia donde existe un producto físico.



**Figura 19. Representación gráfica de la metodología de MMPD, la iteración entre las fases no se presenta en la figura aun cuando existe entre ellas.**

Fuente: Riitahuhta, Asko; Sääski, Juha; Salonen, Tapio (2005). Simulation-based Design Practise Used In Finishing Mobile Working Machines Industry, International Conference on Engineering Design (pág. 4). A. Samuel, W. Lewis.

### Optimización topológica

Retomando lo que Evangelos, Tollnes Flem, Steiner y Olsen (2018) mencionan, la optimización topológica es un proceso iterativo asistido por computadora, por el cual se busca obtener el mejor desempeño estructural de un componente, a través de identificar la distribución óptima de material dentro de su propia geometría. En otras palabras, la optimización topológica es el proceso de determinar la distribución óptima de material dentro de un dominio diseñado” (Joshua D. & Ramana V., 2014).

Actualmente existen herramientas informáticas en el mercado, que apoyan al diseñador a realizar una optimización topológica: OptiStruct, solidThinking, Nastran Shape Generator y Fustrum. “Estas herramientas se basan en un método matemático de

optimización topológica que optimiza la distribución del material, una vez dado un cierto dominio” (Habib Kazi, Grossman, Cheong, Hashemi, & Fitzmaurice, 2017).

La optimización topológica se apoya de los análisis de elemento finito con el fin de evaluar y validar el comportamiento de una geometría dada.

La optimización topológica busca siempre el valor máximo o mínimo de una función  $f(x)$  y su respectivo vector  $x = (x_1, \dots, x_n) \in IR^n$  que lo genera, con respecto a las condiciones iniciales y restricciones existentes (Evangelos, Tollnes Flem, Steiner, & Olsen, 2018). De acuerdo con Hassani y Hinton (1999), la función  $f$  es la función objetivo que puede tener  $x_n$  variables de diseño dependientes de las restricciones en el subespacio  $IR^n$ .

### **Diseño generativo**

El diseño generativo es un método que ha evolucionado de la utilización de los programas de diseño, manufactura y simulación por computadora. Como menciona Krish (2011), el diseño generativo es un proceso de restringido de exploración de un diseño guiado por el diseñador.

El diseño generativo, como su nombre lo dice, genera alternativas de diseño basados en algoritmos cargados en un programa para toma de decisiones, que puede o no incluir el uso de inteligencia artificial. “Esto permite al diseñador explorar un nuevo diseño como resultado de una serie de transformaciones basadas en un largo número de posibles diseños basados en información previa” (Li & Lachmayer, 2018).

Este método revolucionario se ha utilizado para la creación de modelos, animaciones o ilustraciones basadas en un juego de reglas o algoritmos y que buscan de alguna forma imitar patrones encontrados en la naturaleza, estos algoritmos son llamados algoritmos generativos y existe una gran variedad de técnicas de diseño, que dependen de la

disciplina donde serán aplicadas (Singh, 2012). Los diseños que se obtienen al ocupar este método suelen tener formas complejas difíciles de reproducir por procesos de manufactura tradicionales, (ver Figura 20), sin embargo, gracias a la manufactura aditiva, dichas formas pueden ser reproducidas con una gran precisión.



**Figura 20. Diferencia entre un diseño tradicional (izquierda) y un diseño generativo (derecha).**  
Fuente: Prismacim. Recuperado de <https://prismacim.com>

### **Manufactura aditiva**

“La manufactura aditiva es un grupo de tecnologías modernas de manufactura que se usan para producir prototipos tridimensionales, a partir de un dibujo generado por computadora, y a través de la unión de un material capa tras capa” (Prakash, Nancharaih, & Rao, 2018).

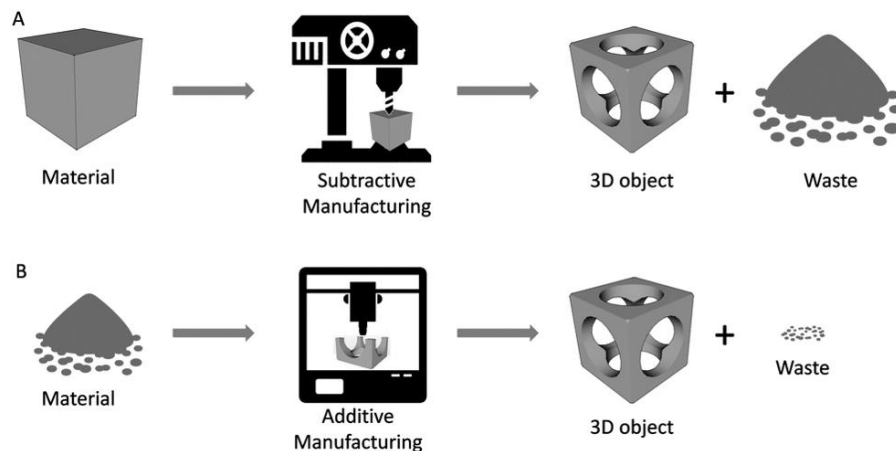
La manufactura aditiva se distingue de la manufactura tradicional, en que la creación del objeto se realiza desde cero, disponiendo y adicionando capas de material, hasta que se obtiene un producto con forma tridimensional.

El origen de la manufactura aditiva se remonta a 1984 con la primera patente de un equipo de estereolitografía (*SLA*, por sus siglas en inglés) realizada por la empresa 3D Systems Inc. (2018), y donde se utilizaban resinas foto sensibles como materia prima.

Posteriormente, en 1988, la empresa Stratasys Ltd (2019) , comenzó a comercializar una máquina que utilizaba el método de disposición fundida (*FDM*, por sus siglas en ingles), donde la materia prima consistía en termoplásticos fundidos y formados a través de una boquilla caliente.

En últimas fechas se han patentado y comercializado diferentes procesos de fabricación aditiva que incluyen diferentes materiales pulverizados para fabricar piezas a color o metálicas a través de fusión generada por un aglutinante

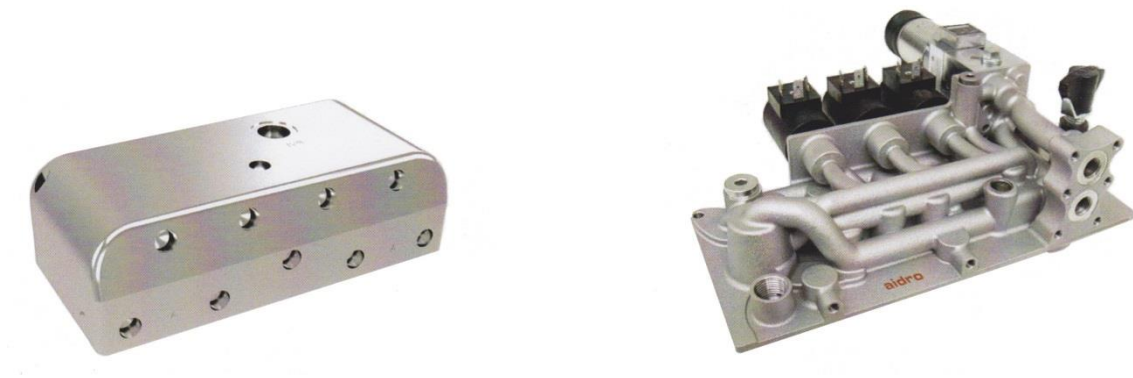
“En la manufactura aditiva, contrario a las técnicas de producción por mecanizado, se usa solo el volumen de material que conforma el objeto” (Christoph, Muñoz, & Hernández, 2016). La Figura 21 representa de manera gráfica el volumen de desperdicio que se puede alcanzar con el uso de la manufactura por arranque de viruta, respecto a un método por manufactura aditiva. La obtención de forma directa del producto elimina los pasos previos de fabricación de moldes, herramentales o herramientas especiales.



**Figura 21. Comparación gráfica de un proceso de manufactura por arranque de viruta (A), respecto a la manufactura aditiva (B)**

Fuente: BCT Technology AG®. Recuperado de: <https://www.bct-technology.com/en/support/tips-tricks/nx-1102-additive-manufacturing.html>

La Figura 22 muestra a la izquierda un bloque de válvulas maquinado por procesos de arranque de viruta, de peso 5Kg, y a la derecha, un bloque hecho por manufactura aditiva con peso total de 1.3Kg. Ambos bloques son de aluminio y resisten una presión interna de 70MPa. La diferencia principal es un ahorro de al menos 66% del material y un aumento de la eficiencia y temperatura de trabajo, debido a que los canales curvados eliminan la fricción y pérdida de caudal causado por intersecciones rectas. Esto nos da una dimensión del grado de optimización de costos que podemos obtener con los nuevos procesos de manufactura aditiva.



**Figura 22. Diferencia entre un bloque de válvulas maquinado por procesos de arranque de viruta y un bloque hecho por manufactura aditiva**

Fuente: Aidro S.R.L.<sup>®</sup>, (2007). Recuperado de <http://www.aidro.it/articles.html>

La manufactura aditiva es un método de producción, aún en desarrollo, que permite realizar diseños que no eran posibles de imaginar con las técnicas de fabricación tradicionales, por lo tanto, es difícil determinar los casos donde es posible aprovechar los beneficios de la fabricación aditiva, parafraseando a Douglas S. & Stanley W. (2014): existe una oportunidad para la manufactura aditiva en productos que contienen una gran

complejidad, que se pueden producir en una proximidad más cercana a los consumidores, o que tienen un impacto grande en el inventario.

En general, la manufactura aditiva es uno de los pilares del diseño generativo, ya que permite elaborar formas complejas sin la restricción de los métodos tradicionales de arranque de viruta. Muchas veces, y dependiendo del material que se utiliza, la manufactura aditiva, o impresión 3D, como comúnmente se le llama, puede inclusive apoyarse de un proceso tradicional de fundición para producir moldes y modelos de piezas con materiales particularmente especiales.

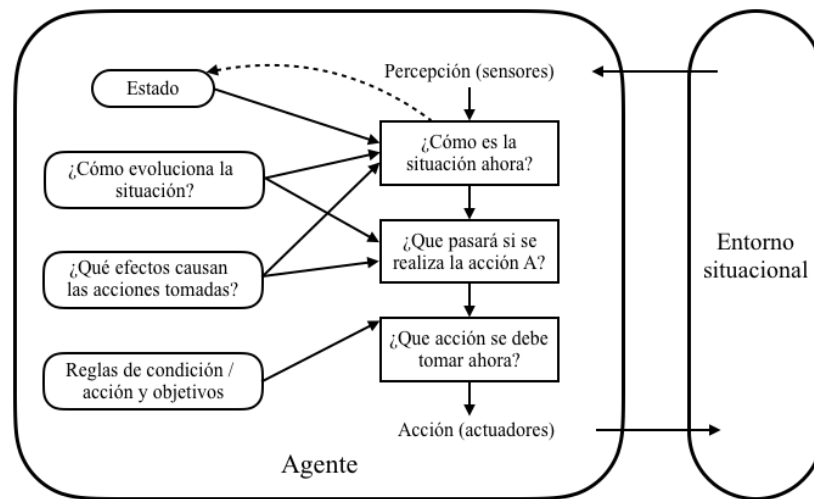
### **Algoritmos de análisis y búsqueda**

#### ***Agente basado en objetivos y modelos***

El conocimiento sobre la situación actual y el entorno son algunas veces insuficientes para tomar una decisión. El agente, por lo tanto, debe tener una base de conocimientos histórica que le permita conocer cómo evoluciona una situación relacionada a entorno y de la misma forma, información acerca de cómo evoluciona una situación de manera independiente a la intervención del agente. Pero además de lo descrito anteriormente, el agente necesita algún tipo de información sobre su objetivo y sobre la situación final deseable.

En ciertas ocasiones, la selección de una acción es directa, esto es, el resultado de una acción es inmediato. En otras ocasiones, la selección está formada por una secuencia de pasos que permiten encontrar el objetivo. Para este último supuesto se requiere una búsqueda planificada de pasos para encontrar una secuencia de acciones que permita al agente llegar a su meta.

En la Figura 23 se representa el esquema de un agente basado en objetivos que almacena información del estado de la situación, así como los objetivos que debe alcanzar, con la posibilidad de realizar una acción que no lleve a la obtención de los objetivos.



**Figura 23. Esquema de un agente basado en objetivos**

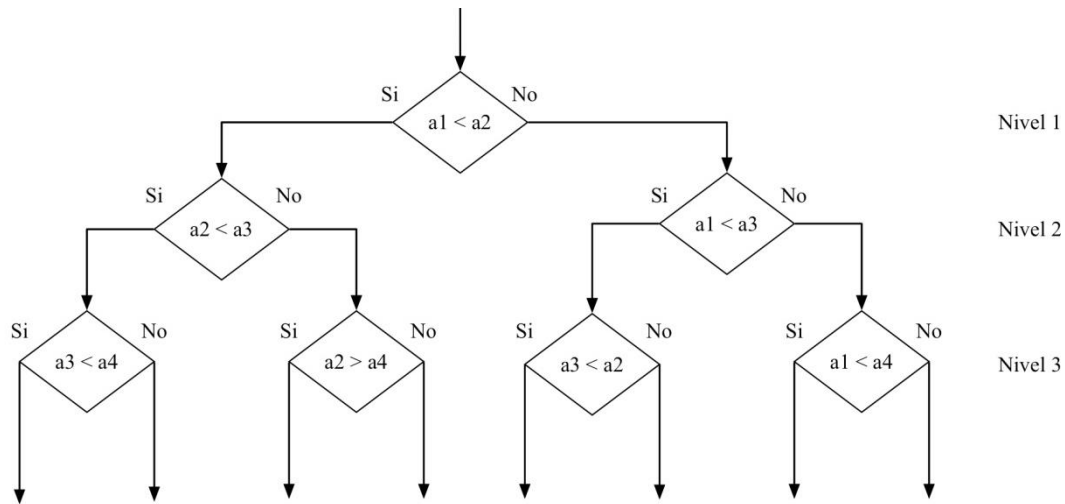
Fuente: Russell, Norvig (2004). Inteligencia Artificial, Un enfoque moderno (pág. 57). Pearson Prentice Hall.

### ***Estrategia de búsqueda no-informada***

Una estrategia de búsqueda utiliza el conocimiento existente del problema para encontrar soluciones óptimas sobre otras que no lo son; esto lo hace a través de navegar en un espacio de estados de los cuales no se tiene información adicional más allá que el planteamiento del problema. El grafo básico es un árbol de búsqueda, donde se aplica al estado inicial una función sucesora que provoca ramificaciones en su camino de encontrar un estado óptimo (figura 24).

El estado óptimo se entiende cómo minimizar o maximizar un estado inicial, identificado como problema, en búsqueda de obtener un uso óptimo del recurso utilizado

para generar dicho estado. Parafraseando a Goulet (2017) "siempre que un estado se pueda modelar en términos matemáticos, una solución óptima podrá ser computada".



**Figura 24. Esquema general de un árbol de búsqueda**

Fuente: Elaboración propia en base a Russell, Norvig (2 (Norvig, 2004)004). Inteligencia Artificial, Un enfoque moderno (pág.83). Pearson Prentice Hall.

El árbol de búsqueda propuesto por Norvig (2004), en la figura 24, es la base para construir una solución dentro del espacio potencial de diseño. Este proceso es englobado dentro de un algoritmo de diseño generativo, o como mejor se le conoce por sus siglas en inglés: *GDA* (Lohan, Dede, & Allison, 2017). El algoritmo de diseño generativo permitirá entonces buscar y proponer un alto número de alternativas de diseño dentro del espacio potencial de trabajo y las restricciones que el mismo programador o diseñador especifique.

### Los problemas de selección de una metodología de diseño

Normalmente existe un número grande de posibilidades de solución para un problema típico de diseño, inclusive, dos personas trabajando de manera separada en un mismo problema, pueden llegar a tener criterios diferentes de cómo solucionar un

problema. Esto anterior se traduce en la cantidad de metodologías creadas a través de la historia para proponer soluciones al problema de diseño.

Irónicamente, dentro del universo de metodologías de diseño, no existe una metodología integradora que exista en un nivel superior, o que represente un primer paso de análisis, que permita seleccionar de entre todas las metodologías existentes, la más conveniente.

Por lo anterior expuesto, se puede establecer que no existe una metodología de diseño infalible ni mucho menos completa. Lo que sí es posible concluir, es que la mayoría de las metodologías de diseño tienen un eje común que se puede resumir en los siguientes puntos:

- Existe un primer proceso de análisis del problema para posteriormente pasar a una síntesis de la solución más adecuada.
- Los procesos siempre tienden de lo abstracto a lo concreto.
- Las etapas están alineadas en el método científico: búsqueda de información, planteamiento de una o varias soluciones, análisis de las posibles soluciones, comprobación y documentación de los resultados.
- Existe interacción y retroalimentación en todas las etapas
- Hay una estructuración del proceso creativo
- Las metodologías de diseño son multidisciplinarias y pueden integrar o exceptuar el uso de tantas herramientas y métodos como el diseñador lo considere apropiado.

Si bien la experiencia del diseñador sobre el problema puede ayudar a aproximar la metodología de solución, esta selección puede llegar a ser subjetiva y parcial. Otro punto

que considerar es la aproximación entre la definición inicial de la propuesta de solución

hecha por el diseñador y la solución óptima. Cuando existe una brecha muy grande entre

estas dos, el proceso de búsqueda de solución deberá ser repetido cíclicamente hasta

encontrar una aproximación óptima.

---

## Capítulo 4

### Solución propuesta e implementación

La propuesta de solución descrita en este capítulo nace primero de una investigación documental en la cual se realizó una revisión sistemática de la literatura existente en libros y publicaciones impresas, además de publicaciones electrónicas utilizando fuentes de *ScienceDirect*, *ResearchNet*, *Scopus*, *SpringerLink*, *Elsevier* y *Google Books*, así también como páginas electrónicas de asociaciones, compañías y revistas siguientes: *The Design Society*, *Computer Aided Design*, *Human-Computer Interaction*, *Research in Engineering Design*, *Design Studies*, *Journal of Engineering Design*, *Design issues*, *The Design Journal*, *International Journal of Design*, *Journal of Design Research*, *Design Principles and Practices* y *Autodesk Inc*. Utilizando operadores booleanos *AND* y *OR*, con las palabras clave: metodología de diseño, diseño generativo, manufactura aditiva, optimización topológica y algoritmos generativos.

De la literatura encontrada y previa lectura del título y del resumen, se realizó un filtro de los documentos con base al siguiente criterio:

1. El documento debería contener información actual no mayor a cinco años, o para el caso de publicaciones con antigüedad mayor a cinco años, la información tomada debió haber sido un precedente importante en la época que fue propuesta o cuya trascendencia siga vigente en nuestro tiempo.

2. La publicación debía referir conceptos aplicables al desarrollo del presente trabajo como metodología de diseño, diseño generativo, manufactura aditiva, optimización topológica y algoritmos generativos.

Se realizó un diagnóstico empírico-analítico de los modelos y algoritmos matemáticos existentes que explican la geometría de cuerpos en el espacio y permiten construir una trayectoria tridimensional. El diagnóstico involucró la experimentación con diferentes algoritmos propuestos hipotéticamente, hasta su validación a base de prueba y error en escenarios simulados.

Finalmente, se contrastaron los resultados obtenidos contra métodos de fabricación tradicionales. Estos resultados podrán observarse en el capítulo 5 y el anexo A del presente trabajo.

### **Resultado del análisis de las metodologías de diseño históricas**

Como anteriormente observamos, existen muchas y muy variadas metodologías de diseño, cada metodología tiene sus características especiales y ventajas o desventajas sobre el resto, parafraseando a Jänsch (2007) “Las metodologías de diseño pueden ser entendidas como una construcción de modelos, métodos, herramientas, aproximaciones y reglas formuladas para ser una guía que produzca mejores resultados y trabajo de diseño”. Sin embargo, una mala selección de una metodología puede complicar el trabajo de diseño al forzar la solución de un problema con un método no adecuado.

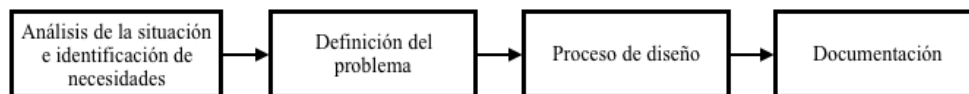
En la tabla 2 se enlistan las metodologías de diseño seleccionadas en este trabajo y se comparan con base en las propias etapas de análisis y solución de un problema. Se observa que cada metodología aborda de manera diferente una propuesta de solución, omitiendo en algunos casos la etapa de diseño del proceso, la documentación de los

resultados o las pruebas de verificación. También se puede observar en la tabla 2, que la mayoría de las metodologías omiten el uso de las tecnologías de la información como herramienta de diseño y simulación.

**Tabla 2. Comparativa de etapas entre metodologías de diseño seleccionadas**

Etapas identificadas / Metodologías de diseño	Agile Design	Bürdek	Cross	Design Thinking	Dixon	Hubka y Eder	Munari	Total Design	USIT	VDI 2221	MMDP
Análisis de la situación	X			X				X			
Identificación de necesidades				X	X	X		X			X
Definición del problema	X	X	X	X	X		X			X	
Desglose del problema		X	X				X		X	X	
Listado de requerimientos			X		X	X	X	X	X	X	X
Diseño del concepto		X		X		X	X	X	X	X	X
Diseño del producto	X		X	X	X	X	X	X		X	X
Iteraciones entre soluciones	X	X	X			X		X		X	X
Pruebas de verificación		X	X		X	X	X				X
Simulación por computadora											X
Diseño de proceso	X	X						X			
Documentación					X	X				X	
Arranque de producción					X						X
Venta					X			X			
Retiro del mercado	X										

Se identifica que, como regla general, las metodologías históricas, tienen en común una fase de análisis y definición del problema antes de pasar propiamente a la etapa de solución. La Figura 25 muestra los pasos en común encontrados en el grueso de las metodologías de diseño históricas.



**Figura 25. Pasos típicamente encontrados en una metodología de diseño**

Fuente: Elaboración propia.

Partiendo del hecho que el objetivo principal es crear un producto que cumpla con ciertas necesidades, representadas en magnitudes y propiedades, es evidente que se requiere

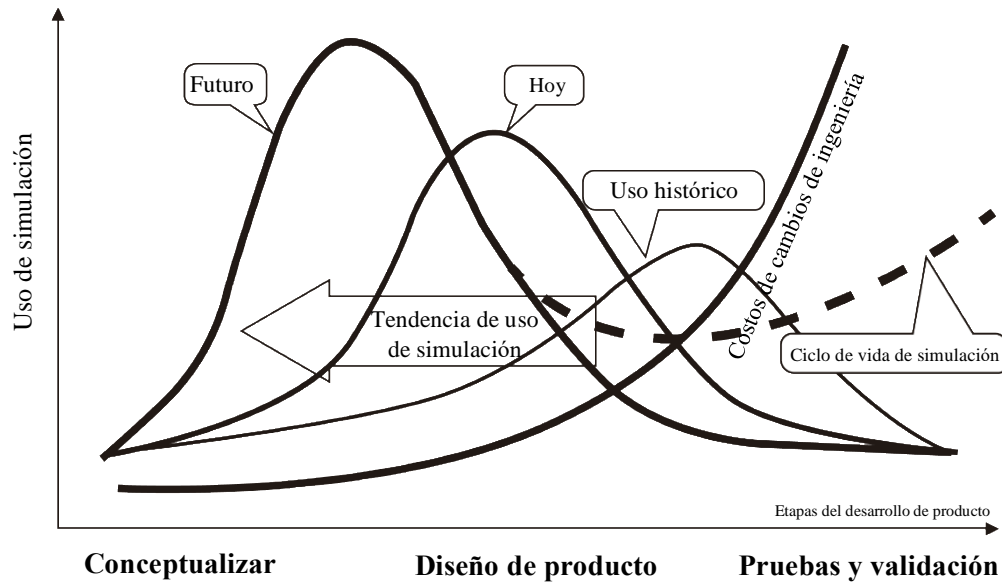
realizar pruebas de prototipos para explorar las posibles soluciones y corregir cualquier error de diseño que se descubra en el proceso. Esta dinámica de rediseño y prueba de prototipos será necesario realizarlas hasta que se cumpla las condiciones requeridas del producto.

En el pasado, el costo y tiempo de realizar los prototipos era tan alto como para invertir recursos explorando varias posibles soluciones. Sin embargo, en nuestros tiempos, los programas de simulación permiten realizar una gran cantidad de prototipos en corto tiempo y con un costo mínimo, ya que no es necesario construirlos en el espacio físico para someterlos a pruebas. Ahora, con el poder de procesamiento existente, se pueden realizar simulaciones realistas de los objetos con bajos costos de inversión y en muy poco tiempo.

Por lo tanto, la virtualización del diseño y sus correspondientes pruebas nos ayudará a analizar y comparar los datos arrojados por los varios prototipos y proponer cambios a los mismos de manera eficiente. Citando la publicación de la VTT acerca del diseño basado en simulación que dice: “La utilización de simulaciones amplía significativamente el modelo del producto. Las simulaciones agregan sus propios requisitos a la información del producto y su documentación” (VTT, 2006). Esto quiere decir que los mismos prototipos y su comportamiento, sirven para retroalimentar futuros prototipos con el fin de optimizar las características y mejorar sus funciones.

Como lo ilustra Riitahuhta et al. (2005), en la gráfica de la Figura 26, el uso de la simulación durante las etapas tempranas del proceso de diseño nos ayuda a mantener controlados los costos de producción provocados por las modificaciones en el producto. Otro efecto positivo de la simulación temprana en el proceso de diseño del producto es que

se profundiza en el conocimiento de este, facilitando al diseñador su optimización en etapas donde el costo de ingeniería aún se mantiene bajo.



**Figura 26. Representación gráfica de la tendencia en el uso del modelado y simulación durante el desarrollo del producto**

Fuente: Riitahuhta, Asko; Sääski, Juha; Salonen, Tapio (2005). Simulation-based Design Practice Used In Finishing Mobile Working Machines Industry, International Conference on Engineering Design (pág. 7). A. Samuel, W. Lewis.

Como punto adicional, tradicionalmente, en el desarrollo de un producto no es considerada la etapa de manufactura del mismo, por lo tanto, cuando el diseño y pruebas del producto concluyen, aparecen los problemas relacionados con el proceso de manufactura.

No es posible dejar hasta el último la definición del método de fabricación cuando la complejidad en el modelo puede estar dada por el mismo método de fabricación a utilizar. Esto es, el tipo de proceso de manufactura seleccionado está directamente relacionado con la complejidad y costo de la pieza y, en proporción, el diseño propuesto de la pieza estará relacionado con la complejidad y costo del proceso de manufactura.

Esta relación complementaria la deja ver Riitahuhta et al. (2005), en la Figura 26, donde los defectos de diseño relacionados con la producción del producto pueden ser identificados demasiado tarde y, por lo tanto, incrementar los costos de producción. Esto anterior, en el peor de los casos, da como resultado un impacto negativo en los tiempos de fabricación y los costos del producto final.

Es por lo anterior que se debe considerar en el desarrollo del producto el mismo desarrollo del proceso, parafraseando a Birkhofer (2011): en nuestros días, “el proceso de desarrollo de productos y creación de productos se analiza y modela en términos de eficiencia y efectividad” por lo tanto, “los límites entre la planificación y el desarrollo del producto son borrosos”.

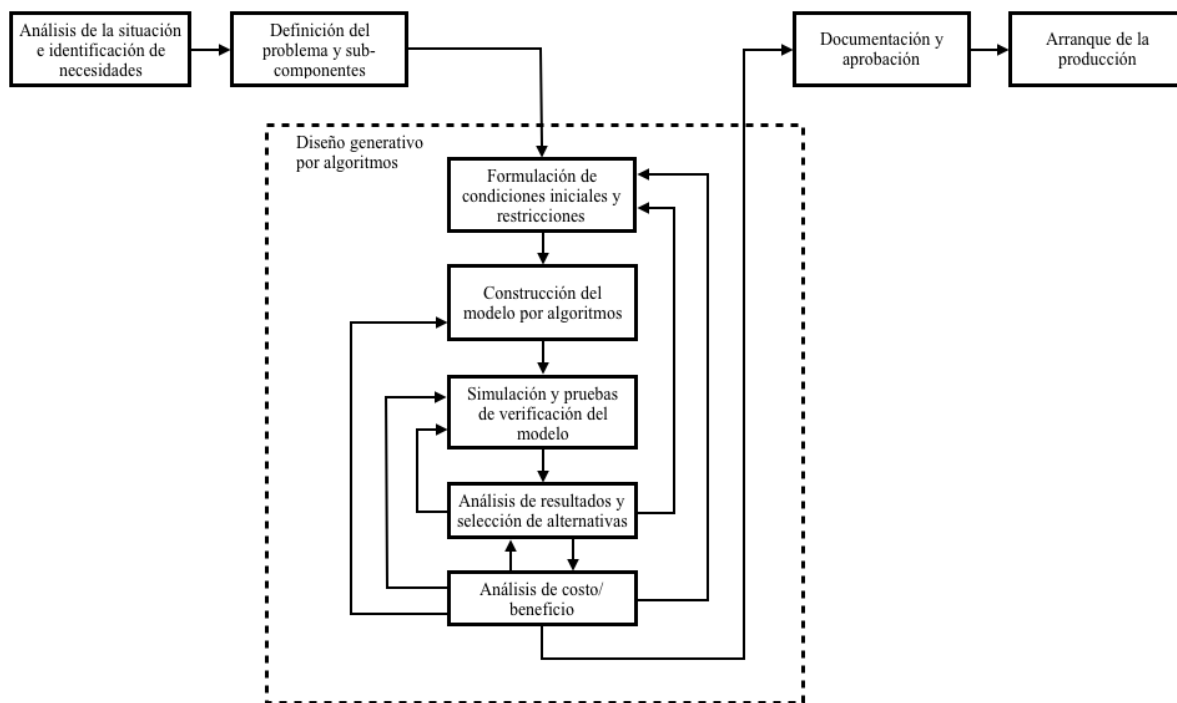
### **Propuesta de solución para una metodología de diseño generativo**

Debido a lo anterior expuesto, dentro de las metodologías de diseño mejor adaptadas a realizar la optimización de un producto, es necesario seleccionar una metodología que profundice en el uso de herramientas de simulación. Desgraciadamente, como se observó en la tabla 2, las metodologías de diseño tradicionales no contemplan el uso de herramientas computacionales tanto como las metodologías modernas. En la realidad, y para este problema que se nos presenta, la etapa de diseño conceptual y prueba es mucho más iterativa de la que un modelo tradicional puede proyectar.

Es por esto por lo que se propone complementar los procesos de análisis, definición del problema, documentación y arranque de la producción, descritos en la figura 27, con una etapa que será llamada de diseño generativo. Esta etapa estará basada en un modelo comprobado y obtenido por Riitahuhta (2005), al realizar una investigación de campo en industrias líderes globales de maquinaria móvil de trabajo.

Esta propuesta de metodología propone, como refiere Lobos (2018), un trabajo de solución técnica basada en condiciones iniciales, restricciones y objetivos más, sin embargo, no toma en cuenta elementos emocionales o aspiracionales para la experiencia de usuario.

En la Figura 27 se representan los pasos para la realización de dicha metodología. Se puede identificar que el énfasis principal está en el diseño y realización del producto, o para ser más exactos, en el rediseño del producto existente y la consecuente definición del método de producción. Sin embargo, esta definición no es consecuencia una de la otra, sino más bien, actividades complementarias que deben retroalimentarse entre sí durante el proceso de diseño de ambas.



**Figura 27. Representación gráfica de la metodología de diseño generativo propuesta**

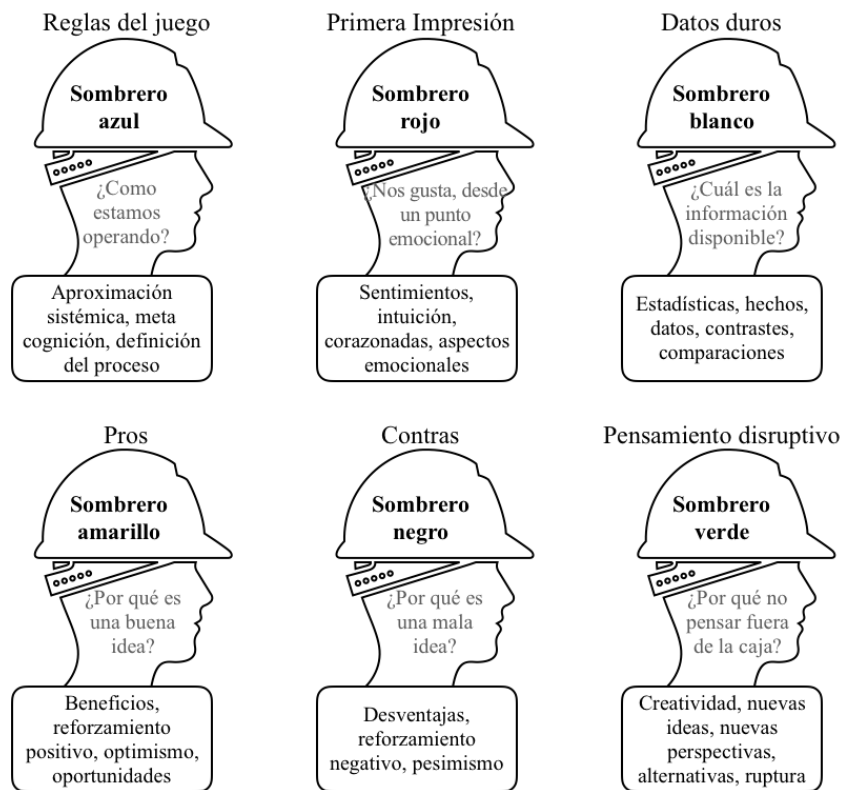
Fuente: Elaboración propia.

## Descripción de las fases propuestas de la metodología de diseño generativo

A continuación, se abordará cada uno de los pasos de la metodología por separado.

### Análisis de la situación e identificación de necesidades

En esta primera fase se debe redactar cuál es el entorno que rodea al problema, y la demanda o necesidad que inicia el desarrollo del producto. Se puede hacer uso de herramientas como lluvia de ideas o *Six Thinking Hats* (De Bono, 1999), (ver figura 28), con el fin de identificar necesidades con respecto a la situación presentada.



**Figura 28. Representación gráfica de la metodología Six Thinking Hats**

Fuente: Elaboración propia en base a De Bono, Edward (1999). *Six Thinking Hats: An Essential Approach to Business Management*. Penguin.

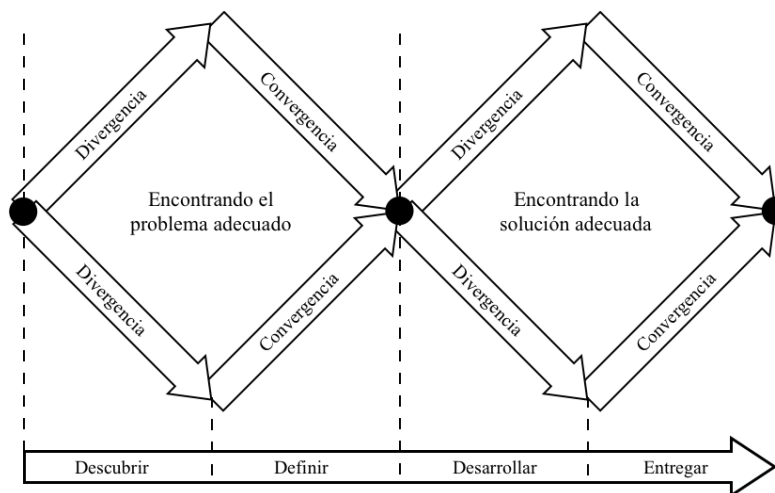
La recopilación y categorización de la información es muy importante en esta etapa.

En caso de encontrar varias necesidades, estas se deben agrupar, siguiendo un orden

propuesto por el diseñador, (3D Systems Inc., 2018) y en caso necesario, priorizar las necesidades que tengan un mayor impacto global.

El diseñador deberá priorizar aquellas necesidades objetivas de las que solo obedecen a un interés personal, e inclusive identificar aquellas necesidades que responden a un periodo específico de tiempo previo a que caduquen.

El diseñador deberá, por tanto, utilizar un pensamiento divergente, como el marcado por el modelo de doble diamante que propone Norman (2013) en la Figura 29, que le dé una primera aproximación al problema, a través de hacer un desglose de las necesidades y situación actual.



**Figura 29. Representación gráfica del modelo de doble diamante del diseño**

Fuente: Norman Don (2013). *The design of everyday things*. Basic Books.

Una herramienta recomendable para descubrir las causas del problema es la llamada 5W+2H (Progressa Lean, 2019), la cual permitirá realizar el desarrollo divergente de la situación actual. La herramienta 5W+2H proviene de siete palabras en idioma inglés, como se describe a continuación, y su utilidad reside en responder de forma clara y concreta a

cada una de las interrogantes planteadas. Las preguntas deberán enfocarse en la situación actual, de donde se desprende el problema.

1. What? (¿Qué?): Describir las situaciones que detonan el problema.
2. When? (¿Cuándo?): ¿Cuándo se presenta la situación problemática?
3. Where? (¿Dónde?) ¿Dónde se está presentando la situación problemática?
4. Who? (¿Quién?) ¿A quién o quiénes les sucede la situación problemática?
5. Why? (¿Por qué?) ¿Por qué sucede la situación problemática?
6. How? (¿Cómo?) ¿Cómo se presenta la situación problemática y cómo se diferencia de una situación normal?
7. How Much? (¿Cuánto?) ¿Cuánto impacta la situación a los recursos existentes?

### **Definición del problema y subcomponentes**

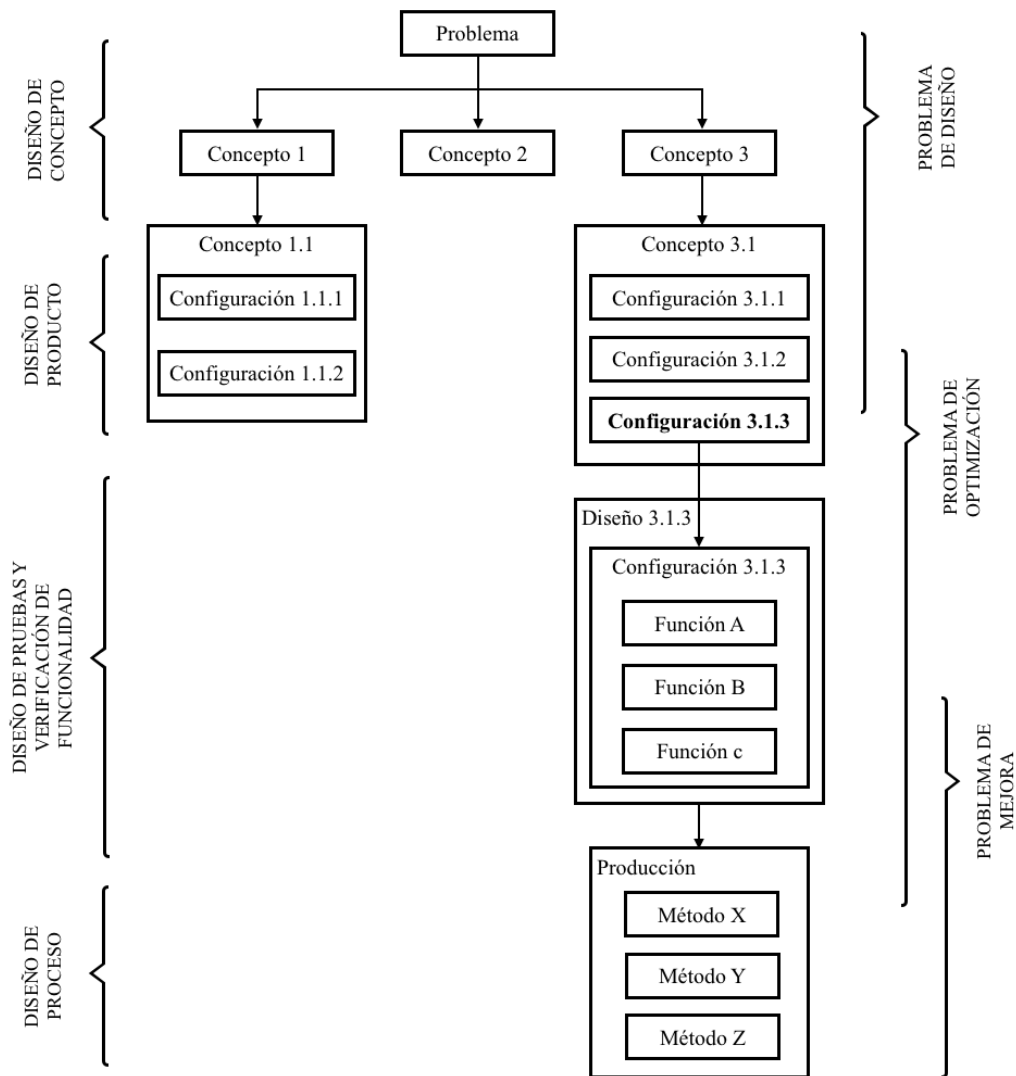
En esta etapa se debe redactar el problema que crea la necesidad inicial. La redacción debe plasmarse en términos cualitativos y cuantitativos siempre que se pueda representar en términos de una propiedad o magnitud.

Por medio de utilizar una herramienta como el *Work Breakdown Structure* (WBS por sus siglas en inglés), se puede utilizar el pensamiento divergente para descomponer el problema principal y poder encontrar los subcomponentes del mismo. Citando a Munari (1983): “el problema no se resuelve por sí mismo, pero en cambio, contiene todos los elementos para su solución; hay que conocerlos y utilizarlos en el proyecto de solución”.

En la Figura 30 se muestra una representación detallada de los problemas y los pasos que existen en general, desde el diseño del concepto, pasando por el diseño del producto, hasta finalizar con el diseño del proceso. Estas fases se enlistan de lado izquierdo de la figura y acompañan cada fase de definición del problema. De lado derecho se

correlaciona el tipo específico de problema de diseño que podría presentarse según lo mencionado por Ulrich (2005), en su taxonomía de problemas.

Se puede observar por tanto que durante el proceso de creación de un producto pueden aparecer uno o más problemas de diseño cuya solución específica debe ser considerada dentro de la misma metodología de diseño.



**Figura 30. Representación gráfica del proceso de diseño del producto y proceso, pasando por las pruebas de funcionalidad**

Fuente: Elaboración propia en base a Riitahuhta, Asko; Sääsäski, Juha; Salonen, Tapio (2005). Simulation-based Design Practise Used In Finishing Mobile Working Machines Industry, International Conference on Engineering Design (pág. 8). A. Samuel, W. Lewis. y Karl T. Ulrich (2005). Design, Creation of Artifacts in Society (pág. 16). University of Pennsylvania.

Ahora bien, utilizando la guía que propone Ulrich (2005), para la clasificación de los problemas de diseño, se puede visualizar que un problema evidentemente de diseño, puede sin embargo, contener problemas secundarios que son del tipo de optimización, como por ejemplo, optimizar el diseño propuesto de tal manera que el costo de producción y el tiempo de entrega, se reduzcan tanto como sea técnicamente posible.

### **Formulación de condiciones iniciales y restricciones**

En esta etapa se deberán formular todas las condiciones de inicio, conocidas en el problema, los puntos de unión y sus dimensiones, las interferencias o restricciones, las propiedades buscadas, etc.

A pesar de que la formulación inicial de condiciones pudiera tomarse como un elemento rígido e inviolable del diseño, se debe continuar revalidando dichas condiciones durante todo el proceso, hasta el instante mismo que el proceso de diseño se detiene, como comenta (Kamrani & Nasr, 2010), esto nos asegura cierta flexibilidad en el diseño, cuidando que dicha formulación continúe reflejando las metas y objetivos del proyecto hasta el cierre del mismo.

Una vez establecidas las condiciones conocidas, se procede a describir las propiedades requeridas para el modelo; estas propiedades podrán posteriormente etiquetarse como un requerimiento o una restricción, según los efectos que produzcan en el diseño.

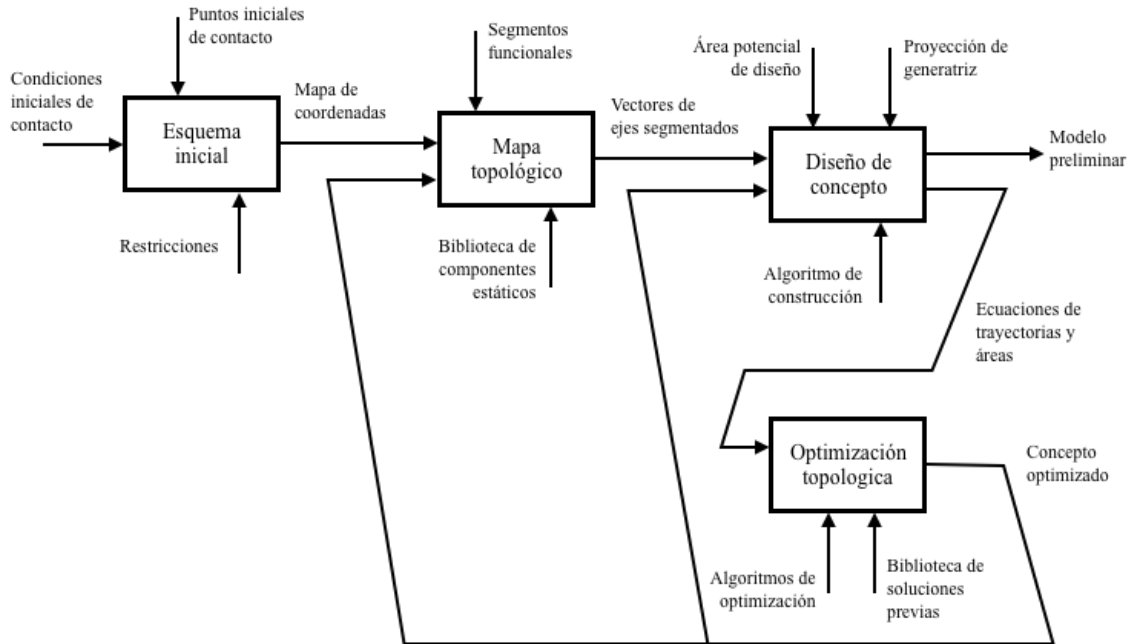
Es necesario que todas las propiedades deban representarse como una magnitud o un indicador medible, esto es, deben representarse por medio de una ecuación matemática o

un fenómeno físico. Debido a que dichas propiedades serán el eje principal del diseño, requieren de especial atención del diseñador para detallarlas tanto como sea posible.

También es prerrogativa de cada diseñador, el establecer tantas propiedades como sea necesario para que el objeto sea funcional y se desempeñe de manera óptima, sin caer en exageraciones que solo compliquen y entorpezcan el proceso de diseño.

### **Construcción del modelo por algoritmos**

En esta etapa es donde se explota la capacidad de los sistemas de cómputo para realizar los cálculos y modelado del producto. Es necesario alimentar el sistema con tanta información como se encuentre disponible, siempre que la información se pueda representar por una magnitud que pueda ser ubicada en un espacio tridimensional. Aun con la existencia de varios proyectos donde se ha utilizado un algoritmo generativo (*GDA*), dichos procesos de diseño no se encuentran totalmente documentados (Li & Lachmayer, *Generative Design Approach for Modeling Creative Designs*, 2018), es por esto que se propone para la solución de este caso, el desarrollo de un algoritmo específico para la construcción de un modelo sólido de revolución.



**Figura 31. Esquema de pasos para desarrollar la construcción del modelo**

Fuente: Elaboración propia.

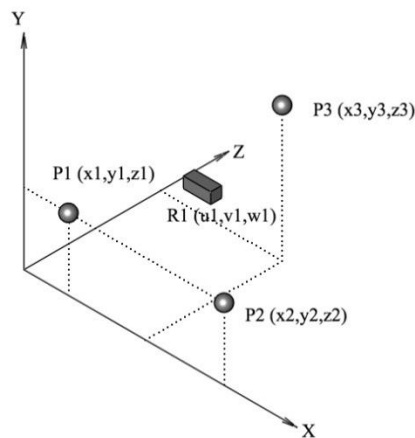
El esquema mostrado en la Figura 31, muestra los pasos propuestos para construir el modelo inicial y se detallan las entradas requeridas en cada paso. Las propiedades ( $Po$ ) y condiciones iniciales ( $Ci$ ) permitirán proyectar un modelo primigenio, en donde las restricciones ( $Re$ ), como su nombre lo refiere, modelarán un mapa topológico ( $Mp$ ) de donde se podrá partir para desarrollar un modelo detallado según la Ecuación 1.

$$(Po \cap Ci) - Re \rightarrow Mp \quad (1)$$

Después de establecer un mapa topológico, los algoritmos de construcción y optimización se encargan respectivamente de proponer una posible solución para, posteriormente, evaluarla y optimizarla. Aunque se prevé dentro del proceso de diseño una etapa específica de simulación y verificación, es importante señalar que, desde esta etapa de construcción, se realizan los primeros ejercicios de prueba y error referente a la trayectoria y forma del producto.

A través de un agente racional y una estrategia de búsqueda, se podrá optimizar en cada ciclo de ejecución el modelo, sumando también nuevo aprendizaje que será almacenado para referencia en futuras decisiones.

Para desarrollar el esquema inicial marcado en la Figura 31, se deberá primero localizar en un mapa de coordenadas los puntos de contacto conocidos y las restricciones existentes. Esto nos servirá de base para identificar los perfiles de revolución que representan los puntos de conexión.



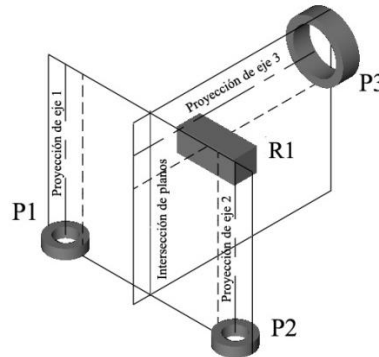
**Figura 32. Ejemplo de localización tridimensional de los puntos de contacto y restricciones conocidas por el diseñador**

Fuente: Elaboración propia.

Para cada punto de contacto y restricción se deberá desarrollar el perfil bidimensional, según el plano donde se encuentre. Esto permitirá proyectar los ejes y las líneas generatrices a lo largo del plano de origen y buscar la intersección de planos en cada punto de contacto.

La Figura 33 representa un ejemplo de cómo se deben representar los puntos de contacto P1, P2 y P3, con los perfiles de revolución y la restricción R1. Se puede también

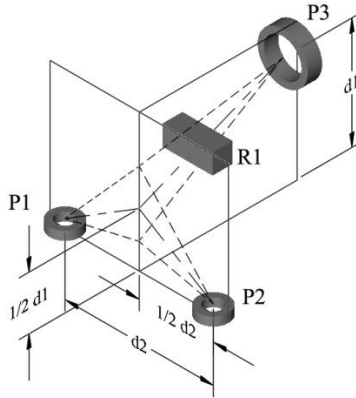
observar el eje transversal de cada punto de contacto, cómo se proyecta hasta su intersección con el resto de los ejes transversales.



**Figura 33. Ejemplo de proyección de los ejes transversales en el plano**  
Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, el algoritmo de construcción propuesto se encargará de proyectar el eje generatriz del cuerpo de revolución en un plano y realizará el análisis en cada cambio de trayectoria, con el fin de asignar una ecuación que mejor defina a la misma.

En la Figura 34 se representa un ejemplo de cómo el algoritmo proyecta el eje de la generatriz de un punto, sobre los planos definidos previamente, hacia la ubicación más próxima de los puntos contiguos. La restricción provoca que la trayectoria de los ejes tenga que desviarse para lograr conectarse con el resto de los ejes. Esta aparentemente sencilla operación de librar el bloqueo que representa la restricción debe realizarse a través de una estrategia de búsqueda.



**Figura 34. Los ejes de las generatrices se proyectan para encontrarse a medio camino, pero la restricción provocará una desviación de la trayectoria**

Fuente: Elaboración propia.

La trayectoria proyectada por los ejes es una función continua en el espacio, dada por la Ecuación 2:

$$\gamma: [a, b] \rightarrow \vec{r}^n \quad (2)$$

donde los puntos  $\gamma(a)$  y  $\gamma(b)$  y son respectivamente el inicio y el final de la trayectoria siempre que  $a, b \in \vec{r}$ ,  $a < b$  y.  $n = 2$ , para el caso de curvas planas (trayectoria en un plano) y  $n = 3$ , para el caso de curvas alabeadas (trayectoria en el espacio) y en el caso de la figura 34, pueden ser representados por  $[P1,P3]$ ,  $[P2,P3]$  o  $[P1,P2]$ .

Con el fin de tener una interpretación física cercana de la trayectoria curva, se establece  $[a,b]$  como un intervalo en el tiempo que tiene la forma de las Ecuaciones 3 y 4:

$$\text{Para } \gamma: [a, b] \rightarrow \vec{r}^3 \quad (3)$$

$$\gamma(t) = (x(t), y(t), z(t)) \quad (a \leq t \leq b) \quad (4)$$

Esto anterior permitirá utilizar una ecuación paramétrica en el espacio, dada por la Ecuación 5:

$$\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \\ z = z(t) \end{cases} \quad (a \leq t \leq b) \quad (5)$$

De tal forma que, cuando se obtienen los puntos en el espacio de inicio  $(x_1, y_1, z_1)$  y final  $(x_2, y_2, z_2)$  para  $\vec{r}^3$ , la ecuación paramétrica se puede despejar como la Ecuación 6:

$$\begin{cases} x = x_1 + t(x_2 - x_1) \\ y = y_1 + t(y_2 - y_1) \\ z = z_1 + t(z_2 - z_1) \end{cases} \quad (0 \leq t \leq 1) \quad (6)$$

Por lo tanto, el trazo del eje que conectará cada punto se podrá representar como una suma de trayectorias donde cada final de trayectoria coincide con el inicio de la subsecuente. Por ejemplo, para tres trayectos consecutivos dados por la Ecuación 7:

$$\gamma: [a, b] \rightarrow \vec{r}^n, \quad \delta: [c, d] \rightarrow \vec{r}^n \quad y \quad \sigma: [e, f] \rightarrow \vec{r}^n \quad (7)$$

La suma de las trayectorias, siempre que  $\gamma(b) = \delta(c)$  y  $\delta(d) = \sigma(e)$ , se denotará como  $\gamma \oplus \delta \oplus \sigma$ . Por lo que se obtendrá la siguiente forma dada por la Ecuación 8:

$$(\gamma \oplus \delta \oplus \sigma)(t) = \begin{cases} \gamma(t) \\ \delta(t - b + c) \\ \sigma(t - d + e) \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \text{si } a \leq t \leq b \\ & \text{si } b \leq t \leq b + d - c \\ & \text{si } d \leq t \leq d + f - e \end{aligned}$$

Se debe considerar que, para el caso de las restricciones, el espacio que interfiere con la trayectoria deberá ser tomado como límite máximo de la trayectoria, de tal manera que se debe expresar como las Ecuaciones 9 y 10:

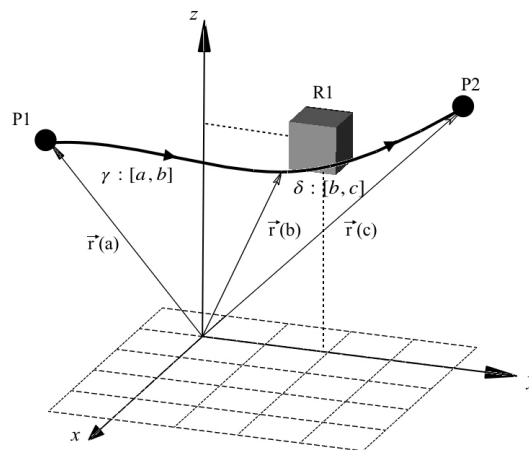
$$\gamma: [a, b'] \rightarrow \vec{r}^n \quad (9)$$

donde

$$(b \cup Ge) - Re \rightarrow b' \quad (10)$$

y equivale al punto límite donde la trayectoria precedente debe finalizar y a su vez, el punto donde una nueva trayectoria debe comenzar, en donde  $b$ , es el punto máximo de la trayectoria,  $Ge$  es la distancia del eje de trayectoria a la línea generatriz (radio de la pared externa del sólido de revolución) y  $Re$  es la restricción. El punto final de esta nueva trayectoria, marcado como  $b'$ , no deberá encontrarse dentro del área de interferencia causada por la restricción.

La Figura 35 ejemplifica una trayectoria en el espacio dada por dos curvas, cualesquiera para unir dos puntos denominados P1 y P2 y que obliga al intervalo  $\gamma: [a, b]$  a alejarse de la restricción R1 hasta un punto donde se debe trazar un nuevo intervalo marcado como  $\delta: [b, c]$ .



**Figura 35. Ejemplo de una trayectoria curva en el espacio entre los puntos P1 y P2. La curvatura evita interferir con la restricción R1**

Fuente: Elaboración propia.

Para determinar la trayectoria que pueda unir los puntos iniciales, es necesario trazar una secuencia de puntos que tengan como origen uno de los puntos iniciales y que generen una línea, o curva, en su caso, hacia el punto final. Para esto, un algoritmo se debe encargar de generar la trayectoria, al mismo tiempo que revisa las posibles interferencias

ocasionadas por una restricción. El mismo algoritmo podrá evaluar el cambio de ruta más efectivo para obtener una trayectoria funcional.

Para lo anterior, se retoma el algoritmo de colonización espacial propuesto por Lohan, Dede, & Allison (2017), utilizado en su metodología de diseño generativo y que tiene como base el algoritmo generativo (*GDA*), planteado por Runnions (2005), pero con una modificación en la asignación de las llamadas auxinas.

En este trabajo se tomará las auxinas como el equivalente a los puntos nodales de la trayectoria y estos delimitarán el espacio dado por una restricción y el punto objetivo de la trayectoria; en pocas palabras, son los nodos de conexión de una trayectoria  $\gamma: [a, b]$  entre dos puntos dados (P1 y P2). La Ecuación 11 muestra la fórmula propuesta por Runnions (2005):

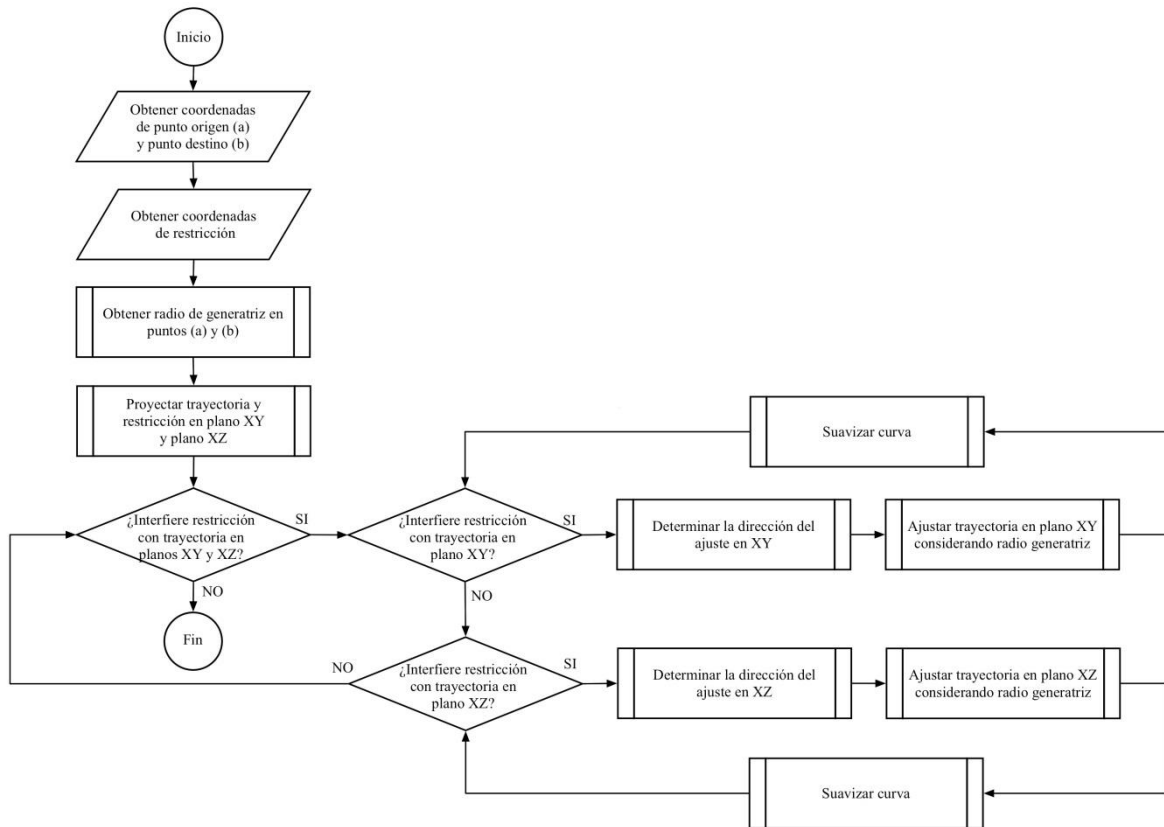
$$v' = v + D \frac{n}{\|n\|}, \text{ donde } n = \sum_{s \in S(v)} \frac{s - v}{\|s - v\|} \quad (11)$$

Donde  $v$  es el punto inicial,  $S$  son el conjunto de auxinas que delimitan la restricción  $R1$  e indican el punto objetivo  $P2$ ,  $n$  es el eje generatriz que unirá a los puntos dentro de una trayectoria potencial y  $D$  es una constante que indicará el paso. El algoritmo crecerá continuamente hasta que el punto inicial  $P2$  sea alcanzado desde el punto  $P1$ .

La misma ecuación y auxinas se toman para ejecutar el algoritmo en los dos ejes, con el fin de obtener una proyección de la trayectoria en  $X$  y  $Y$ . Estas trayectorias serán los componentes del vector  $\gamma$ , compuesto por números reales, cuyas coordenadas  $[a, b]$  son obtenidas de las coordenadas de las auxinas  $n$ , localizadas dentro de las trayectorias en cada eje según los representa la Ecuación 12.

$$\gamma = [a1x, a1y, a2x, a2y, \dots, anx, any] \quad (12)$$

La Figura 36 muestra un diagrama de flujo que sintetiza el algoritmo generativo (GDA) propuesto por Lohan, Dede, & Allison, (2017), y que está adaptado para construir una trayectoria de unión entre dos puntos en el espacio (auxinas), y que son representadas como punto origen (a) y punto destino (b).



**Figura 36. Diagrama de flujo del algoritmo de construcción propuesto para la trayectoria**  
Fuente: Elaboración propia.

El pseudo código de la figura 37 ejemplifica el desarrollo del algoritmo para construir una trayectoria y alejarla de una posible restricción, usando el lenguaje Python (Python Software Foundation, 2019).

```

1 # Programa para construir trayectoria entre dos puntos
2 inicio
3 import mumpy as np
  
```

```

4
5 # Introducir coordenadas X,Y,Z de centroide a (punto de origen) y
6 # radio (origen de eje generatriz)
7 axy = [ax,ay] # coordenadas en X,Y de punto a
8 axz = [ax,az] # coordenadas en X,Z de punto a
9 ra = radio de generatriz punto a
10
11 # Introducir coordenadas X,Y,Z de centroide b (punto de origen) y
12 # radio (origen de eje generatriz)
13 bxy = [bx,by] # coordenadas en X,Y de punto b
14 bxz = [bx,bz] # coordenadas en X,Z de punto b
15 rb = radio de generatriz punto b
16
17 # Introducir coordenadas de vértices de restricción proyectadas como
18 # área en XY y XZ
19 restrxy = np.array ([Vertx1,Vertx1], [Vertx2,Vertx2], ...,
20 [Vertxn,Vertxn])
21 restrxz = np.array ( [Vertx1,Vertz1], [Vertx2,Vertz2], ...,
22 [Vertxn,Vertzn])
23
24 # Trazar trayectoria recta entre punto a y b en plano XY
25 trayectoria = np.array ([axy,bxy])
26
27 # Evaluar si la trayectoria trazada interfiere con la restricción en
28 # el plano XY y XZ
29 ajustexy = 0 # Resetear contador de ajuste en plano XY
30 ajustexz = 0 # Resetear contador de ajuste en plano XY
31 while (trayectoria in restrxy) and (trayectoria in restrxz):
32
33     if (ajustexy = 0 and ajustexz = 0) # Comenzar ajuste en XY
34         ajustexy = 1
35
36         # Calcular área bajo la trayectoria en ambas direcciones
37         # para determinar dirección de ajuste en XY
38         areadwn = integrate.quad (restrxy , axy,bxy)
39         areaovr = integrate.quad (restrxy , bxy,axy)
40
41         if areadwn => areaovr
42             # Agregar punto medio en la trayectoria y moverlo
43             # fuera de la restricción considerando el radio
44             # de generatriz.
45             a1x = ((ax+bx)/2)
46             a1y = np.max(Vertx) + |np.max [ra,rb]|
47             a1xy = [a1x,a1y]
48             trayectoria = np.array(axy,a1xy,bxy)
49         else
50             a1x = ((ax+bx)/2)
51             a1y = np.min(Vertx) - |np.max [ra,rb]|
52             a1xy = [a1x,a1y]
53             trayectoria = np.array(axy,a1xy,bxy)
54
55     elif (ajustexy = 1 and ajustexz = 0) # Comenzar ajuste en XZ
56         ajustexz = 1
57

```

```

58      # Calcular área bajo la trayectoria en ambas direcciones
59      # para determinar dirección de ajuste en XZ
60      areadwn = integrate.quad (restrxz , axz,bxz)
61      areaovr = integrate.quad (restrxz , bxz,axz)
62
63      if areadwn => areaovr
64          # Agregar punto medio en la trayectoria y moverlo
65          # fuera de la restricción considerando el radio
66          # de generatriz.
67
68          a1x = ((ax+bx)/2)
69          a1z = np.max(Vertz) + |np.max [ra,rb]|
70          a1xz = [a1x,a1z]
71          trayectoria = np.array (axz,a1xz,bxz)
72      else
73          a1x = ((ax+bx)/2)
74          a1z = np.min(Vertz) - |np.max [ra,rb]|
75          a1xz = [a1x,a1z]
76          trayectoria = np.array (axz,a1xz,bxz)
77      else
78          ajustexy = 0
79          ajustexz = 0
80      break
81  fin

```

**Figura 37. Pseudocódigo para el proceso de construcción de una trayectoria con base a dos puntos y una posible restricción**

Fuente: Elaboración propia.

Posterior a la construcción de la trayectoria, es necesario realizar un suavizado de la misma, con el fin de reducir los cambios de dirección abruptos creados durante la construcción. Para esto se puede utilizar el filtro de Savitzky–Golay (1964), dado por las Ecuaciones 13 y 14:

$$Y_j = \sum_{i=\frac{1-m}{2}}^{\frac{m-1}{2}} C_x y_{j+i} \quad (13)$$

$$\frac{m-1}{2} \leq j \leq n - \frac{m-1}{2} \quad (14)$$

Donde la información de la trayectoria está dada por una serie de  $n$  puntos  $(x_j, y_j)$  para  $j = 1, 2, \dots, n$ , y donde  $x$  es una variable independiente y  $y_j$  es el valor observado.

Ambos puntos  $(x_j, y_j)$  son acondicionados por medio de  $m$  coeficientes de convulsión  $C_j$ .

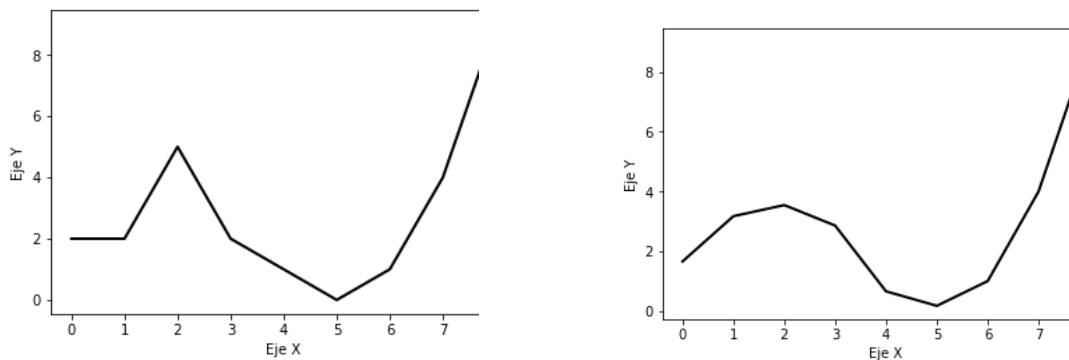
Afortunadamente, dentro de las librerías de Phyton<sup>®</sup> se cuenta con el algoritmo dentro de la librería “spicy.signal”, por lo que el código de suavizado de la curva puede quedar según la figura 38.

```

1 # Programa para suavizar una trayectoria
2 inicio
3 import mumpy as np
4 import matplotlib.pyplot as plt
5 from spicy.signal import savgol_filter
6
7 # Aplicar algoritmo para suavizar la curva
8 traySuaviz = savgol_filter(trayectoria, 5, 2)
9
10 fin
    
```

**Figura 38. Pseudocódigo para el proceso de suavizado de Savitzky–Golay (1964) sobre una trayectoria**  
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 39 se muestra un ejemplo de aplicación del algoritmo de Savitzky–Golay (1964), sobre una trayectoria. La trayectoria de la derecha muestra el resultado después de aplicar el filtro de suavizado sobre la trayectoria inicial de la izquierda.



**Figura 39. Comparativa entre dos curvas, la de la derecha, como resultado del suavizado de la curva izquierda.**

Fuente: Elaboración propia.

Una vez resuelta la trayectoria, sin interferencia con la restricción y suavizada, es necesario determinar el área transversal del objeto, dada por la trayectoria generatriz. Para esto se tomará cada cambio de trayectoria como un segmento y se proyectará en un plano el eje junto con la curva generatriz.

Aunque la localización de los puntos se realizará con referencia a un mapa tridimensional, el análisis y optimización de cada intervalo de la trayectoria será bidimensional. Esto último se logra debido a que se estará trabajando con un cuerpo de revolución.

Una característica matemática de los cuerpos de revolución es que el volumen tridimensional nace de un área bidimensional que, a su vez, se compone de un eje y una curva. En la Ecuación 15 se resume el teorema de Pappus-Guldinus, donde el área generada es igual al producto de la longitud del arco por la distancia recorrida por su centroide.

$$A = \int 2\pi y dL \quad (15)$$

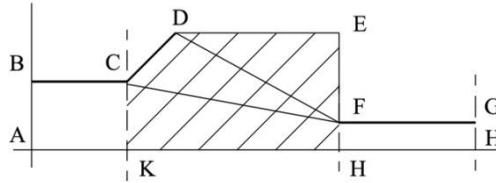
donde  $2\pi\bar{y}$  es la distancia recorrida por el centroide de  $L$ , siendo  $L$  la distancia de la curva generatriz que rota alrededor del eje  $x$ .

Para el análisis de cada intervalo, se debe especificar la trayectoria que describe su eje, así como una potencial trayectoria de la generatriz; ambas se deberán proyectar en el mismo plano. Lo anterior permitirá obtener un área potencial de diseño susceptible a ser optimizada.

La Figura 40 muestra, como ejemplo, el adaptador con la trayectoria del eje y su correspondiente generatriz; ambas sobre el mismo plano. Se observa que existe un par de trayectorias potenciales de unión, compuestas por los segmentos  $\overline{CF}$  y  $\overline{DF}$ . Estas trayectorias son analizadas por el algoritmo como los puntos más cercanos de conexión entre los segmentos externos del objeto.

Se puede observar en la figura 40, que el área delimitada por los puntos C, D, E, F, H y K, es lo que Assimi, Jamali, & Nariman-zahed (2017), llaman espacio factible, que es la región donde una solución potencial puede someterse a una optimización. Es importante

entonces que el algoritmo de diseño se concentre en esta región factible con el fin de encontrar la trayectoria óptima entre dichos puntos que otorgue la mayor resistencia mecánica con el mínimo uso de material y, por tanto, el mínimo peso posible.



**Figura 40. Proyección en un plano del adaptador donde se señala el área potencial de diseño y los puntos de contacto con las trayectorias también potenciales**

Fuente: Elaboración propia.

Con el fin de tener una interpretación física, se establecen los segmentos de unión [C,F] y [D,F] como intervalos en el tiempo que se podrán representar según las Ecuaciones 16, 17, 18 y 19:

$$\text{Para } \gamma: [c, f] \rightarrow \vec{r}^2 \quad (16)$$

$$\gamma(t) = (x(t), y(t)) \quad (c \leq t \leq f) \quad (17)$$

$$\text{Para } \gamma: [d, f] \rightarrow \vec{r}^2 \quad (18)$$

$$\gamma(t) = (x(t), y(t)) \quad (d \leq t \leq f) \quad (19)$$

Esto anterior permitirá utilizar las Ecuaciones paramétricas 20 y 21 dadas por:

$$\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \end{cases} \quad (c \leq t \leq f) \quad (20)$$

$$\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \end{cases} \quad (d \leq t \leq f) \quad (21)$$

En este caso, las ecuaciones representan dos posibles soluciones que deberán ser evaluadas por el algoritmo de optimización, con el fin de encontrar la más adecuada.

Con las trayectorias propuestas, el siguiente paso es establecer el área bajo la curva generatriz que corresponde al diámetro exterior del sólido. El área bajo la curva generatriz en un segmento  $[a,b]$  es representada por una integral definida por la Ecuación 22:

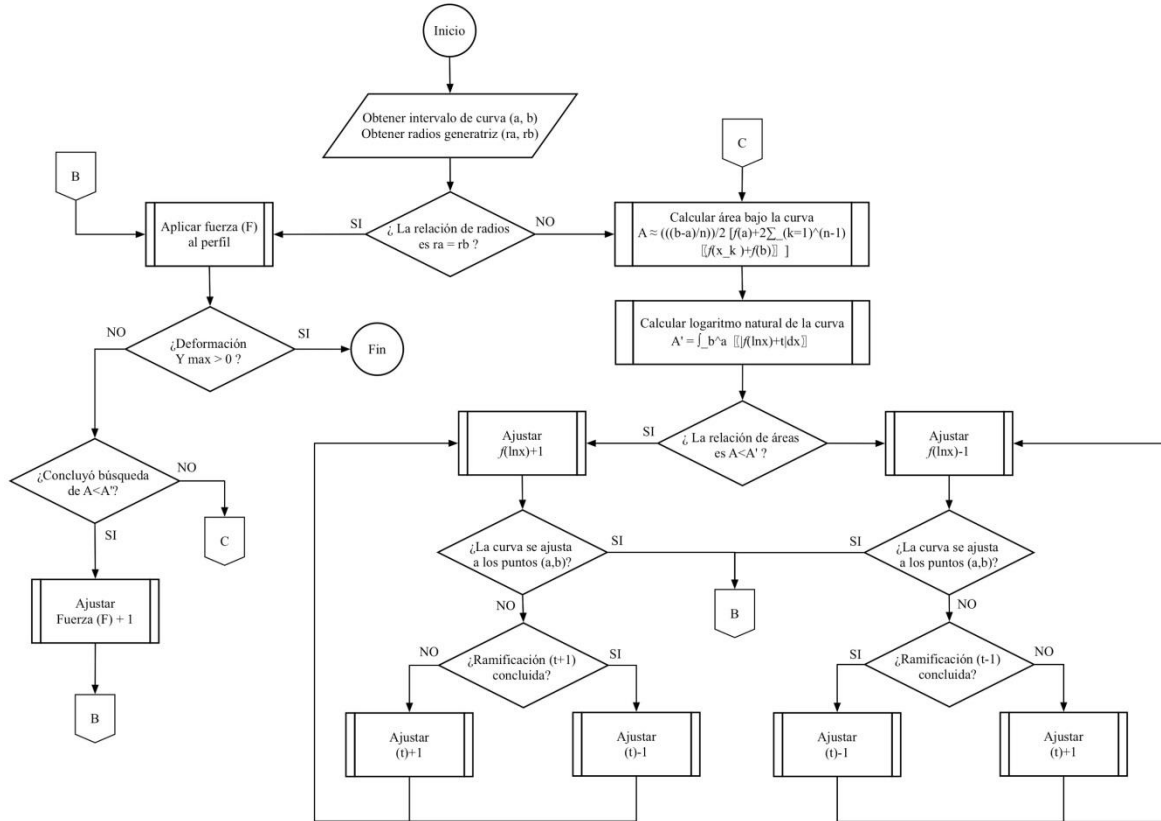
$$A = \int_b^a |f(x)| dx \quad (22)$$

Para el primer cálculo de optimización, el algoritmo despreciará la generatriz del diámetro interior y únicamente comparará el área correspondiente al diámetro exterior, y la tomará como área generatriz del estado inicial para compararla contra el área obtenida después de una búsqueda. El algoritmo propuesto utilizará la base del logaritmo natural para ajustar la curva con una transición suave y obtener al mismo tiempo un radio de giro lo más compacto posible. El área optimizada, por lo tanto, se deberá calcular de la siguiente forma según la Ecuación 23:

$$A = \int_b^a |f(\ln x) + t| dx \quad (23)$$

Donde  $f(\ln x)$  indicará la dirección y curvatura de la trayectoria, mientras que la variable  $t$  será el ajuste de la trayectoria para alcanzar el punto final. Estas dos variables provocarán que el algoritmo de búsqueda haga un primer paso para buscar la optimización y posteriormente, un paso de ajuste para que a continuación, volver a reevaluar dicho paso.

En la Figura 41, se muestra el diagrama de flujo propuesto para construir la trayectoria de la línea generatriz, que formará el diámetro exterior del sólido de revolución, y que conectará los puntos marcados en las condiciones iniciales del diseño.



**Figura 41. Diagrama de flujo del algoritmo de construcción propuesto para la generatriz**

Fuente: Elaboración propia.

Debido a que el diseñador solo puede analizar un número finito de soluciones de diseño, antes de sufrir una fatiga mental (Krish, 2011), el algoritmo propuesto busca encontrar los límites superiores o inferiores en la relación de áreas bajo la curva de la trayectoria original, versus la trayectoria nueva propuesta, con el fin de realizar un “filtro de rendimiento” (Krish, 2011), mediante un análisis de deformación del perfil resultante cuando se aplica una fuerza perpendicular al eje de rotación.

A continuación, en la figura 42, se desarrolla el algoritmo de optimización de la trayectoria por medio de ajustar el área bajo la curva. En este caso, como los radios de la trayectoria inicial es diferente al radio de la trayectoria final. Se propone utilizar una trayectoria basada en el logaritmo natural ( $ln$ ), que permita un cambio de trayectoria suave.

```
1 # Programa para ajustar generatriz entre dos puntos en plano XY
2 inicio
3 import mumpy as np
4
5 ra = radio de generatriz punto a
6 rb = radio de generatriz punto b
7 trayectoriaXY = np.array ([axy,bxy])
8 axy = [ax,ay] # coordenadas en X,Y de punto a
9 bxy = [bx,by] # coordenadas en X,Y de punto b
10 trayectoriaXY_adj = np.array ([axy_adj,bxy_adj])
11 axy_adj = [ax_adj,ay_adj] # coordenadas en X,Y de punto a ajustados
12 bxy_adj = [bx_adj,by_adj] # coordenadas en X,Y de punto b ajustados
13 constante_de_ajuste_t = 0
14 r_max = |np.max [ra,rb]|
15 ajuste_de_funcion = 0
16 incremento = 0.1
17 ax_aj, bx_aj = ax, bx # límites de la integral
18
19 # Verificar si existe cambio en radio de generatriz inicial y final
20 while ra != rb
21
22     # Calcular áreas bajo la generatriz en segmento (ax,bx)
23     areagntrz = integrate.quad (trayectoriaXY , ax,bx)
24     def func(x):
25         return (np.log(trayectoriaXY)) + constante_de_ajuste_t
26     valores_en_x = np.linspace(ax, bx)
27     area_log = func(x)
28
29     # Verificar relación de áreas para determinar dirección de ajuste
30     if area_log < areagntrz
31         area_log = func(x) + ajuste_de_funcion
32
33     # Verificar si la curva de ajusta a los puntos de unión
34     if ([axy,bxy]) != ([axy_adj,bxy_adj])
35
36         # Modificar constante de ajuste
37         if constante_de_ajuste == rmax
38             def func(x):
39                 return (np.log(trayectoriaXY)) +
40                     (constante_de_ajuste_t - 1)
41             valores_en_x = np.linspace(ax, bx)
42             area_log = func(x)
43         else
44             def func(x):
45                 return (np.log(trayectoriaXY)) +
46                     (constante_de_ajuste_t + 1)
47             valores_en_x = np.linspace(ax, bx)
48             area_log = func(x)
49     else
50
51     # Modificar constante de ajuste
52     if constante_de_ajuste == rmax
53         def func(x):
```

```

54         return (np.log(trayectoriaXY)) +
55             (constante_de_ajuste_t - 1)
56     valores_en_x = np.linspace(ax, bx)
57     area_log = func(x)
58     else
59         def func(x):
60             return (np.log(trayectoriaXY)) +
61                 (constante_de_ajuste_t + 1)
62             valores_en_x = np.linspace(ax, bx)
63             area_log = func(x)
64     else
65     if area_log < areagntrz
66         area_log = func(x) - ajuste_de_funcion
67
68     # Verificar si la curva de ajusta a los puntos de unión
69     if ([axy,bxy]) != ([axy_adj,bxy_adj])
70
71         # Modificar constante de ajuste
72         if constante_de_ajuste == rmax
73             def func(x):
74                 return (np.log(trayectoriaXY)) +
75                     (constante_de_ajuste_t - 1)
76                 valores_en_x = np.linspace(ax, bx)
77                 area_log = func(x)
78             else
79                 def func(x):
80                     return (np.log(trayectoriaXY)) +
81                         (constante_de_ajuste_t + 1)
82                     valores_en_x = np.linspace(ax, bx)
83                     area_log = func(x)
84         else
85
86         # Modificar constante de ajuste
87         if constante_de_ajuste == rmax
88             def func(x):
89                 return (np.log(trayectoriaXY)) +
90                     (constante_de_ajuste_t - 1)
91                 valores_en_x = np.linspace(ax, bx)
92                 area_log = func(x)
93             else
94                 def func(x):
95                     return (np.log(trayectoriaXY)) +
96                         (constante_de_ajuste_t + 1)
96                 valores_en_x = np.linspace(ax, bx)
98                 area_log = func(x)
99     break
100    fin

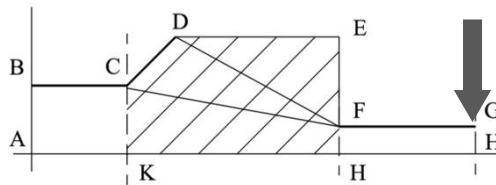
```

**Figura 42. Pseudocódigo para la determinación de la curva generatriz sobre una trayectoria**

Fuente: Elaboración propia.

Se podrá observar que el algoritmo propuesto en las figuras 41 y 42, basa la optimización del área en el uso del logaritmo natural ( $\ln$ ); esto anterior debido a que tiene como base el número  $e$  (número de Euler). Se utiliza el Número de Euler debido a su relación cercana con ciertas formas existentes en la naturaleza, pero principalmente, por su aproximación a la curva que describen los esfuerzos a los que se somete una viga en voladizo. El logaritmo es utilizado especialmente para el cambio de radios entre dos trayectorias, esto es, cuando hay un escalón entre dos generatrices que concurren en el mismo eje de rotación.

De igual forma, como se puede observar en el diagrama de la Figura 43, otra variable importante que se debe considerar para la construcción del modelo es la carga que será aplicada de manera perpendicular al eje de la generatriz. Esto permitirá realizar la optimización del área sin llegar a comprometer la resistencia del modelo.



**Figura 43. Proyección en un plano del adaptador con la carga  $F_p$  en uno de sus extremos**

Fuente: Elaboración propia.

La intención de esta evaluación de la carga no es obtener las condiciones cuando falla la pieza, sino más bien, obtener una referencia de resistencia a la flexión en cada perfil nuevo generado. La intención es que el algoritmo compare los perfiles nuevos con los previamente creados para realizar una toma de decisión de hacia dónde debería optimizar la curva generatriz, además de decidir si se debe continuar trabajando sobre la trayectoria

planteada o regresar para evaluar otra trayectoria. En la siguiente etapa de la metodología, cuando se construya el modelo tridimensional, la evaluación será más exacta.

El algoritmo realizará una evaluación bidimensional aproximada de la resistencia del adaptador con la fuerza  $F_p$  dada, tomando como base un material genérico como puede ser el aluminio, el acero o inclusive un material plástico, según el criterio del diseñador.

Para el cálculo del momento de flexión se deberá obtener una matriz bidimensional de transporte de fuerzas y desplazamientos, como lo propone Monroy & Rodríguez (2004) y cuya fórmula se enlista en las Ecuaciones 24, 25 y 26:

$$M_{z_0} = M_{z_A} - Fx_A(y_A - y_0) + Fy_A(x_A - x_0) \quad (24)$$

$$Fx_0 = Fx_A \quad (25)$$

$$Fy_0 = Fy_A \quad (26)$$

Mediante la adición de fuerzas iguales, opuestas y no colineales, en el punto de origen de las coordenadas en el plano, es posible trasladar las fuerzas de cualquier punto sobre el mismo plano. Lo mismo aplica para los desplazamientos, donde se podrá utilizar la siguiente fórmula de traslación mencionada en las Ecuaciones 27, 28, 29, 30 y 31:

$$\Delta y = -(x_A - x_0)\theta_{z_A} \quad (27)$$

$$\Delta x = -(y_A - y_0)\theta_{z_A} \quad (28)$$

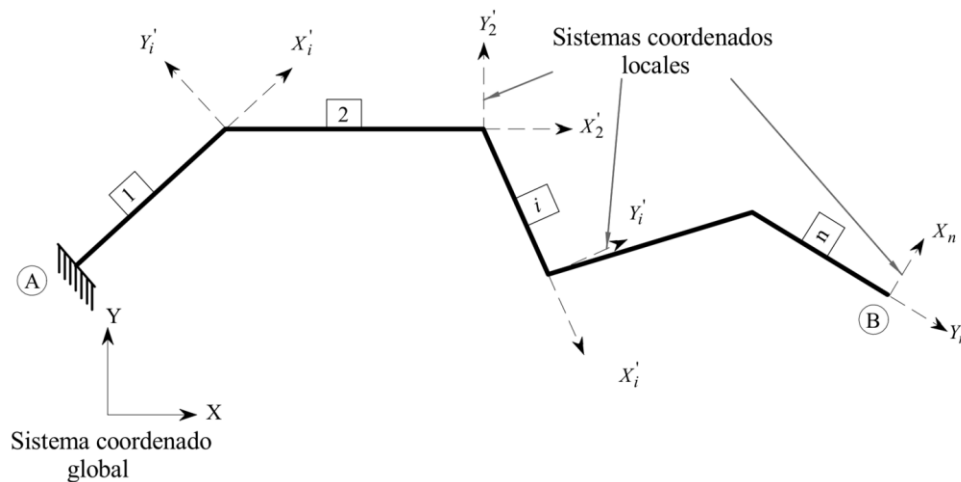
$$\Delta x_0 = \Delta x_A + \Delta x = \Delta x_A + (y_A - y_0)\theta_{z_A} \quad (29)$$

$$\Delta y_0 = \Delta y_A + \Delta y = \Delta y_A + (x_A - x_0)\theta_{z_A} \quad (30)$$

$$\theta_{z_0} = \theta_{z_A} \quad (31)$$

La traslación se deberá realizar para cada segmento donde exista un cambio de trayectoria o donde exista un cambio de sección entre los segmentos contiguos. Para una trayectoria en dos dimensiones, formada por segmentos no colineales, la matriz de

flexibilidad del extremo final se obtiene a través de la matriz de cada segmento. En la Figura 44 se ejemplifica un trayecto formado por varios segmentos donde cada uno cuenta con su sistema local de coordenadas, los cuales se trasladan al punto B bajo un sistema de coordenadas globales.



**Figura 44. Trayectoria formada por segmentos no colineales**

Fuente: Monroy y Rodríguez (2004). Obtención de la rigidez elástica de barras formadas por segmentos de sección variable no colineales, XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural (pág.7). Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural.

Para complementar las matrices de traslación citadas, es necesario considerar también la matriz de los segmentos de sección variable, tomando como referencia lo que Tena (1994) especifica. La fórmula de la matriz de rigidez para cada sección queda, por tanto, según la Ecuación 32:

$$[f] = \begin{bmatrix} \int_0^L \frac{dx}{EA(x)} & 0 & 0 \\ 0 & \int_0^L \frac{(L-x^2)dx}{EI_z(x)} + \int_0^L \frac{dx}{GA_{cy}(x)} & \int_0^L \frac{(L-x)dx}{EI_z(x)} \\ 0 & \int_0^L \frac{(L-x)dx}{EI_z(x)} & \int_0^L \frac{dx}{EI_z(x)} \end{bmatrix} \quad (32)$$

donde  $E$  es el módulo de elasticidad y  $G$  el módulo de rigidez del cuerpo,  $A(x)$  es la función que representa la variación del área,  $I_z(x)$  es el momento de inercia,  $A_{cy}(x)$  es la sección transversal respecto al eje y  $L$  es la longitud del segmento.

Afortunadamente, para el cálculo del esfuerzo se puede recurrir a la utilización de un software de análisis de elemento finito como SimScale (SimScale GmbH, 2018), en donde se puede simular sobre el sólido de revolución en sus tres ejes.

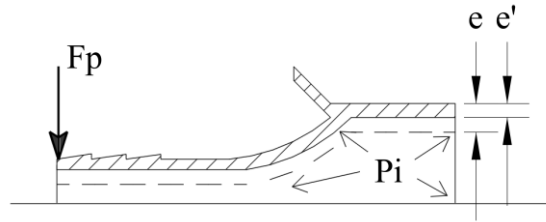
En esta etapa de evaluación se requiere también encontrar la combinación de menor área con mayor resistencia, haciendo que el algoritmo explore las diferentes combinaciones existentes entre ambas variables para encontrar una solución óptima.

La optimización del diámetro interior tendrá como inicio la geometría de la trayectoria generatriz tendiendo hacia su propio eje. Por lo tanto, se debe trasladar la curva generatriz hacia su eje, en incrementos controlados, con el fin de evaluar la distancia obtenida entre ambas trayectorias, exterior e interior, como una sola área. Por tanto, la fórmula para obtener el área entre las trayectorias está dada por la Ecuación 33:

$$A = \int_b^a ((f(x) - g(x))dx \quad (33)$$

donde  $f(x)$  es el diámetro exterior y  $g(x)$ , el diámetro interior del sólido de revolución.

El algoritmo de búsqueda deberá trasladar la curva  $f(x)$  sobre el eje  $y$ , sobre toda la longitud que separa dicha generatriz del eje, hasta encontrar una distancia óptima dada por la curva  $g(x)$ , y que cumpla con los requerimientos especificados de la pieza, como son, la resistencia mecánica a una fuerza de flexión y/o una presión interna.



**Figura 45. Construcción de diámetro interno a través de trasladar el diámetro externo**

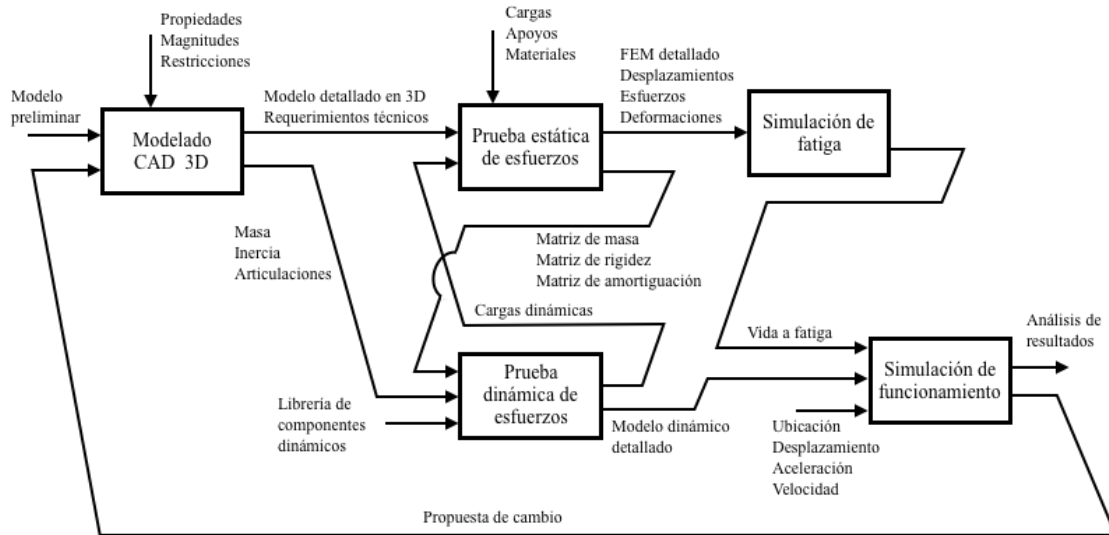
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 45 se muestra un ejemplo de cómo se debe trasladar la trayectoria dada por  $e'$ , curva  $f(x)$  sobre el eje  $y$ , hacia la trayectoria  $e$ , curva  $f(x)$  sobre el eje  $y$ . Se podrá utilizar el mismo algoritmo de búsqueda referido en la Figura 41, con el debido ajuste de la fuerza externa  $F_p$  y la presión interna  $P_i$ .

### **Simulación y pruebas de verificación del modelo**

En esta etapa se verificará que el modelo cumpla con los requerimientos y propiedades especificados en las primeras etapas y ocupará de entrada el modelo preliminar con la geometría optimizada. La Figura 46 muestra el diagrama de pasos propuestos para llevar a cabo la simulación y verificación.

Esta etapa, aunque contiene una secuencia de pasos, es una etapa pura de prueba y error que corre de forma paralela e interactiva, donde el modelo 3D es sometido a esfuerzos estáticos y dinámicos, cuando la función lo requiera, con el fin de detallar sus dimensiones o formas.



**Figura 46. Representación gráfica de la etapa de simulación y verificación**

Fuente: Elaboración propia.

Partiendo del modelo 3D se puede utilizar el software Simscale (SimScale GmbH, 2018), el cual es un programa para diseño y simulación de piezas de ingeniería, asistido por computadora, y basado en computación en la nube. El módulo de análisis de elemento finito permite realizar análisis estático y dinámico (lineal y no lineal) de estructuras, así como simular fatiga y fallas en diversos materiales bajo la influencia de diversas cargas.

A diferencia de la etapa de construcción del modelo, en esta etapa se debe detallar exhaustivamente la información que se tenga de los fenómenos físicos a los que estará sometido el modelo como, por ejemplo, la magnitud, dirección y localización de las cargas.

Las pruebas de verificación permitirán obtener materiales óptimos adecuados para fabricar el modelo y con los que más adelante se realizará un análisis de costo/beneficio.

### **Análisis de resultados y selección de alternativas**

Cuando se realiza la optimización de una propiedad física en un diseño, es inevitable afectar de manera directa o indirecta, alguna otra propiedad. Por dar un ejemplo,

cuando se optimiza el área de una sección para aligerar el peso de un diseño, se expone la resistencia mecánica del propio diseño en dicha sección. La optimización también tiene un impacto en el tipo de material que se utilizará y, en consecuencia, con los tiempos y costos de producción.

Por lo tanto, es necesario analizar el impacto que tiene una propiedad sobre el resto de las propiedades del modelo. Utilizando como base el modelo de matriz propuesto por Eppinger, Whitney, Smith y Gebala (1994), podemos relacionar y ponderar las propiedades de un producto.

La Tabla 3 muestra un ejemplo de una matriz de relación, donde a cada propiedad se le asigna un valor específico dentro de una escala, ambos propuestos por el diseñador, dependiendo de la importancia de la propiedad dentro de la funcionalidad total del diseño.

Al final de la tabla se suman los valores correlacionados con el fin de obtener un valor global para cada propiedad.

**Tabla 3. Ejemplo de una matriz de relación**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
A	-	X			X			X					
B	X	-			X					X			
C			-			X				X			X
D				-									X
E	X	X			-								
F			X			-		X	X				
G							-	X					
H	X						X	-				X	
I						X	X		-			X	
J		X	X							-			
SUMA TOTAL													

Posterior a elaborar la matriz de relación, se deberán agrupar los valores globales obtenidos y asignarles una prioridad de manera descendente. Dicha prioridad ayudará a categorizar las propiedades con mayor impacto sobre el diseño. Con este impacto el

diseñador podrá fijar su atención en las propiedades importantes y dejar en segundo término aquellas cuyo efecto es despreciable. La Tabla 4 muestra un ejemplo de cómo representar las propiedades según la prioridad de su función. Es recomendable manejar un mínimo de tres niveles de prioridad para separar las prioridades indispensables de las importantes y las despreciables. Esta tabla no es más que un análisis de sensibilidad que analiza los diferentes parámetros del producto con el fin de identificar su impacto en el diseño y explorar, de esta forma, varias alternativas (Chang, 2015).

**Tabla 4. Tabla para categorización de propiedades**

	Prioridad 1 (Función indispensable)	Prioridad 2 (Función importante)	Prioridad 3 (Función despreciable)
Propiedad A	X		
Propiedad B		X	
Propiedad C	X		
Propiedad D			X
Propiedad E	X		
Propiedad F			X
Propiedad G		X	

Según el ejemplo de la Tabla 4, el diseñador podrá contar entonces con al menos tres alternativas de diseño donde las propiedades marcadas con la prioridad 1, funciones indispensables, formarán la línea conductora del diseño alrededor de las cuales serán colocadas las propiedades con prioridad 2, funciones importantes. Finalmente, las propiedades con prioridad 3, funciones despreciables, podrán incorporarse al diseño en menor o mayor valor, dependiendo de si existe o no un efecto en las prioridades con nivel de prioridad más alto.

El diseñador tendrá, por lo tanto, opciones de modelos donde ciertas propiedades son más importantes que otras. De estas opciones de modelos, el diseñador deberá seleccionar la alternativa de la cual obtenga el mejor desempeño requerido del producto.

En la Tabla 5 se presenta un ejemplo de una tabla donde el diseñador debe desglosar cada una de las propiedades y señalar tanto su peso específico dentro del diseño (prioridad) como el desempeño obtenido en su funcionalidad. En la última columna de la tabla se debe realizar una suma de los valores ponderados con el fin de obtener un valor relativo total para cada opción de modelo propuesto.

**Tabla 5. Tabla para identificar el desempeño de un modelo**

	Desempeño de función ( $au_1$ )	Prioridad de propiedad ( $av_1$ )	Valor ponderado propiedad ( $aw_1$ )	Desempeño de función ( $au_2$ )	Prioridad de propiedad ( $av_2$ )	Valor ponderado propiedad ( $aw_2$ )	...	Valor total ponderado del modelo
Modelo (a)	( $au_1$ )	( $av_1$ )	$aw_1=(au_1 \times av_1)$	( $au_2$ )	( $av_2$ )	$aw_2=(au_2 \times av_2)$	...	$\sum_1^n aw_n$
Modelo (b)	( $bu_1$ )	( $bv_1$ )	$bw_1=(bu_1 \times bv_1)$	( $bu_2$ )	( $bv_2$ )	$bw_2=(bu_2 \times bv_2)$	...	$\sum_1^n bw_n$
Modelo (c)	( $cu_1$ )	( $cv_1$ )	$cw_1=(cu_1 \times cv_1)$	( $cu_2$ )	( $cv_2$ )	$cw_2=(cu_2 \times cv_2)$	...	$\sum_1^n cw_n$
:	:	:	:	:	:	:	...	:
Modelo (z)	( $zu_1$ )	( $zv_1$ )	$zw_1=(zu_1 \times zv_1)$	( $zu_n$ )	( $zv_n$ )	$zw_n=(zu_n \times zv_n)$	...	$\sum_1^n zw_n$

Con la sumatoria del valor total ponderado para cada modelo, tendremos una referencia numérica que nos ayudará a seleccionar el modelo con el mejor balance de propiedades y funcionalidad requerida, esto es, se tendrá la mejor opción técnicamente hablando.

### **Análisis de costo / beneficio**

La intención en esta etapa es encontrar la mayor rentabilidad entre dos tipos de modelos y sus procesos de producción potenciales. Este análisis debe considerar el mayor cumplimiento de las necesidades y desempeño funcional, contra los menores recursos requeridos para llevarlas a cabo.

Por lo tanto, al hablar de beneficios, se debe considerar el grado de cumplimiento de las propiedades requeridas del modelo, así como el desempeño funcional de cada una, según el análisis arrojado de la etapa anterior.

Respecto a los costos involucrados, existen aquellos que no necesariamente se representan en términos monetarios, sino en término de recursos requeridos, dentro de los cuales, se debe considerar la capacidad actual del diseñador o empresa para desarrollar el producto, asegurando una condición mínima de calidad del mismo, en los tiempos máximos disponibles para su uso.

Posteriormente se deberá cuantificar, por medio de una técnica de valorización, los beneficios que se obtendrían al fabricar un determinado producto con determinados materiales y condiciones, contra los costos totales de cada alternativa que se tenga. Se debe involucrar por lo menos los siguientes costos monetarios:

- Costos de capital (compra de maquinaria, adecuación del espacio y requerimientos de instalación)
- Costos de operación (costos de fabricación directos de mano de obra, materia prima, herramientas, herraamentales, costo de merma)
- Costos de mantenimiento (costo de energía, costo de consumibles)

## **Documentación y aprobación**

En esta etapa se debe recopilar y completar la documentación técnica detallada del producto. La intención es ordenar la información existente según la etapa correspondiente del proyecto. Los siguientes son los documentos mínimos que debieran de recopilarse para cada proyecto:

**Memoria técnica:** En la memoria técnica se debe utilizar información objetiva y basada en realidades medibles o demostrables, y se deberá registrar toda la información existente referente al problema, así como la generada en las etapas de la búsqueda de solución. Todas las condiciones iniciales establecidas y las propiedades requeridas para el producto se deberán documentar.

También se deberá incluir una justificación de las decisiones tomadas, con el fin de dejar evidencia para futuros proyectos, cuidando que todos los comentarios realizados de manera afirmativa, e inclusive, negativa, deberán tener un sustento cuantificable de alguna manera para evitar los puntos de vista parciales y subjetivos.

**Planos:** Los planos generados por las etapas intermedias son tan importantes como los planos finales de diseño. Ambos se deben documentar con la diferencia que los planos de producción deberán contar con un sello de aprobación y número de versión. Los planos deberán contener al menos los siguientes elementos: nombre de la compañía, nombre del proyecto, versión del plano, nombre de quien elabora, nombre de quien aprueba, fecha de la versión, acotamientos, escala, simbología y si tiene relación con otro plano cuando se trate de un subcomponente o una familia de planos.

**Cronograma:** El cronograma deberá reflejar una relación en secuencia de todas las actividades realizadas durante el proyecto; cada actividad deberá ser identificada con el

personal involucrado, los recursos requeridos y el tiempo estimado para realizar dicha actividad. Las actividades deberán organizarse por categorías que identifiquen las etapas análisis de la situación, definición del problema, diseño y arranque de la producción.

**Presupuestos:** Se deberá documentar los gastos directos e indirectos ocasionados durante el desarrollo del proyecto. El cronograma ayudará a relacionar los costos de la mano de obra al asignar un costo a cada hora invertida por el personal del proyecto.

Para los costos de materiales y suministros, se deberá tener una relación de las inversiones en equipo, materia prima, herramientas y herramientas. Todas estas inversiones deberán ser únicamente destinadas al proyecto y se debe de tener cuidado de no incluir gastos de operación como, por ejemplo, el costo de darle servicio de mantenimiento a una máquina existente.

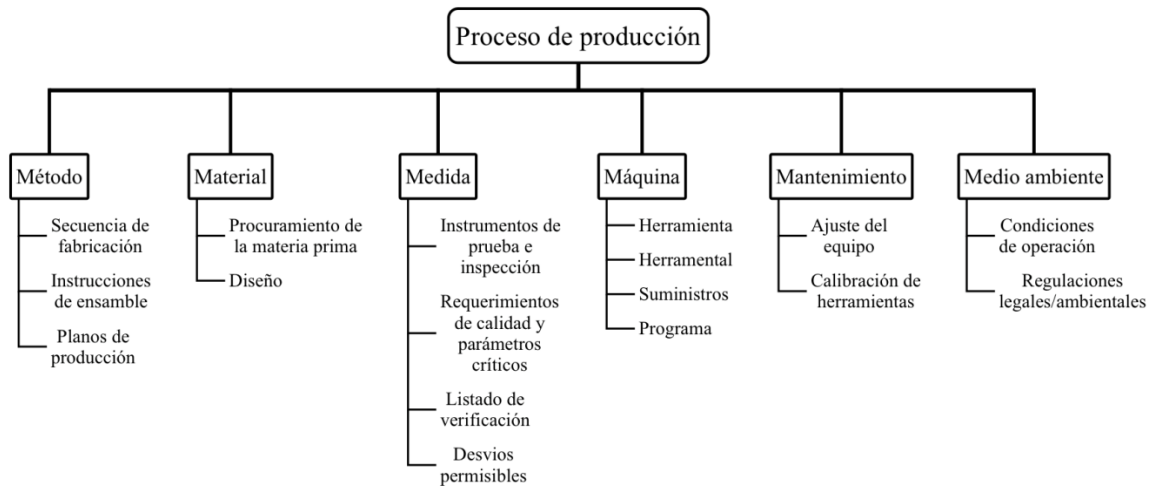
Los costos indirectos se calcularán en base al gasto de energía, los costos de almacenamiento, transporte o seguros cuando estos son requeridos específicamente para la fabricación del producto en cuestión.

### **Arranque de la producción**

El arranque de la producción es una etapa que concatena y concluye las etapas de diseño anteriores, permitiendo obtener el modelo físico final.

En esta etapa, se hará una recopilación de la documentación existente para iniciar con la producción del producto, y con base en la documentación técnica y planos obtenidos en las anteriores etapas, se deberá realizar la planificación de la producción, donde se debe especificar los medios y métodos.

La Figura 47 contiene los elementos mínimos necesarios previo al arranque de la producción de un producto.



**Figura 47. Indicación de los elementos mínimos requeridos para arrancar la producción de un producto**

Fuente: Elaboración propia.

El método nos dará la secuencia de pasos junto con las instrucciones de fabricación, de donde se podrá partir e ir integrando las etapas de la maquinaria, el material, el control de calidad, señalado en la Figura 47, como medida. Se debe hacer un énfasis especial en el control continuo de la calidad durante la producción del modelo y asegurar el cumplimiento de las regulaciones o normativas aplicables.

Con esta última etapa se concluye la ejecución de metodología de diseño generativo propuesta y queda solo la tarea de aplicar la metodología para obtener el diseño deseado del adaptador como se describe en el anexo A.

---

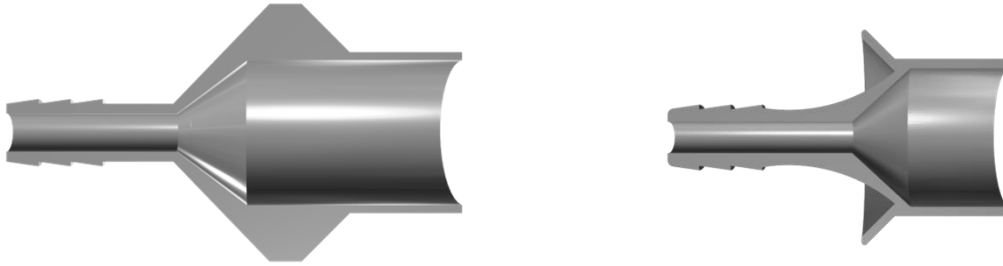
## Capítulo 5

### Resultados, análisis e interpretación

Una de las mayores ventajas del diseño generativo es que permite obtener una amplia variedad de modelos con formas y dimensiones favorablemente suficientes para cumplir con las propiedades y funciones requeridas en el planteamiento del problema. Cuando se apoya de un proceso de fabricación por manufactura aditiva, se logran ahorros en el consumo de materia prima, herramientas y herramientas respecto a los métodos tradicionales de fabricación.

Para el caso de estudio presente, donde el lote consta de 32 piezas, se representará el costo y tiempos de fabricación del moldeo por inyección a presión, solo para fines ilustrativos. El verdadero contraste de resultados de donde se obtendrán las conclusiones, es del análisis que se realizará entre un proceso de arranque de viruta y un proceso de manufactura aditiva, específicamente el proceso de deposición fundida.

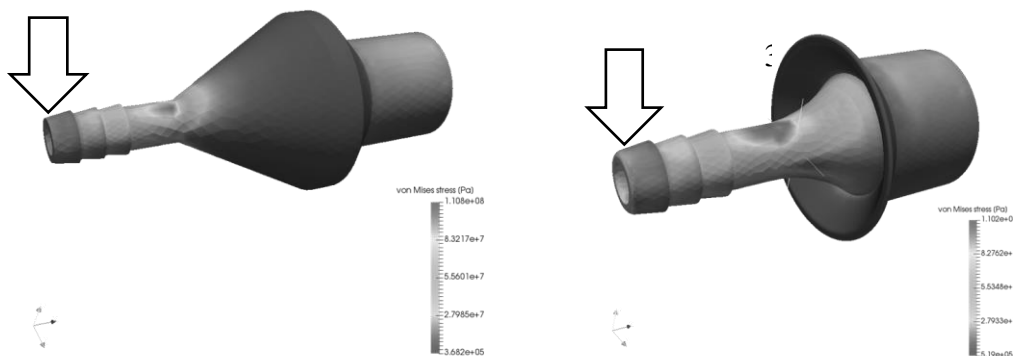
En la Figura 48 podemos observar una comparativa entre un modelo diseñado expresamente para ser fabricado a través de un método tradicional por arranque de viruta (izquierda), y otro para ser fabricado por un método de manufactura aditiva (derecha). En el lado derecho de la Figura 48, se encuentra un corte transversal de lo que se podría llamar un diseño tradicional del adaptador, donde, a partir de una barra comercial de 3.81 cm de diámetro (1½ pulgadas), se proyectó realizar un mecanizado por medio de una operación de torneado.



**Figura 48. Corte transversal de dos diseños de adaptadores, ambos con la misma funcionalidad.**  
Fuente: Elaboración propia.

El uso de material en el modelo del lado derecho de la Figura 48, es notablemente menor respecto al modelo de lado izquierdo. La diferencia en el ahorro de material entre un modelo y otro es del 53%, sin embargo, partiendo del hecho que la pieza manufacturada por arranque de viruta parte de una barra comercial de 3.81cm de diámetro y 7cm de largo, el volumen total de material requerido es de 79.80 cm<sup>3</sup>.

Por lo tanto, el volumen de la barra de 79.80 cm<sup>3</sup> comparado con los 5.44cm<sup>3</sup> de material, usado para producir el modelo por manufactura aditiva, nos arroja una diferencia total del 93%, esto quiere decir que virtualmente, con el material desechado por el proceso de arranque de viruta, se podría fabricar al menos 12 piezas más. Esto gracias a la optimización de la geometría realizada por los algoritmos de la metodología generativa.



**Figura 49. Comparación de resistencia mecánica entre dos diseños**  
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 49 se representa un par de modelos realizados con el mismo material, PLA en este caso, y con el mismo espesor de paredes. Para la simulación de análisis finito se utilizó el software SimScale (SimScale GmbH, 2018). El modelo de la izquierda, diseñado para ser fabricado mediante un proceso de manufactura por arranque de viruta, soporta una fuerza de hasta 295N, antes de llegar al esfuerzo de Von Mises, que es equivalente a un fallo elástico. El modelo de la derecha está considerado para fabricarse por manufactura aditiva, soporta una carga de 333N, esto significa un 12% de incremento en la resistencia.

Otro aspecto que considerar, es el ahorro en tiempo y costo de fabricación que se obtiene con la metodología para un tamaño de lote de 32 piezas. En la tabla 6 se muestra el costo en material y herramientas para tres de los procesos más comunes: arranque de viruta, manufactura aditiva e inyección a presión. Esta comparativa se hizo tomando en cuenta el mismo material termoplástico.

Se indica en la tabla 6, como se observó previamente en la figura 48, que los costos de fabricación del molde para la inyección a presión, marcados como costos de herramental, inflan el costo total de la fabricación, dejando fuera de consideración dicho proceso para el tamaño de lote requerido. Por otro lado, en la misma tabla, se identifica una merma del 83% de material para el proceso de arranque de viruta. Esta cantidad de desperdicio lo convierte en un proceso ineficiente y costoso a la larga.

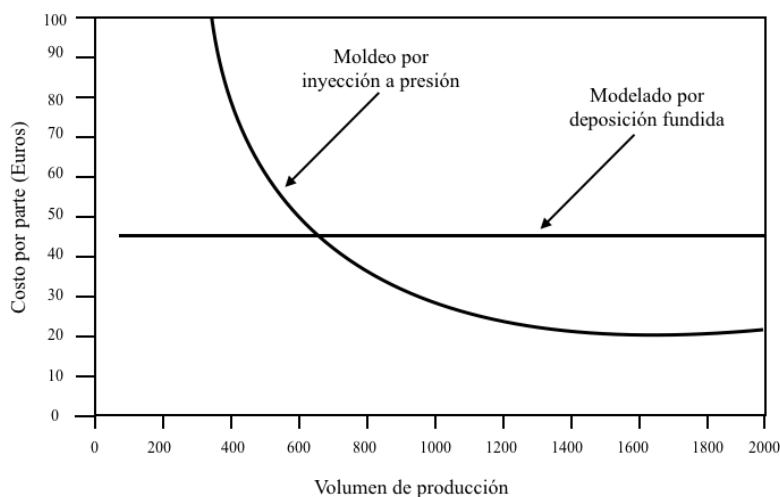
En términos de desgaste de maquinaria y herramienta, el proceso de arranque de viruta mantiene la misma ineffectividad del 83%, esto es, la mayoría del desgaste generado se deberá a la producción de merma.

**Tabla 6. Comparativa de costos entre tres procesos diferentes de fabricación para el mismo adaptador**

Tipo de proceso de manufactura	Costo de material (pesos)	Porcentaje de merma	Total de piezas	Costo total de material (pesos)	Costo de herramental y/o herramienta (pesos)	Costo total de fabricación
Arranque de viruta	\$ 149.54	83 %	32	\$4,785.28	\$ 3,200.00	\$7,985.28
Manufactura aditiva	\$ 4.9	0 %	32	\$ 156.80	\$ 0	\$ 156.80
Inyección a presión	\$ 0.05	5%	32	\$ 1.60	\$ 58,000.00	\$58,001.60

En la tabla 6, podemos cotejar el resultado con el estudio de Hopkinson y Dickens (2003) de la figura 50, el cual refiere que, para lotes de producción menores a 660 piezas, el proceso de moldeo por inyección a presión no es un proceso económicamente viable debido a los altos costos que representa arrancar la producción.

Por lo tanto, se comprueba que el diseño generativo, junto con la simulación por computadora y la manufactura aditiva, permiten la producción de pequeños y medianos lotes de una manera costo-efectiva y con un tiempo de respuesta corto para satisfacer las demandas de diseño.

**Figura 50. Comparación de costos entre dos procesos de manufactura diferentes**

Fuente: Elaboración propia en base a Hopkinson & Dickens (2003). Analysis of rapid manufacturing using layer manufacturing processes for production Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, Part C : Journal of Mechanical Engineering Science, 217 (C1) (pág.38). Professional Engineering Publishing.

Otro de los parámetros importante de analizar, es el tiempo total de fabricación. Se observa en la tabla 7 que la manufactura aditiva es una opción intermedia y que depende mucho de la configuración que se obtenga con el tamaño de lote y disposición de las piezas del tiempo total de fabricación que se obtenga. Esto confirma “la investigación actual sobre los costos de fabricación aditiva, los cuales revelan que esta tecnología es rentable para la fabricación de pequeños lotes” (Douglas S. & Stanley W., 2014), como lo es el caso presente.

**Tabla 7. Comparativa de tiempos de fabricación entre tres procesos diferentes de fabricación.**

Tipo de proceso de manufactura	Tiempo de fabricación por lote	Tamaño del lote (piezas)	Cantidad de lotes	Tiempo de fabricación de herramental y/o herramienta	Tiempo de puesta a punto por lote	Tiempo total de fabricación
Arranque de viruta	0h46m	1	32	8h0m	0h10m	38h10m
Manufactura aditiva	15h18m	8	4	0h0m	0h5m	61h32m
Inyección a presión	0h5m	32	1	160h0m	2h0m	162h05m

Finalmente, una ventaja importante de la fabricación aditiva es el impacto ambiental que tiene sobre la cadena de suministro. Lo anterior debido a que la fabricación se realiza sobre demanda desde un solo componente hasta el producto final, por lo que no es necesario contar con un área de almacenamiento ni desplazar material entre almacenes. Es posible, por lo tanto, reducir el espacio de almacenamiento, así como las distancias de transporte con el consecuente ahorro de energía y reducción de emisiones.

En los tiempos por venir, es un hecho que las técnicas de fabricación aditiva se verán optimizadas por nuevas tecnologías, pudiendo bajar los costos y tiempos de fabricación, al mismo tiempo que mayor rango de materiales puedan ser utilizados como materia prima para este proceso.

---

## Conclusiones

A la fecha de elaboración del presente trabajo, las metodologías de diseño existentes están sesgadas en su alcance, debido que no profundizan en el diseño del proceso de producción, ni retroalimenta la fase de diseño del producto con desviaciones encontradas durante una fase de simulación funcional. Se concluye, por lo tanto, que la selección de una metodología generativa no solo es viable, sino que permite optimizar el diseño del producto tanto como el diseño del proceso.

Por su parte, el uso de algoritmos matemáticos y la simulación por computadora dentro de la metodología permiten al diseñador contar con varias opciones de solución ponderadas de acuerdo a los grados de desempeño requeridos.

El diseño del adaptador requerido se logró de manera exitosa, permitiendo concluir que la metodología generativa, de mano con la manufactura aditiva, es una solución costo-efectiva viable, comparada con las metodologías de diseño basadas en métodos de fabricación tradicionales, y propone métodos innovadores de diseño y producción que solo podrán evolucionar y mejorar con el tiempo

---

## Sugerencias para trabajos futuros

El presente trabajo concentra la solución en diseñar sólidos de revolución, pero los algoritmos se pueden refinar para buscar soluciones a modelos prismáticos. Se recomienda evaluar a detalle la inclusión de modelos matemáticos basados en la metodología TRIZ (Altshuller, 1988), en conjunto con la metodología USIT (Sickafus, 2001), como precursores de los algoritmos de construcción, como lo sugiere Singh (2012), y Schöfer et al. (2015).

Se propone también trabajar en la redacción de una patente nacional para una metodología de diseño generativo, cuyos algoritmos sean una opción a lo que propone Krishnapilai (EUA Patente nº US2007/0078634A, 2007). En dicha redacción es importante proponer un método para variar la densidad del material a través de técnicas de generación de texturas, porosidades o estructuras en forma de células, esto con el fin de reducir el uso de la materia prima y en consecuencia su peso y costo de producción.

Finalmente, se recomienda documentar y categorizar los procesos existentes de manufactura aditiva, los fenómenos físicos, así como los modelos matemáticos, que influyen en el diseño de un producto. Lo anterior con el fin de crear una base de datos que alimente a los futuros algoritmos generativos de construcción y optimización

---

## Referencias bibliográficas

- 3D Systems Inc. (2018). *Nuestra Historia*. Obtenido de 3D Systems:  
<https://es.3dsystems.com/our-story>
- 3D Systems Inc. (2019). *3DXpert para Solidworks*. Obtenido de 3D Systems:  
<https://es.3dsystems.com/software/3dexpert-solidworks>
- Alexander, C. (1964). *Notes on the Synthesis of Form*. Harvard: Harvard University Press.
- Altshuller, G. (1988). *Creativity As an Exact Science*. New York: Gordon and Breach Publishers.
- Adams, K. (2015). *Non-functional Requirements in Systems Analysis and Design*. Switzerland: Springer International Publishing.
- Anaya, M. E., Monterrosa, R., Navas, A., & Pérez, A. (2012). *Metodología de Morris Asimow*. (U. D. Bosco, Ed.) San Salvador, Soyapango.
- Archer, L. (1967). *Método sistemático per progettisti*. Venezia: Marsilio Editori.
- Asimow, M. (1962). *Introducción al Diseño*. Prentice Hall.
- Asimow, M. (1968). *Principi di progettazione*. Venezia: Marsilio Editori.
- Assimi, H., Jamali, A., & Nariman-zahed, N. (2017). Sizing and topology optimization of truss structures using genetic programming. *Swarm and Evolutionary Computation*, 90-103.

Autodesk. (2019). *Fusion 360 subscription*. Obtenido de Autodesk:

<https://www.autodesk.com/products/fusion-360/compare#design>

Autodesk. (2019). *Project Dreamcatcher*. Obtenido de Autodesk Research:

<https://autodeskresearch.com/projects/dreamcatcher>

Bürdek, B. E. (2005). *Design: History, Theory and Practice of Product Design*. (S. R.

Meredith Dale, Trad.) Basel: Publishers for Architecture.

Beck, K., Grenning, J., Martin, R., Beedle, M., Highsmith, J., & Mellor, S. (2001).

*Manifiesto for Agile Software Development*. Obtenido de Agile Manifiesto:

<http://agilemanifesto.org>

Beer, F., & Johnston Jr., E. (2001). *Mecánica Vectorial para Ingenieros "Estática"*.

México: McGraw Hill.

Birkhofer, H. (2011). *The Future of Design Methodology*. Londres: Springer.

Bonsiepe, G. (1975). *Teoría e práctica del disegno industriale*. Milán: Giangiacomo

Feltrinelli Editore.

Chang, K.-H. (2015). *Design Theory and Methods using CAD/CAE*. Amsterdam: Elsevier

Inc.

Chesbrough, H. (2003). *Open Innovation: The New Imperative for Creating and Profiting*

*from Technology*. Boston: Harvard Business School Press.

Christoph, R., Muñoz, R., & Hernández, Á. (2016). *Manufactura Aditiva. Realidad y*

*Reflexión*, 97-109.

Cross, N. (2008). *Engineering Design Methods*. Hoboken, NJ: Wiley.

Cross, N. (2011). *Design Thinking: Understanding How Designers Think and Work*. New

York: Berg Publishers.

De Bono, E. (1999). *Six Thinking Hats: An Essential Approach to Business Management*.

Londres: Penguin.

Desmos Inc. (2019). *Desmos Graphing Calculator*. Obtenido de Desmos:

<https://www.desmos.com/calculator>

Dixon, J. R. (1989). On Research Methodology Towards a Scientific Theory of

Engineering Design. En S. Newsome, W. Spillers, & S. Finger, *Design Theory '88*

(págs. 316-337). New York: Springer.

Douglas S., T., & Stanley W., G. (2014). *Costs and Cost Effectiveness of Additive*

*Manufacturing*. National Institute of Standards and Technology.

Eppinger, S., Whitney, D., Smith, R., & Gebala, D. (1994). A Model-Based Method for

Organizing Tasks in Product Development. *Research in Engineering Design*, 1-13.

Evangelos, T., Tollnes Flem, D., Steiner, M., & Olsen, A. (2018). State of the art of

generative design and topology optimization and potential research needs .

*Proceedings of NordDesign 2018* (págs. 1-15). Sweden: Linköping University.

Goulet, V. (2017). *Four-Bar Linkage Synthesis Using Non-Convex Optimization*. Quebec,

Canada.

Griffin, A. (1997). PDMA Research on New Product Development Practices: Updating

Trends and Benchmarking Best Practices. *Journal of Product Innovation*

*Management*, 14, 429-458.

Habib Kazi, R., Grossman, T., Cheong, H., Hashemi, A., & Fitzmaurice, G. (2017).

DreamSketch: Early Stage 3D Design Explorations with Sketching and Generative

Design. *UIST '17 Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User*

*Interface Software and Technology* (págs. 401-414). Toronto: Association for Computing Machinery.

Hassani, B., & Hinton, E. (1999). *Homogenization and Structural Topology Optimization*. London: Springer-Verlag.

Hopkinson, N., & Dickens, P. (2003). Analysis of rapid manufacturing using layer manufacturing processes for production. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C : Journal of Mechanical Engineering Science*, 31-39.

Hubka, V., & Eder, W. (1988). *Theory of Technical Systems, A Total Concept Theory for Engineering Design*. Berlin: Springer-Verlag.

Industrial Research Institute. (2015). Everything's in Beta. *Winter Meeting 2015 - IRI2038: Everything's in Beta*. Seattle: Industrial Research Institute.

Jänsch, J. (2007). *Akzeptanz und Anwendung von Konstruktionsmethoden im industriellen Einsatz – Analyse und Empfehlungen aus kognitionswissenschaftlicher Sicht*. Technische Universität Darmstadt. Düsseldorf: VDI-Verlag.

Joshua D., D., & Ramana V., G. (Enero 2014 de 2014). A survey of structural and multidisciplinary continuum topology optimization: post 2000. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 49(1), 1-38.

Kamrani, A., & Nasr, E. (2010). *Engineering Design and Rapid Prototyping*. New York: Springer.

Krick, E. V. (1962). *Methods Engineering*. John Wiley & Sons, Inc.

Krish, S. (2011). A practical generative design method. *Computer-Aided Design*, 88-100.

Krishnapilai, A. (5 de Abril de 2007). *EUA Patente n° US2007/0078634A*.

- Li, H., & Lachmayer, R. (2018). *Generative Design Approach for Modeling Creative Designs*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Hannover: Institute of Product Development.
- Lobos, A. (2018). *Finding Balance in Generative Product Design*. *NordDesign 2018*. Linköping: Rochester Institute of Technology.
- Lohan, D., Dede, E., & Allison, J. (2017). Topology optimization for heat conduction using generative design algorithms. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 1063-1077.
- MediaActive. (2017). *El gran libro de 3ds Max 2017*. México: Marcombo.
- Monroy, F., & Rodríguez, M. A. (2004). Obtención de la rigidez elástica de barras formadas por segmentos de sección variable no-colineales. *XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural* (págs. 1-18). Acapulco: Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural.
- Morales, L. R. (2004). *Diseño: estrategia y táctica*. Siglo XXI.
- Mortensen, N. (1997). Design Characteristics as Basis for Design Languages. *Proceedings of ICED 97, WDK 25. 2*, págs. 23-30. n/a.
- Munari, B. (1983). *Como Nacen los Objetos*. Barcelona: Editorial Gustavo Gili.
- Norman, D. (2013). *The design of everyday things (Revised and expanded ed.)*. New York: Basic Books.
- Norvig, R. (2004). *Inteligencia Artificial, un enfoque moderno*. Madrid: Pearson Prentice Hall.
- Olea, O., & González Lobo, C. (1977). *Análisis y Diseño Lógico*. México: Trillas.

- Prakash, K., Nancharaih, T., & Rao, V. (2018). Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing - An Overview. *Materials Today: Proceedings 5* , 3873-3882.
- Progressa Lean. (2019). *5W + 2H Técnica de análisis de problemas*. Obtenido de Progressa lean: <http://www.progressalean.com/5w2h-tecnica-de-analisis-de-problemas/>
- Pugh, S. (1991). *Total Design: Integrated Methods for Successful Product Engineering*. Addison-Wesley Publishing Company.
- Python Software Foundation. (2019). *Welcome to Python*. Obtenido de Python.org: <https://www.python.org>
- Riitahuhta, A., Sääski, J., & Salonen, T. (2005). Simulation-based Design Practise Used In Finishing Mobile Working Machines Industry. En W. L. A. Samuel (Ed.), *International Conference on Engineering Design* (págs. 551-552). Melbourne: A. Samuel, W. Lewis.
- Rodríguez, G. (1983). *Manual de Diseño Industrial*. Ciudad de México: Ediciones G. Gili.
- Runions, A., Fuhrer, M., Lane, B., Pavol, F., Rolland-Lagan, A.-G., & Prusinkiewicz, P. (2005). Modeling and visualization of leaf venation patterns. *ACM Transactions on Graphics*, 702–711.
- Russell, S., & Norvig, P. (2004). *Inteligencia Artificial, Un Enfoque Moderno*. Madrid: Pearson Prentice Hall.
- Schöfer, M., Maranzana, N., Aoussat, A., Gazo, C., & Bersano, G. (2015). The value of TRIZ and its derivatives for interdisciplinary group problem solving . *World Conference: TRIZ FUTURE, TF 2011-2014* (págs. 672-681). Ámsterdam: Elsevier Ltd. .
- Salinas, O. (1992). *Historia del Diseño Industrial*. Ciudad de México: Trillas.

- Savitsky, A., & Golay, M. (1964). Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. *Analytical Chemistry*, 1627-1639.
- Sickafus, E. N. (2001). *Unified Structured Inventive Thinking an Overview*. Grosse Ile: Ntelleck, LLC.
- Simon, H. A. (1969). *The Sciences of the Artificial*. Cambridge: MIT Press.
- SimScale GmbH. (2018). *Simscale*. Obtenido de Simulation software reinvented for the web: [www.simscale.com](http://www.simscale.com)
- Singh, V. (2012). Towards an integrated generative design framework. *Design Studies*, 185-207.
- Smyth, C. (2013). *Functional Design for 3D Printing*. Adrienne Smyth.
- Stratasys Ltd. (2019). *About Stratasys*. Obtenido de Stratasys: <https://www.stratasys.com/corporate/about-us>
- Tena, A. (1994). Rigidez Elástica de elementos de sección variable. *IX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural* (págs. 123-137). Zacatecas: Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural A.C.
- Tyre, M., Eooinger, S., & Csizinszky, E. (1993). *Systematic versus intuitive problem solving on the shop floor : does it matter?* Papel de Trabajo, Massachusetts Institute of Technology, Sloan School of Management.
- Ulrich, K. T. (2005). *Design, Creation of Artifacts in Society*. University of Pennsylvania.
- VDI. (1993). *VDI 2221:1993 Methodik zum Entwickeln und Kunstruieren technischer Systeme und Produkte*. Düsseldorf: VDI.
- Vilchis, L. (1998). *Metodología del diseño*. Claves Latinoamericanas.

VTT. (2006). *Simulation-based design process of smart machines*. VTT Technical

Research Centre of Finland. Espoo: Mikko Lehtonen.

Yoshikawa, H. (1981). General Design Theory and a CAD system. *Man-Machine*

*Communication in CAD/CAM, Proceedings of The IFIP WG5.2 5.3 Working*

*Conference 1980 (Tokyo)*, (págs. 35-57). North-Holland: In Sata, T. and Warman,

E., editor.

---

## Bibliografía

- American Psychological Association (2013). *Publication Manual*. American Psychological Association
- Assimi, H., Jamali, A., & Nariman-zahed. (2017). A hybrid algorithm coupling genetic programming and Nelder–Mead for topology and size optimization of trusses with static and dynamic constraints. *Expert Systems With Applications*, 127-141.
- Bernier S., Luyt B. & Reinhard T. (2015). *Design for 3D Printing: Scanning, Creating, Editing, Remixing, and Making in Three Dimensions*. Maker Media, Inc.
- Cuevas A. (2018). *Aplicaciones gráficas con Phyton*. RA-MA Editorial.
- Deaton J. & Grandhi R. (2014). A survey of structural and multidisciplinary continuum topology optimization: post 2000. *Structral and Multidisciplinary Optimization* 49, 1-38.
- Fallas J. (2012). *Análisis de Varianza: Comparando tres o mas medias*. Universidad para la Cooperación Internacional
- Gero, J. (1991). *Artificial Intelligence in design '91*. Sydney: Butterworth-Heinemann
- Gutiérrez P, de la Vara R. (2012). *Análisis y Diseño de Experimentos*. México: McGraw-Hill / Interamericana Editores S.A. de C.V.
- Hopkinson N., Hague R.J.M. & Dickens P.M. (2006). *Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age*. John Wiley & Sons Ltd.

- Hubka, V. (1982). *Principles of engineering design*. London: Butterworth Scientific
- Lohan D., Dede E. & Allison J. (2017). *Topology optimization for heat conduction using generative design algorithms*. Papel de Trabajo, Springer-Verlag.
- McKinney W. (2017). *Python for Data Analysis*. O'Reilly Media, Inc.
- Parsons, T. (2009). *Thinking: Objects: Contemporary Approaches to Product Design*. Switzerland. AVA Publishing.
- Rodriguez, L. (2004). *Diseño: estrategia y tácticas*. Siglo XXI
- Thakur, A., Banerjee A. & Gupta S. (2008). A survey of CAD model simplification techniques for physics-based simulation applications. *Computer-Aided Design 41*, 65–80.
- Thomson M., Moroni G., Vaneker T., Fadel G., Campbell I., Gibson I., Bernard A., Schulz J., Graf P., Ahuja B. & Martina F. (2016). Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP Annals - Manufacturing Technology 65*, 737-760.
- Villafuerte, H. (2010). *Guías para Métodos Numéricos*. Universidad del Valle de Guatemala.

---

## Anexo A

### Desarrollo técnico de la solución

A continuación, en este anexo A, se ejecutará en cada una de sus etapas, la metodología de diseño generativo propuesta.

#### **Análisis de la situación e identificación de necesidades**

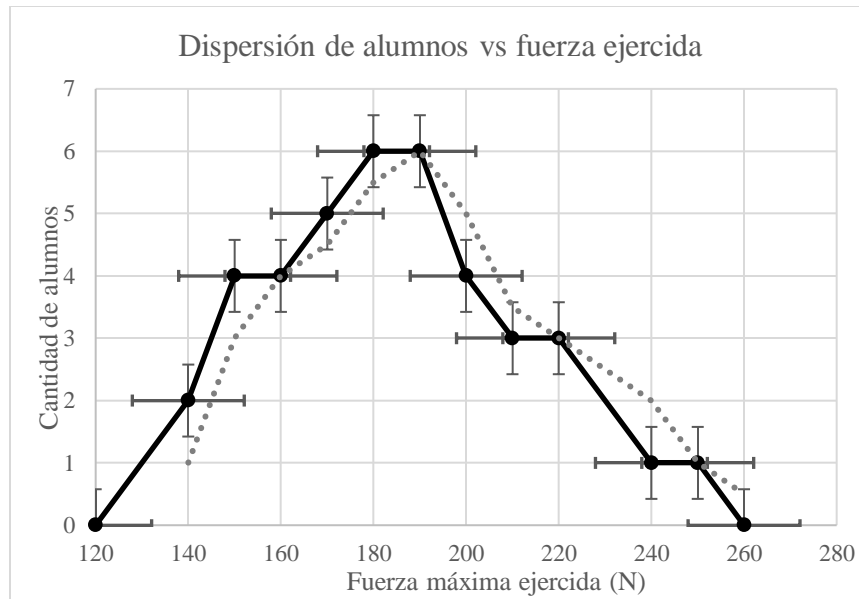
En el caso presente, la necesidad se plantea como el diseño y construcción de treinta y dos adaptadores para conectar una manguera de 10 mm de diámetro, con la entrada de un riel de aire de 25 mm de diámetro. El adaptador en cuestión deberá permitir el paso de aire con hasta 5 bar de presión sin ninguna pérdida interna y contará con al menos las siguientes características: suave al tacto, inocuo en su manejo, sin bordes cortantes, que resista la oxidación, con baja o nula conductividad, resistente a ralladuras, que resista una temperatura de trabajo de 0 a 40 grados centígrados y, sobre todo, que sea resistente a la flexión que pudieran ejercer los usuarios. Esta última característica se tuvo que obtener directamente de la experiencia del usuario.

Aun cuando el adaptador no es un componente que esté sometido a ninguna carga externa, salvo la presión interna de trabajo, es necesario diseñar sobre el peor escenario, que es, una eventual ruptura causada de manera deliberada por uno de los alumnos al someter el adaptador a un esfuerzo de flexión.

Para saber la fuerza a la que el adaptador estará sometido, la empresa SK realizó un levantamiento con 40 alumnos y alumnas, entre 15 y 18 años, para obtener una media de la

fuerza ejercida. En este caso específico, la condición más crítica de fallo existirá cuando el adaptador se someta a un esfuerzo de flexión sobre el eje transversal.

En la Figura 51 se muestra la gráfica con la distribución muestral de alumnos que resultó del levantamiento realizado, junto con el error estándar de la muestra.



**Figura 51. Gráfica de la distribución muestral de fuerza ejercida por alumnos**  
Fuente: Elaboración propia.

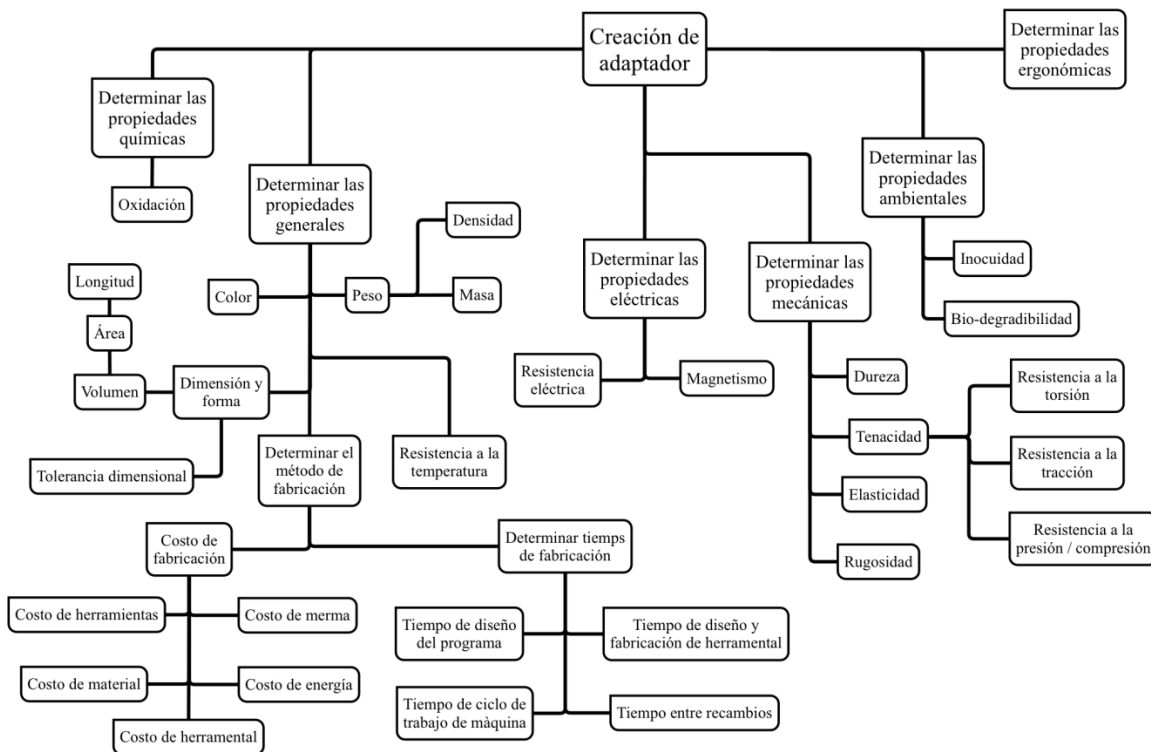
Como resultado del levantamiento realizado, se determinó que existe una fuerza media ejercida de 200 N. Sin embargo, para fines de diseño se tomará el valor de la fuerza máxima ejercida, considerando agregar el valor del error estándar a la misma. Esto arroja un valor de 270 N.

Finalmente, se agregará un 10% de factor de seguridad a la fuerza máxima obtenida con fines de robustecer el diseño, por lo tanto, se considerará un valor igual a 297 N, como la fuerza de flexión máxima a la que podrá ser sometido el modelo. Esto quiere decir, que

las dimensiones, formas y material del modelo deben soportar como mínimo dicha fuerza ejercida en voladizo, en el extremo de menor diámetro, sin deformación alguna.

### Definición del problema y subcomponentes

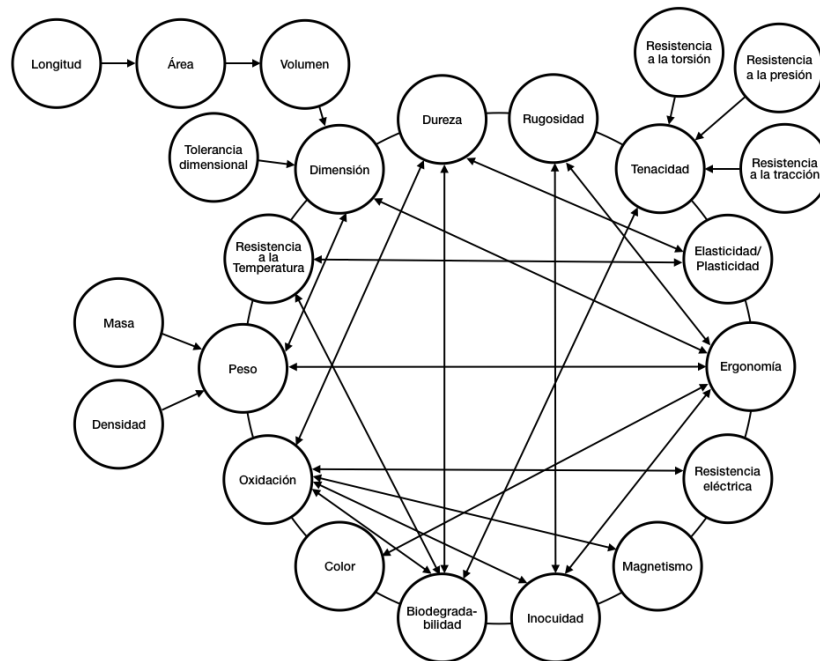
En la Figura 52 se muestra un WBS que desglosa las necesidades identificadas dentro del problema en cuestión. En él se pueden observar los problemas principales y secundarios. Los componentes del problema se desglosan en términos medibles con el fin de identificar dentro del mismo problema las funciones y propiedades que se deben resolver.



**Figura 52. WBS de la situación actual del problema con sus componentes**  
 Fuente: Elaboración propia.

Después de identificar los componentes del problema, se extrajeron las propiedades del modelo que representan dichos problemas. En la Figura 53 se hace una representación

gráfica de las propiedades importantes del problema. Las líneas de conexión muestran la interrelación entre dichas propiedades y en su caso la dependencia de ciertas magnitudes. Se puede argumentar que estos son los componentes del problema que dan origen al diseño general. Podemos observar cómo la solución de uno de los componentes puede ocasionar que otro componente sufra un efecto secundario. Esta interrelación se deberá priorizar en un paso más adelante, con el fin de lograr propiedades importantes a cambio de sacrificar otras propiedades de menor importancia o con efectos despreciables dentro del modelo.



**Figura 53. Representación gráfica de la interrelación existente entre las propiedades requeridas para el adaptador**

Fuente: Elaboración propia.

Con las propiedades que dan origen al problema, correctamente identificadas, se puede continuar con la etapa siguiente que es formular los componentes del problema como necesidades o restricciones del diseño.

## Formulación de condiciones iniciales y restricciones

Una vez identificados los componentes del problema, se realizó una cuantificación de los mismos, transformándolos en una propiedad requerida dentro del diseño y observando siempre la existencia de un indicador o magnitud medible para dicha propiedad. La Tabla 8 enlista y cuantifica las propiedades requeridas para solucionar el problema.

**Tabla 8. Desglose de las propiedades y sus magnitudes correspondientes**

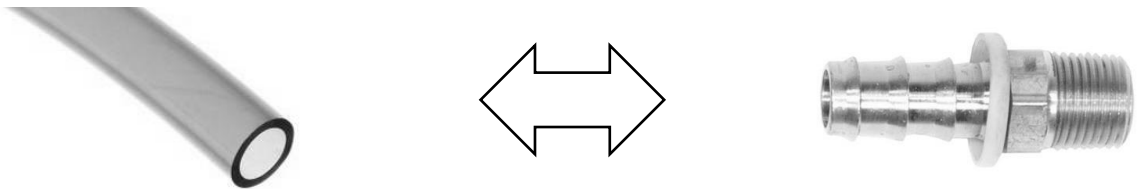
Propiedad (abreviatura)	Magnitud / Indicador	Operador matemático	Valor numérico	Unidad
Resistente a rayones (RR)	dureza	mayor que	50	shore
Superficie lisa (SL)	rugosidad media	menor que	1	$\mu\text{m}$
Alta resistencia mecánica				
Resistencia a la flexión (RF))	fuerza aplicada en voladizo sin deformación	igual a	297	N
Resistencia a la presión (RP)	presión interna sin deformación	igual a	5	bar
Ergonomía: sin bordes cortantes (ER)	redondez en vértices	mayor que	100	grados
Aislante eléctrico (AL)	resistividad	mayor que	$10^{10}$	$\Omega\text{m}$
Sin magnetismo (SM)	material no magnético	igual a		
Inocuidad en su manejo (IN)	inocuo	igual a	n/a	n/a
Biodegradable (BI)	biodegradable	igual a	n/a	n/a
Que no presente corrosión (SC)	aleación sin hierro	no es igual a	n/a	n/a
Densidad y masa	según diseño	n/a	n/a	n/a
Peso (PE)	peso ligero	menor que	200	g
Temperaturas de operación (TT)	temperatura	mayor que	0	$^{\circ}\text{C}$
		menor que	60	$^{\circ}\text{C}$
Dimensiones	según diseño	n/a	n/a	mm
Tolerancia dimensional (TD)	tolerancia	menor que	50	$\mu\text{m}$
		mayor que	50	$\mu\text{m}$

Se puede observar en la Tabla 8 que cada propiedad tiene por fuerza un indicador medible, con el fin de que la solución al problema sea a su vez cuantificables y no dependa de términos subjetivos. Estas propiedades serán el hilo conductor durante todo el diseño.

Continuando con la definición de las condiciones iniciales, es relativamente fácil resolver parte de la geometría del adaptador, en este caso, los dos extremos de conexión.

Estos extremos pueden ser definidos debido a que se conoce las dimensiones y forma de las terminales a donde deberá conectarse.

El primer paso es comenzar con el extremo que se conecta una manguera comercial de 10 mm de diámetro fabricada en poliuretano. Para este extremo se utiliza una solución comercial existente y que consta de una espiga con cuñas. En la Figura 54 se muestra de lado derecho la citada espiga, cuyo uso probado en la industria asegurará el correcto acoplamiento con la manguera de poliuretano.

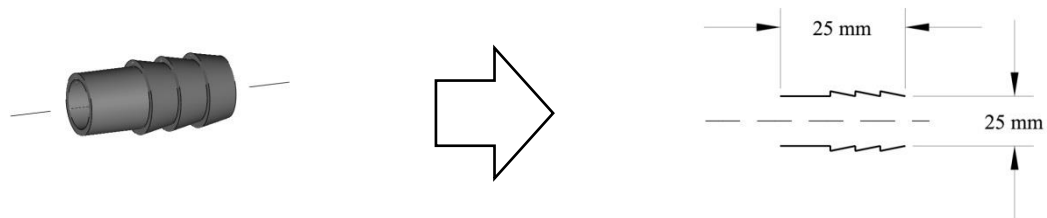


**Figura 54. Conector tipo espiga utilizado para la conexión de mangueras de 10mm**

Fuente: Recuperado de <http://ph.parker.com>

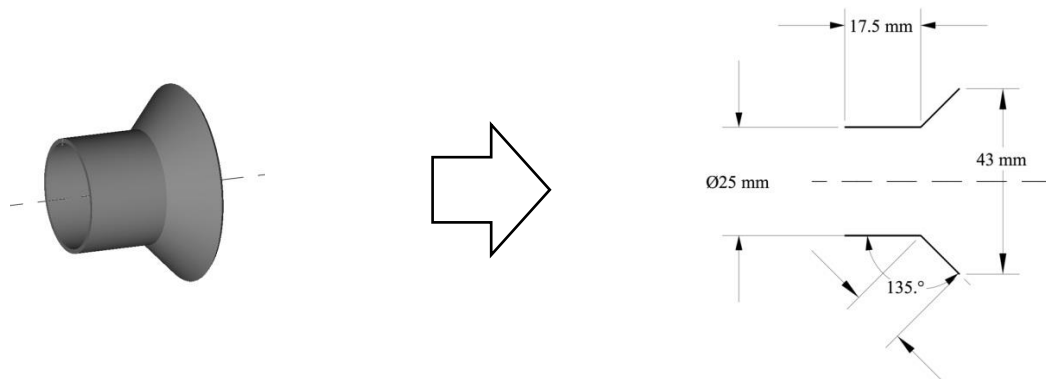
Por lo anterior, se eligió replicar la espiga para dar forma a uno de los extremos del adaptador. De igual forma que el extremo que va conectado con la manguera, el extremo del adaptador que corresponde con la conexión del riel de aire ya es conocido y, por lo tanto, se puede concluir que ambos extremos del adaptador están resueltos.

En las Figura 55 y figura 56 se representan ambos extremos del adaptador, junto con las dimensiones iniciales que deberán tener.



**Figura 55. Vista tridimensional y corte longitudinal de la misma, del extremo del adaptador que será conectado a la manguera de 10 mm**

Fuente: Elaboración propia.

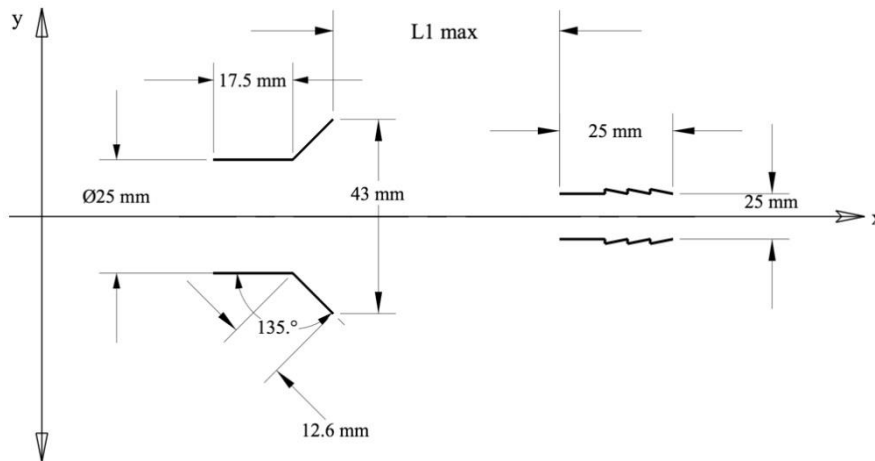


**Figura 56. Vista tridimensional y corte longitudinal de la misma, del extremo del adaptador que será conectado a la entrada del riel de aire**

Fuente: Elaboración propia.

Con ambos extremos del adaptador resueltos, se encuentra en consecuencia: la primera restricción del modelo que se compone por la longitud máxima del segmento intermedio donde ambos extremos se conectan. Esta longitud se identificará como L1, y en la Figura 57 se puede ver representada junto con ambos extremos localizados todos sobre el mismo eje.

La longitud de L1 será establecida como una dimensión máxima, esto es, la restricción será no rebasar dicha longitud, y para fines prácticos del diseño, el valor inicial se tomará de 25 mm, esto con el fin de mantener la proporción en las tres secciones, dos extremos y uno intermedio. La longitud final será descubierta posteriormente según evolucione del diseño.

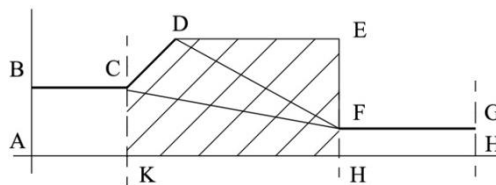


**Figura 57. Vista del corte longitudinal de ambos extremos del adaptador alineados sobre el mismo eje. La longitud L1 max, es una restricción dentro del modelo**

Fuente: Elaboración propia.

### Construcción del modelo por algoritmos

La Figura 58 muestra el adaptador con la trayectoria del eje y su correspondiente generatriz, ambas sobre el mismo plano. Se observa que existe un par de trayectorias potenciales de unión, compuestas por los segmentos  $\overline{CF}$  y  $\overline{DF}$ ; estas trayectorias son especificadas dentro del algoritmo de búsqueda como los puntos más cercanos de conexión entre los segmentos externos del objeto.

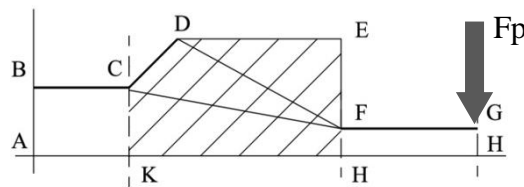


**Figura 58. Proyección en un plano del adaptador donde se señala el área potencial de diseño y los puntos de contacto con las trayectorias también potenciales**

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 59, el área contenida por los puntos C, D, E, H, y K, se considera el área de diseño potencial, la cual se deberá evaluar por medio del algoritmo de construcción para obtener una trayectoria que conecte ambos extremos de la línea generatriz.

Adicionalmente, para el algoritmo de construcción, la única carga que identifica es la fuerza de flexión en voladizo, que se calcula aplicada a uno de los extremos. Esta fuerza, marcada en la figura 58 como FP, se obtiene de las propiedades iniciales y es de 297 N.



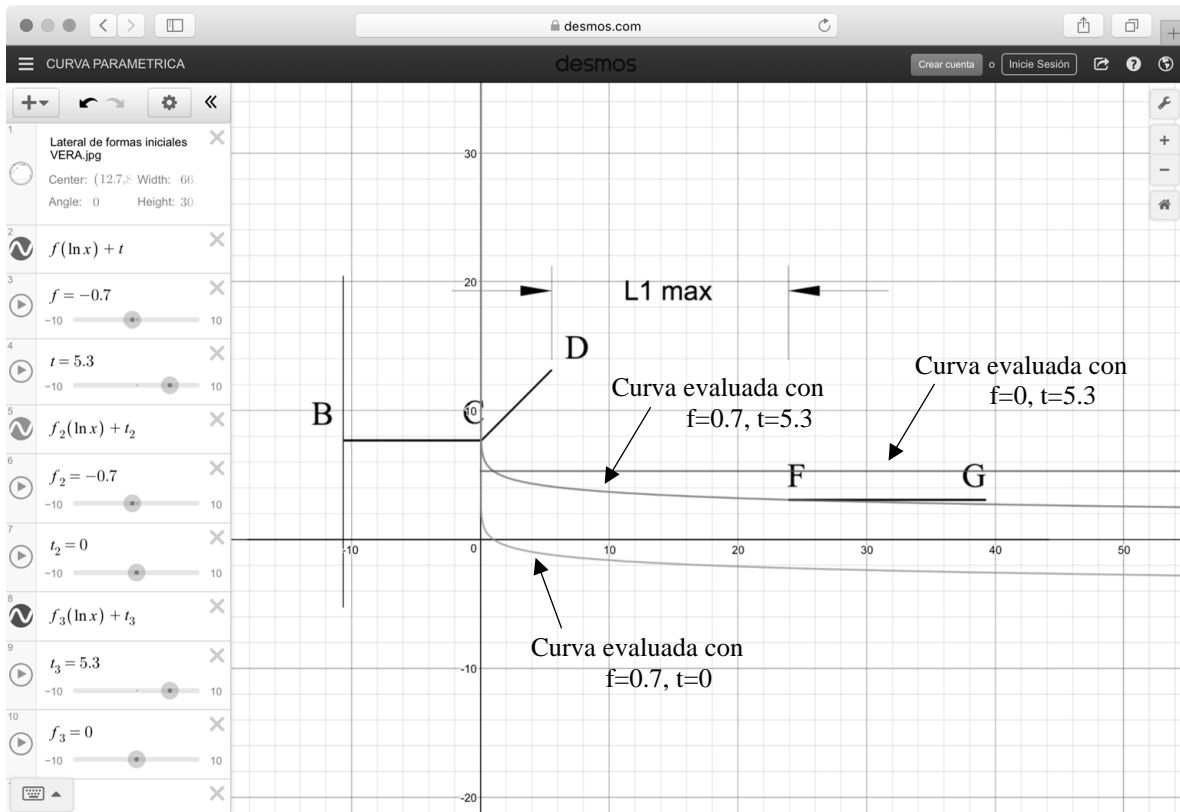
**Figura 59. Proyección en un plano del adaptador con la carga Fp en uno de sus extremos**  
Fuente: Elaboración propia.

El algoritmo realizará una evaluación bidimensional del esfuerzo al cual se somete el adaptador bajo la fuerza Fp dada. La intención es determinar la trayectoria que arroje un perfil apto para soportar el esfuerzo, sin llegar a la complejidad de un análisis de elemento finito en esta etapa del diseño. Como tampoco se ha llegado a la etapa de definición de material, se tomará como base para el algoritmo de diseño, un material genérico como el aluminio.

En la Figura 60 se representa de manera gráfica, un ejemplo del ajuste matemático de la trayectoria  $\overline{CF}$  por medio de la evaluación de las variables importantes de la función citada en la Ecuación 34.

$$A = \int_b^a |f(\ln x) + t| dx \quad (34)$$

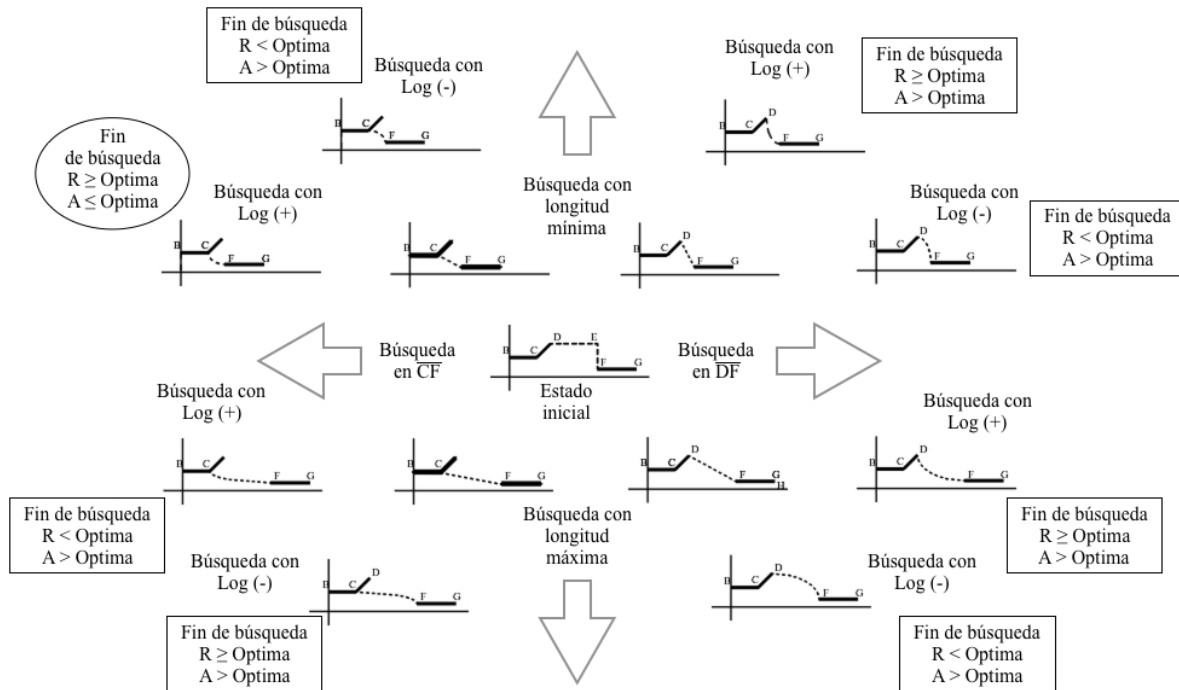
Se podrá ver en la Figura 60, con ayuda de la aplicación *desmos.com* (Desmos Inc., 2019), cómo para cada variación de  $f(\ln x)$ , se debe ajustar la variable  $t$ . Este ajuste lo realiza de forma autónoma el algoritmo hasta encontrar la curva óptima que deberá ser analizada en conjunto con la fuerza aplicada  $F_p$ .



**Figura 60. Grafica ejemplo del ajuste matemático de una curva para unir dos trayectorias**  
 Fuente: Elaboración propia basada en la aplicación Desmos®. Recuperado de <http://www.desmos.com>

La Figura 61 muestra el resultado del árbol de búsqueda del algoritmo de construcción y optimización aplicado al adaptador, específicamente a los segmentos  $\overline{CF}$  y  $\overline{DF}$ . En el árbol de la figura 61 se podrá observar que las ramificaciones se dividen primero, por cada segmento, y posteriormente se vuelven a dividir para encontrar la relación R y A óptima.

Esta relación  $R$  y  $A$ , está dada por la resistencia a la flexión y el área bajo la curva, respectivamente. El algoritmo tuvo como tarea encontrar la menor área posible que contenga la mayor resistencia a la flexión posible.



**Figura 61. Representación gráfica de la búsqueda realizada por el algoritmo**

Fuente: Elaboración propia.

En el anexo B del presente trabajo, se diseña un experimento de análisis de varianza que permite determinar el efecto que tiene la optimización basada en el algoritmo Ln, y su efecto en la resistencia a la flexión, a partir de los datos de la deformación en el modelo.

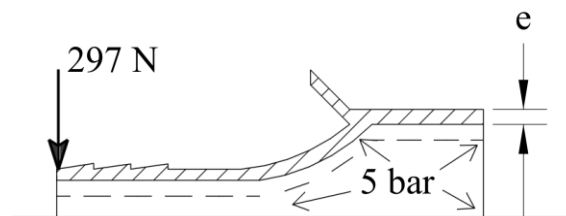
El resultado del experimento nos arrojó que, a un nivel de significación  $\alpha = 0.05$ , se rechaza la hipótesis nula de igualdad de medias y se acepta la hipótesis alternativa, la cual establece que la media de la variable “deformación” y, por lo tanto, la resistencia a la flexión, depende de la condición del logaritmo Ln, usado en la optimización.

El algoritmo propuesto permitió generar para cada segmento ( $\overline{CF}$  y  $\overline{DF}$ ), una propuesta de trayectoria de unión, de la cual tomó como variable la distancia entre los

puntos y la forma de la trayectoria. Posteriormente, con cada trayectoria propuesta, realizó la evaluación de la resistencia para retroalimentarse con los resultados de dicha evaluación. Se programó el algoritmo con un número finito de pasos, con la intención de arrojar varias posibles soluciones que incluyeran el factor de relación entre R y A en un número limitado de interacciones. Al final de la operación de búsqueda, el mismo algoritmo identificó la relación óptima.

Con la trayectoria de unión definida, y que equivale al diámetro exterior del adaptador, el siguiente paso fue obtener la trayectoria de diámetro interior.

Para esto, se tomó la trayectoria exterior optimizada, y se sometió de nuevo al algoritmo de construcción, pero ahora bajo la influencia de dos fuerzas: nuevamente la fuerza de flexión y la fuerza de presión interna. Para lo anterior, se tomó el adaptador como un recipiente sellado por ambos extremos y sometido a una presión interna de 5 bar, como se estipuló en los valores iniciales. Adicionalmente, se agregó la fuerza en voladizo de 297 N. La Figura 62 es una representación gráfica de la fuerza y presión mencionadas.



**Figura 62. Representación del corte transversal del adaptador, con las variables tomadas para el cálculo del diámetro interno**

Fuente: Elaboración propia.

El resultado de la operación arrojó un espesor de pared  $e = 1.2$  mm considerando aluminio como material de referencia y  $e = 2$  mm, para cuando se usó PLA como materia prima.

Con la forma y dimensiones del adaptador prácticamente definidas, en términos de resistencia mecánica y funcionalidad, es necesario considerar tres propiedades más relacionadas con la función, ergonomía y la forma en que será fabricado.

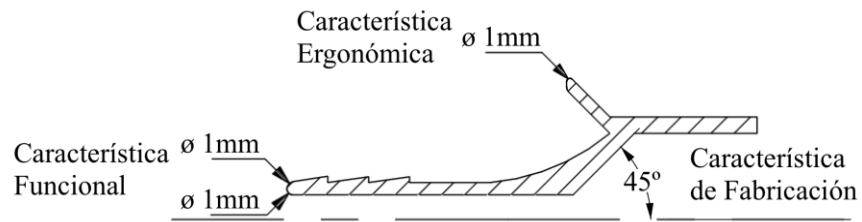
La primera propiedad corresponde a una característica ergonómica y la manipulación segura del adaptador por parte de los usuarios, quienes serán jóvenes alumnos. Para cumplir con esta propiedad, todas las esquinas que formen ángulos agudos, y que estén expuestas al usuario, deberán ser redondeadas para evitar cualquier tipo de lesión cuando se manipule el modelo.

La segunda propiedad que debe ser revisada tiene mucho que ver con la funcionalidad del adaptador en el extremo de la espiga que se conectará con la manguera. En este extremo es necesario redondear la esquina con el fin de propiciar una inserción gradual de la espiga dentro de la manguera, pero sin llegar a tener un borde cortante. Por lo anterior, la boca de la espiga deberá ser redondeada tanto en su diámetro interno, como en su diámetro externo.

Finalmente, la tercera propiedad está relacionada con el método de fabricación por manufactura aditiva, específicamente el método de deposición fundida. Debido a que la fabricación se realiza capa por capa, es necesario considerar el traslape entre capas. De manera ideal, el traslape de la capa superior no deberá ser menor a la mitad del grosor de la extrusión de la capa inferior, esto con el fin de que exista suficiente material para la fusión entre capas; esto significa que, si la boquilla de extrusión tiene un diámetro de 1mm, es recomendable construir de manera vertical con traslapes no mayores a 0.5mm. Lo anterior, para fines prácticos, es que una superficie vertical lo más cercana a un ángulo de 90°

respecto al horizonte, será más resistente y permitirá mantener el costo de fabricación bajo, al evitar el uso de material de soporte.

Por lo anterior expuesto, el diámetro interno del adaptador se rediseñó en cierto segmento para que tuviera como máximo un ángulo de  $45^\circ$  respecto a la vertical.



**Figura 63. Representación del corte transversal del de adaptador con el ajuste de las esquinas y ángulo del diámetro interior**

Fuente: Elaboración propia.

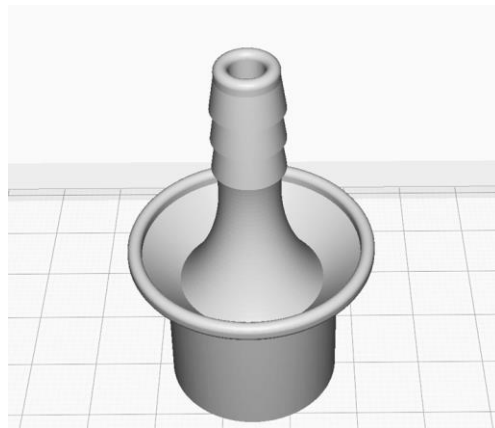
En la Figura 63 se pueden observar las tres características que fueron modificadas, según lo anteriormente explicado.

Es necesario realizar una aclaración importante para los cuerpos de revolución que son fabricados por el método de deposición fundida, y tiene que ver con la anisotropía. El método de deposición fundida puede generar tensiones importantes entre cada capa dispuesta en la dirección del eje (Z). Adicionalmente, una mala programación de la temperatura o velocidad, e inclusive un defecto en el material, puede también ocasionar una fusión débil entre capas.

Esto anterior origina que los modelos creados por deposición fundida cuenten con una gran resistencia a la compresión en el eje (Z), pero en contraparte, si el diseñador no toma medidas correctivas, el modelo es más susceptible de falla por un esfuerzo flexionante o cortante sobre el eje (Z), respecto a los ejes (X,Y).

Si bien es cierto que la manufactura de un sólido de revolución puede ser realizada con el eje transversal localizado de manera horizontal, habrá que tomar en cuenta que se deberá agregar al diseño material de soporte, con su correspondiente impacto en el costo y tiempo de fabricación.

El modelo de adaptador del presente trabajo será construido de manera vertical, como lo muestra la Figura 64; lo anterior debido a que contiene geometrías concéntricas que complican la fabricación de soportes para su construcción horizontal. Adicionalmente, es necesario mantener el tiempo de fabricación al mínimo y la colocación vertical del modelo ayudará a optimizar los desplazamientos del cabezal extrusor.



**Figura 64. Representación del adaptador en posición vertical, como será impreso**  
Fuente: Elaboración propia.

### Análisis de resultados y selección de alternativas

En la Tabla 9, se muestra el desarrollo de la matriz de relación de las propiedades requeridas para el modelo de adaptador. Los valores asignados para cada propiedad se basan en una escala del número uno al cinco. Entre mayor es el número, mayor es la importancia de la propiedad dentro del diseño.

**Tabla 9. Matriz de relación entre las propiedades requeridas del adaptador**

Propiedad	RR	SL	RC	PR	ER	AL	SM	IN	BI	SC	PE	TT	TD	
	-	3	4	4	5	5	2	1	5	3	5	3	5	3
RR	3	-		7										
SL	4		-			9								
RF	5	8		-	10						8		8	
RP	5			9	-						8		8	
ER	5		9			-		10			8		8	
AL	2						-	3						
SM	1						3	-						
IN	5					10			-					
BI	3									-				
SC	5										-			
PE	3			7	8	8						-		
TT	5												-	
TD	3			7	8	8								-
Suma		8	9	40	26	35	3	3	10	0	0	24	0	34

Una vez teniendo el valor total ponderado de cada propiedad con relación al resto de las mismas dentro del diseño, se procede a priorizar cada una asignándole un valor numérico del uno al tres, y donde el número uno es una propiedad que desempeña una función indispensable; el número dos es una propiedad con una función importante; y el número tres es una propiedad con una función despreciable respecto a las otras dos prioridades. En la Tabla 10 se podrá observar el acomodo de las propiedades para el modelo de adaptador en cuestión.

**Tabla 10. Suma de ponderación y priorización de las propiedades para el diseño**

Abreviatura	Propiedad	Valor ponderado	Prioridad de función
RR	Resistente a rayones <sup>a</sup>	8	3
SL	Superficie lisa <sup>b</sup>	9	3
RF	Resistencia a la flexión <sup>a</sup>	40	1
RP	Resistencia a la presión <sup>a</sup>	26	2
ER	Ergonomía: sin bordes cortantes <sup>b</sup>	35	1
AL	Aislante eléctrico	3	3
SM	Sin magnetismo	3	3
IN	Inocuidad en su manejo	10	3
BI	Biodegradable	0	3
SC	Que no presente corrosión	0	3
PE	Peso (densidad y masa) <sup>b</sup>	24	2
TT	Soporte temperaturas ambientes de trabajo	0	3
TD	Tolerancia dimensional <sup>b</sup>	34	1

**Notas:**<sup>a</sup> Estas magnitudes son todas relativas a la resistencia mecánica de la pieza

<sup>b</sup> Estas magnitudes son correspondientes de la forma y dimensión final de la pieza

Debido a que la etapa anterior arrojó un modelo preliminar del adaptador, se debe tomar la decisión sobre el material que será utilizado con fines de concluir el diseño. Esto quiere decir, que se debe seleccionar el material o materiales que mejor aseguren el cumplimiento de las propiedades y una funcionalidad óptima.

En la Tabla 11 se realiza una ponderación de las propiedades, *versus* los materiales, de tal manera que se cuantifique, en un valor numérico del 0 al 5, aquellos materiales que mejor cubren las propiedades requeridas del diseño. El valor numérico se asignará a dos características importantes: el peso de la propiedad, que se obtuvo de la Tabla 10, y un valor asignado por el diseñador llamado “desempeño de la función”. El desempeño de la función tiene que ver con el desempeño del material requerido por la propiedad.

Tanto el peso de la propiedad dentro del diseño, como el desempeño de la función del material sobre la propiedad, son multiplicados para obtener un valor ponderado para cada propiedad con cada material.

Los materiales indicados en la Tabla 11, son propuesta del propio diseñador y pueden ser tan amplios como se requiera explorar alternativas de desempeño. Sin embargo, para este modelo se evaluarán solo cuatro materiales: dos metálicos y dos plásticos, que cubran el rango de propiedades requeridas y que su adquisición sea fácil en el mercado.

**Tabla 11. Ponderación para identificar el desempeño de cuatro materiales**

Propiedad	Característica para evaluar	Modelo en acero		Modelo en aluminio		Modelo en ABS		Modelo en PLA	
		Valor (0 a 5)	Valor ponderado	Valor (0 a 5)	Valor ponderado	Valor (0 a 5)	Valor ponderado	Valor (0 a 5)	Valor ponderado
Resistente a rayones	Desempeño de la función	5		4		4		3	
	Peso de la propiedad	3		3		3		3	
		15		12		12		9	
Superficie lisa <sup>a</sup>	Desempeño de la función	5		5		5		5	
	Peso de la propiedad	4		4		3		4	
		20		20		15		20	
Resistencia a la flexión <sup>b</sup>	Desempeño de la función	5		4		2		3	
	Peso específico de la propiedad	3		3		3		3	
		15		12		6		9	
Resistencia a la presión <sup>b</sup>	Desempeño de la función	5		4		2		3	
	Peso de la propiedad	3		3		3		3	
		15		12		6		9	

**Tabla 11. Ponderación para identificar el desempeño de cuatro materiales (continuación)**

Propiedad	Característica para evaluar	Modelo en acero		Modelo en aluminio		Modelo en ABS		Modelo en PLA	
		Valor (0 a 5)	Valor ponderado	Valor (0 a 5)	Valor ponderado	Valor (0 a 5)	Valor ponderado	Valor (0 a 5)	Valor ponderado
Ergonomía: sin bordes cortantes <sup>a</sup>	Desempeño de la función	5		5		5		5	
	Peso de la propiedad	5		5		5		5	
		25		25		25		25	
Aislante eléctrico	Desempeño de la función	0		0		5		5	
	Peso de la propiedad	2		2		2		2	
		0		0		10		10	
Sin magnetismo	Desempeño de la función	0		0		5		5	
	Peso de la propiedad	1		1		1		1	
		0		0		5		5	
Inocuidad en su manejo	Desempeño de la función	5		5		4		5	
	Peso de la propiedad	5		5		5		5	
		25		25		20		25	
Bio-degradable	Desempeño de la función	1		1		0		5	
	Peso de la propiedad	3		3		3		3	
		3		3		0		15	
Que no presente corrosión	Desempeño de la función	0		4		5		5	
	Peso específico de la propiedad	5		5		5		5	
		0		20		25		25	
Peso ligero	Desempeño de la función	1		2		5		5	
	Peso de la propiedad	3		3		3		3	
		3		6		15		15	

**Tabla 11. Ponderación para identificar el desempeño de cuatro materiales (continuación)**

Propiedad	Característica para evaluar	Modelo en acero		Modelo en aluminio		Modelo en ABS		Modelo en PLA	
		Valor (0 a 5)	Valor ponderado	Valor (0 a 5)	Valor ponderado	Valor (0 a 5)	Valor ponderado	Valor (0 a 5)	Valor ponderado
Soporte temperatura ambiente de trabajos	Desempeño de la función	5		5		5		2	
	Peso de la propiedad	5		5		5		5	
		25		25		25		10	
Tolerancia dimensional <sup>a</sup>	Desempeño de la función	5		5		5		5	
	Peso de la propiedad	3		3		3		3	
		15		15		15		15	
Valor total ponderado		161		175		179		192	

**Notas:**<sup>a</sup> Estas propiedades son relativas al proceso de producción más que al material de la pieza, por lo que se les asigna el mismo desempeño a todos los materiales.

<sup>b</sup> Estas propiedades son relativas a la dimensión y forma del modelo final, por lo que solo se evalúan de manera parcial.

Los resultados obtenidos de la Tabla 11 nos indican que el PLA es la solución óptima para el diseño, seguido por el aluminio y el ABS, los cuales tienen un desempeño similar. La tabla también nos indica que el material menos idóneo es el acero inoxidable.

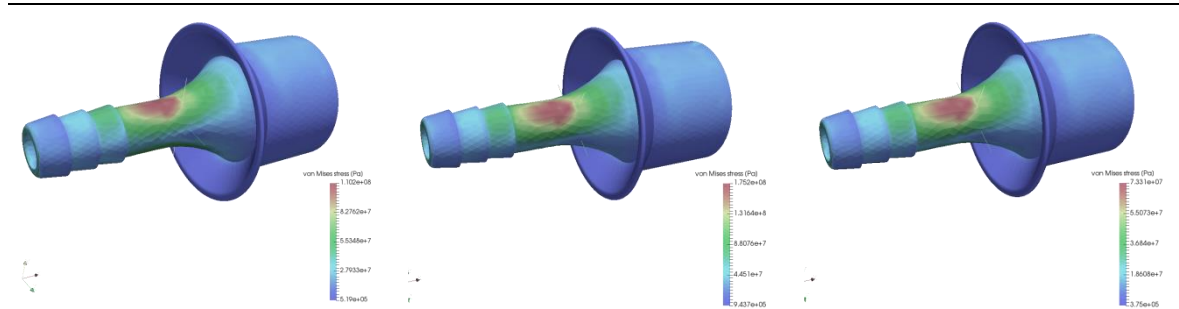
El paso siguiente es correr una simulación completa de análisis finito donde podamos verificar las propiedades que son prioritarias dentro del diseño y que fueron establecidas en la Tabla 10: resistencia a la flexión, ergonomía y tolerancia dimensional. Como solo la resistencia a la flexión depende directamente del material y no del proceso, se realizó un análisis de elemento finito con los tres materiales que mejor se desempeñan: PLA, ABS y aluminio.

En la Tabla 12 se podrán observar los resultados del análisis de resistencia hechos a la pieza a través del software SimScale (SimScale GmbH, 2018), en donde se observa la

fuerza máxima soportada antes de llegar al esfuerzo de Von Mises, lo cual significa un fallo elástico inminente en el modelo.

**Tabla 12. Resultados de aplicar el análisis del elemento finito para tres materiales.**

PLA, fallo bajo un esfuerzo de Von Mises de 110.2Mpa a una fuerza aplicada de 333N.	Aluminio, fallo bajo un esfuerzo de Von Mises de 175.2Mpa, a una fuerza aplicada de 527N.	ABS, fallo bajo un esfuerzo de Von Mises:73.3Mpa a una fuerza aplicada de 221N.
---	---	---



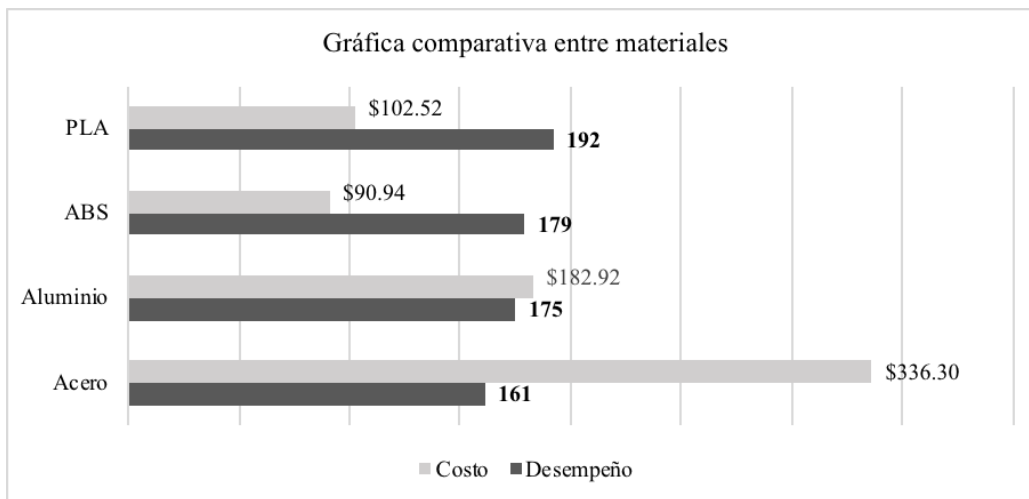
En la tabla 12 se puede observar que el modelo hecho de material ABS está totalmente fuera de especificación, lo anterior debida que se requiere soportar una fuerza en voladizo de 297 N, pero el modelo fabricado en ABS falla con una fuerza aplicada de 221N. Esto lo hace totalmente inadecuado como solución. Por otro lado, los modelos fabricados en PLA y aluminio pueden resistir una fuerza de 297N, de manera holgada, sin llegar al esfuerzo de Von Mises.

### **Análisis de costo / beneficio**

Una vez obtenido el material óptimo para la construcción del modelo, se realiza un análisis de costo beneficio en los cuatro materiales seleccionados en la etapa anterior. La intención es que, aun cuando es evidente que el mejor desempeño lo tiene el PLA, no se debe descartar de manera temprana el resto de los materiales hasta no cuantificar su costo y equiparlo con su desempeño dentro del modelo. De esta forma, podremos realizar una toma de decisión completa.

Cabe mencionar que la comparación de costo se realizó tomando en base la misma cantidad de material requerida para fabricar el modelo.

Como se puede observar en la gráfica de la Figura 65, el costo del material se graficó junto con el desempeño obtenido en la fase anterior. Esta gráfica arroja que, tanto el PLA como el ABS, son opciones de bajo costo, sin embargo, el ABS quedó descartado en la etapa anterior. Con respecto al acero, tanto el costo elevado como su bajo desempeño, confirman que es un material no apto para el modelo de adaptador.



**Figura 65. Comparativa de costos de producción y el desempeño de los materiales seleccionados**  
Fuente: Elaboración propia

Con respecto al aluminio, podemos llegar a la conclusión que, a pesar de contar con un buen desempeño, el costo es 40% mayor que el PLA.

Podemos entonces concluir de manera definitiva, que el material PLA es la mejor opción en términos de costo/beneficio para la fabricación del modelo de adaptador.

Respecto a los costos de capital y mantenimiento, cabe mencionar que la adquisición de una máquina impresora 3D para termoplásticos representa el 5% del costo

de inversión de una máquina impresora 3D para metales, razón por la cual, la fabricación de piezas en PLA se justifica totalmente contra realizarlas en aluminio.

### **Arranque de la producción**

Este proyecto, al ser un plan piloto para producción de un prototipo funcional, no requirió de desarrollar un plan de producción ni arranque de la producción como tal. Lo que sí se desarrolló, fueron las condiciones iniciales para la fabricación del prototipo, utilizando un proceso de impresión 3D, por medio de deposición fundida.

Las variables iniciales que se tomaron fueron las siguientes:

#### **Capas**

Debido al requerimiento de rugosidad de la pieza, el grosor de las capas es un factor determinante para lograr una superficie lisa. Por lo tanto, se optó por utilizar el espesor de capa mínimo que la impresora 3D era posible de trabajar, esto es, un espesor de capa de 0.08 mm.

#### **Diámetro de la nariz de extrusión**

Debido a que el espesor de las paredes obtenido en el diseño fue de 2mm, se utilizó un múltiplo de dicha dimensión existente en el mercado para la boquilla de extrusión. Es por lo anterior que se usó un diámetro de 0.4mm para la nariz del extrusor.

#### **Relleno**

Con el fin de asegurar la máxima resistencia del modelo, el relleno de las paredes internas fue de 100%, esto quiere decir, que el modelo será totalmente sólido. Se puede realizar una optimización del relleno interno de las paredes, pero esta actividad quedó fuera del alcance de este proyecto.

### **Temperatura de trabajo**

La temperatura de trabajo de la impresora se fijó en 210 grados centígrados, tomando como referencia las recomendaciones del fabricante, listadas en el anexo C, para trabajar con filamento PLA.

### **Filamento**

Como se obtuvo en el resultado de selección del material, se optó por trabajar con un filamento de PLA de 3mm de diámetro, color gris.

### **Velocidades de avance**

Al ser un prototipo la pieza que se imprimió, se optó por trabajar con una velocidad de 60mm/s, según la recomendación del propio fabricante del filamento, listadas en el anexo C del presente trabajo.

### **Tiempo del proceso**

Se utilizó para la impresión del modelo, una impresora Ultimaker2® con una boquilla de extrusión de 0.4mm; esto nos arrojó un tiempo total aproximado de 1.6 horas de trabajo por pieza. No fue necesario ningún tiempo de post-procesamiento de la pieza.

---

## Anexo B

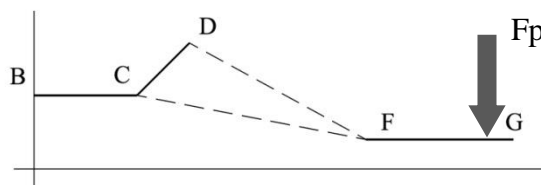
### Diseño y análisis de experimento

Con el fin de validar si el algoritmo de optimización propuesto incide sobre las propiedades físicas del modelo, se diseñó un experimento que determine el impacto en la resistencia del perfil, dependiendo del valor  $L_n$  para la transición de trayectoria. Es por lo anterior que se realizó un análisis estadístico, utilizando un análisis de varianza (ANOVA).

#### Diseño del análisis del elemento finito

La intención del experimento fue validar estadísticamente la deformación en el eje Y de la pieza, cuando se le aplica una fuerza  $F_p$ , como función del signo del logaritmo aplicado a la curva de transición. Adicionalmente, se agregó un valor de referencia para  $L_n$ , representado por una transición recta sin uso del logaritmo.

En la figura 66 se muestra una representación gráfica del modelo y que fue usada para realizar en análisis del elemento finito, del cual se obtuvo las observaciones para el experimento.



**Figura 66. Proyección en un plano del adaptador, con los segmentos a evaluar y con la carga  $F_p$  en uno de sus extremos**

Fuente: Elaboración propia.

Para la realización del experimento, primero se recurrió al análisis del elemento finito del perfil, usando el programa SimScale® (SimScale GmbH, 2018). Los parámetros de diseño, que se tomaron como base para realizar el análisis de elemento finito, se enlistan en la tabla 13.

**Tabla 13. Parámetros iniciales utilizados para el análisis de elemento finito**

Parámetro	Valor
Tipo de ensayo	Viga en cantiléver
Material	Aluminio
Módulo de Young del material	7e+10 Pa
Densidad del material	2,700 kg/m <sup>2</sup>
No. de Poisson	0.34
Fuerza (Fp)	-297 N
Eje de la fuerza	Y
Soporte	Fijo
Tipo de solución	MUMPS
Método de enumeración	SCOTCH
Precisión para detección de singularidad	8
Tipo de análisis	Estático (no lineal)
Número mínimo de triángulos	7000

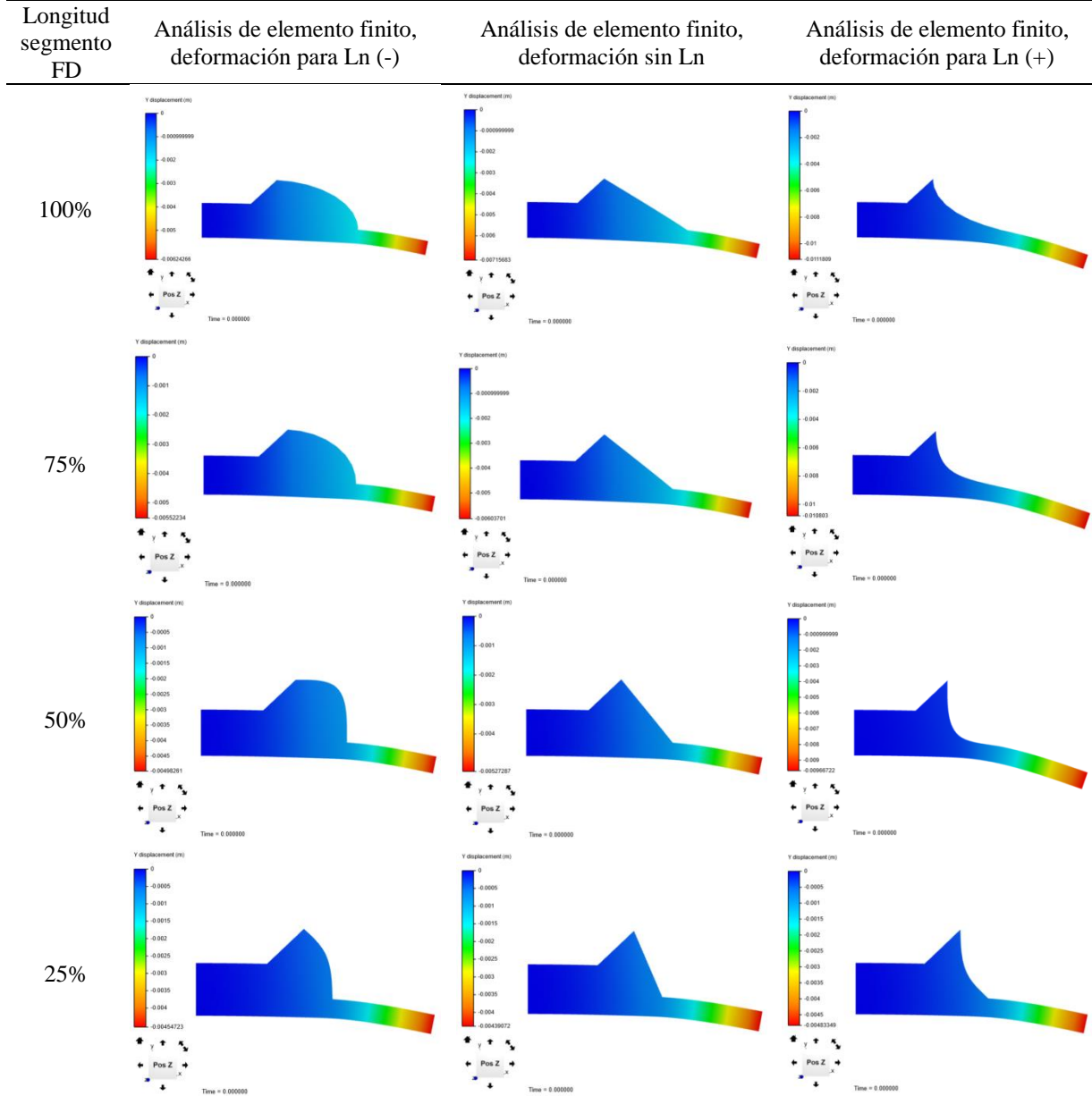
### Resultado del análisis del elemento finito

A continuación, se enlistan los resultados del análisis del elemento finito realizado al modelo y cuyos datos fueron utilizados para realizar el experimento de análisis de las varianzas ANOVA.

La tabla 14 muestra las gráficas obtenidas por la aplicación del análisis del elemento finito del modelo en el segmento FD, tomando tres supuestos para la transición entre el punto F y el punto D: transición con Ln(-), transición con Ln(+) y transición sin logaritmo,

aplicando una línea recta. Las gráficas obtenidas representan el nivel de deformación al que el modelo es sometido cuando se aplica la carga  $F_p$ .

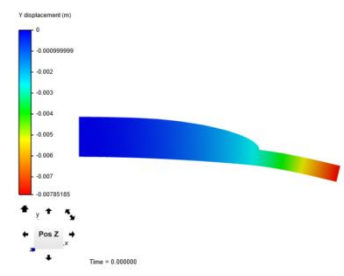
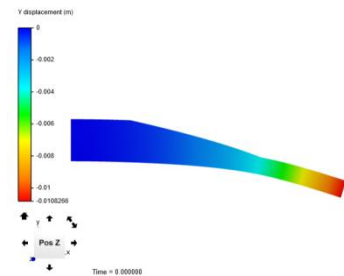
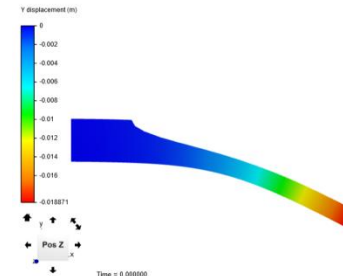
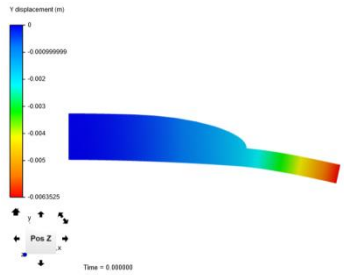
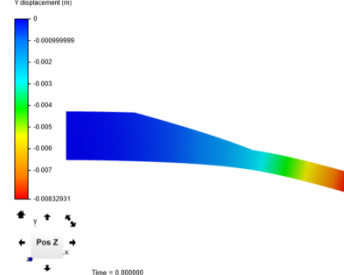
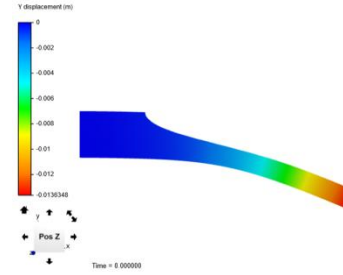
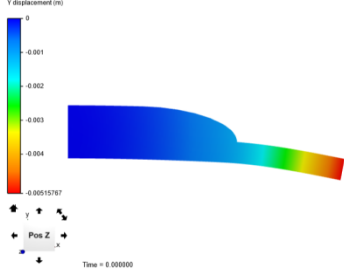
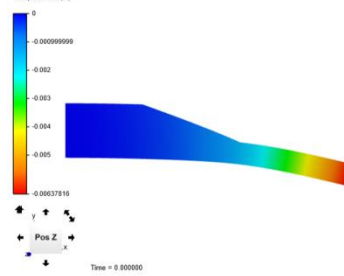
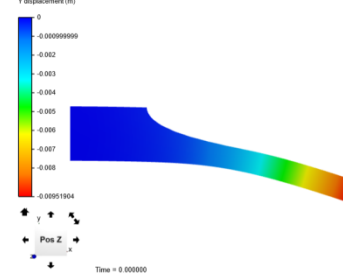
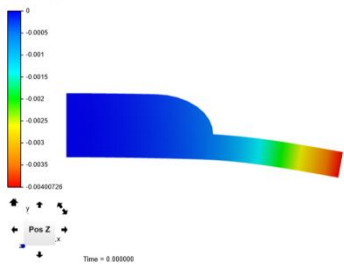
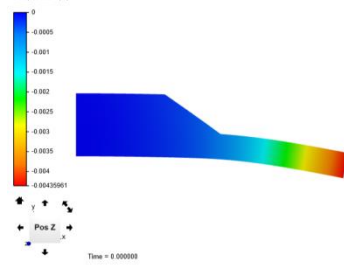
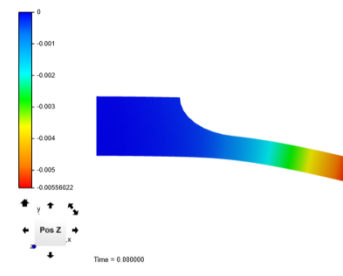
**Tabla 14. Análisis de elemento finito realizado en el segmento FD.**



La tabla 15 muestra las gráficas obtenidas por la aplicación del análisis del elemento finito del modelo en el segmento FD, tomando tres supuestos para la transición entre el punto F y el punto D: transición con Ln(-), transición con Ln(+) y transición sin logaritmo,

Metodología de diseño generativo para creación de un sólido de revolución aplicando una línea recta. Las gráficas obtenidas representan el nivel de deformación al que el modelo es sometido cuando se aplica la carga  $F_p$ .

**Tabla 15. Análisis de elemento finito realizado en el segmento CF.**

Longitud segmento CF	Análisis de elemento finito, deformación para Ln (-)	Análisis de elemento finito, deformación sin Ln	Análisis de elemento finito, deformación para Ln (+)
100%			
75%			
50%			
25%			

Los datos obtenidos del análisis del elemento finito se muestran en la tabla 16, se encuentran agrupados para los segmentos FD y CF. Para este caso tomaremos los

resultados de la deformación ya que es una respuesta directa de la resistencia a la flexión del modelo.

**Tabla 16. Resultados obtenidos al aplicar el análisis de elemento finito.**

Segmento	Longitud del segmento	Logaritmo aplicado	Área bajo la curva (mm <sup>2</sup> )	Esfuerzo de von Mises (Pa)	Deformación (mm)
FD	100%	Ln (-)	1029.073	2,065,197,952	6.24
FD	75%	Ln (-)	895.373	1,923,917,696	5.52
FD	50%	Ln (-)	814.835	1,963,612,032	4.98
FD	25%	Ln (-)	636.351	2,248,903,680	4.54
FD	100%	Sin Ln	890.952	1,733,120,512	7.15
FD	75%	Sin Ln	791.916	1,797,344,512	6.03
FD	50%	Sin Ln	705.303	1,847,428,096	5.27
FD	25%	Sin Ln	593.798	2,022,642,944	4.39
FD	100%	Ln (+)	752.831	1,850,660,224	11.18
FD	75%	Ln (+)	643.012	1,881,610,880	10.8
FD	50%	Ln (+)	595.771	2,492,397,312	9.66
FD	25%	Ln (+)	573.766	2,280,819,200	4.83
CF	100%	Ln (-)	766.547	2,032,181,376	7.85
CF	75%	Ln (-)	676.197	1,965,007,488	6.35
CF	50%	Ln (-)	585.74	2,027,440,640	5.15
CF	25%	Ln (-)	464.64	2,118,876,288	4
CF	100%	Sin Ln	684.209	1,734,475,136	10.82
CF	75%	Sin Ln	611.453	1,762,080,256	8.32
CF	50%	Sin Ln	540.625	1,866,445,312	6.37
CF	25%	Sin Ln	441.228	2,017,694,336	4.35
CF	100%	Ln (+)	602.267	2,132,940,928	18.87
CF	75%	Ln (+)	546.708	2,104,813,440	13.63
CF	50%	Ln (+)	491.671	1,877,628,800	9.51
CF	25%	Ln (+)	417.816	1,817,285,504	5.56

### **Análisis de varianza (ANOVA) de un solo factor**

El ANOVA de un solo factor es un tipo de análisis que se emplea. Se quiere estudiar si existen diferencias significativas entre las medias de una variable aleatoria continua en los diferentes niveles de otra variable.

Para el análisis de varianza se estableció como factor controlable el logaritmo con dos tratamientos: positivo y negativo. La información de la deformación, obtenida del análisis del elemento finito, se utilizó como variable cuantitativa en las observaciones.

Los segmentos FD y CF con sus distintos porcentajes de longitudes, fueron tomadas como unidades experimentales, esto es, agrupan las observaciones obtenidas de la variable cuantitativa.

### **Consideraciones para el experimento y planteamiento de la hipótesis estadística**

En la tabla 17 se indican las condiciones iniciales para cada experimento, entre ellos el factor controlable “logaritmo” y la variable “respuesta”, desplazamiento del segmento, que en términos generales indica la deformación del modelo.

Se utilizaron dos niveles para el factor logaritmo, sirviendo uno de estos como testigo. La ausencia de logaritmo se usó como referencia. Los dos tratamientos utilizados para el logaritmo se identificaron con los signos positivo y negativo.

Se estableció como hipótesis nula  $H_0: \mu_{Ln(+)} = \mu_{Ln(-)} = \mu_{SinLn}$ , en este caso las medias de los tratamientos tendrán el mismo efecto.

Se estableció como hipótesis alterna  $H_A: \mu_{Ln(+)} \neq \mu_{Ln(-)} \neq \mu_{SinLn}$ , en este caso las medias de al menos dos tratamientos serán diferentes.

Nivel de significancia se estableció como:  $\alpha = 0.05$ , con el fin de establecer un nivel de confianza del 95%.

A continuación, se muestran los valores de los tratamientos del factor “logaritmo”, relacionadas con las unidades experimentales en la tabla 17.

**Tabla 17. Factor “Logaritmo” aplicado en**

Segmento	Unidad experimental (longitud del segmento)	Tratamiento Ln (-)	Testigo (sin Ln)	Tratamiento Ln (+)
CF	100%	7.85	10.82	18.87
CF	75%	6.35	8.32	13.63
CF	50%	5.15	6.37	9.51
CF	25%	4	4.35	5.56
FD	100%	6.24	7.15	11.18
FD	75%	5.52	6.03	10.8
FD	50%	4.98	5.27	9.66
FD	25%	4.54	4.39	4.83

### Resultado del experimento

Utilizando el programa Excel<sup>®</sup> como herramienta de análisis, se obtuvieron los resultados sintetizados del ANOVA para el experimento. La tabla 18 contiene los resultados del análisis de la varianza.

**Tabla 18. Resultados del análisis de varianza.**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Valor P	Valor crítico para F
Entre grupos	108.35	2	54.18	6.25	0.01	2.57
Dentro de los grupos	182.11	21	8.67			
Total	290.47	23				

Adicionalmente, en la tabla 19 se enlista el resumen del modelo.

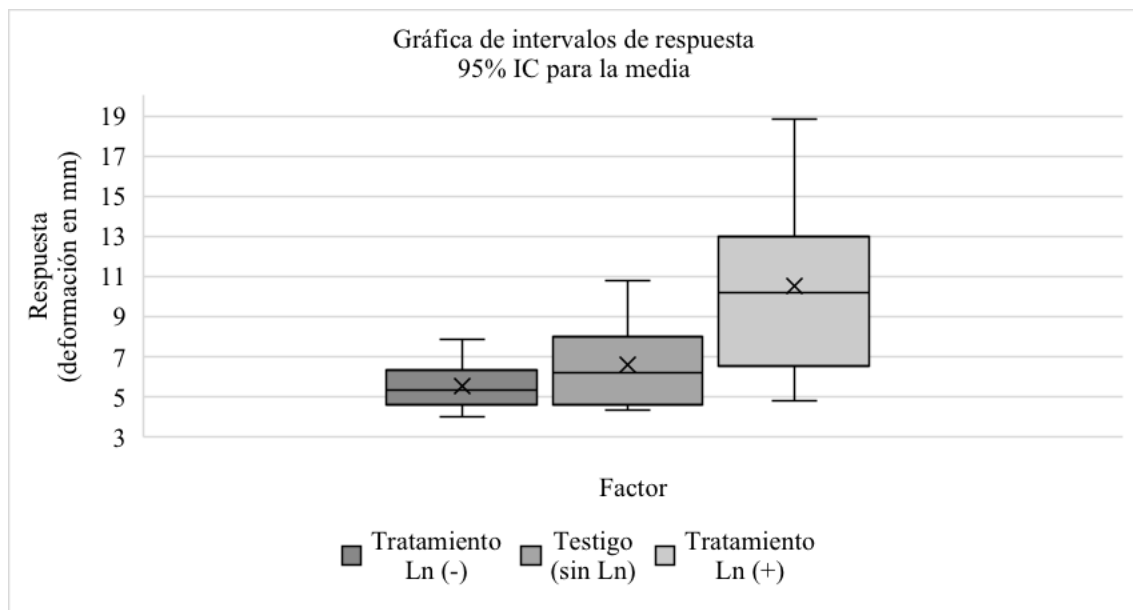
**Tabla 19. Resumen del modelo.**

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Log (-)	8	44.63	5.58	1.47
Sin Log	8	52.70	6.59	4.74
Log (+)	8	84.04	10.51	19.81

## Interpretación del resultado

A partir de los resultados expuestos se puede rechazar la hipótesis nula. Se observa que los dos tratamientos del factor logaritmo son diferentes y se confirma por el resultado del valor P, el cual es diferente de cero. Podemos, por lo tanto, concluir que existe al menos un grupo cuya media es distinta a la media del resto del grupo.

Para darle solidez a la decisión, se realizó una gráfica de los intervalos de respuesta. En la figura 67 se muestra la gráfica de los intervalos con sus medias. Se puede observar que la mayor diferencia se presenta en el tratamiento Ln(+). Esta gráfica también nos deja ver que el uso de Ln(+) para ajustar la transición del segmento, brinda mejor respuesta ante la deformación del modelo, esto es, el modelo tiene una resistencia a la flexión más alta.



**Figura 67. Gráfica de intervalos de respuesta para los tratamientos Ln(-) y Ln(+) junto con los valores testigos (sin Ln).**

Fuente: Elaboración propia.

---

## Anexo C

### Ficha técnica del fabricante de PLA

Preparation date: 10-07-2017

Version No.: 3.0

## Technical Data Sheet

### PLA by Innofil3D BV

Filament suitable for all commercially available leading brands 3D FDM/FFF printers

#### IDENTIFICATION OF THE MATERIAL

Trade name	Innofil3D PLA
Chemical name	Polylactic Acid
Chemical family	Thermoplastic Polylactic Acid
Use	3D-Printing
Origin	Innofil3D BV

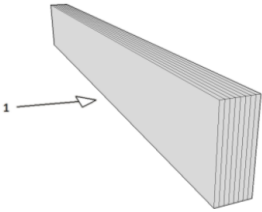
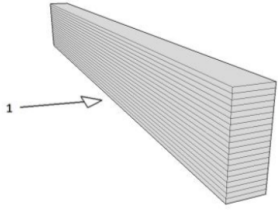
#### GUIDELINE FOR PRINT SETTINGS

Nozzle temperature	220 ± 10 °C
Bed temperature	Approx. 60 °C
Bed modification	Tape or glue below 60 °C
Active cooling fan	YES (up to 100%)
Layer height	0.08 - 0.2 mm
Shell thickness	0.4 - 0.8 mm
Print speed	40 - 80 mm/s

Settings are based on a 0.4 mm nozzle

MATERIAL PROPERTIES		Test Method
Melt temperature	145 - 160 °C	ASTM D3418
Glass transition temperature	~ 60 °C	ASTM D3418
Melt Flow Rate <sup>1</sup>	6.09 g/10min	ISO 1133
Melt Volume Rate <sup>1</sup>	6.73 cm <sup>3</sup> /10min	ISO 1133
Density	1.26 g/cm <sup>3</sup>	ASTM D1505
Odor	Odorless	/
Solubility	Insoluble in water	/

<sup>1</sup>Test conditions: T = 210 °C; m = 2.16 kg

MECHANICAL PROPERTIES   FLEXURAL TEST		Test Method	ISO 178
<p>All test specimens were printed using an Ultimaker 2+ under the following conditions:                      printing temperature: 210 °C                      heated bed temperature: 60 °C                      print speed: 40 mm/s                      number of shells: 2                      Infill under 45°                      1→: bending direction</p>	 <p>Normal</p>	 <p>Parallel</p>	
	Infill	100%	100%
Flexural modulus (MPa)	2409.5 ± 206.3	2551.4 ± 100.8	
Maximum force (MPa)	65.7 ± 5.3	86.2 ± 3.2	
Deformation (%)	4.1 ± 0.2	3.8 ± 0.2	

FILAMENT SPECIFICATIONS		Test Method
Diameter 1.75	1.75 ± 0.05 mm	Innofil3D
Diameter 2.85	2.85 ± 0.10 mm	Innofil3D
Max. roundness deviation 1.75	0.05 mm	Innofil3D
Max. roundness deviation 2.85	0.10 mm	Innofil3D
Net weight on reel	750 g ± 2%	Innofil3D

---

## Anexo D

### Glosario de términos

#### **ABS**

El ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) es un material plástico que se puede imprimir a temperaturas fácilmente alcanzables y puede ser muy fuerte y rígido. El ABS, sin embargo, tiene una alta transición vítrea y una alta dinámica de retracción térmica.

#### **Agente**

Un agente es cualquier cosa capaz de percibir su medio ambiente con la ayuda de sensores y actuar en ese medio, utilizando actuadores.

#### **Agente racional**

Un agente racional es aquel que hace lo correcto en términos conceptuales. En cada posible secuencia de percepciones, un agente racional deberá emprender aquella acción que supuestamente maximice su medida de rendimiento, basándose en las evidencias aportadas por la secuencia de percepciones y en el conocimiento que el agente mantiene almacenado.

#### **Anisotropía**

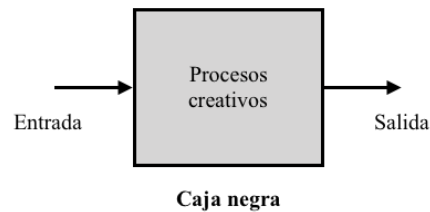
“La anisotropía es la propiedad general de la materia según la cual tiene cualidades como: elasticidad, temperatura, conductividad, velocidad de propagación de la luz, etc., varían según la dirección en que son examinadas” (Smyth, 2013).

## Auxina

En Biología así se llaman a las hormonas reguladoras del crecimiento en las plantas. Posteriormente el término fue tomado por Sachs (1981), en su hipótesis de canalización, para sugerir que las venas de una hoja crecen a través de centros hormonales llamados auxinas. Sin, embargo, Runions y otros (2005), retoma el término como una analogía, para su algoritmo de colonización espacial. Posteriormente, Lohan, Dede, & Allison (2017), utilizan el término auxina para representar los  $n$  puntos representados como un vector  $\vec{a}$ , dentro de su algoritmo genético de optimización.

## Caja negra

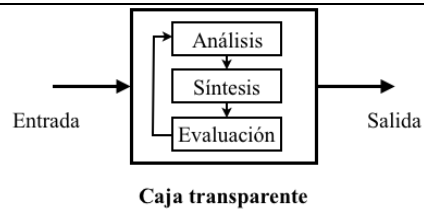
Tendencia en el diseño donde el diseñador es la parte más importante en el diseño. A través de su subconsciente se producen resultados en los que confía y que a menudo son exitosos, pero en contra parte, no es capaz de explicar cómo llegó a ellos.



**Figura 68. Representación gráfica de la Caja Negra, en ella el proceso de diseño es desconocido**  
Fuente: Elaboración propia.

## Caja transparente

Tendencia en el diseño donde la parte más importante es el procedimiento, el cual debe ser sistemático, racional y transparente, en donde el diseñador es solo una variable más dentro del proceso.



**Figura 69. Representación gráfica de la Caja Transparente donde existe un proceso secuencial lógico y claro**

Fuente: Elaboración propia.

## Diseño industrial

Debido a que en la actualidad el concepto de diseño industrial tiene una gran variedad de conceptos e interpretaciones, se tomará la definición de diseño industrial, reconocida de manera oficial por el ICSID (International Council of Societies of Industrial Design) y que en últimas fechas evolucionó a WDO® (World Design Organization).

“El diseño industrial es un proceso estratégico de solución de problemas que impulsa la innovación, desarrolla el éxito empresarial y conduce a una mejor calidad de vida a través de productos, sistemas, servicios y experiencias innovadores. El diseño industrial cierra la brecha entre lo que es y lo que es posible. Es una profesión transdisciplinaria que aprovecha la creatividad para resolver problemas y co-crear soluciones con la intención de mejorar un producto, sistema, servicio, experiencia o negocio. En su corazón, el Diseño Industrial proporciona una forma más optimista de mirar el futuro al replantear los problemas como oportunidades. Vincula la innovación, la tecnología, la investigación, los negocios y los clientes para proporcionar un nuevo valor y una ventaja competitiva en las esferas económica, social y ambiental.”

## **Estrategia**

Habilidad, arte de coordinar y dirigir las acciones a realizar para alcanzar un objetivo

## **Estrategia de diseño**

Es el arte o habilidad de encontrar las ideas o conceptos claves para el objetivo del proyecto.

## **Elemento finito método de análisis por,**

En el método de análisis por elemento finito, un cuerpo es representado como una malla tridimensional formada de la unión de varios componentes llamados “elementos”. Estos elementos se interconectan través de uniones llamadas “nodos”. A través de una función de aproximación de las variables dentro de cada uno de los elementos, podemos determinar la variable dentro de la malla y, por lo tanto, aproximar una solución del cuerpo.

El FEM (*Finite Element Method*, por su traducción al inglés) permite simular esfuerzos y deformaciones en cuerpos sólidos, en cualquiera de sus tres ejes de coordenadas, pudiendo el diseñador obtener las condiciones de falla del cuerpo con el fin de emitir recomendaciones sobre las dimensiones, forma, propiedades del cuerpo e inclusive el material de fabricación del mismo.

## **Logaritmo natural**

El logaritmo natural o logaritmo neperiano, es el logaritmo cuya base es el número  $e$ , el cual es un número irracional con valor aproximado de 2,7182818284590452353.

## **Método**

Procedimiento que se sigue en las ciencias para hallar la verdad y enseñarla. De manera más amplia, el método es un procedimiento específico para la acción práctica y teórica que permite abordar un problema dentro de una disciplina científica determinada.

## **Método de diseño**

Son todos y cada uno de los procedimientos, técnicas, herramientas, instrumentos que ayudan a lograr un diseño determinado y a su vez, son las distintas clases de actividades que el diseñador utiliza y combina entre sí en un proceso general de diseño.

## **Metodología**

Esfera de la ciencia que estudia los métodos generales y particulares de la investigación científica, así como los principios para abordar diferentes tipos de objetos de estudio y las distintas clases de teorías científicas.

## **Metodología científica**

Podemos definirla como el marco desde el cual se intenta explicar, justificar y describir la aplicación de métodos específicos.

Según la Real Academia de la Lengua Española (RAE), la metodología se define como el “conjunto de métodos que se siguen en una investigación científica o en una exposición doctrinal.”

## **Metodología de diseño**

Es una aproximación sistemática para crear un diseño mediante el ordenamiento de los hechos y las ideas, partiendo de un análisis de la situación actual para llegar a una situación deseada, mediante el uso de herramientas, técnicas y lineamientos.

## **PLA**

EL PLA (ácido poliláctico por sus siglas en inglés) es un bioplástico derivado del maíz u otras fuentes de dextrosa. Es un material biodegradable, transparente y útil para la impresión por deposición fundida, debido a su baja transición vítrea y bajas temperaturas de extracción.

## **Problema perverso**

Este concepto fue acuñado por Rittel y Webber y describe problemas de gran complejidad o situaciones donde tanto el problema, como la solución, son desconocidos al principio del proceso. Una característica principal es que los problemas no alcanzan una solución definitiva y siempre presentarán variables adicionales al planteamiento inicial, esto es, las posibles soluciones tendrán ventajas y desventajas entre ellas.

## **Proceso de diseño**

Serie de transformaciones que le ocurren a un objeto de diseño determinado a partir de una situación inicial, hasta que se alcanza un nuevo estado en que ese objeto de diseño ha cambiado. El proceso se detiene cuando el producto adquiere las características deseadas. En este momento, el proceso se extingue y el objeto de diseño es un producto que satisface los requerimientos de quien diseña.

## **PyME**

Abreviación de Pequeñas y Medianas Industrias

## **Von Mises esfuerzo de,**

El esfuerzo de Von Mises es una magnitud física que es proporcional a la energía de deformación. En ingeniería de estructuras es usado este índice como indicador del límite de la resistencia del cuerpo antes de fallar.

## **WBS**

Abreviación en inglés de *Work Breakdown Structure*, es un método de organizar las actividades de un trabajo de forma jerárquica, agrupando actividades en común y sin respetar ninguna secuencia en particular.