

*Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
Facultad de Ingeniería Mecánica.
Departamento de Ingeniería Mecánica.*



TRABAJO DE DIPLOMA

*Optimización de los procesos de estirado de chapas mediante técnicas de
Inteligencia Artificial.*

Autor: Michel Ramos Díaz

Tutor: Dr. José R. Marty Delgado.

Curso: 2011-2012

Pensamiento



Facultad de Ingeniería Mecánica

Aprendí que no se puede dar marcha atrás, que la esencia de la vida es ir hacia adelante. La vida, en realidad, es una calle de sentido único.

Agatha Christie

Medicattoria

Facultad de Ingeniería Mecánica



A mis padres por ser un caudal inagotable de amor, por brindarme su apoyo incondicional, darme confianza y ser siempre la luz que ilumina mi camino.

A mi novia, familiares y mis amigos por estar siempre a mi lado y apoyarme en todo momento.

Agradecimientos



Facultad de Ingeniería Mecánica

A mis padres, novia y amigos por todo su amor y colaboración incondicional y porque siguiendo su ejemplo he logrado las mejores cosas de mi vida.

A mi tutor Dr. José R. Marty Delgado por su dedicación, su tiempo y por haberme ofrecido todo su conocimiento y experiencia.

A mis compañeros de aula y amigos de toda la vida. A todas las personas que han contribuido cabalmente en el transcurso de mi carrera y que han brindado todo su cariño, ayuda y confianza hacia mí.

“A TODOS MUCHAS GRACIAS”

Índice



Facultad de Ingeniería Mecánica

	Pág.
Introducción	1
Capítulo I: Antecedentes, estado actual y perspectiva del empleo de las técnicas de IA para el estudio de los procesos de estirado de chapas	5
1.1 Las Técnicas de Inteligencia Artificial.....	5
1.1.1 Algoritmos Genéticos.....	5
1.1.2 Redes Neuronales (RNA).....	8
1.1.3 Sistemas Expertos	13
1.1.4 Lógica Difusa	14
1.1.5 Recocido Simulado.....	14
1.1.6 Colonia de hormigas	14
1.2 Aplicación de las técnicas de Inteligencia Artificial en la producción para la optimización de los procesos de conformado de metales.....	15
1.2.1 Corte de piezas rectangulares mediante algoritmos genéticos	15
1.2.2 El establecimiento de GA-BP optimizando un modelo de red neuronal para la estimación de la recuperación elástica	17
1.2.3 Identificación de los parámetros y el sistema de control adaptativo para el proceso de embutición profunda mediante técnicas de inteligencia artificial	21
1.2.4 Las características del material mediante el modelo de identificación	22
1.2.5 Aprendizaje del modelo de red neuronal artificial	23
1.2.6 Planeación de Procesos asistida por computadora en el estirado de chapas	26
1.3 Conclusiones parciales	27
Capítulo II: Principales elementos tecnológicos en el cálculo de una operación de embutición 33	
2.1 Metodología para el diseño de herramientas de embutición	33
2.1.1 Calculo del diámetro inicial a partir de las dimensiones finales de la pieza	33
2.1.2 Criterios más importantes para el cálculo de la fuerza de embutido	33
2.1.3 Criterio sobre la fuerza de rotura del material.....	36
2.1.4 Criterios más importantes para el cálculo de la fuerza en el prensa chapas	36
2.1.5 Determinación de los radios de la matriz para las diferentes operaciones	37
2.1.6 Determinación del radio del punzón para las diferentes operaciones.	38
2.1.7 Relación de embutido admisible	38

2.1.8	Valores recomendados para estos parámetros.....	39
2.1.8	Recomendación para el cálculo de las tensiones	42
2.1.9	Recomendación para el cálculo de las deformaciones.....	42
2.2	Propuesta de guía metodológica para el cálculo de los parámetros fundamentales en los procesos de embutición	43
2.3	Parámetros críticos y objetivos que se van a optimizar	44
2.3.1	Propiedades químicas y mecánicas del material	44
2.3.2	Calculo de los parámetros críticos en el proceso	44
2.3.3	Objetivos que interesan optimizar en el proceso.....	48
2.4	Conclusiones del capítulo	50
Capítulo III: Herramientas de I.A. Propuesta de una metodología de trabajo para la optimización		52
3.1	Características de los procesos de embutido y estirado de chapa.....	52
3.1.1	Procesos de embutido más comunes	53
3.1.2	Factores más importantes que condicionan la calidad de las embuticiones	54
3.1.3	Estrategia para el diseño de procesos de conformado de chapas por estirado usando técnicas de inteligencia artificial.....	54
3.2	Metodología de trabajo para la optimización de los objetivos seleccionados.....	56
3.3	Conclusiones parciales	57
Capítulo IV: Aplicación de la metodología propuesta a un caso industrial.....		59
4.1	Formulación del problema, selección de las variables y sus niveles.....	60
4.2	Selección de los parámetros de la herramienta de IA	62
4.3	Metodología propuesta para el trabajo con MatLab.....	62
4.4	Discusión de los resultados y su validación	63
4.5	Conclusiones parciales	67
Conclusiones generales		64
Recomendaciones		66
Bibliografía.....		71

Resumen



Facultad de Ingeniería Mecánica

Resumen

En este trabajo se realizará una revisión bibliográfica detallada sobre la utilización de herramientas de Inteligencia Artificial (IA) para la optimización de los procesos de conformación de chapas y se ejemplifican cuáles son las principales herramientas de inteligencia artificial aplicadas a procesos de conformado. Se obtendrán los principales elementos tecnológicos para el cálculo de herramientas de embutición, mostrando una metodología de trabajo para el diseño de estas. En esta metodología se muestran como resultados los parámetros críticos y cuáles son los objetivos que interesan optimizar en el proceso de conformado de chapas.

También se aplicará la metodología propuesta a un caso industrial, donde se hará una formulación del problema en cuestión, se seleccionará las variables y sus niveles, los parámetros de la herramienta de IA y se hará una discusión y validación de los resultados obtenidos.

Abstract



Facultad de Ingeniería Mecánica

Abstract

In this work we conduct a detailed literature review on the use of tools of Artificial Intelligence (AI) for the optimization of metal forming processes and exemplified what are the main tools of artificial intelligence applied to forming processes. It produces the main technological elements for calculating drawing tools, showing a methodology for the design of these. This methodology results are shown as the critical parameters and what are the objectives pursued in the process optimization of sheet metal forming.

Also apply the proposed methodology to an industrial case, where there will be a formulation of the problem in question, select the variables and their levels, the parameters of the AI tool and provide a discussion and validation of the results.

Introducción



Facultad de Ingeniería Mecánica

Introducción

Este trabajo de diploma tiene una gran importancia ya que tiene relación con la proyección de procesos tecnológicos para la fabricación de piezas. En el mismo se pone en práctica fundamentalmente los procesos de conformado de chapas metálicas utilizando la técnica de embutido profundo o estampado de chapas que es una de las más utilizadas[1].

Este trabajo se realizó con la ayuda de técnicos e ingenieros de la Empresa Industrial de Productos y Utensilios Domésticos “1^{ro} de Mayo” (INPUD) de Santa Clara, en Villa Clara, que es un gran exponente de la utilización de los procesos de conformación de chapas metálicas.

Esta empresa fue fundada en 1964 por el Comandante de la Revolución Ernesto Guevara de la Serna, desde el comienzo esta se ha destinado a la producción de utensilios para satisfacer las necesidades de la familia cubana en el hogar. A partir de su creación hasta los años 90, en que el país transitó por el período especial, esta fue la principal industria en Cuba que utilizó los procesos de conformación de chapas.

En los inicios del siglo XXI con la reactivación de la economía cubana la EINPUD retoma las producciones tradicionales, entre las cuales se tiene la fabricación de ollas de presión, carpintería de aluminio con la conformación de puertas y ventanas, fogones de gas, fregaderos los cuales se distribuyen a la población como parte de la Revolución Energética y de las mejoras de la vivienda que lleva a cabo el país[2].

La evolución de la tecnología moderna y el aumento de las demandas junto con la competitividad internacional de los procesos de fabricación de productos, que requieren menos costos de diseño y de fabricación, se hace necesaria la aplicación de nuevos materiales y procesos o tecnologías. Con este desarrollo aparecen los sistemas inteligentes los cuales son capaces de realizar operaciones de conformación de metales que por los métodos tradicionales sería imposible de realizar, argumentos de los cuales la directiva de la EINPUD no está ajena [2].

También conociendo estos modelos no solo se puede mejorar los procesos en la empresa, sino que se puede obtener mejoras en todas las ramas de la economía pues son sistemas muy versátiles con los cuales se pueden manejar cualquier tipo de problema ya sea en proceso donde se trabajen los metales ya sea por conformado o por otro tipo de proceso.

Idea inicial

Formular un problema de optimización con una función objetivo para los procesos de embutición de chapas. Aplicación a un caso industrial.

Situación problemática

¿Cómo se emplean las técnicas de inteligencia artificial en los procesos de conformación de chapas metálicas para la optimización de los mismos?

Problema de Investigación

¿Cómo se utilizan las técnicas de Inteligencia Artificial para optimizar los procesos de conformación de chapas?

Preguntas de investigación

- 1-¿En qué consisten las técnicas de Inteligencia Artificial?
- 2-¿Cómo se utilizan estas técnicas en los Procesos de Conformación de Metales?
- 3-¿Cómo se pueden optimizar estos procesos mediante estas técnicas?

Novedad científica

Demostrar a partir de una revisión bibliográfica las ventajas que se pueden obtener en los procesos de conformación de chapa al utilizar las técnicas de inteligencia artificial y los beneficios que traería consigo la utilización de las mismas en nuestra industria.

Objetivo general

Realizar una optimización en los procesos de estirado de chapas a través de las técnicas de inteligencia artificial utilizando MatLab para su utilización y aplicación a un caso industrial.

Objetivos específicos

1. Realizar una revisión bibliográfica sobre las técnicas de inteligencia artificial y los procesos de conformación de chapas.
2. Realizar una descripción de algunas de las técnicas de Inteligencia Artificial más utilizadas en los Procesos de Conformación de Chapas.
3. Determinación de los parámetros críticos en los procesos de conformación y las variables a optimizar.
4. Optimizar utilizando MatLab la fuerza máxima de embutido mediante algoritmos genéticos.

Principal resultado a obtener

En la actualidad existen diferentes modelos de Inteligencia Artificial basándose cada uno de ellos en consideraciones teórico prácticas. En la industria es importante el conocimiento de estos métodos para un amplio desarrollo de las mismas y su utilización en la optimización de los procesos de conformado de chapa que es el tema en cuestión. Se propone un documento elaborado a partir de una revisión bibliográfica de los procesos de conformado de chapa bien actualizada y tecnologías de punta que utilizan estas herramientas de Inteligencia Artificial para la optimización de estos procesos.

Hipótesis del trabajo

Si utilizamos correctamente las diferentes herramientas de inteligencia artificial se puede realizar la optimización de los procesos de estirado de chapas para mejorar la eficiencia en nuestras industrias.

Justificación

Con los resultados obtenidos en esta investigación le brindará a la comunidad científica-técnica Cubana un amplio conocimiento sobre diferentes métodos y tecnologías que pueden optimizar los proceso de conformado mediante técnicas de Inteligencia Artificial. Aumentando consigo el interés sobre la utilización de estas técnicas en nuestra industria para lograr la mayor eficiencia en la producción.

Viabilidad de la Investigación

La investigación es viable ya que se cuenta con los recursos necesarios tanto en los centros de investigación para los estudios y en las fábricas donde se desarrollan. Además se cuenta con profesionales y estudiantes de la Universidad Central “Marta Abreu de Las Villas” y la EIMPUD “1^o de Mayo” de Villa Clara con un amplio conocimiento para el desarrollo de esta investigación. La dirección de la EIMPUD se encuentra abierta a la cooperación para llevar adelante este estudio.

Metodología

Se realizará una investigación descriptiva y explotaría dentro del paradigma cualitativo. El propósito de esta consiste en conocer las diferentes técnicas de Inteligencia Artificial así como su uso en tecnologías modernas para la optimización de los procesos de conformado de metales. El trabajo se ejecutará en la facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central “Marta Abreu de las Villas” (UCLV) de Villa Clara y la EIMPUD “1^o de Mayo” de Villa Clara.

Estructura del Trabajo

El Trabajo de Diploma consta de una síntesis o resumen, introducción, cuatro capítulos, así como conclusiones, recomendaciones, bibliografía y anexos.

Capítulo I: En este capítulo se realizará una revisión bibliográfica detallada sobre la utilización de herramientas de Inteligencia Artificial (IA) para la optimización de los procesos de conformación de chapas y se ejemplifican cuáles son las principales herramientas de inteligencia artificial aplicadas a procesos de conformado.

Capítulo II: En este capítulo se buscaran los principales elementos tecnológicos para el cálculo de herramientas de embutición, mostrando una metodología de trabajo para el diseño de estas. En esta metodología se muestran como resultados los parámetros críticos y cuáles son los objetivos que interesan optimizar en el proceso de conformado de chapas.

Capítulo III: En dicho capítulo se abordará sobre las técnicas de IA y el uso de una metodología para el trabajo con las mismas. Además se caracterizará los procesos de embutidos y estirado de chapas, se mostraran los factores que condicionan la calidad final de la pieza embutida y se propondrá una metodología de trabajo para la optimización.

Capítulo IV: En este capítulo se aplicará la metodología propuesta a un caso industrial, donde se hará una formulación del problema en cuestión, se seleccionará las variables y sus niveles, los parámetros de la herramienta de IA y se hará una discusión y validación de los resultados obtenidos.

Capítulo I



Facultad de Ingeniería Mecánica

Capítulo I: Antecedentes, estado actual y perspectiva del empleo de las técnicas de IA para el estudio de los procesos de estirado de chapas

1.1 Las Técnicas de Inteligencia Artificial

En este capítulo el autor pretende caracterizar las principales técnicas de inteligencia artificial (IA) según la información especializada, la inteligencia artificial (IA) en su sentido más simple, mostraría la capacidad de un equipo de realizar las mismas funciones que caracterizan al pensamiento humano. El término fue definido en 1956 en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Estableciéndose las bases de la Inteligencia Artificial como un campo independiente dentro de la informática.

Este término se ha aplicado a programas y sistemas informáticos capaces de realizar tareas complejas, simulando el funcionamiento del pensamiento humano, aunque todavía muy lejos de éste. En esta esfera los campos de investigación más importantes son el procesamiento de la información, el reconocimiento de modelos, los juegos y las áreas aplicadas. Las técnicas computacionales, desde sus inicios, marcaron un paradigma en la creación. Sus aplicaciones van desde la industria de los juegos hasta las cadenas de producción de múltiples industrias. Se han desarrollado múltiples tecnologías y técnicas en la rama de la Inteligencia Artificial (IA) por la necesidad de darle solución a variados problemas de la vida cotidiana, los cuales tienen soluciones que por los métodos tradicionales se hacen casi imposibles de realizar o su solución incurre en costos significativos. Entre las diferentes técnicas de Inteligencia Artificial tenemos:

- ✓ **Redes Neuronales Artificiales (Artificial Neural Networks)**
- ✓ **Algoritmos Genéticos (Genetic Algorithms)**
- ✓ **Colonia de Hormigas**
- ✓ **Computación Evolutiva (Evolutionary Computation)**
- ✓ **Lógica Difusa (Fuzzy Logic)**
- ✓ **Recocido Simulado (simulated annealing)**
- ✓ **Razonamiento Basado en Casos (Case-Based Reasoning)**
- ✓ **Sistemas Expertos (Expert Systems)**
- ✓ **Visión Artificial**
- ✓ **Aprendizaje Automático (Machine Learning)**
- ✓ **Ingeniería del Conocimiento (Knowledge Engineering)**
- ✓ **Sistemas Basados en Reglas (Rule-Based Systems)**

1.1.1 Algoritmos Genéticos

✓ **Definición**

Los Algoritmos Genéticos son algoritmos matemáticos de optimización de propósito general, basados en mecanismos naturales de selección y genética, proporcionando excelentes soluciones en problemas complejos con gran número de parámetros. [3]. Un Algoritmo Genético (AG) es un método de programación con el objetivo de buscar dentro de un espacio de hipotéticas candidatas la mejor de ellas, que imita a la evolución biológica como estrategia para resolver problemas. [4]

✓ **Funcionamiento de los Algoritmos Genéticos**

Dado un determinado problema a resolver, la entrada del Algoritmos Genéticos (AG) es un conjunto de soluciones potenciales a ese problema, las cuales se codifican, y la función de aptitud la cual permite evaluar cuantitativamente a cada candidata, las cuales pueden ser soluciones que ya se sabe que funcionan, con el objetivo de que este obtenga las mejores candidatas, pero se suelen generar aleatoriamente. [5]



Figura 1.1: Diagrama de flujo de un algoritmo genético[5]

El Algoritmo Genético (AG) evaluará a cada candidata según su función de aptitud donde en un grupo de ellas generadas aleatoriamente, la mayoría pueden no funcionar y serán eliminadas. De lo contrario, por puro azar, unas pocas pueden ser prometedoras para la solución del problema. Estas últimas se reproducirán y se realizarán múltiples copias de ellas, pero las mismas no son perfectas, introduciéndose cambios aleatorios durante el proceso de copia. Después, esta descendencia digital prosigue con la siguiente generación, formando un nuevo conjunto de soluciones candidatas, y se someten a una ronda de evaluación de aptitud y se realiza el mismo proceso con las expectativas de que la aptitud media de la población se incrementará en cada ronda y, por tanto, repitiendo este proceso cientos o miles de rondas, pueden descubrirse las mejores soluciones del problema.

✓ Métodos de selección

Un Algoritmo Genético puede utilizar muchas técnicas diferentes para seleccionar a los individuos que deben copiarse hacia la siguiente generación algunos de los cuales son:

- **Selección elitista:** garantiza la selección de los miembros más aptos de cada generación. Selección proporcional a la aptitud: de los individuos más aptos los cuales tienen más probabilidad de ser seleccionados, pero no la certeza.
- **Selección por rueda de ruleta:** la probabilidad de que un individuo sea seleccionado es proporcional a la diferencia entre su aptitud y la de sus competidores. (Conceptualmente, esto puede representarse como un juego de ruleta: cada individuo obtiene una sección de la ruleta, pero los más aptos obtienen secciones mayores que las de los menos aptos. Luego la ruleta se hace girar, y en cada vez se elige al individuo que "posea" la sección en la que se pare la ruleta).
- **Selección escalada:** al incrementarse la aptitud media de la población, la fuerza de la presión selectiva también aumenta y la función de aptitud se hace más discriminadora. Este método es útil cuando todos los individuos tengan una aptitud relativamente alta y sólo les distinguen pequeñas diferencias en la aptitud.
- **Selección por torneo:** se eligen subgrupos de individuos de la población, y los miembros de cada subgrupo compiten entre ellos. Sólo se elige a un individuo de cada subgrupo para la reproducción.
- **Selección por rango:** a cada individuo de la población se le asigna un rango numérico basado en su aptitud, y la selección se basa en este ranking, en lugar de las diferencias absolutas en aptitud.
- **Selección generacional:** la descendencia de los individuos seleccionados en cada generación se convierte en toda la siguiente generación.
- **Selección por estado estacionario:** la descendencia de los individuos seleccionados en cada generación vuelven al acervo genético preexistente, reemplazando a algunos de los miembros menos aptos de la siguiente generación.
- **Selección jerárquica:** los individuos atraviesan múltiples rondas de selección en cada generación. Las evaluaciones de los primeros niveles son más rápidas y menos discriminatorias, mientras que los que sobreviven hasta niveles más altos son evaluados más rigurosamente.

✓ **Métodos de cambio**

Existen tres métodos de cambio: selección, cruce y mutación, los cuales consisten en:

- **Selección:** es el mecanismo por el cual las soluciones más próximas al óptimo tienen mayor probabilidad de sobrevivir y ser elegidos para reproducirse. Después de la selección de los más aptos deben ser alterados aleatoriamente para mejorar su aptitud en la próxima generación. Este proceso se logra mediante dos estrategias básicas. La primera es la mutación.
- **Mutación:** La mutación al igual que en los seres vivos cambia un gen por otro, una mutación en un Algoritmo Genético también causa pequeñas alteraciones en puntos concretos del código de un individuo.
- **Cruzamiento:** El segundo método se llama cruzamiento, e implica elegir a dos individuos para que intercambien segmentos de su código, produciendo una "descendencia" artificial cuyos individuos son combinaciones de sus padres. Este proceso realiza la recombinación de la misma forma que se realiza en los cromosomas durante la reproducción sexual. Entre las formas comunes de cruzamiento tenemos el cruzamiento en un punto, el cual consiste en un intercambio en un punto aleatorio del genoma de los dos individuos, y uno de los individuos contribuye con todo su código anterior a ese punto y el otro individuo contribuye todo su código a partir de ese punto para producir una descendencia. También tenemos el cruzamiento uniforme, el cual consiste en que la posición del valor del genoma dado de la descendencia corresponde con el valor en esa posición del genoma de uno de los progenitores o al valor en esa posición del genoma del otro progenitor, elegido con un 50% de probabilidad.

1.1.2 **Redes Neuronales (RNA)**

✓ **Definición**

Una red neuronal es un método de resolución de problemas basado en un modelo informático de la manera en que están conectadas las neuronas del cerebro. Una red neuronal consiste en capas de unidades procesadoras, llamadas nodos, unidas por conexiones direccionales: una capa de entrada, una capa de salida y cero o más capas ocultas en medio. [5]

✓ **Funcionamiento de las redes neuronales**

Las redes neuronales consisten en una simulación de las propiedades observadas en los sistemas neuronales biológicos a través de modelos matemáticos recreados mediante mecanismos artificiales (como un circuito integrado, un ordenador o un conjunto de válvulas). El objetivo es conseguir que las máquinas den respuestas similares a las que es capaz de dar el cerebro que se caracterizan por su generalización y su robustez.

Una red neuronal se compone de unidades llamadas neuronas. Cada neurona recibe una serie de entradas a través de interconexiones y emite una salida. Esta salida viene dada por tres funciones:

1. Una función de propagación (también conocida como función de excitación), que por lo general consiste en el sumatorio de cada entrada multiplicada por el peso de su interconexión

(valor neto). Si el peso es positivo, la conexión se denomina *excitatoria*; si es negativo, se denomina *inhibitoria*.

2. Una función de activación, que modifica a la anterior. Puede no existir, siendo en este caso la salida la misma función de propagación.
3. Una función de transferencia, que se aplica al valor devuelto por la función de activación. Se utiliza para acotar la salida de la neurona y generalmente viene dada por la interpretación que queramos darle a dichas salidas. Algunas de las más utilizadas son la función sigmoidea (para obtener valores en el intervalo $[0,1]$) y la tangente hiperbólica (para obtener valores en el intervalo $[-1,1]$).

A la capa de entrada se le presenta un patrón inicial, donde hay nodos que se estimulan y transmiten una señal a la capa siguiente. Si la suma de todas las entradas que entran en una de las neuronas virtuales es mayor que el umbral de activación de la neurona, esa neurona se activa, y transmite su propia señal a las neuronas de la siguiente capa. (Figura 1.2).

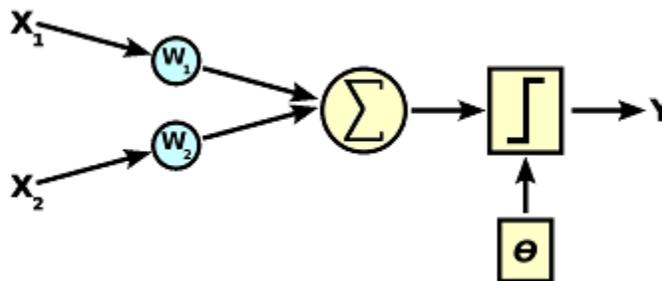


Figura 1.2: Perceptrón con 2 entradas.

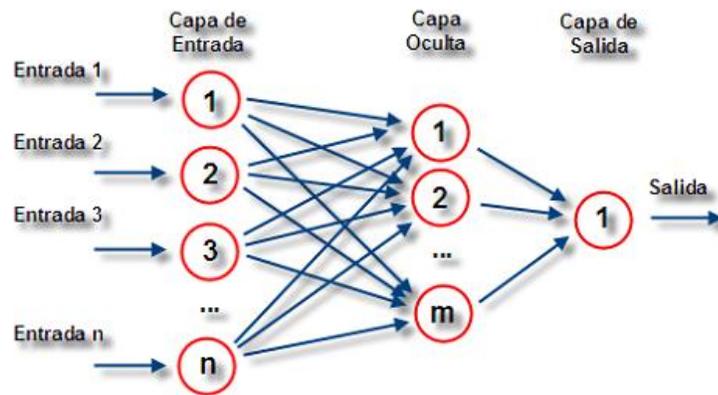
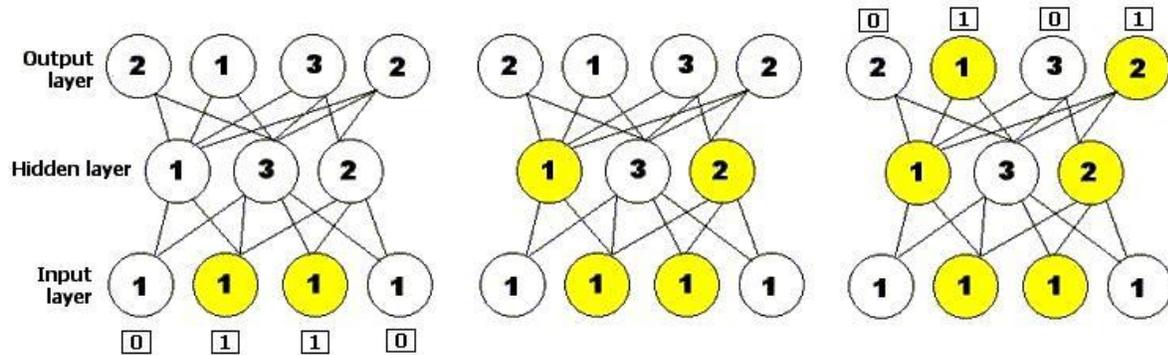


Figura 1.3: Red neuronal artificial perceptrón simple con n neuronas de entrada, m neuronas en su capa oculta y una neurona de salida

Figura 1.4: Se muestra una red neuronal anticipativa, con una capa consistente en cuatro neuronas, una capa



oculta consistente en tres neuronas y una capa de salida de cuatro neuronas. El número de cada neurona representa su umbral de activación: solo se excitará si recibe al menos esa cantidad de entradas. El diagrama muestra como la red neuronal recibe una cadena de entrada y como la activación se extiende por la red hasta producir una salida [5]

El patrón de activación se propaga hacia delante hasta que alcanza a la capa de salida, donde es devuelto como solución a la entrada presentada. Al igual que en el sistema nervioso biológicos, las redes neuronales aprenden y afinan su rendimiento a lo largo del tiempo, mediante la repetición de rondas en las que se ajustan sus umbrales, hasta que la salida real coincide con la salida deseada para cualquier entrada dada. Este proceso puede ser supervisado por un experimentador humano, o puede correr automáticamente utilizando un algoritmo de aprendizaje. Se han utilizado Algoritmos Genéticos (AG) para construir y entrenar a redes neuronales.

✓ **Diseño y programación de una RNA (red neuronal artificial)**

Con un paradigma convencional de programación en ingeniería del software, el objetivo del programador es modelar matemáticamente (con distintos grados de formalismo) el problema en cuestión y posteriormente formular una solución (programa) mediante un algoritmo codificado que *tenga* una serie de propiedades que permitan resolver dicho problema. En contraposición, la aproximación basada en las RNA parte de un conjunto de datos de entrada suficientemente significativo y el objetivo es conseguir que la red *aprenda* automáticamente las propiedades

deseadas. En este sentido, el diseño de la red tiene menos que ver con cuestiones como los flujos de datos y la detección de condiciones, y más que ver con cuestiones tales como la selección del modelo de red, la de las variables a incorporar y el pre procesamiento de la información que formará el *conjunto de entrenamiento*. Asimismo, el proceso por el que los parámetros de la red se adecuan a la resolución de cada problema no se denomina genéricamente programación sino que se suele denominar *entrenamiento neuronal*.

Por ejemplo en una red que se va a aplicar al diagnóstico de imágenes médicas; durante la fase de entrenamiento el sistema recibe imágenes de tejidos que se sabe son cancerígenos y tejidos que se sabe son sanos, así como las respectivas clasificaciones de dichas imágenes. Si el entrenamiento es el adecuado, una vez concluido, el sistema podrá recibir imágenes de tejidos no clasificados y obtener su clasificación *sano/no sano* con un buen grado de seguridad. Las variables de entrada pueden ser desde los puntos individuales de cada imagen hasta un vector de características de las mismas que se puedan incorporar al sistema (por ejemplo, procedencia anatómica del tejido de la imagen o la edad del paciente al que se le extrajo la muestra).

✓ Estructura de una RNA

La mayoría de los científicos coinciden en que una RNA es muy diferente en términos de estructura de un cerebro animal. Al igual que el cerebro, una RNA se compone de un conjunto masivamente paralelo de unidades de proceso muy simples y es en las conexiones entre estas unidades donde reside la inteligencia de la red. Sin embargo, en términos de escala, un cerebro es muchísimo mayor que cualquier RNA creada hasta la actualidad, y las neuronas artificiales también son más simples que su contrapartida animal.

Biológicamente, un cerebro aprende mediante la reorganización de las conexiones sinápticas entre las neuronas que lo componen. De la misma manera, las RNA tienen un gran número de *procesadores* virtuales interconectados que de forma simplificada simulan la funcionalidad de las neuronas biológicas. En esta simulación, la reorganización de las conexiones sinápticas biológicas se modela mediante un mecanismo de *pesos*, que son ajustados durante la fase de aprendizaje. En una RNA entrenada, el conjunto de los pesos determina el *conocimiento* de esa RNA y tiene la propiedad de resolver el problema para el que la RNA ha sido entrenada.

Por otra parte, en una RNA, además de los pesos y las conexiones, cada neurona tiene asociada una función matemática denominada función de transferencia. Dicha función genera la señal de salida de la neurona a partir de las señales de entrada. La entrada de la función es la suma de todas las señales de entrada por el peso asociado a la conexión de entrada de la señal. Algunos ejemplos de entradas son la función escalón de Heaviside, la lineal o mixta, la sigmoide y la función gaussiana, recordando que la función de transferencia es la relación entre la señal de salida y la entrada.

✓ Principios de las Redes Neuronales

El aprendizaje humano se considera actualmente que este se logra cuando hay cambios en la intensidad de las conexiones de señal entre neuronas. Una red de alimentación positiva, totalmente desarrollada, es el tipo más común de red neuronal artificial, y se construye siguiendo

ese principio, a través de varias capas de elementos de procesamiento que simulan las neuronas [6].

Los elementos en la primera capa (entrada) se alimentan con datos, por ejemplo de fuerzas, velocidades y tensiones. Cada elemento suma todas sus entradas: una por elemento en la capa de entrada, muchas por elemento en las capas siguientes. En una capa cada elemento transfiere los datos de acuerdo con una función de transferencia a todos los elementos de la siguiente capa. En las otras capas se recibe, una señal distinta, a causa de los distintos factores de ponderación o pesos de conexión entre los elementos. La última capa es la de salida, dentro de la cual cada elemento se compara con la salida deseada. La diferencia entre la salida deseada y la calculada que es el error se realimenta a la red, cambiando los pesos de las conexiones de forma tal que se reduzca el error.

Después de una variada repetición de este proceso, la red se ha adiestrado y esta red se puede usar con datos de entrada nuevos los cuales no se hayan usado en dicha red. Estas redes se deben adiestrar con ejemplos reales y concretos para minimizar los errores y garantizar una mayor exactitud en los valores de salida. Debido a esto, se hace muy difícil formular en forma matemática relaciones entre entrada y salida y predecir el comportamiento de una red neuronal artificial cuando las entradas no se han adiestrado.

✓ **Algunas de las características de las Redes Neuronales son:**

- **Auto organización:** consiste en la modificación completa de la red con el fin de desarrollar un objetivo específico. Con esta característica la red puede responder a datos o situaciones que no ha experimentado antes, solucionándolas sobre la base de su entrenamiento. Esta característica es muy útil sobre todo cuando la información de entrada es poco clara o se encuentra incompleta.
- **Aprendizaje adaptativo:** pueden comportarse en función de un entrenamiento con una serie de ejemplos ilustrativos, lo cual no hace necesario elaborar un modelo inmediato, ni establecer funciones probabilísticas. Una red neuronal artificial tiene un aprendizaje adaptativo porque puede modificarse constantemente con el fin de adaptarse a nuevas condiciones de trabajo.
- **Operación en tiempo real:** son las más indicadas para el reconocimiento de patrones en tiempo real, debido a que trabajan en paralelo actualizando todas sus instancias simultáneamente. Esta característica solo se puede obtener cuando se trabajan las redes con hardware diseñados para el procesamiento paralelo.
- **Tolerancia a fallos:** tienen una alta capacidad de tolerancia a fallos. Las redes pueden reconocer patrones de información con ruido, distorsión o incompletos, pero que, además, pueden seguir trabajando aunque se destruya parte de la red (con cierta degradación).
- **Fácil inserción en la tecnología existente:** Es relativamente sencillo obtener chips especializados para redes neuronales que mejoran su capacidad en ciertas tareas. Ello facilita la integración modular en los sistemas existentes.[2]

✓ **Aprendizaje**

Una clasificación que se suele hacer es en función del tipo de aprendizaje de que es capaz (si necesita o no un conjunto de entrenamiento supervisado). Para cada tipo de aprendizaje encontramos varios modelos propuestos por diferentes autores:

- **Aprendizaje supervisado:** necesitan un conjunto de datos de entrada previamente clasificado o cuya respuesta objetivo se conoce. Ejemplos de este tipo de redes son: el perceptrón simple, la red Adaline, el perceptrón multicapa, red backpropagation, y la memoria asociativa bidireccional.
- **Aprendizaje no supervisado o auto organizado:** no necesitan de tal conjunto previo. Ejemplos de este tipo de redes son: las memorias asociativas, las redes de Hopfield, la máquina de Boltzmann y la máquina de Cauchy, las redes de aprendizaje competitivo, las redes de Kohonen o mapas auto organizados y las redes de resonancia adaptativa (ART).
- **Redes híbridas:** son un enfoque mixto en el que se utiliza una función de mejora para facilitar la convergencia. Un ejemplo de este último tipo son las redes de base radial.
- **Aprendizaje reforzado:** se sitúa a medio camino entre el supervisado y el auto organizado.

✓ **Tipo de entrada**

Finalmente también se pueden clasificar las RNAs según sean capaces de procesar información de distinto tipo en:

- **Redes analógicas:** procesan datos de entrada con valores continuos y, habitualmente, acotados. Ejemplos de este tipo de redes son: Hopfield, Kohonen y las redes de aprendizaje competitivo.
- **Redes discretas:** procesan datos de entrada de naturaleza discreta; habitualmente valores lógicos booleanos.

Ejemplos de este segundo tipo de redes son: las máquinas de Boltzmann y Cauchy, y la red discreta de Hopfield.

1.1.3 Sistemas Expertos

✓ **Definición.**

Los sistemas expertos tradicionales intentan reproducir el razonamiento humano de forma simbólica. Es un programa de aplicación informática que toma decisiones o resuelve problemas de un campo determinado, como sistemas de producción, las finanzas o la medicina, utilizando los conocimientos y las reglas analíticas definidas por los expertos en dicho campo.

Dichos expertos le dan soluciones a los problemas utilizando una combinación de conocimientos basados en hechos y en su capacidad de razonamiento. En los sistemas expertos, estos dos factores básicos están contenidos en componentes separados, pero relacionados: una base de conocimientos y una máquina de deducción, o de inferencia. La base de conocimientos proporciona hechos objetivos y reglas sobre el tema, mientras que la máquina de deducción

proporciona la capacidad de razonamiento que le permiten al sistema experto extraer conclusiones[7].

Estos sistemas facilitan el uso de herramientas adicionales en forma de interfaces de usuario y mecanismos de explicación. Las interfaces de usuario, le permiten al usuario desarrollar consultas, proporcionar información e interactuar de variadas formas con el sistema.

1.1.4 Lógica Difusa

✓ Definición.

Es un método de proceder similar al razonamiento humano. Estos sistemas de lógica difusa son una mejora a los sistemas experto tradicionales, en el sentido de que permiten utilizar lenguaje humano razonando de forma similar a los seres humanos[7].

1.1.5 Recocido Simulado

✓ Definición.

Este método toma su nombre del proceso industrial en el que un material se calienta por encima de su punto de fusión y luego se enfría gradualmente para eliminar defectos en su estructura cristalina, produciendo una red cristalina más estable y regular.

En el recocido simulado, como en los Algoritmos Genéticos, existe una función de aptitud que define un paisaje adaptativo; en lugar de una población de candidatas como en los Algoritmos Genéticos (AG), sólo existe una solución candidata. El recocido simulado también añade el concepto de "temperatura", una cantidad numérica global que disminuye gradualmente en el tiempo. En cada paso del algoritmo, la solución muta

Después, la aptitud de la nueva solución se compara con la aptitud de la solución anterior; si es mayor, se conserva la nueva solución. En caso contrario, el algoritmo toma la decisión de conservarla o descartarla en base a la temperatura. Si la temperatura es alta, como lo es al principio, puede conservarse incluso cambios que causan cambios significativos en la aptitud, y se utilizan como base para la siguiente ronda del algoritmo. Pero al disminuir la temperatura, el algoritmo se hace más propenso a aceptar nada más los cambios que aumentan la aptitud. Al finalizar la temperatura alcanza el cero y el sistema se "congela"; cualquiera que sea la configuración que exista en ese punto se convierte en la solución [5].

1.1.6 Colonia de hormigas

✓ Definición

El sistema de Optimización de colonia de hormigas (ant colony optimization o ACO) el cual está inspirado en el rastro y seguimiento de feromonas realizado por las hormigas como medio de comunicación. Los caminos de feromonas sirven como información distribuida que las hormigas usan en forma probabilística para construir soluciones a un problema y que las hormigas adaptan para reflejar su experiencia[8].

Resulta realmente interesante analizar como las hormigas buscan su alimento y logran establecer el camino más corto para luego regresar a su nido. Para esto, al moverse una hormiga, deposita una sustancia química denominada feromona como una señal odorífera para que las demás puedan seguirla. Las feromonas son un sistema indirecto de comunicación química entre animales de una misma especie, que transmiten información acerca del estado fisiológico, reproductivo y social, así como la edad, el sexo y el parentesco del animal emisor, las cuales son recibidas en el sistema olfativo del animal receptor, quien interpreta esas señales, jugando un papel importante en la organización y la supervivencia de muchas especies [9].

Las primeras hormigas que son la que realizan el primer camino no saben a ciencia cierta el lugar hacia donde van toman el camino más largo pero las que le siguen son capaces de tomar caminos más cortos y entonces la mayoría de las hormigas toman ese último camino aumentando la concentración de feromonas. Considerando que la evaporación de la sustancia química hace que los caminos menos transitados sean cada vez menos deseables y la realimentación positiva en el camino con más feromonas, resulta claro que al cabo de un tiempo casi todas las hormigas transiten por el camino más corto.

1.2 Aplicación de las técnicas de Inteligencia Artificial en la producción para la optimización de los procesos de conformado de metales

Con este capítulo se realizará una revisión bibliográfica sobre las más modernas tecnologías que se usan en el mundo de las grandes empresas de manufactura las cuales utilizan estas técnicas para lograr altos índices de rendimiento y óptimos diseños de piezas, logrando con estas avanzadas técnicas bajos costos de fabricación.

1.2.1 Corte de piezas rectangulares mediante algoritmos genéticos

Los autores [10] desarrollaron un trabajo sobre un problema real en la industria, el corte de piezas rectangulares mediante algoritmos genéticos. Este problema consiste en la colocación de unas figuras rectangulares dentro de una superficie base con el fin de aprovechar al máximo el material de la chapa base. En la fig. 1.5, se puede ver un ejemplo de un problema de este tipo.

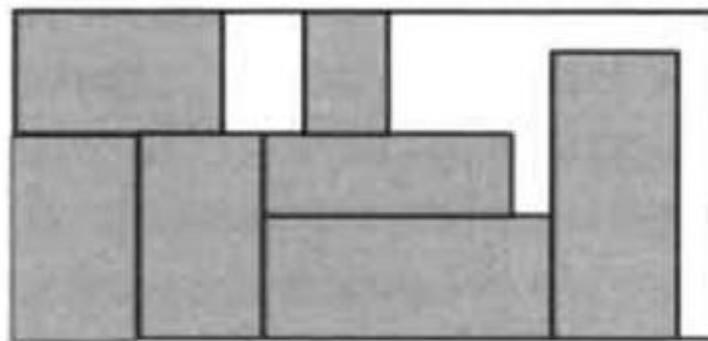


Figura 1.5: Ejemplo de ubicación de piezas [10]

Primero los autores crean un cromosoma de longitud igual a la suma de todos los máximos. Cada una de las posiciones del cromosoma va a representar un rectángulo. Luego el individuo representa la secuencia usada para ubicar los rectángulos en la chapa. Considerándose que se tienen 4 rectángulos para insertar en la chapa enumerados del 1 al 4 para distinguirlos, se crea un genotipo que podría ser solución al problema el cual sería dado por la siguiente permutación: $\pi = (1, 3, 4, 2)$. Esto quiere decir que el rectángulo 1 es el primero en introducirse en la chapa base, seguido del 3, del 4 y por último el 2.

Conocida la secuencia de entrada, se explica los pasos del algoritmo propuesto por Jakobs, para saber la ubicación de un rectángulo genérico dentro de la chapa base:

- Se coloca el rectángulo situado en primer lugar en la permutación, en la esquina inferior izquierda de la chapa base.
- Se van situando el resto de los rectángulos, tomando el orden de la permutación, de manera que para situar un rectángulo, se parte de la esquina superior derecha de la chapa base, bajándolo tanto como sea posible hasta tocar otro rectángulo y no poder avanzar más. Luego se debe llevar tan a la izquierda como sea posible, igualmente hasta alcanzar algún límite que impida el avance (Fig.: 1.6).

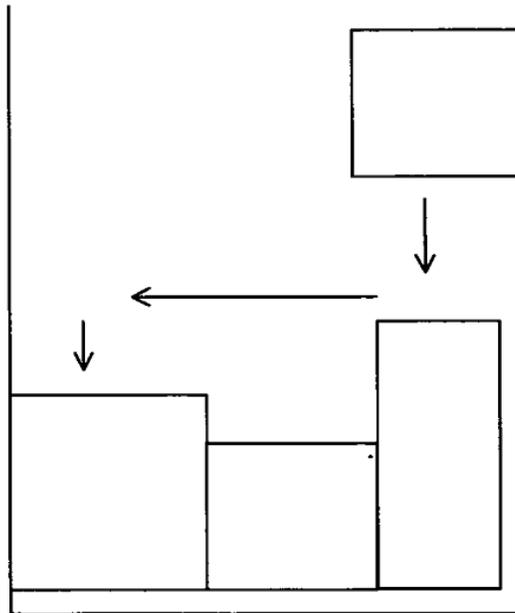


Figura 1.6: Secuencia de posicionamiento [10]

Los resultados obtenidos por los autores para poder medir la calidad de las soluciones aportadas por cada uno de los AGs presentados en el trabajo ha sido necesario generar una serie de problemas de pruebas, con el fin de comprobar la influencia del número de rectángulos en la velocidad de cálculo en la calidad de las soluciones.

En primer lugar, se estudió la posibilidad de comparar los resultados al simular un algoritmo genético con los que se obtienen mediante la programación entera [11]. Esta comparación solo se pudo hacer para simulaciones de menos de 20 piezas, cuando el número de piezas a colocar superaba esta cifra, la solución basada en programación entera se volvía muy lenta (varias horas), sin embargo el tiempo necesario para la simulación con AG seguía siendo de unos pocos segundos.

Con menos de 20 piezas, los resultados ofrecidos por ambos métodos son muy similares, obviamente el AG, en algunas simulaciones, aprovecha menos el material, pero este menor aprovechamiento no pasa de un 5 %. Estos resultados les permiten concluir que la solución que se plantea con AG se puede aplicar en estos problemas, siendo conscientes que su uso implica un menor aprovechamiento del material.

Por lo que se arriba la conclusión que se puede resolver el problema de la colocación de piezas rectangulares dentro de la chapa base para su corte mediante técnicas heurísticas, en concreto con algoritmos genéticos. Los cuales fueron comparados con los resultados de la programación entera y ofrecieron resultados positivos. Además de estos resultados es necesario intentar

mejorar los resultados ofrecidos por los algoritmos genéticos paralelos y se deben probar otras formas de codificar estos problemas.

1.2.2 El establecimiento de GA-BP optimizando un modelo de red neuronal para la estimación de la recuperación elástica

El grupo de investigadores [12] desarrollaron un algoritmo genético para optimizar una red neuronal para la estimación de la recuperación elástica del material que se está deformando.

Muchos experimentos se han llevado a cabo bajo pura flexión (es decir, con una tensión mínima), las condiciones de diversos tipos: las herramientas cilíndricas, U-bending/channel flexión y flexión-V. Sin embargo, estos resultados tienen poca aplicación a las situaciones donde la tensión en la chapa está presente, porque la tensión de la chapa domina otras variables del proceso en la determinación de la recuperación elástica. El proceso de extracción de flexión utilizados en este estudio realizado por [13], figura 1.7, consta de dos actuadores hidráulicos orientados a 90° entre sí, con un cilindro fijo o en movimiento en la intersección de sus líneas de acción para simular el radio de herramienta sobre las cuales se coloca la chapa de metal. El actuador superior (horizontal) está programado para proporcionar una fuerza de contención constante, mientras que el actuador inferior está configurado para desplazar a una velocidad constante.

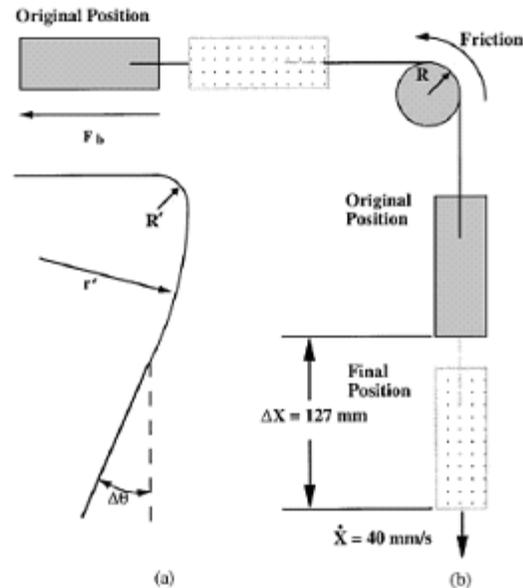


Figura 1.7: Draw/bend test geometry: (a) specimen shape after unloading; and (b) original and final shapes during testing [12]

Tres materiales fueron seleccionados para predecir la recuperación elástica. La primera aleación, acero DQSK, el acero HSLA, y el aluminio 6022-T4. El acero HSLA es galvanizado en caliente, mientras que los otros materiales fueron sin recubrimiento. El material se somete a una carga de tracción, flexión. Al final de la prueba, el material se le permite la recuperación elástica cuando se le retira las garras de los accesorios de la muestra. Las muestras fueron cortadas a las longitudes de 508 mm a lo largo de la dirección de laminado de la chapa, con un ancho de 50 mm. La tira fue doblada por el rodillo a una velocidad constante de $s = 40$ mm. Con el fin de investigar el papel de herramienta rodillo, la tensión y la fricción en la recuperación elástica, se realizaron ensayos con una selección de los parámetros del proceso.

Varios conjuntos de herramientas, tanto fijas como móviles, se construyeron con un radio de 3,2, 6,4, 12,7 y 25,4 mm. La modelación se fijó en una fracción del límite elástico de cada material en los siguientes incrementos: 0.5, 0.7, 0.9, 1.1, 1.3 y 1.5. La fricción fue modificada mediante el uso de rodillos lubricados (mínima fricción), lubricando herramientas fijas (fricción media), y sin lubricar herramientas fija (alta fricción). Después de la modelación, a fin de obtener los ángulos de la recuperación elástica las muestras fueron ópticamente medidas.

Para el establecimiento de GA-BP optimizando el modelo de red neuronal se tomaron los ochos parámetros de entrada y se combinaron cinco parámetros adimensionales:

- (i) la relación de rendimiento de la fuerza para el módulo de Young, σ_y / E ,
- (ii) coeficiente de fricción, μ ,
- (iii) la proporción del radio de la herramienta y espesor de la chapa, R / t ,
- (iv) la fuerza real de volver a dar fuerza, $F_b = F_b / \sigma_y$,
- (v) la anisotropía de plástico, r .

Capítulo I: Antecedentes, estado actual y perspectiva del empleo de las técnicas de IA para el estudio de los procesos de estirado de chapas

Los parámetros de interés, a saber, la recuperación elástica ángulo se la salida de los NN. Los datos experimentales se compone de 104 muestras que cada muestra tiene seis valores, 5 de entradas y un valor objetivo. Una parte de las muestras se observa en las Tablas 1,2 y 3 para el aluminio 6022-T4, DQSK y HSLA.[12]

Table 1: Some experimental data of 6022-T4 aluminium

σ_y/E	r	μ	R/t	\bar{F}_b	$\Delta\theta^\circ$
0.0025	0.73	0.2	6.9780	0.9	9.8
0.0025	0.73	0.2	10.467	0.5	47.7
0.0025	0.73	0.2	13.956	0.9	2.2
0.0025	0.73	0.12	3.4890	1.1	5.4
0.0025	0.73	0.12	6.9780	0.9	10.5
0.0025	0.73	0.12	10.467	0.5	52.2
0.0025	0.73	0.12	13.956	0.9	5.3
0.0025	0.73	0.12	27.912	0.9	1

Table 2: Some experimental data of DQSK

σ_y/E	r	μ	R/t	\bar{F}_b	$\Delta\theta^\circ$
0.0007	1.87	0.19	4.2333	0.9	4.1
0.0007	1.87	0.19	6.35	0.5	7.3
0.0007	1.87	0.19	8.4666	0.9	3.2
0.0007	1.87	0.17	2.1166	0.9	-5.4
0.0007	1.87	0.17	4.2333	0.9	4.6
0.0007	1.87	0.17	6.35	0.5	7.2
0.0007	1.87	0.17	8.4666	0.9	6.2

Table 3: Some experimental data of HSLA

σ_y/E	r	μ	R/t	\bar{F}_b	$\Delta\theta^\circ$
0.0020	0.69	0.09	4.2333	0.9	0.6
0.0020	0.69	0.09	6.35	0.5	16.6
0.0020	0.69	0.09	8.4666	0.9	1.7
0.0020	0.69	0.06	2.1166	0.7	-8.3
0.0020	0.69	0.06	4.2333	0.9	-0.2
0.0020	0.69	0.06	6.35	0.5	14
0.0020	0.69	0.06	8.4666	0.5	11.8

El 70% de estas muestras se seleccionan al azar para la conformación, el 10 por ciento para la validación y el 20 por ciento para la prueba. En cada interacción, el error de entrenamiento y el error de validación de cálculo. El objetivo de entrenamiento es la reducción del error de salida, pero el entrenamiento debe terminar cuando el error de validación comienza a subir.

Una red de alimentación hacia adelante neural con cinco entradas y una salida se establece en vista del hecho de que la entrada y los parámetros de salida están relacionados por una función continua, una sola capa oculta se considera adecuada. El número de neuronas capa oculta se fijó en 50 por pista, y luego un modelo de red con la arquitectura 5-50-1 se estableció, como se muestra en la figura 2.4.

El procedimiento de definición del modelo de NN es la siguiente:

1. Inicializar la población de la función de peso
2. Cálculo de la suficiencia de todos los individuos de la población
3. Selección, cruzamiento, mutación actividad que genera la siguiente población
4. Desarrollar algunos cromosomas diferentes, con casi mejor condición física por el método de propagación hacia atrás.

5. Seleccionar algunos cromosomas que las élites que sin ningún tipo de operación se destinará a la población próxima
6. Detener condición

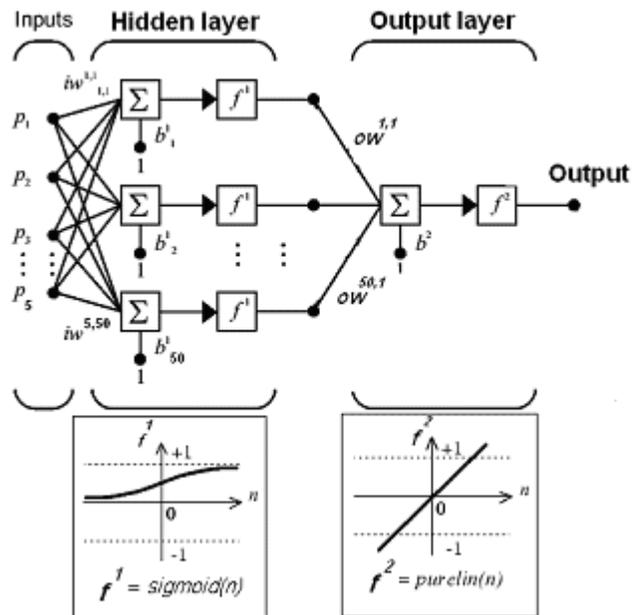


Figura 1.8: Feed forward neural network with five inputs, 50 hidden layer neurons and one output [12]

En este estudio se utilizan métodos para la optimización de las redes neuronales: Método de propagación hacia atrás, algoritmos genéticos y el método de GA-BP. Los resultados se muestran en la Figura 1.9. La figura muestra que el método de propagación hacia atrás cae en óptimos locales. Por lo tanto, el método GA-BP parece ser un algoritmo de una formación adecuada para este problema. En la figura 1.10 se muestra el error de validación del método GA-BP. El error de validación comienza a aumentar después de 30 iteraciones, así que después de esta iteración, la formación no es útil. Por último, red neuronal se ha optimizado con GA-BP método por el 30 iteraciones. Después del entrenamiento, las estimaciones de la red neuronal se tomaron en comparación con los datos experimentales para algunos casos particulares. La Figura 1.11 muestra la relación de $\theta \Delta$ para obligarlos a volver a normalizarlo (Fb). Las estimaciones de redes neuronales de la recuperación elástica y los datos experimentales de 6022-T4 de aluminio con $R=5,9$ mm para el modo de rodar en seco se comparan en la figura. Se puede observar que la red neuronal optimizada es capaz de responder a los datos de entrada desconocido para estimar el producto requerido, en el ámbito cubierto por los datos experimentales.

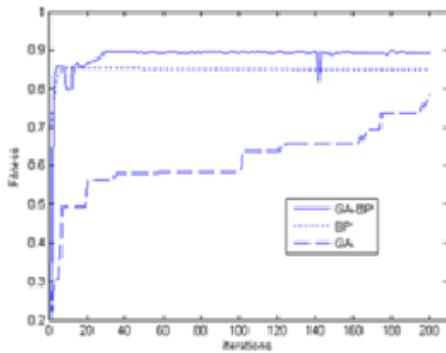


Figura 1.9: Comparing GA-BP, BP and GA training methods for 200 iterations

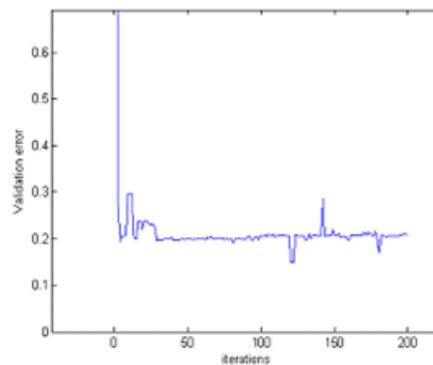


Figura 1.10: Validation error in GA-BP training method

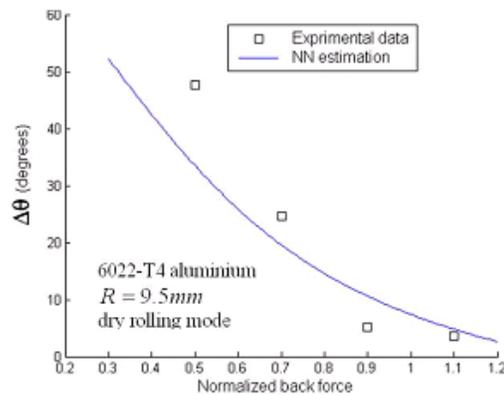


Figura 1.11: Comparing experimental data with NN estimation

Debido a la existencia de la recuperación elástica, la precisión de los productos y las operaciones posteriores se vieron gravemente afectadas. Entonces, ¿cómo estimar con eficacia de la recuperación elástica ha sido la clave para la precisión y la conformación de ultra-precisión de las herramientas de diseño. En este trabajo, se utiliza un feed forward de redes neuronales para modelar el proceso de deformación. Se utilizan tres métodos para la optimización de redes neuronales: Método de propagación hacia atrás, algoritmo genético y un nuevo método GA-BP. Como resultado de este estudio se demuestra que la GA-BP método más rápido llega a los resultados deseados sin atraparse en óptimos locales.

1.2.3 Identificación de los parámetros y el sistema de control adaptativo para el proceso de embutición profunda mediante técnicas de inteligencia artificial

Los autores [14] proponen un sofisticado sistema de control adaptativo para el proceso de embutición profunda. Este proceso consiste en una etapa de identificación durante el proceso y una variable de control de la fuerza de mantenimiento variable en la matriz (BHF), etapa donde se controla la BHF de acuerdo a las propiedades del material identificado en la matriz y la formación de condiciones. Sin embargo, es difícil identificar las características anisotrópicas de materiales mediante el método basado en la suposición del material isotrópico. Para resolver este

problema, una red neuronal artificial (ANN), se aplicó con el fin de identificar las propiedades del material anisotrópico y coeficiente de fricción μ entre la matriz y la herramienta. En el trabajo, el coeficiente de fricción se supone que es constante durante el proceso. Todavía es muy difícil obtener un óptimo sistema de control de BHF porque la fricción varía durante el proceso.

El principio del control adaptativo BHF se muestra en la figura. 2.8, la etapa inicial consiste en la identificación de las propiedades del material. Las curvas límite de fractura y las arrugas BHF se calculan mediante el empleo de las propiedades del material identificado y sobre la base de la teoría elemental elastoplástico. Después de esta etapa, una variable técnica BHF se lleva a cabo con el fin de aplicar una BHF variable adecuada durante el proceso. En la figura 1.12, dos tipos de esquemas de BHF está indicado para el control adaptativo BHF para diferentes propósitos. Ruta de acceso (a) es una taza con espesor de pared uniforme y la ruta (b) para la mejora de la altura de la taza de espesor.

Formación teórica límite en la matriz, las curvas de la fuerza de los materiales anisotrópicos en la matriz Considerando criterio de Mises-Hill rendimiento con r anisotropía normal y suponiendo que el blanco de endurecimiento por deformación

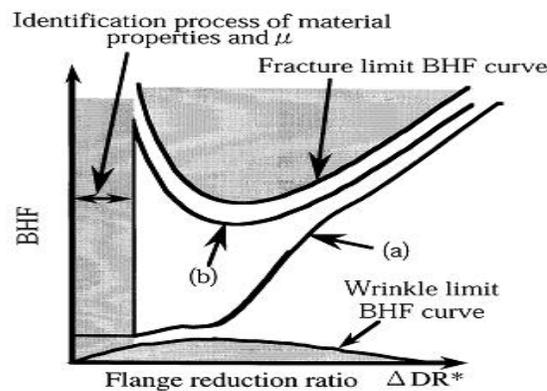


Figura 1.12: Principio del proceso de control adaptable BHF de embutición profunda.(a) BHF curva para obtener una proporción uniforme en el espesor de pared, (b) la curva de BHF basado sobre el límite de la fractura [14].

1.2.4 Las características del material mediante el modelo de identificación

Para el control del proceso de adaptación de embutición profunda, es necesario identificar las propiedades del material y la condición de la lubricación durante el proceso de detección. De acuerdo al anterior trabajo [15] un modelo ANN mejorado la exactitud de la identificación. Sin embargo, el modelo de ANN, que fue adquirida por los datos en el inicio del proceso, se pueden emplear para identificar los parámetros desde el principio, pero no en las demás etapas del

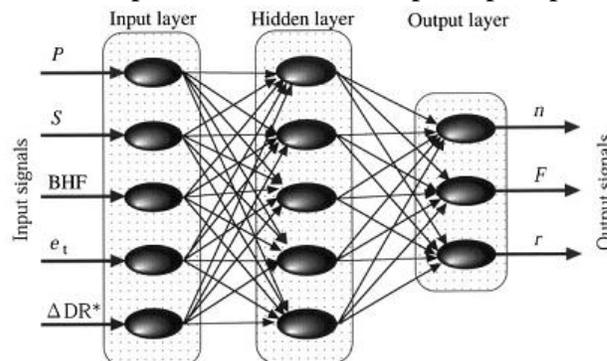


Figura 1.13: Three-layered ANN model

proceso. En general, es bien sabido que la fricción entre la matriz y las herramientas de turno con diferentes lubricantes varía de una manera también dependiente del tiempo. En este estudio, un modelo de identificación de la combinación se utilizó, en la que las propiedades del material fueron identificadas por el modelo de ANN en el inicio del proceso y el actual m se obtiene sustituyendo en proceso de identificar las propiedades del material en el modelo elemental teoría de la plasticidad.

1.2.5 Aprendizaje del modelo de red neuronal artificial

En este proceso, una ANN de tres capas se muestra en la figura 1.13 es utilizada como un modelo de identificación. Las señales de entrada y salida de la ANN se enumeran en la Tabla 4. Los números de las señales han sido modificados y mejorados para lograr una alta precisión en el aprendizaje, en comparación con nuestro anterior trabajo [15]. El número de capas de entrada se incrementó de tres a cinco, y la capa de salida se redujo en tres debido a la omisión de μ . Cinco juegos de punzón de carga P , presión del prensa chapas BHF, Espesor de la chapa S , y la relación de la reducción de la chapa ΔDR^* , que se miden en una etapa temprana (donde ΔDR^* 0,01, 0,02, 0,03, 0,04), fueron introducidos como las señales de entrada. Las señales de salida son las propiedades del material del blanco, que se r coeficiente de anisotropía, el trabajo de endurecimiento n exponente y el coeficiente de plasticidad F . La ANN se supo mediante un algoritmo de retro propagación.

Cuarenta y seis juegos de en proceso de detección de datos con diferentes condiciones de formación y espacios en blanco, y las propiedades del material determina a partir del ensayo de tracción se utilizan para el aprendizaje de la ANN. El número de neuronas en cada capa de la red neuronal son 20, 40 y 3, donde se decide el número de neuronas en la capa oculta por ensayo y error. El aprendizaje se llevó a cabo 600.000 veces y los errores en la red neuronal convergentes a 0,65%. En comparación con nuestro anterior trabajo [15], el número de los aprendizajes se incrementó y la fiabilidad de la ANN fue aún mayor (la convergencia final anterior fue del 1,2%).

Tabla 4:
Input and output factors of ANN

Input data	Output data
Punch load, P	n value
Punch stroke, S	F value
BHF	r value
Flange thickness strain, $e_t = (t_{max} - t_0)/t_0$	
Flange reduction ratio, ΔDR^*	

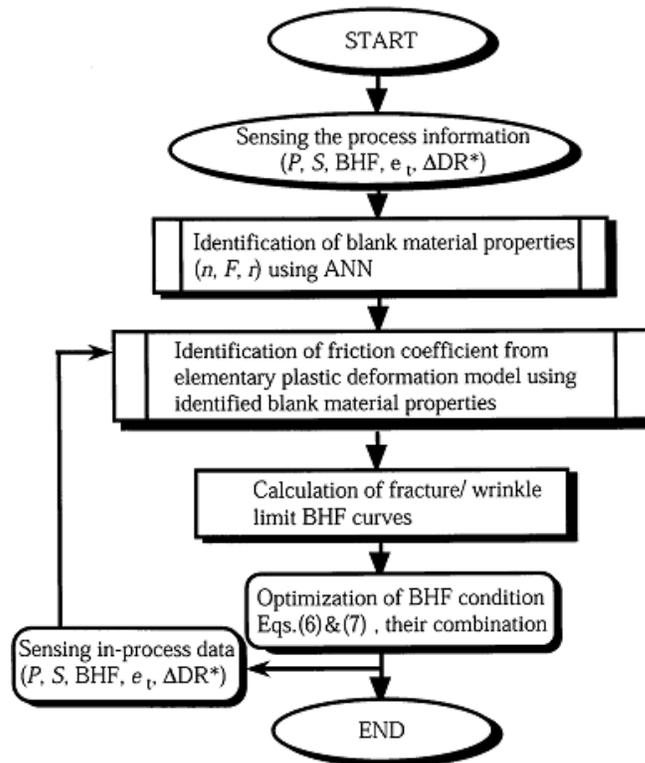


Figura 1.14: Flowchart of adaptive BHF control

Para obtener los datos de la enseñanza para el aprendizaje de la ANN, el experimento de embutición profunda se llevó a cabo. Dos tipos de láminas de metal, aleación de aluminio (A5182-O) de 1,0 mm de espesor y acero extra de embutición profunda (EDDQ) de espesor de 0,7 mm fueron empleados en el experimento. Las propiedades del material de la matriz se muestran en la tabla 5. Hay dos tipos de tamaños de la matriz que se utilizan en el experimento: relación de radios DR 1,79 y 1,86. Los lubricantes utilizados son de fluorocarbono seca (tipo spray) y el aceite de lubricación PG-3740 ($\nu = 218 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$). El aparato de embutición profunda en este experimento es capaz de la gestión informatizada de la velocidad del BHF y empuje de la prensa, en el proceso de embutición profunda que se ha desarrollado ya por los autores [19,20]. Este sistema está equipado con varios sensores: fuerza de desplazamiento, la carga de fuerza, BHF, el desplazamiento de la matriz y el desplazamiento de desplazamiento radial de la chapa. Los experimentos se realizaron en la velocidad de perforación de $v = 25 \text{ mm min}^{-1}$, que es cinco veces más rápido que el anterior control adaptativo [16, 17]. La

configuración del aparato experimental se muestra en la figura. 1.15. El control del proceso de la BHF se llevó a cabo para la obtención de una pared uniforme de casquillos.

Tabla 5
Material properties of blank used

Material	t_0 (mm)	n value	F value ($N \cdot mm^{-2}$)	r value
Al (A5182-O)	1.0	0.28	398.6	0.6
Steel (EDDQ)	0.7	0.24	409.6	1.97

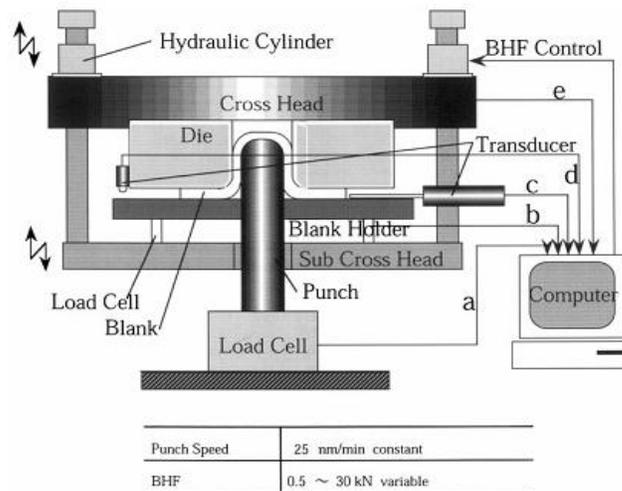


Figura 1.15: Esquema del sistema de control de embutición profunda. (a) celda de carga, (b) BHF, (c) el desplazamiento de brida, (d) el desplazamiento del prensachapas; (e) fuerza de empuje [15].

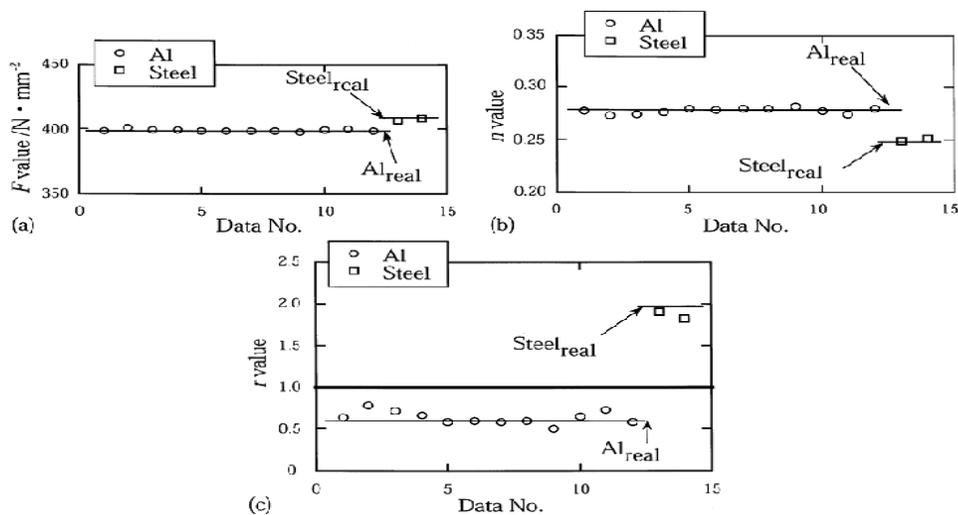


Figura 1.16: Identificación de las propiedades del material usando ANN. (a) valor de F , (b) valor de n , (c) valor de r [15].

Como resultado de gran interés los autores identificaron las propiedades del material por la red neuronal artificial. Fig. 1.16 muestra la comparación entre las propiedades de los materiales identificados durante el proceso de la ANN y los obtenidos en el ensayo de tracción. El coeficiente de anisotropía r se identifica con la mayor precisión que los otros dos parámetros (F , n). Se confirma que la red neuronal como modelo de identificación de las propiedades del material es bastante eficaz y fiable.

1.2.6 Planeación de Procesos asistida por computadora en el estirado de chapas

El autor [2] efectuó un estudio sobre diferentes herramientas de Inteligencia Artificial a través de una planeación y programación de procesos asistida por computadora para realizar la optimización de una pieza producida por estirado de chapas. Caracterizó mediante una revisión bibliográfica los procesos de estirado de chapas, realizando una descripción de algunas herramientas de Inteligencia Artificial más utilizadas en dicho proceso. Hizo la propuesta de un CAPP para la optimización de un fregadero realizado en dicha empresa, en la cual se utiliza un software conocido como Matlab, también mostró resultados de una simulación llevada a cabo por métodos de elementos finitos y efectuó una comparación entre dos Algoritmos Genéticos utilizados para la obtención de la fuerza óptima de embutido. En este trabajo se puede ver como con la utilización de estas herramientas numéricas y una buena planeación de procesos se pueden mejorar los índices de producción y aprovechamiento de la materia prima.

Propuso una metodología para la planeación y programación de procesos de embutido de chapas.

Paso 1 Descripción del proceso.

- a. Caracterización del material
- b. Análisis geométrico de la pieza (Planos de la pieza)
- c. Determinación del diámetro equivalente y la altura permisible en función del diámetro equivalente.
- d. Cálculo de los parámetros activos de la herramienta (Radio de redondeo de la matriz y del punzón, el juego de embutición)
- e. Diseño conjuntos superior e inferior de la herramienta (plano del troquel)
- f. Establecer las relaciones cinemáticas del proceso (velocidad de conformación, relación de deformaciones, entre la parte deformada y la parte no deformada
- g. Establecer los límites de conformabilidad del material, o sea, determinar si es posible ejecutar la operación de conformación sin causar algún defecto de superficie o interno en el material.
- h. Prever la fuerza y las tensiones necesarias para ejecutar la operación de conformación.
- i. Considerar la influencia del endurecimiento por deformación, la relación de embutición, tipo de lubricante empleado.

Paso 2. Simulación del proceso de embutido de chapas empleando el método de elementos finitos (MEF)

- a. Definir las variables de entrada con las que se trabajará, forma geométrica, material, parámetros del proceso, diagrama límite de conformado
- b. Establecer las condiciones de frontera para cada uno de esos parámetros
- c. Definir las variables de salida que interesan

- d. Diseñar la simulación para determinar el efecto de la variación de las variables de entrada sobre los indicadores de eficiencia.
- e. Validación del MEF

Paso 3. Seleccionar de forma apropiada una herramienta de inteligencia artificial para modelar el efecto de las variables de entrada sobre los indicadores de eficiencia.

Paso 4. Modelar la herramienta de IA para cada indicador de eficiencia seleccionado

Paso 5. Comparar los resultados de la optimización de los diferentes algoritmos utilizados.

Con esta metodología el autor [2] realizó un análisis de formabilidad de la chapa y de la recuperación elástica en el material de la pieza, la determinación de otras importantes informaciones tales como la distribución de la deformación del espesor, distribución de tensiones, número de pasos, esfuerzos del punzón, etc., son factores importantes que influyen sobre el ciclo completo del proceso de conformado por estirados de chapas. Consiguió con la simulación de las operaciones de embutido de chapas, la interacción de diferentes parámetros donde actúan varios factores los cuales deben ser considerados, como las propiedades del material, las leyes constitutivas, las condiciones tribológicas y de fricción que son de gran importancia. Además se tienen las representaciones geométricas y los tiempos de cálculo computacional que deben ser también considerados para la simulación de la operación de conformado.[2]

1.3 Conclusiones parciales

En este capítulo se mostraron las diferentes técnicas de inteligencia artificial donde se dio una amplia información en cuanto a la forma de utilizarlas así como su funcionamiento y sus características. Además se puede observar como la introducción de estas le dan a la producción un mayor rendimiento debido a su amplia capacidad de solucionar múltiples problemas hasta sin conocer todos los datos pues una vez que estos sistemas se han adaptado son capaces de desarrollar soluciones de otros problemas que nunca fueron usados en su adaptación, desarrollando diseños eficientes de cualquier producto con una gran calidad y con una gran flexibilidad.

También se puede observar como las tecnologías asistidas por computadoras con la introducción de estas técnicas traen consigo un salto en la optimización de las producciones a partir del conformado de metales así como un aumento en la competitividad entre las grandes empresas productoras de piezas conformadas.

Capítulo 2



Facultad de Ingeniería Mecánica

Capítulo II: Principales elementos tecnológicos en el cálculo de una operación de embutición

2.1 Metodología para el diseño de herramientas de embutición

El seguimiento de una metodología para el cálculo de los diferentes parámetros para el diseño de una herramienta para el proceso de embutido es sumamente necesario pues hay gran diversidad de criterios en como calcular las mismas por su complejidad. Aquí en este documento se presenta algunos de los criterios más importantes recogidos en la literatura consultada.

2.1.1 Cálculo del diámetro inicial a partir de las dimensiones finales de la pieza

Se calcula el diámetro del semiproducto inicial D_o a partir de la pieza cilíndrica final.

$$a) \frac{D_o^2 * \pi}{4} = \frac{d_1^2 * \pi}{4} + d_1 * \pi * h$$

$$D_o = \sqrt{d_1^2 + 4 * d_1 * h}$$

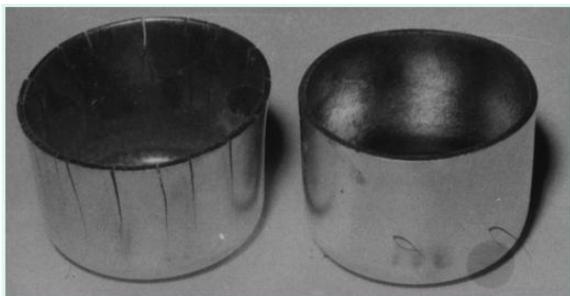
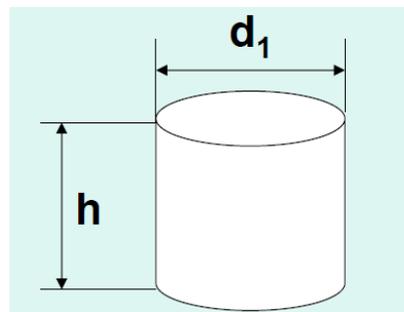
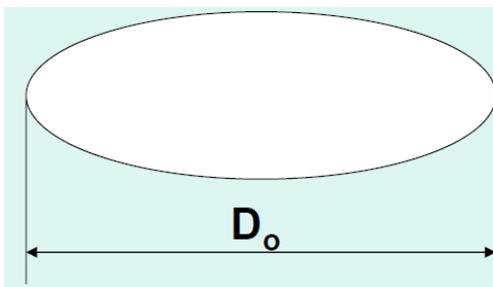


Figura 2.1: Ejemplo de pieza embutida

2.1.2 Criterios más importantes para el cálculo de la fuerza de embutido

La fuerza necesaria para la embutición profunda y sus variaciones se pueden determinar de dos maneras, ya sea a partir de ecuaciones teóricas basadas en la teoría de la plasticidad, o mediante el uso de ecuaciones empíricas. Las siguientes ecuaciones se pueden emplear para calcular la fuerza máxima $F_d.max$ de embutido.

Según [18] la fuerza real necesaria se calcula como:

$$F_{real} = F_{id} (1.5 \dots 2)$$

$$F_{id} = \pi \cdot d_1 \cdot S_0 \cdot K_{fm} \cdot l_n (D / d_1)$$

Dónde:

d_1 - diámetro final en la pieza (mm)

K_{fm} - Resistencia media a la conformación ($KgF / mm^2, Pa$)

D - Diámetro del semiproducto inicial (mm)

σ_u - Resistencia ultima del material de la chapa (N / mm^2)

a) $F_{real} = n \cdot \pi \cdot d_1 \cdot S_0 \cdot \sigma_u$

b) $F_{real} = 5 \cdot d_1 \cdot S \cdot K_{fm} \cdot l_n (D / d_1)$

Tabla 6: Valores de n para el cálculo de la fuerza de embutido

m=D/ d_1	0.55	0.6	0.65	0.7	0.8
n	1	0.86	0.72	0.5	0.4

L. Schaeffer [19] plantea que la fuerza real de embutición se define como:

$$F_{real} = F_{id} + F_{apc} + F_{ar} + F_{re}$$

Dónde:

F_{id} - fuerza ideal de embutición

F_{apc} - fuerza fricción entre la matriz y el prensa chapa

F_{ar} - fuerza de fricción entre la chapa y el redondeo de la matriz

F_{re} - Fuerza de retroceso elástico

$$a) F_{id} = A_0 \cdot K_{fm} \cdot l_n(D_r / d_1)$$

Dónde:

A_0 - área de sección del semiproducto

$$A_0 = \pi \cdot d_1 \cdot S$$

D_r - diámetro de la pieza en el momento de la fuerza máxima

$$F_{id} = \pi \cdot d_1 \cdot S \cdot K_{fm} \cdot \frac{\left(0.77 \frac{D}{d_1} + 0.23\right) d_1}{d_1}$$

$$K_{fm} = \frac{K_{f1} + K_{f2}}{2}$$

$$D_r = \left(0.77 \frac{D}{d_1} + 0.23\right) d_1$$

$$\varepsilon_1 = l_n \sqrt{\beta_0^2 + 1 - \beta^2}$$

$$\beta = D / d_1$$

$$\beta_0 = D_r / d_1$$

$$\varepsilon_2 = l_n(D / d_1)$$

NOTA: Con los valores de deformaciones calculados ε_1 y ε_2 y la curva de fluencia del cuerpo, se determinan los valores de K_{f1} y K_{f2}

$$b) F_{apc} = \frac{\pi}{2} \mu \cdot d_1^2 \cdot P_{pc} \cdot \frac{\beta_0 - 1}{\beta}$$

Dónde:

μ - Coeficiente de fricción

P_{pc} - fuerza con el prensa chapa

$$c) F_{ar} = (e^{\frac{\mu \cdot \pi}{2}} - 1) \cdot (F_{id} + F_{Apc})$$

$$d) F_{re} = \pi \cdot d \cdot S \cdot K_{f_1} \cdot \frac{S}{4 \cdot R_m}$$

G.M Kakandicar y V.M Nandedkar [20] definen esta fuerza máxima con la siguiente expresión:

$$F_{\max} = \pi * d_1 * S \left[e^{\frac{\mu * \pi}{2}} * 1,1 * \sigma_{f_{m1}} * \ln \frac{D_R}{d_1} + \frac{2 * \mu * F_n}{\pi * D_R * S} + \sigma_{f_{m2}} * \frac{S}{2 * R_p} \right]$$

$$\sigma_{m1} = K_{f_{m1}}$$

$$\sigma_{m2} = K_{f_{m2}}$$

2.1.3 Criterio sobre la fuerza de rotura del material.

Fuerza máxima en el momento donde aparece el D_R

$$F_{cr} = \pi * D_R * S * \sigma_u$$

Donde:

S_0 - espesor inicial

S_1 - espesor final

2.1.4 Criterios más importantes para el cálculo de la fuerza en el prensa chapas

En el proceso de embutido hay presente tensiones de compresión tangencial las cuales pueden provocar arrugas debido a la deformación, las arrugas pueden ser evitadas mediante el uso de un prensa chapas. La presión necesaria para evitar las arrugas depende del material de la hoja, el espesor de la hoja relativa, y la relación de embutido. Una investigación realizada por Siebel muestra que la presión requerida en el prensa chapas puede ser estimada a partir de la siguiente ecuación.

Siebel plantea que la fuerza en el prensa chapas se calcula como:

$$P_{pc} = 0.0025 \left[(\beta_0 - 1)^2 + 0.5 \frac{d_1}{100S} \right] \sigma_u$$

Según [18] esta fuerza está definida en la siguiente expresión:

$$P_{pc} = \frac{P \cdot \pi}{4} \cdot (D_0^2 - d_1^2)$$

Tabla 7: Valores de P para el cálculo de esfuerzo en el prensa chapas

material	Al	Latón	Acero de embutición
$p(\text{kgf} / \text{cm}^2)$	12	20	25

El criterio de G.M Kakandicar and V.M Nandedkar [20] es que esta fuerza está definida por:

$$P_{pc} = 10^{-3} \cdot C \cdot \left[(\beta - 1)^3 + \frac{0.005 \cdot D_R}{S_0} \right] S_u$$

Cuando el factor C es de 2 a 3.

Dónde:

S_0 - espesor inicial

S_u - espesor final

2.1.5 Determinación de los radios de la matriz para las diferentes operaciones

El radio de la matriz depende del tamaño de la pieza y su espesor. Con el fin de reducir la carga de embutido y de aumentar la proporción de la limitación del embutido los radios grandes son los deseados, sin embargo los radios grandes tienden a aumentar la formación de arrugas en la región de la radio de la matriz. Por el contrario, la posibilidad de formación de las arrugas se reduce si el radio de la matriz se hace pequeño. Varios autores han desarrollado las siguientes ecuaciones empíricas para la radio de la matriz que han sido utilizadas para la optimización.

Mallo [18] plantea que:

$$R_m = 0.6 \cdot \sqrt{(D - d_1) \cdot S} \Rightarrow \text{Primera operación de embutido}$$

$$R_m = 0.8 \cdot \sqrt{(d_1 - d_2) \cdot S} \Rightarrow \text{Operaciones siguientes}$$

Dónde:

d_1 - diámetro del punzón primera operación

d_2 - diámetro del punzón segunda operación

R_m - radio de la matriz

G.M Kakandicar and V.M Nandedkar [20] dice que:

$$R_m = 0.0035 \cdot [50 + (D - d_1)] \cdot \sqrt{S}$$

$$R_m = (5 \dots 10) \cdot S$$

2.1.6 Determinación del radio del punzón para las diferentes operaciones.

El radio del punzón debe ser mayor que el radio de la matriz por un factor de 5.3. El radio del punzón nunca debe ser menor que el de la matriz o el golpe podría perforar el material. Para piezas pequeñas de gran espesor de la chapa es aconsejable usar una transición suave (por ejemplo, parabólica) del radio del punzón a la parte cilíndrica de la perforación con el fin de evitar la reducción de espesor de la pared en la zona de transición desde el fondo de la copa a la pared.

G.M Kakandicar and V.M Nandedkar [20] plantea que el radio de curvatura del punzón se define como:

$$R_p = (3 \dots 5) \cdot R_m$$

Dónde:

R_p - Radio del punzón.

2.1.7 Relación de embutido admisible (β_{adm})

En las piezas embutidas cilíndricas puede calcularse la relación de embutido mediante los diámetros y los espesores. Es de suma importancia el cálculo de este parámetro pues daría una aproximación de hasta donde se puede embutir la pieza en un paso.

Schaeffez [19] muestra que la relación de embutido admisible como:

$$\beta_{adm} = 2,15 - \frac{d_1}{1000 * S} \Rightarrow \text{Materiales de alta estampabilidad}$$

$$\beta_{adm} = 2,0 - \frac{1,1 * d}{1000 * S} \Rightarrow \text{Materiales de mayor estampabilidad}$$

NOTA: cuando no es posible estampar en una sola etapa porque se sobrepasa la Relación límite del estampado admisible, entonces la pieza se puede producir en varias etapas.

2⁰ paso $\beta = 1.3$

3^{er} paso $\beta = 1.2$

NOTA: su caso de dar un tratamiento térmico intermedio (recocido contra acritud) entonces puede emplearse $\beta = 1.6$

$$\beta_{total} = \beta_0 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 = \frac{D}{d_1} \cdot \frac{d_1}{d_2} \cdot \frac{d_2}{d_3} = \frac{D}{d_3}$$

Mallo [18] dice que esta relación de embutido está dada por:

$$\beta = \frac{D_0}{d_1}$$

Número de pasos (n)

$$n = \frac{h_n}{d_n} = \frac{D^2 - d_n^2}{4 \cdot d_n^2}$$

Dónde:

d_n - diámetro en el paso n

2.1.8 Valores recomendados para estos parámetros

Estos valores son recomendados por la literatura consultada basados en la experiencia y la utilización de los mismos en la industria. Son recomendados por diferentes autores que han estudiado estos procesos.

✓ Radio de la matriz

Tabla 8: Radios de redondeo de la matriz en función del espesor relativo

$$S / d_1 \cdot 100\%$$

	2.0...1	1.0...0.3	(0.3...0.1
Sin reborde	(6...8) · S	(8...10) · S	(10...15) · S
Con reborde	(10...15) · S	(15...20) · S	(20...30) · S

✓ Radio de redondeo del punzón

$$R_p = (5 \dots 6) \cdot S$$

$$S / d_n \geq 0.6\% \Rightarrow R_p = R_m$$

$$S / d_n = 0.6 \dots 0.3\% \Rightarrow R_p = 1.5 \cdot R_m$$

$$S / d_n \leq 0.3\% \Rightarrow R_p = 2 \cdot R_m$$

Donde:

R_p - radio en la pieza terminada

✓ **Juego de embutido**

La dimensión Z entre el punzón y la matriz es el llamada juego de embutido y debe de ser mayor que el espesor de la chapa. Un valor grande de Z favorece la formación de arrugas, uno pequeño provoca un estirado de la pieza con el aumento de la fuerza necesaria para embutir y del peligro de formación de grietas.

$$Z = S \cdot \sqrt{\frac{D}{d_1}} \quad (\text{mm})$$

$$Z = S + K \cdot \sqrt{10 \cdot S}$$

Dónde:

K = 0.07 para los aceros aluminio

K = 0.02 aluminio

K = 0.04 otros materiales no ferrosos

✓ **Diámetro del agujero de salida del aire en el punzón (d_l)**

$$d_l = (0.1 \dots 0.15) \cdot d_1$$

Tabla 9: Diámetros recomendados para el orificio de salida del aire en el punzón

$d_1(mm)$	< 100	100...200	> 200
$d_1(mm)$	6	8	10

✓ **Diseño del prensa chapas**

- 1^{ra} Operación

Si $(D - d_1) \geq (22) \cdot S$ se recomienda uso del prensa chapas

- Operaciones posteriores $\xi = \frac{S}{d_n - 1} \cdot 100\%$

$\xi < 1 \dots 1.25$ Se recomienda el empleo del prensa chapas

Si $\xi > 1.5$ Se recomienda no emplear el prensa chapas

$\xi 1.25 \dots 1.5$ Es opcional el empleo del prensa chapas

✓ **Presión en el prensa chapas**

$$p_{pc} = q \cdot A$$

Dónde:

A – área sobre la que actúa el prensa chapas

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot [D^2 - (d_1 + 2 \cdot R_m)^2] \text{ Primera operación}$$

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot [d_{n-1}^2 - (d_n + 2 \cdot R_m)^2] \text{ Operaciones siguientes sin reborde}$$

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot [D_{R_p}^2 - (d_n + 2 \cdot R_m)^2] \text{ Operaciones siguientes con reborde}$$

Dónde:

D_{R_p} - diámetro de reborde del prensa chapas

2.1.8 Recomendación para el cálculo de las tensiones [19].

- a) Tensión máxima (radial) que ocurre después del paso de la chapa por el radio de la matriz

$$\sigma_{rm} = K_{fm} \cdot \ln(D / d_1)$$

- b) Tensión radial debido al rozamiento

$$\sigma_{ra} = \mu \cdot P_{pc} \left(\frac{d_1}{S} \right) \left(\frac{\beta - 1}{2\beta} \right)$$

- c) Tensión de fricción en el radio de la matriz

$$\sigma_{am} = \frac{F_{ar}}{(\pi \cdot d_1 \cdot S)}$$

- d) Tensión total debido al rozamiento

$$\sigma_a = \sigma_{ra} + \sigma_{am}$$

- e) Tensión debido a la recuperación elásticas

$$\sigma_{re} = K_{f1} (S_0 / 4Rm)$$

- f) Tensión total en el proceso

$$\sigma_{total} = \sigma_{rm} + \sigma_a + \sigma_{re}$$

(Esta tensión no debe sobrepasar la tensión máxima (σ_u) del material)

2.1.9 Recomendación para el cálculo de las deformaciones [21].

$$\varphi_1 = \ln \sqrt{\beta_0^2 + 1 - \beta^2}$$

$$\varphi_2 = \ln \frac{D}{d_1} = \ln \frac{420}{214}$$

$$\varphi_3 = \varphi_1 + \varphi_2$$

2.2 Propuesta de guía metodológica para el cálculo de los parámetros fundamentales en los procesos de embutición

1. Cálculo del diámetro inicial a partir de las dimensiones finales de la pieza.

$$\frac{D_0^2 * \pi}{4} = \frac{d_1^2 * \pi}{4} + d_1 * \pi * h$$

$$D_0 = \sqrt{d_1^2 + 4 * d_1 * h}$$

2. Cálculo de la fuerza de rotura.

$$F_{cr} = \pi * D_R * S * \sigma_u$$

3. Cálculo de la relación de embutido admisible.

$$\beta = \frac{D_0}{d_1}$$

4. Número de pasos (n)

$$n = \frac{h_n}{d_n} = \frac{D^2 - d_n^2}{4 * d_n^2}$$

5. Juego de embutido.

$$Z = S \cdot \sqrt{\frac{D}{d_1}}$$

6. Cálculo de la fuerza en el prensa chapas.

$$P_{pc} = 0.0025 \left[(\beta_0 - 1)^2 + 0.5 \frac{d_1}{100S} \right] \sigma_u$$

7. Determinación de los radios de la matriz.

$$R_m = 0.0035 \cdot [50 + (D - d_1)] \cdot \sqrt{S}$$

8. Determinación del radio del punzón.

$$R_p = (3 \dots 5) \cdot R_m$$

9. Cálculo de la fuerza de embutido.

$$F_{max} = \pi * d_1 * S \left[e^{\frac{\mu * \pi}{2}} * 1.1 * K_{fm} * \ln \frac{D_R}{d_1} + \frac{2 * \mu * F_n}{\pi * D_R * S} + K_{fm} * \frac{S}{2 * R_p} \right]$$

10. Cálculo de las tensiones y las deformaciones por las recomendaciones anteriormente dadas

2.3 Parámetros críticos y objetivos que se van a optimizar

El material con el que se confeccionan las ollas en la EINPUD 1ro de Mayo es aluminio ASTM-3003, el cual se produce en la fábrica Haomei Aluminio, la cual se encuentra en Zhengzhou, provincia de Henan, China. Son un fabricante profesional de aluminio que producen principalmente aluminio de las series 1, 3, 5, 6, y serie 8 de aluminio puro y de aleación de aluminio, producen placas, tira, láminas, disco para utensilios de cocina, entre otros.

2.3.1 Propiedades químicas y mecánicas del material [22].

Tabla 10: Composición química

Aleación	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Otros
3003	96.75	0.6	0.7	0.05-0.2	1.0-1.5	0.1	0.15

Tabla 11: Propiedades mecánicas

Material	Resistencia a la fluencia	Resistencia máxima	Módulo de elasticidad
ASTM-3003	145 MPa	152 MPa	10000 KSI

2.3.2 Calculo de los parámetros críticos en el proceso

- Diámetro inicial de la pieza.

$$D_0 = 420mm$$

- Fuerza de rotura del material

$$F_{cr} = \pi * D_R * S * \sigma_u$$

$$F_{cr} = \pi * 372.62 * 3 * 152$$

$$F_{cr} = 533802.8N$$

$$F_{cr} = 119.5Ton$$

$$D_r = \left[0.77 * \left(\frac{D_0}{d_1} \right) + 0.23 \right] * d_1$$

$$D_r = \left[0.77 * \left(\frac{420}{214} \right) + 0.23 \right] * 214$$

$$D_r = 372.62mm$$

- Calculo de la relación de embutido.

$$\beta = \frac{D_0}{d_1} = \frac{420mm}{214mm}$$

$$\beta = 1.96$$

- Número de pasos (n)

$$n = \frac{D^2 - d_1}{4 * d_1^2} = \frac{420^2 - 214}{4 * 214^2}$$

$$n = 0,96$$

$$n = 1$$

- Juego de embutido.

$$Z = S * \sqrt{\frac{D}{d_1}} = 3 * \sqrt{\frac{420}{214}}$$

$$Z = 4,2mm$$

- Presión en el prensa chapas.

$$P_{pc} = 0,0025 \left[(\beta_0 - 1)^2 + 0,5 \frac{d_1}{100S} \right] \sigma_u$$

$$P_{pc} = 0,0025 \left[(1,96 - 1)^2 + 0,5 * \frac{214}{100 * 3} \right] * 152$$

$$P_{pc} = 0,4857MPa$$

- Determinación del radio del punzón.

$$R_p = 23,5 \text{ mm (Predefinido por la pieza)}$$

- Determinación de los radios de la matriz.

$$R_m = \frac{R_p}{(3 \dots 5)} = \frac{23,5}{(4,7 \dots 7,83)}$$

$$R_m = 5,5mm$$

- Cálculo de la fuerza de embutido.

$$F_{\max} = \pi * d_1 * S \left[e^{\frac{\mu * \pi}{2}} * 1,1 * K_{fm1} * \ln \frac{D_R}{d_1} + \frac{2 * \mu * P_{pc}}{\pi * D_R * S} + K_{fm2} * \frac{S}{2 * R_p} \right]$$

$$F_{\max} = \pi * 214 * 3 \left[e^{\frac{0,02 * \pi}{2}} * 1,1 * 145 * \ln \frac{372,62}{214} + \frac{2 * 0,02 * 0,4875}{\pi * 372,62 * 3} + 145 * \frac{3}{2 * 23,5} \right]$$

$$F_{\max} = 218506,5N$$

$$F_{\max} = 48945,4lb$$

$$F_{\max} = 48,945Ton$$

$$F_{\max} = 50Ton$$

- Diámetro del agujero de salida del aire en el punzón (d_1)

$$d_1 = (0,1 \dots 0,15) * d_1$$

$$d_1 = (0,1 \dots 0,15) 214 \text{ mm}$$

$$d_1 = (21,4 \dots 32,1) \text{ mm}$$

Recomendación para $d_1 \square = 214 \text{ mm}$, $d_1 = 10 \text{ mm}$

- Área sobre la que actúa el prensa chapas.

$$A = \frac{\pi}{4} * [D^2 - (d_1 + 2 * R_m)^2]$$

$$A = \frac{\pi}{4} * [420^2 - (214 + 2 * 5,5)^2]$$

$$A = 98104,5 \text{ mm}^2$$

$$A = 0,098 \text{ m}^2$$

- Tensión máxima radial

$$\sigma_{rm} = K_{jm} * \ln(D/d_1)$$

$$\sigma_{rm} = 145 * \ln(420/214)$$

$$\sigma_{rm} = 97,77 \text{ MPa}$$

- Tensión radial debido al rozamiento

$$\sigma_{ra} = \mu * P_{pc} \left(\frac{d_1}{S} \right) \left(\frac{\beta - 1}{2\beta} \right)$$

$$\sigma_{ra} = 0,02 * 0,4857 \left(\frac{214}{3} \right) \left(\frac{1,96 - 1}{2 * 1,96} \right)$$

$$\sigma_{ra} = 0,169 \text{ MPa}$$

- Tensión de fricción en el radio de la matriz

$$\sigma_{am} = \frac{F_{ar}}{(\pi * d_1 * S)}$$

$$F_{apc} = \frac{\pi}{2} \cdot \mu \cdot d_1^2 \cdot P_{pc} \cdot \frac{\beta_0 - 1}{\beta}$$

$$F_{apc} = \frac{\pi}{2} * 0,02 * 214^2 * 0,4857 * \frac{1,96 - 1}{1,96}$$

$$F_{apc} = 342,3N$$

$$F_{id} = \pi \cdot d_1 \cdot S \cdot K_{fm} * l_n \left[\frac{\left(0,77 \frac{D}{d_1} + 0,23 \right) d_1}{d_1} \right]$$

$$F_{id} = \pi * 214 * 3 * 145 * l_n \left[\frac{\left(0,77 * \frac{420}{214} + 0,23 \right) 214}{214} \right]$$

$$F_{ar} = (e^{\frac{\mu \cdot \pi}{2}} - 1) * (F_{id} + F_{Apc})$$

$$F_{ar} = (e^{0,02 * \frac{\pi}{2}} - 1) * (162188,2 + 342,3)$$

$$F_{ar} = 5187,09N$$

$$F_{id} = 162188,2N$$

$$F_{id} = 36330,1lb$$

$$F_{id} = 36,330Ton$$

$$\sigma_{am} = \frac{F_{ar}}{(\pi * d_1 * S)}$$

$$\sigma_{am} = \frac{167717,6}{(\pi * 214 * 3)}$$

$$\sigma_{am} = 2,57MPa$$

- Tensión total debido al rozamiento

$$\sigma_a = \sigma_{ra} + \sigma_{am}$$

$$\sigma_a = 0,169 + 2,57$$

$$\sigma_a = 2,739MPa$$

- Tensión debido a la recuperación elásticas

$$\sigma_{re} = K_{f1} (S_0 / 4Rm)$$

$$\sigma_{re} = 145(3 / 4 * 5,5)$$

$$\sigma_{re} = 19,77MPa$$

- Tensión total en el proceso.

$$\begin{aligned}\sigma_{total} &= \sigma_{rm} + \sigma_a + \sigma_{re} \\ \sigma_{total} &= 97,77 + 2,739 + 19,77 \\ \sigma_{total} &= 120.2MPa\end{aligned}$$

- Cálculo de la deformación

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= \ln \sqrt{\beta_0^2 + 1 - \beta^2} & \beta_0 &= \frac{D_r}{d_1} = \frac{372,62}{214} \\ & & \beta_0 &= 1.74 \\ \varphi_1 &= \ln \sqrt{1,74^2 + 1 - 1,96^2} \\ \varphi_1 &= -0,84 \\ \varphi_2 &= \ln \frac{D}{d_1} = \ln \frac{420}{214} \\ \varphi_2 &= 0,67 \\ \varphi_3 &= \varphi_1 + \varphi_2 \\ \varphi_3 &= -0,84 + 0,67 \\ \varphi_3 &= -0.17\end{aligned}$$

2.3.3 Objetivos que interesan optimizar en el proceso

El problema de optimización se ha formado con el fin de optimizar la carga máxima requerida para el embutido. La ecuación para la carga máxima está seleccionada, que se expresa en términos de todos los parámetros relacionados con la geometría, parámetros de proceso así como los parámetros de la máquina. Las ecuaciones de restricción se han formulado en términos de parámetros como el diámetro de la matriz, la relación de embutido, un diámetro del punzón y los radios de redondeo del mismo, los parámetros del proceso tales como presión del prensa chapas y el coeficiente de fricción.

- Formulación del problema y restricciones.

Minimizar:

$$F_{max} = \pi * d_1 * S \left[e^{\frac{\mu * \pi}{2}} * 1,1 * K_{fm1} * \ln \frac{D_R}{d_1} + \frac{2 * \mu * P_{PC}}{\pi * D_R * S} + K_{fm2} * \frac{S}{2 * R_p} \right]$$

Sujeto a:

$$1,84 \leq \beta \leq 2,07$$

$$3R_m \leq R_p \leq 5R_m$$

$$P_{pc} = 0,0025 \left[(\beta_0 - 1)^2 + 0,5 \frac{d_1}{100S} \right] \sigma_u \geq 0,3$$

$$D_r \geq \left[0,77 * \left(\frac{D_0}{d_1} \right) + 0,23 \right] * d_1$$

Donde:

β = Juego de embutido

R_p = Radio del punzón

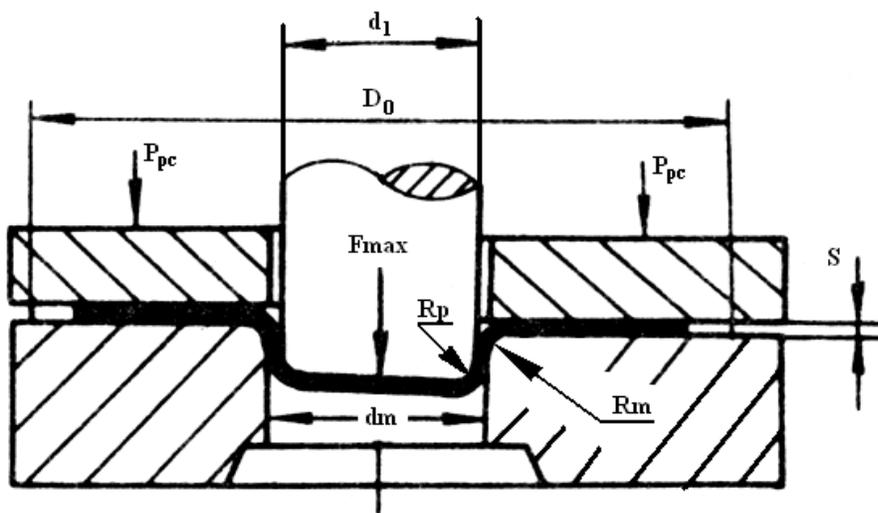
R_m = Radio de la matriz

P_{pc} = Presion en el prensachapas

Tabla: 12 Selección del rango de valores

No	Variabes	Valor inferior	Valor superior
1	μ	0.015	0.03
2	D_r	371MPa	373 MPa
3	R_p	16,5 mm	27,5 mm
4	P_{pc}	0.3 MPa	0.5 Mpa
5	K_{fm}	120MPa	148 MPa

Figura 2.2: Esquema del proceso de embutición [23].



$$D_0 = 420mm$$

$$S = 3mm$$

$$d_1 = 214mm$$

$$d_m = 222,4mm$$

$$R_p = 23,5mm$$

$$R_m = 5,5mm$$

$$F_{max} = 50Ton$$

$$P_{pc} = 0,4857MPa$$

2.4 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se desarrolló una metodología para el diseño de una herramienta de embutición, dando los parámetros críticos y el objetivo que interesa optimizar en el proceso. Como conclusiones podemos arribar a:

1. A partir de la revisión bibliográfica y la consulta a experto se demuestra que no existe una guía metodológica para hallar los principales elementos tecnológicos para el cálculo en los procesos de embutición.
2. Se propone una guía metodológica para el cálculo de los elementos tecnológicos fundamentales en un proceso de embutición.
3. Los valores obtenidos en los cálculos se encuentran dentro de los valores admisibles de tensión, la fuerza máxima del punzón menor que la fuerza a la que resiste el material y con la relación de embutido se obtuvo un valor aceptable demostrando que este proceso se puede realizar teóricamente en un solo paso.

Capítulo 3



Facultad de Ingeniería Mecánica

Capítulo III: Herramientas de I.A. Propuesta de una metodología de trabajo para la optimización

3.1 Características de los procesos de embutido y estirado de chapa

La embutición es una operación que consiste en obtener una pieza hueca de superficie no desarrollable y del mismo espesor que el recorte inicial, por lo que se puede decir que es una transformación de superficie por desplazamiento molecular. Si existiese estiramiento se puede constatar una disminución del espesor del metal. Por lo tanto, la embutición se puede definir como un procedimiento para el conformado de piezas no desarrollables por estirado de chapa, que requiere generalmente el empleo de máquinas (prensas) y de utillajes (troqueles). La característica principal de los procesos de estirado de chapa es la existencia de conformados tridimensionales, realizados con herramientas de forma, lo cual es a la vez, la principal diferencia entre los procesos de estirado de chapas y los procesos de doblado.[24]

Otra característica y diferencia importante en estos procesos con los de doblado es la existencia de estados tensionales mucho más complejos en los primeros, pues además de existir tensiones normales de doblado aparecen tensiones a tracción y/o compresión, que estiran o recalcan la chapa.

Por ello, la producción de piezas embutidas está reservada a la fabricación en serie, en la cual permite rebajar considerablemente el precio de costo. Se emplea mucho en construcción de automóviles y para la fabricación de objetos de uso doméstico.[2]

Se distinguen la embutición en frío, practicada a la temperatura ambiente y la embutición en caliente, para la cual la chapa se calienta a temperaturas de forja (800 a 850° C) para el acero suave). La embutición en caliente es poco frecuente por ser muy costosa.

En el embutido profundo una lámina de material inicialmente llana o pre-conformada se sujeta entre el dado o matriz y el prensachapa. El prensachapa aplica una fuerza que es necesaria para prevenir el arrugado y controlar el flujo de material en la cavidad de la matriz. Entonces el punzón se empuja en la cavidad de la matriz con una fuerza y transfiere la forma específica del punzón y la matriz simultáneamente a la región que se escogió para ello. Durante la fase del conformado el material se sujeta mediante tensiones de compresión-tracción durante el conformado. Cuando la fuerza del prensa chapas es muy grande el proceso de embutido profundo se convierte en un proceso de estirado. En el proceso de conformación por estirado, el material es fijo en la región bajo el prensachapas y conlleva a la reducción de los espesores en las partes restantes del espacio conformado en el que las tensiones son tensoras en casi todas las direcciones

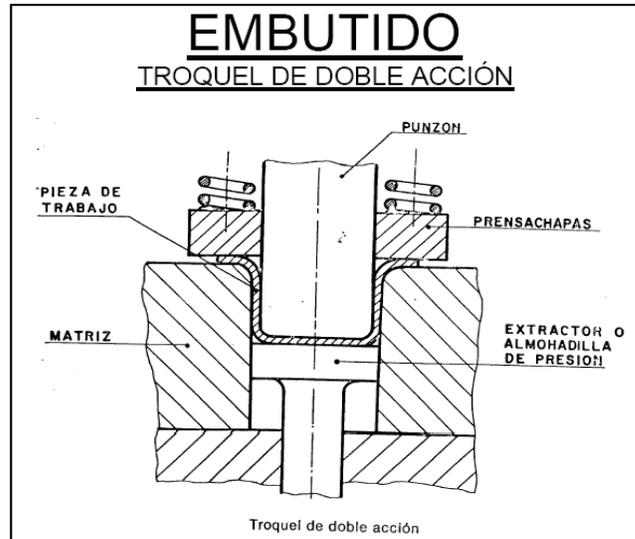


Figura 3.1: Partes que conforman la herramienta utilizada para los procesos de embutido[24].

3.1.1 Procesos de embutido más comunes

El desarrollo de la técnica ha exigido la creación de una serie de procesos con características distintas de los cuales los más importantes se relacionan a continuación, otros pueden ser consultados en los anexos.

- 1- Embutido simple.
- 2- Embutido con estricción.
- 3- Embutido por pasos separados.
- 4- Repujado.
- 5- Rebordeado de agujeros.
- 6- Expansionados.
- 7- Conformación tensionada.
- 8- Repulsado

✓ Embutido simple:

El recorte que reposa sobre el anillo de embutir es empujado a través del mismo por un punzón; para evitar cortaduras el punzón y la matriz deben poseer cantos redondeados. La zona anular exterior de la rodaja es doblada a lo largo de la matriz y al ser embutida forma la parte cilíndrica del recipiente. Esta zona tiende a elevarse formando arrugas, producto de las tensiones tangenciales, lo que se evita por medio del empleo de un tercer elemento en el troquel, el llamado pisador o prensachapas, el cual ejerce presión sobre la zona anular exterior de la chapa durante la operación de embutido. [18]

✓ Embutido por pasos separados:

En este caso el proceso se realiza sobre las llamadas prensas escalonadas o transferidoras. Cada caso separado cuenta con un troquel de embutido que consta de la matriz y el punzón respectivo.

Estos troqueles se colocan en filas uno detrás del otro. En cada carrera de la prensa se embuten tantas piezas como troqueles existan. Junto a los pasos propios de embutir existen, generalmente, procesos auxiliares de doblado y corte. El material de partida casi siempre es una banda de material. [25]

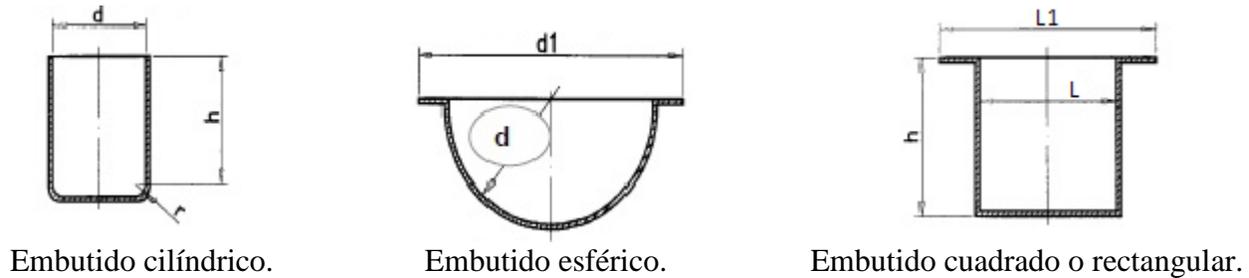


Figura 3.2: Formas más comunes de piezas embutidas.[24]

3.1.2 Factores más importantes que condicionan la calidad de las embuticiones

El mayor obstáculo para el mejoramiento de la calidad en cualquier sistema es la variabilidad de las entradas al mismo (variables independientes ó entradas) y el cambio constante en las condiciones del proceso. En los procesos de embutición, la calidad de la pieza queda determinada por:

- Variabilidad en el material (propiedades mecánicas, rugosidad superficial, variaciones en el espesor)
- Variabilidad en la herramienta (cambios geométricos en la herramienta debido al desgaste, variaciones en las condiciones superficiales, holguras, propiedades del material de la herramienta, temperatura)
- Variabilidad del proceso (fuerza en el prensachapas, velocidad del punzón, localización de la herramienta, rigidez de la prensa)
- Lubricación (parámetro clave en el conformado exitoso de piezas y muy difícil de controlar. Las condiciones de lubricación cambian globalmente en la chapa debido a la temperatura y la rugosidad superficial)
- Otras causas (posicionado incorrecto de la herramienta o de la chapa, funcionamiento incorrecto de la prensa)

3.1.3 Estrategia para el diseño de procesos de conformado de chapas por estirado usando técnicas de inteligencia artificial

La fabricación de piezas por procesos de embutición, se subordina a la tarea general de diseño de tecnologías de fabricación de piezas. El sistema encargado del diseño de piezas, puede requerir, por ejemplo, de la generación de la tecnología de fabricación por embutición de una pieza en particular con ayuda de troqueles. Como elementos determinantes de la generación de esta tecnología, se encuentran, necesariamente, la obtención de la forma y dimensiones del semiproducto inicial, el estirado satisfactorio de la pieza y el diseño del troquel más adecuado para fabricar la pieza en cuestión.

La metodología desarrollada por J. Arzola en el libro *Sistemas de Ingeniería*[26], también es aplicable al caso concreto de la embutición de piezas a partir de chapas. Las tareas de preparación de las decisiones derivadas de la aplicación de los principios de descomposición de los sistemas, se someten a un análisis externo e interno, según recomienda el autor.

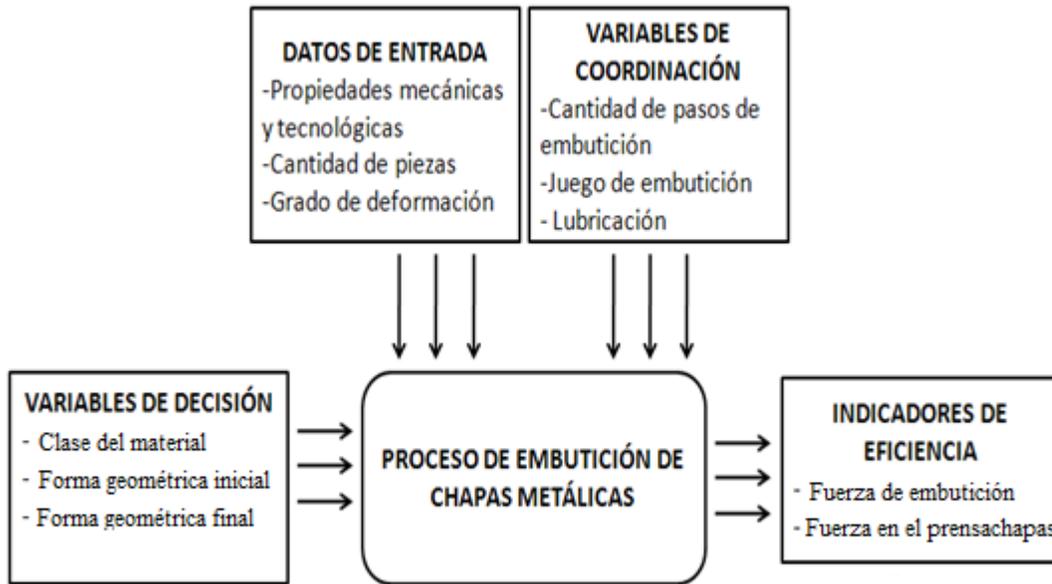


Figura 3.3: Información sobre los factores que intervienen en un proceso de embutición de chapas [2].

En la figura 3.3 los autores [2, 24] proponen el sistema de variables a emplear para el análisis externo de la tarea de ingeniería referida al análisis de los procesos de embutición de chapas. Queda definido el conjunto de indicadores cuantificables a optimizar, el conjunto de variables intermedias a restringir y el conjunto de indicadores de carácter subjetivo a evaluar.

En el sistema de variables de la figura 3.2 se considera además, que en el estirado satisfactorio del semiproducto inicial, hasta lograr la forma final, tiene que conciliarse con el diseño del semiproducto, para determinar las dimensiones de este y el efecto de la variabilidad del material, las condiciones de fricción y los esfuerzos para evitar, por ejemplo, la formación de pliegues en la pieza.

En el análisis interno se consideran la modelación matemática, la organización racional de los procedimientos de cálculo y la simulación. La separación del proceso de análisis en dos partes es convencional: una vez realizado el análisis interno, se retorna al externo con el fin de precisar la composición de variables. El proceso de análisis puede requerir de varias iteraciones.

Las tareas de la obtención de la forma y dimensiones del semiproducto inicial, el estirado satisfactorio de la pieza y el diseño del troquel más adecuado para fabricar la pieza en cuestión, se deben analizar como tareas interdependientes. Los mejores resultados se alcanzan cuando se interrelacionan con los factores más importantes que condicionan la calidad de las embuticiones.

En la literatura científica se pueden encontrar varios enfoques para realizar la planeación, modelación, y conjuntamente, la optimización de las operaciones de embutido de chapas. La complejidad físico mecánica de la operación de embutición demanda el uso de las técnicas para su optimización. Una posible vía para resolver los problemas que en ella se presentan parte de la representación multiobjetiva, multicriterial y de la toma de decisiones, sobre las variables que intervienen en el proceso de embutición y su relación con las técnicas de Inteligencia Artificial. Esto es:

- a) La utilización de los métodos de cálculos en el análisis paramétrico del proceso.
- b) Optimización del proceso mediante técnicas de Inteligencia Artificial (IA), Redes Neuronales Artificiales (RNA), Algoritmos Genéticos (AG), Sistema Experto (SE), Lógica Difusa (LD), Recocido Simulado (RS) y otras técnicas (por ejemplo, combinación de las anteriores)

3.2 Metodología de trabajo para la optimización de los objetivos seleccionados [27].

Etapa 1. Descripción del proceso

- a) Establecer las relaciones cinemáticas del proceso (forma, velocidades, relación de deformaciones, entre la parte deformada y la parte no deformada)
- b) Establecer los límites de conformabilidad del material, o sea, determinar si es posible ejecutar la operación de conformación sin causar algún defecto de superficie o interno en el material.
- c) Prever la fuerza y las tensiones necesarias para ejecutar la operación de conformación.

Etapa 2. Cálculo de los parámetros críticos en el proceso de embutido.

- a) Definir las variables de entrada con las que se trabajará, forma geométrica, material, parámetros del proceso, diagrama límite de conformado
- b) Establecer las condiciones de frontera para cada uno de esos parámetros
- c) Definir las variables de salida que interesan
- d) Diseñar la simulación para determinar el efecto de la variación de las variables de entrada sobre los indicadores de eficiencia.
- e) Considerar la influencia del endurecimiento por deformación, la relación de embutición, tipo de lubricante empleado y los diagramas límites de conformación

Etapa 3. Seleccionar de forma apropiada una herramienta de inteligencia artificial para modelar el efecto de las variables de entrada sobre los indicadores de eficiencia

- a) Selección de las variables a optimizar (indicadores de eficiencia)
- b) Definir los parámetros para la creación y posterior entrenamiento de la herramienta de inteligencia artificial
- c) Establecer las condiciones de frontera para cada uno de esos parámetros
- d) Diseñar la simulación para determinar el efecto de la variación de las variables de entrada sobre los indicadores de eficiencia.
- e) Modelar la herramienta de IA para cada indicador de eficiencia seleccionado
- f) Validación

Etapa 4. Comparar los resultados de los cálculos y la IA

- a) Análisis de la variabilidad de los resultados del cálculo y de la herramienta de IA
- b) Análisis de sensibilidad del método en general
- c) Correspondencia y validación de las soluciones

El uso y desarrollo de métodos heurísticos, de inteligencia artificial, de métodos con enfoques evolutivos, así como la aplicación de las nuevas tecnologías de la informática y las comunicaciones, permiten el desarrollo continuo de vías para la solución de tareas propias de los procesos de embutición de chapas, sobre la base de los fundamentos del análisis y la síntesis de sistemas de ingeniería para la preparación y toma de decisiones bajo criterios múltiples.

3.3 Conclusiones parciales

En este capítulo donde se caracterizó los procesos de conformado podemos arribar a las siguientes conclusiones.

- Se propone una estrategia para el diseño en los procesos de conformado de chapas por estirado utilizando técnicas de inteligencia artificial.
- Se propone una metodología de trabajo para la optimización de los procesos de conformado de chapas metálicas la cual consta de 4 etapas y cada etapa consta de algunos pasos a seguir.

Capítulo 4



Facultad de Ingeniería Mecánica

Capítulo IV: Aplicación de la metodología propuesta a un caso industrial

MatLab es un programa interactivo para computación numérica y visualización de datos. Es ampliamente usado por ingenieros de control en el análisis y diseño, posee además una extraordinaria versatilidad y capacidad para resolver problemas en matemática aplicada, física, química, ingeniería, finanzas y muchas otras aplicaciones. Está basado en un sofisticado software de matrices para el análisis de sistemas de ecuaciones. Permite resolver complicados problemas numéricos sin necesidad de escribir un programa.

Es un programa para realizar cálculos numéricos con vectores y matrices, y por tanto se puede trabajar también con números escalares (tanto reales como complejos), con cadenas de caracteres y con otras estructuras de información más complejas.

MatLab es un lenguaje de alto rendimiento para cálculos técnicos, es al mismo tiempo un entorno y un lenguaje de programación. Uno de sus puntos fuertes es que permite construir nuestras propias herramientas reutilizables. Podemos crear fácilmente nuestras propias funciones y programas especiales (conocidos como M-archivos) en código MatLab, los podemos agrupar en Toolbox (también llamadas librerías): colección especializada de M-archivos para trabajar en clases particulares de problemas. MatLab, a parte del cálculo matricial y álgebra lineal, también puede manejar polinomios, funciones, ecuaciones diferenciales ordinarias, gráficos, etc.

MatLab goza en la actualidad de un alto nivel de implantación en escuelas y centros universitarios, así como en departamentos de investigación y desarrollo de muchas compañías industriales nacionales e internacionales. En entornos universitarios, por ejemplo, MatLab se ha convertido en una herramienta básica, tanto para los profesionales e investigadores de centros docentes, como una importante herramienta para la impartición de cursos universitarios, tales como sistemas e ingeniería de control, álgebra lineal, proceso digital de imagen, señal, etc. En el mundo industrial, MATLAB está siendo utilizado como herramienta de investigación para la resolución de complejos problemas planteados en la realización y aplicación de modelos matemáticos en ingeniería. Los usos más característicos de la herramienta los encontramos en áreas de computación y cálculo numérico tradicional, prototipaje algorítmico, teoría de control automático, estadística, análisis de series temporales para el proceso digital de señal.

Herramienta de inteligencia artificial a utilizar

Los Algoritmos Genéticos (AGs) son métodos adaptativos que pueden usarse para resolver problemas de búsqueda y optimización. Están basados en el proceso genético de los organismos vivos. A lo largo de las generaciones, las poblaciones evolucionan en la naturaleza de acorde con los principios de la selección natural y la supervivencia de los más fuertes, postulados por Darwin. Por imitación de este proceso, los Algoritmos Genéticos son capaces de ir creando soluciones para problemas del mundo real. La evolución de dichas soluciones hacia valores óptimos del problema depende en buena medida de una adecuada codificación de las mismas.

Un algoritmo genético consiste en una función matemática o una rutina de software que toma como entradas a los ejemplares y retorna como salidas cuáles de ellos deben generar descendencia para la nueva generación.[28]

Versiones más complejas de algoritmos genéticos generan un ciclo iterativo que directamente toma a la especie (el total de los ejemplares) y crea una nueva generación que reemplaza a la antigua una cantidad de veces determinada por su propio diseño. Una de sus características principales es la de ir perfeccionando su propia heurística en el proceso de ejecución, por lo que no requiere largos períodos de entrenamiento especializado por parte del ser humano, principal defecto de otros métodos para solucionar problemas, como los Sistemas Expertos.

Como Saber si es Posible usar un Algoritmo Genético

La aplicación más común de los algoritmos genéticos ha sido la solución de problemas de optimización, en donde han mostrado ser muy eficientes y confiables. Sin embargo, no todos los problemas pudieran ser apropiados para la técnica, y se recomienda en general tomar en cuenta las siguientes características del mismo antes de intentar usarla:

- Su espacio de búsqueda (i.e., sus posibles soluciones) debe estar delimitado dentro de un cierto rango.
- Debe poderse definir una función de aptitud que nos indique qué tan buena o mala es una cierta respuesta.
- Las soluciones deben codificarse de una forma que resulte relativamente fácil de implementar en la computadora.

El primer punto es muy importante, y lo más recomendable es intentar resolver problemas que tengan espacios de búsqueda discretos aunque éstos sean muy grandes. Sin embargo, también podrá intentarse usar la técnica con espacios de búsqueda continuos, pero preferentemente cuando exista un rango de soluciones relativamente pequeño.[28]

La **función de aptitud** no es más que la función objetivo del problema de optimización. El algoritmo genético únicamente maximiza, pero la minimización puede realizarse fácilmente utilizando el recíproco de la función maximizante (debe cuidarse, por supuesto, que el recíproco de la función no genere una división por cero). Una característica que debe tener esta función es que tiene ser capaz de "castigar" a las malas soluciones, y de "premiar" a las buenas, de forma que sean estas últimas las que se propaguen con mayor rapidez.

La **codificación** más común de las soluciones es a través de cadenas binarias, aunque se han utilizado también números reales y letras. El primero de estos esquemas ha gozado de mucha popularidad debido a que es el que propuso originalmente Holland, y además porque resulta muy sencillo de implementar.[28]

4.1 Formulación del problema, selección de las variables y sus niveles

El objetivo del estudio presente es desarrollar una estrategia de optimización para determinar la fuerza máxima de embutido óptimo para un modelo de olla, la olla "PRONTO" fabricada por la EIMPUD Iro de Mayo de Santa Clara es seleccionada para el estudio. La copa es un embutido con las paredes cilíndricas. La empresa no la fabrican desde hace 7 años pero próximamente comenzará su producción de estas ollas. Todavía lo fabrica con el ensayo y métodos de prueba y error y todos los parámetros del proceso así como las dimensiones del producto se deciden con las tolerancias dadas en la tecnología de fabricación. El material de la olla es aluminio ASTM-

3003 con un espesor de 3 mm y la tensión última de 154 MPa y sus propiedades químicas y mecánicas se encuentran referenciadas en el capítulo 2.

Formulación de la función objeto

La formulación del problema para la olla "PRONTO", los rangos de variables y parámetros para el Algoritmo Genético son seleccionados en la consulta con los profesionales y la literatura.

$$F_{\max} = \pi * d_1 * S \left[e^{\frac{\mu * \pi}{2}} * 1,1 * K_{f_m} * \ln \frac{D_R}{d_1} + \frac{2 * \mu * P_{pc}}{\pi * D_R * S} + K_{f_m} * \frac{S}{2 * R_p} \right]$$

Donde:

d_1 = Diámetro del punzón (mm)

S = Espesor de la chapa (mm)

μ = Coeficiente de fricción

K_{f_m} = Resistencia media a la conformación (KgF/mm², P_a)

D_R = Diámetro de la chapa donde ocurre la fuerza de embutición máxima (mm)

P_{pc} = Presión en el prensachapas (KgF/mm²)

R_p = Radio de redondeo del punzón

Sujeto a:

$$1,84 \leq \beta \leq 2,07$$

$$3R_m \leq R_p \leq 5R_m$$

$$P_{pc} = 0,0025 \left[(\beta_0 - 1)^2 + 0,5 \frac{d_1}{100S} \right] \sigma_u \geq 0.3$$

$$D_r \geq \left[0,77 * \left(\frac{D_0}{d_1} \right) + 0,23 \right] * d_1$$

Donde:

β = Juego de embutido

R_p = Radio del punzón

R_m = Radio de la matriz

P_{pc} = Presion en el prensachapas

Tabla 13: Selección del rango de valores.

Variables	Valor inferior	Valor superior
μ	0.015	0.03
D_r	371MPa	373 MPa
R_p	16,5 mm	27,5 mm
P_{pc}	0.3 MPa	0.5 Mpa
K_{fm}	120MPa	148 MPa

4.2 Selección de los parámetros de la herramienta de IA

La selección de los parámetros de la herramienta de inteligencia artificial será basada en la consulta a los artículos obtenidos y la consulta a los expertos en el área de optimización utilizando el software MatLab.

Tabla 14: Selección de los parámetros del algoritmo genético.

Population type	Double vector
Population size	500
Selection	Roulette
Mutation	Use constraint dependent default
Crossover	Scatteret
Reproduction, crossover fraction.	0.8
Elitism	5

4.3 Metodología propuesta para el trabajo con MatLab

Paso 1: Descripción del problema en cuestión.

- Formulación del problema.
- Definir función objeto, variables y sus restricciones.

Paso 2: Creación de la función objeto como archivo .m.

- Abrir el software MatLab.
- Abrir el editor de funciones.
- Crear el archivo .m declarando la función objeto y sus variables de entrada.
- Guardar el archivo creado.

Paso 3: Optimización de la función.

- Abrir el toolbox de optimización.
- En Solver poner Algoritmo Genético.
- Fitness Function poner @ y nombre del archivo creado.
- Definir el número de variables de la función a optimizar.
- Definir las fronteras o restricciones del problema (Bounds).
- En Options, las opciones que se quieren obtener del algoritmo.
- Correr el algoritmo.

4.4 Discusión de los resultados y su validación

Después de tener la función a optimizar se pasa a la corrida del ejemplo utilizando como herramienta de inteligencia artificial un algoritmo genético.

```
function Fmax= fuerzamaxima(x)

% global
% x(1)=μ linspace(0.015,0.03,100)
% x(2)=Kfm linspace(120,148,100)
% x(3)=DR linspace(371,373,100)
% x(4)=Ppc linspace(0.3,0.3,100)
% x(5)=Rp linspace(16.5,27.5,100)

Fmax = pi* 214*3*((2.71828^(((x(1)*pi))/2) ) )*1.1* x(2)* (log(x (3)/214)
)+(((2*x (1)*x (4) ))/((pi* x (3)*3) ))+ (x (2)*(3/((2*x(5) ) ))));
end
```

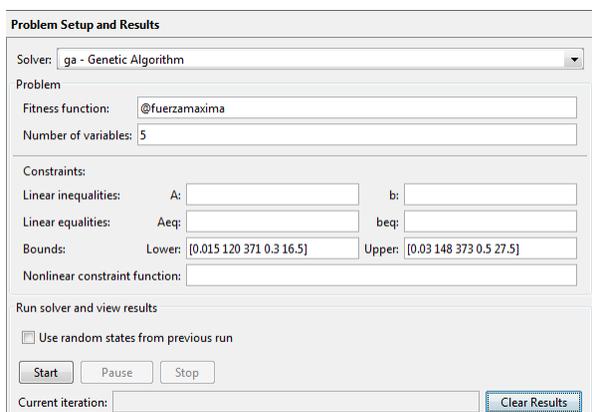


Figura 4.1: Descripción del problema en el toolbox de optimización

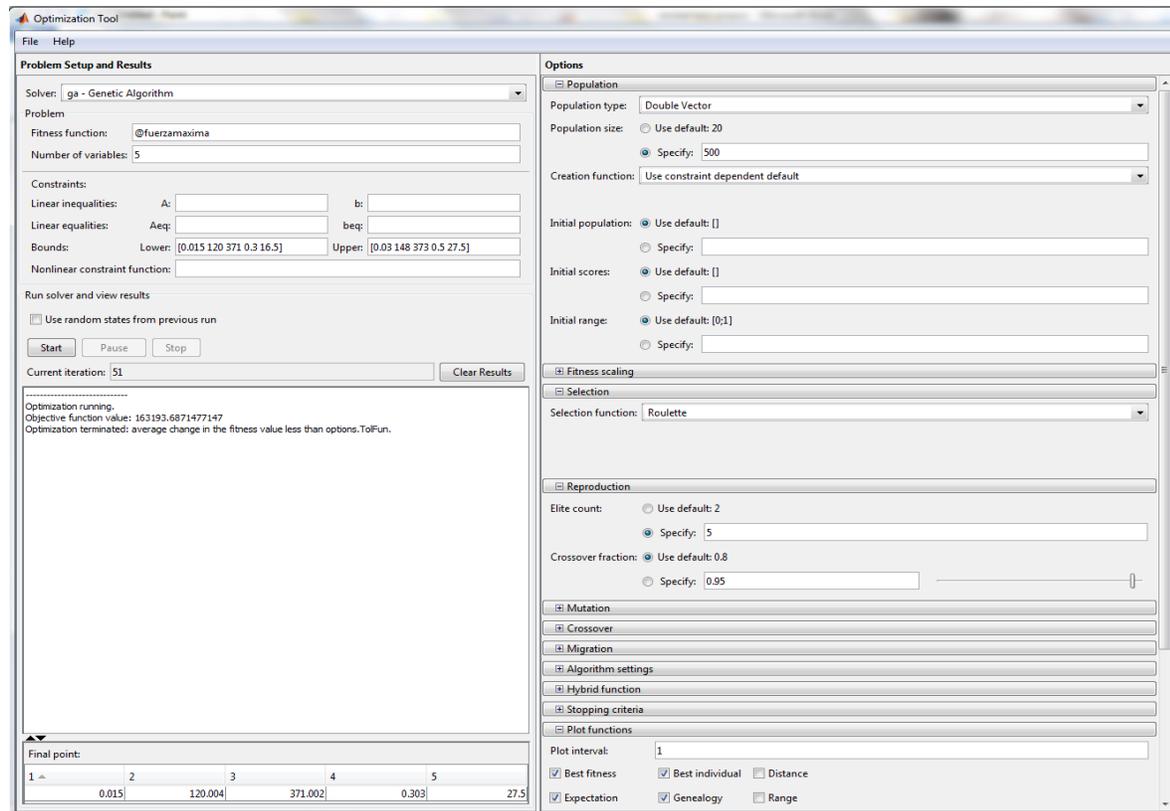


Figura 4.2: Toolbox de optimización con el ejemplo corrido

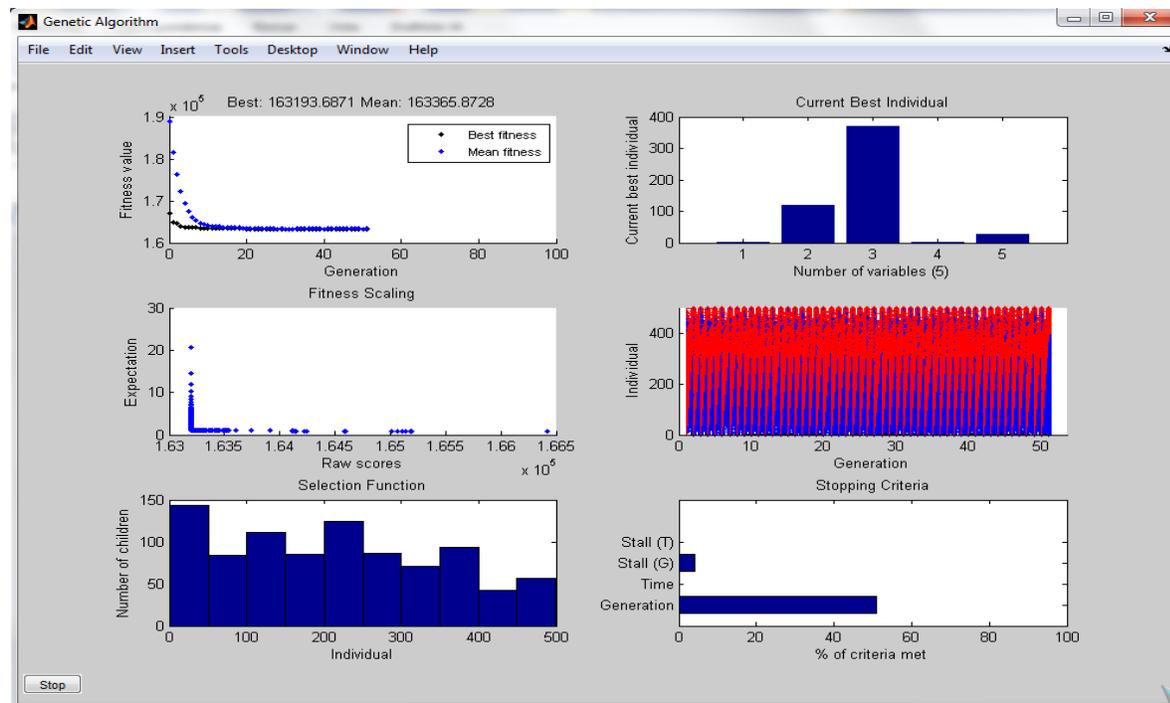


Figura 4.3: Graficas obtenidas del proceso de optimización en función del algoritmo utilizado

Los resultados obtenidos fueron satisfactorios, los valores de la función objetivo fueron de 163193.68 N (37 Ton) dando como los mejores valores para μ , Kfm, DR, Ppc y Rp de 0.015, 120.004, 371.002, 0.303 y 27.5 respectivamente.

En esta optimización se utiliza un Algoritmo Genético conocido en el MatLab como (ga) la cual busca un mínimo de la función objetivo utilizando un algoritmo genético dentro del intervalo dado como restricciones de las variables utilizadas. Al igual que en el primer algoritmo utilizamos una población de doble vector, con un tamaño de población de 100, la función de creación es la que tiene el programa por defecto la cual es uniforme si no existe ninguna limitación y posibilidad de obtener poblaciones de otra manera, el rango inicial está entre [0,1]. Como escala de la función a optimizar se utiliza una escala por categoría o ranking. La selección se realiza por rueda de ruleta. La reproducción se realiza por una cuenta elite de 5 y una fracción de cruce de 0.8. La mutación está llevada a cabo por la función por defecto del programa la cual utiliza la distribución Gaussiana sin restricciones y una posibilidad de adaptarse de otra manera. El cruce se realiza por una función de esparcimiento donde se crea al azar un vector binario en la selección de los genes donde el vector es 1 para los primeros padres y el vector es 0 en los genes de los segundos padres y la combinación de los genes se obtienen los hijos. En la migración se utiliza una dirección hacia adelante donde la última subpoblación emigra hacia la próxima población es decir [(n)th pasa a (n+1)th] esta tiene una fracción de 0.2y un intervalo de 20. En las herramientas de solución del problema que es donde se definen los parámetros específicos del algoritmo se utiliza un valor inicial de 10 y un factor de valor de 100 donde se incrementa el valor inicial. En el criterio de parada se establece una generación de 100, en un límite de tiempo infinito, el límite de la función a optimizar es infinito, el valor final de generaciones es de 50 en un límite de tiempo infinito, la tolerancia de la función es de 1E-6 y la tolerancia de contracción no lineal es de 1E-6. Mediante la optimización utilizando este algoritmo genético se obtuvieron diferentes graficas entre las que tenemos.

Función mejor (Best fitness): Se grafica el mejor valor de la función en cada generación contra el número de interacciones.

Mejor individuo (Best individual): Se grafica el vector de entrada de los individuos con el mejor valor de la función en cada generación.

Genealogía (Genealogy): Grafica la genealogía de los individuos, líneas desde una generación a la otra, en la gráfica están señaladas por líneas de colores, las líneas rojas indican la mutación de los hijos, las líneas azules indican el cruce de los hijos y las líneas negras indican los individuos elite.

Rango de diversidad (Score diversity): Grafica en un histograma el rango por cada generación.

Selección (selection): Grafica en un histograma a los padres. En esta se muestra la contribución de los padres en cada generación.

Rango (Score): Se grafica los rangos de los individuos por cada generación.

Parada (stopping): Grafica el nivel de criterio de parada.

Corrida del mismo ejemplo disminuyendo el rango de valores y acercándolo al valor real de la resistencia a la conformación y del radio del punzón, manteniendo los mismos valores de las opciones del algoritmo.

Radio del punzón (Rp)	23-24
Resistencia a la conformación (Kfm)	142-148

Tabla 15: Rango de valores de las variables Kfm y Rp

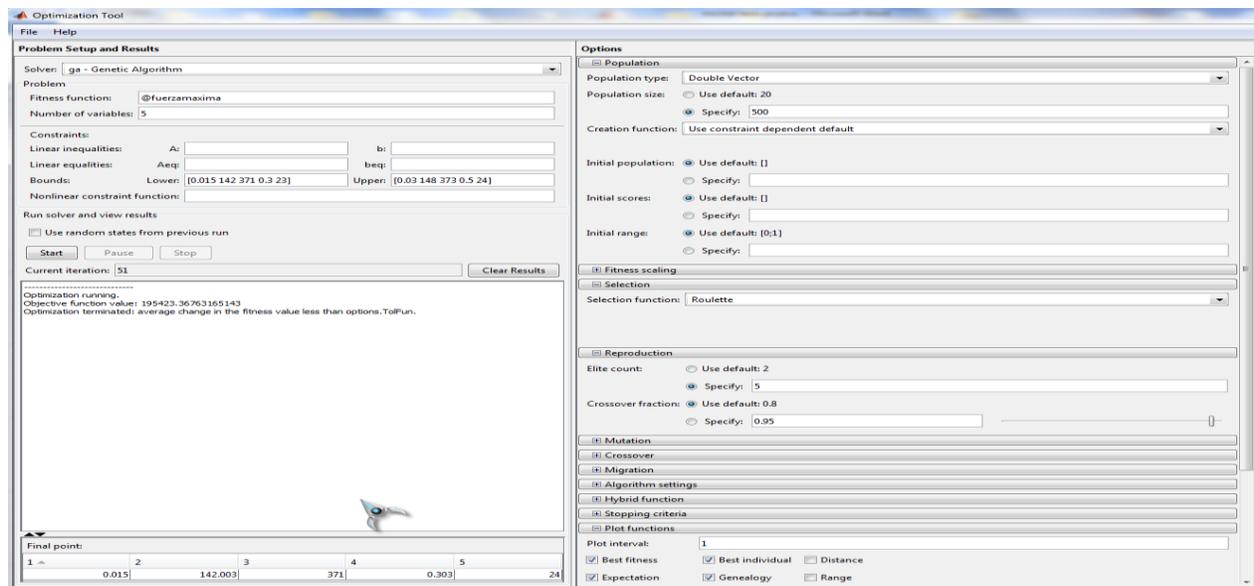


Figura 4.4: Toolbox de optimización con el cambio de variables

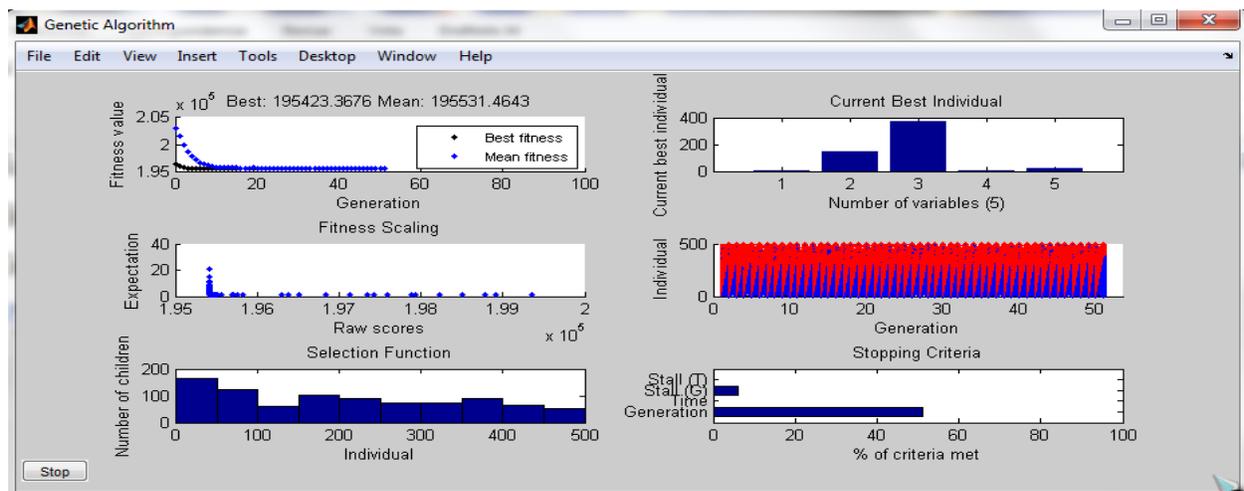


Figura 4.5: Graficas obtenidas en la segunda optimización

En este caso los valores obtenidos estuvieron en correspondencia con los cambios que se hicieron en la segunda corrida, el valor de la función objeto 195423.36 N(45 Ton) y los valores de μ , Kfm, DR, Ppc y Rp fueron de 0.015, 142.003, 371, 0.303 y 24 respectivamente, demostrando que si ocurre un aumento en el valor de la resistencia a la conformación el mínimo de fuerza necesaria para lograr un embutido satisfactorio aumenta. Además acortando el rango de valores a los valores reales del problema el algoritmo busca la solución más óptima al caso en cuestión.

4.5 Conclusiones parciales

- Para los procesos de estirado de chapas metálicas no existe una expresión analítica que describa las relaciones funcionales entre los parámetros tecnológicos del proceso y el dimensionamiento e integración de los elementos constitutivos de la herramienta. Tampoco existen criterios uniformes en cuanto a los elementos a optimizar en la operación.
- La complejidad de las operaciones de embutido de chapas conduce a la necesaria aplicación de un enfoque en la búsqueda del conjunto de soluciones racionales desde el punto de vista técnico-económico, lo que sugiere el desarrollo de metodologías científicamente fundamentada de análisis y síntesis de sistemas de ingeniería, soportada en un sistema CAD/CAPP. Por lo que en este capítulo se logró la optimización de la fuerza de embutido a partir de datos reales del proceso de conformado de la olla de presión PRONTO producida en la EINPUD logrando la optimización mediante el uso del software MatLab donde se ejecutó la programación de dos algoritmos genéticos donde se obtuvieron gráficas de la corrida del programa donde se puede ver como ocurrió el proceso y se obtuvo el valor óptimo de la función objetivo.

Conclusiones



Facultad de Ingeniería Mecánica

Conclusiones generales

1. En este trabajo se dio cumplimiento al objetivo general del trabajo pues se realizó un estudio sobre las herramientas de Inteligencia Artificial donde se dieron a conocer las diferentes técnicas. También se ofrecieron una amplia información en cuanto a la forma de utilizarlas así como su funcionamiento y sus características. Además se puede observar como la introducción de estas le dan a la producción un mayor rendimiento debido a su amplia capacidad de solucionar múltiples problemas hasta sin conocer todos los datos pues una vez que estos sistemas se han adaptado son capaces de desarrollar soluciones de otros problemas que nunca fueron usados en su adaptación, desarrollando diseños eficientes de cualquier producto con una calidad impresionante, con una gran flexibilidad.
2. Se propuso una guía metodológica para el cálculo de los elementos tecnológicos fundamentales en un proceso de embutición y se aplicó a un caso real.
3. Los valores obtenidos en los cálculos se encuentran dentro de los valores admisibles de tensión, la fuerza máxima del punzón menor que la fuerza a la que resiste el material y con la relación de embutido se obtuvo un valor aceptable demostrando que este proceso se puede realizar teóricamente en un solo paso.
4. Para los procesos de estirado de chapas metálicas no existe una expresión analítica que describa las relaciones funcionales entre los parámetros tecnológicos del proceso y el dimensionamiento e integración de los elementos constitutivos de la herramienta. Tampoco existen criterios uniformes en cuanto a los elementos a optimizar en la operación.
5. Se logró la optimización de la fuerza de embutido a partir de datos reales del proceso de conformado de la olla de presión PRONTO producida en la EIMPUD logrando la optimización mediante el uso del software MatLab donde se ejecutó la programación de dos algoritmos genéticos en los cuales se obtuvieron gráficas de la corrida del programa donde se puede ver como ocurrió el proceso y se obtuvo el valor óptimo de la función objetivo.

Recomendaciones



Facultad de Ingeniería Mecánica

Recomendaciones

1. En este trabajo se deja plasmado un resumen práctico para el estudio de las diferentes técnicas de inteligencia artificial el cual es recomendable su lectura pues le puede servir a los estudiantes de la carrera de Ingeniería Mecánica para su familiarización con estas modernas técnicas capaces de desarrollar diseños óptimos de piezas de cualquier geometría con ahorros económicos considerables.
2. Se debe seguir adquiriendo experiencias en la optimización de este proceso y después que se obtenga los valores óptimos realizar un ensayo de este valor obtenido por el software en la realidad para comparar y así establecer si estos software son confiables para la obtención de una mejor eficiencia en la producción de nuestras empresas y así tener menos costos de producción.
3. Valorar los resultados obtenidos en este trabajo para en un futuro su aplicación en la EIMPUD la cual representaría un ahorro considerable en los costos de producción de la olla PRONTO.

Bibliografía



Facultad de Ingeniería Mecánica

Bibliografía.

1. Gao, J.X., Tang, Y.S, Sharma, R, *A feature model editor and process planning system for sheet metal products*. Materials Processing Technology, 2000. 107(1-3): : p. 88-95.
2. Ediel, H.S., *Planeación de Procesos asistida por computadora*, in *Departamento de Ingeniería Mecánica*2011, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas: Santa Clara.
3. Holland, J., *Home Page sobre Algoritmos Genéticos*. 1999. 2.
4. Crevillén, G.y.D.D., "*Home page sobre Algoritmos Genéticos*". 2008. 1.
5. Marczyk, A., "*Algoritmos genéticos y computación evolutiva*", in *Mathematics Department*2004, Macquarie University: Sydney.
6. Moro, M., *Tecnologías de Fabricación*2002.
7. A., V., *Aplicaciones de la Inteligencia Artificial en Problemas de Producción*. 2008. 33.
8. Morales, E., "*Optimización basada en: Colonia de Hormigas*". 2009. 1.
9. M., B.B.y.A., "*Colonias distribuidas de hormigas en un entorno paralelo asíncrono*", in *XXVI Conferencia Latinoamericana de Informática 2000*: México.
10. De la Fuente García, D.y.G.G., A, "*Resolución de problemas de corte de piezas rectangulares mediante algoritmos généticos*". 2001.
11. Beasley, J.E., *An exact two-dimensional non-quillotine cutting tree search procedure*. Opns Res. 1985. 33: p. 49-64.
12. M. E. Golmakani, K.K., M.-R. Akbarzade-T., M. Kadkhodayan, M. Davarynejad, *Application of a hybrid GA-BP optimized neural network for springback estimation in sheet metal forming process*. 2008.
13. W. Carden, L.G., D. Matlock, y R. Wagoner "*Measurement of springback*" *Mechanical Sciences* 2002: p. 79-101.
14. K. Manabe, M.Y.a.S.Y., "*Artificial intelligence identification of process parameters and adaptive control system for deep-drawing process*". Materials Processing Technology 1998: p. 421-426.
15. K. Manabe, M.Y., *Conf. Tech. Plasticity* in *4th Int. Conf. Tech. Plasticity*1993. p. 1905–1910.
16. K. Manabe, H.N., *Int. SAMPE Sym*. 1989: p. 707–712.
17. K. Manabe, S.Y., M. Yang, H. Nishimura, *Technical Papers of NAMRC*. 1995: p. 41–46.
18. Mallo, M., *Conformación de metales*.1983.
19. Schaeffer, -. *Conformación de chapas metálicas*2004: Imprensa Livre Editora Ltda.
20. Kakandikar, -. *Optimization of forming load and variables in deep drawing process for automotive cup using Genetic Algorithm*. 2006.
21. Schaeffer, *Conformación de chapas metálicas*, ed. I.L.E. Ltda2004.
22. <http://hongmacn.en.made-in-china.com/product/tMGxEpXVskJ/China-3003-Disco-De-Aluminio-PARA-Olla-Express.html>.
23. Michel.Arturo, R.P., *Propuesta de la Aplicación de una Herramienta de Inteligencia Artificial para Optimizar el Proceso de Embutido de Chapas.*, in *Ingeniería Mecánica*2010, Marta Abreu de Las Villas: Santa Clara
24. Portal, M.A.R., *Propuesta de la Aplicación de una Herramienta de Inteligencia Artificial para Optimizar el Proceso de Embutido de Chapas*, in *Ingeniería Mecánica*2010.
25. H. Gharib, A.S.W., M. Younan, A. , *An analytical incremental model for the analysis of the cup drawing*. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2006: p. 245-248.

- 26. Arsola, J., *Sistemas de ingeniería*1989.**
- 27. Marty Delgado, J.R.B.A., Y.; Valdez Infante, *Propuesta para la aplicación de sistemas inteligentes en la planeación y programación de procesos de embutidos de chapas.* 2010.**
- 28. Lio, D.G., *Algoritmos Genéticos*, in *Departamento de Ciencia de la Computación*1998, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas: Santa Clara.**