



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN
ALGORITMO BASADO EN LÓGICA DIFUSA APLICADO
A LA SOLUCIÓN DE PROBLEMA DEL NESTING

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO ELÉCTRICO – ELECTRÓNICO

P R E S E N T A N:

BASURTO MADRID JULIA
SÁNCHEZ SALGADO MARÍA DEL CARMEN

DIRECTOR DE TESIS: DR. FERNANDO VELÁZQUEZ VILLEGAS



2011



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado asignado:

Presidente	Ing. Roberto Macías Pérez
Vocal	Dr. Fernando Velázquez Villegas
Secretario	Ing. Rodolfo Peters Lammel
1er. Suplente	Dr. Carlos Rivera Rivera
2do. Suplente	Dr. Ana María Vázquez Vargas

Sitio donde se desarrolló el tema:

Facultad de Ingeniería

Director de tesis:

M.I. Fernando Velázquez Villegas

DEDICATORIAS

"Creemos que Amar es tener, pero no, Amar es ceder y entregarse.."

- El Quijote de la Mancha

"El hombre puede aguantar mucho si aprende a aguantarse a sí mismo."

- Axel Munthe

A Chema por compartir la vida conmigo y darme la fortaleza que necesito.

A mi hermana Elia y a mis sobrinos, Juan Carlos y Alejandro, para que siempre tengan en cuenta que todo lo que nos proponamos en la vida lo podemos lograr si trabajamos fuerte y continuamente con rectitud. Y que en la vida las cosas tienen más sentido si se comparten.

Julia Basurto Madrid

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Amalia Madrid y Leobardo Basurto, por su apoyo y enseñanzas.

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme todas esas oportunidades de crecimiento, no sólo profesional sino integral como ser humano.

Al Dr. Fernando Velázquez Villegas, no sólo por todo el tiempo y dedicación que me brindó para llevar por buen camino este trabajo, sino por su amistad sincera.

Al proyecto CONACYT FOMIX GTO2006C0131927 "Diseño Mecatrónico de una plataforma para el acomodo de piezas NESTING" por el apoyo para la realización de este trabajo.

A mis sinodales, Ing. Roberto Macías Pérez, Ing. Rodolfo Peters Lammel, Dr. Carlos Rivera Rivera, Dra. Ana María Vázquez Vargas, por su colaboración.

Al Dr. Saúl Daniel Santillán Gutiérrez por la oportunidad de aportar a su proyecto.

Al Ing. Israel Becerril Sierra, porque a pesar de todo siempre creyó en mí.

A Carmen, por darme la oportunidad de trabajar en equipo con ella, por sus enseñanzas, paciencia, pero sobre todo por su amistad.

A Vicky y Eleuterio por sus palabras de aliento y apoyo.

A Ruth, por su constante apoyo y amistad.

Finalmente, a todos los que contribuyeron directa o indirectamente con su apoyo en este trabajo.

Julia Basurto Madrid

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, María Salgado y Simón Sánchez, por su amor y apoyo durante toda y vida y especialmente en este importante logro.

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme todas esas oportunidades de crecimiento, no sólo profesional sino integral como ser humano.

Al Dr. Fernando Velázquez Villegas, no sólo por todo el tiempo y dedicación que me brindó para llevar por buen camino este trabajo, sino por su amistad sincera.

Al proyecto CONACYT FOMIX GTO2006C0131927 "Diseño Mecatrónico de una plataforma para el acomodo de piezas NESTING" para la realización de este trabajo.

A mis sinodales, Ing. Roberto Macías Pérez, Ing. Rodolfo Peters Lammel, Dr. Carlos Rivera Rivera, Dra. Ana María Vázquez Vargas, por su colaboración.

Al Dr. Saúl Daniel Santillán Gutiérrez por darnos la oportunidad de aportar a su proyecto.

A mi compañera de Tesis, por su tiempo y dedicación a este proyecto. Y sobre todo por el apoyo moral en tiempos difíciles.

Finalmente, a todos los que contribuyeron directa o indirectamente con su apoyo en este trabajo.

María del Carmen Sánchez Salgado

Contenido

INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO	4
1.1. LÓGICA DIFUSA	4
1.1.1. TEORÍA DE CONJUNTOS DIFUSOS.	5
1.1.2. OPERACIONES ENTRE CONJUNTOS DIFUSOS.	10
1.1.3. PRINCIPIOS DE LÓGICA DIFUSA.	10
1.1.4. OPERADOR DE IMPLICACIÓN.	11
1.1.5. INFERENCIA EN LÓGICA DIFUSA	13
1.1.6. MODELOS DIFUSOS LINGÜÍSTICOS	14
1.2. EJEMPLO DE CASO RESUELTO CON LÓGICA DIFUSA	22
1.3. SOFTWARE USADO	26
1.3.1. ORIGEN DE JAVA	26
1.3.2. CARACTERÍSTICAS DE JAVA	27
1.3.3. VENTAJAS	29
2. ANÁLISIS DEL PROBLEMA	31
2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE NESTING	31
2.1.1. SITUACIÓN DE LA INDUSTRIA DEL CALZADO.	31
2.1.2. DEFINICIÓN DE NESTING.	32
2.2. SOLUCIÓN PROPUESTA.	33
2.3. CÓMO APLICAR LÓGICA DIFUSA.	34
2.3.1. REQUERIMIENTOS PARA EL SISTEMA FUZZY: GENERACIÓN DEL PERFIL Y ENVOLVENTE CONVEXA.	34
2.3.2. ENTRADAS DEL SISTEMA DIFUSO: EFICIENCIA DE ÁREA OCUPADA, TASA DE HUECOS.	36
2.3.3. DEFINICIÓN DE LOS CONJUNTOS DE ENTRADA.	38
2.3.4. DEFINICIÓN DE LOS CONJUNTOS DE SALIDA.	39
3. DISEÑO DE LA SOLUCIÓN	40
3.1. DISEÑO DEL ALGORITMO	40
3.2. DIAGRAMA DE BLOQUES	40

3.2.1. INTERFAZ DE DIFUSIÓN	40
3.2.2. BASE DE CONOCIMIENTO	50
3.2.3. MOTOR DE INFERENCIA	52
3.2.4. INTERFAZ DE DESDIFUSIÓN	56
3.3. IMPLEMENTACIÓN DE LA SOLUCIÓN	57
3.3.1. DEFINICIÓN DE LAS CLASES	57
4. PRUEBAS	58
4.1. ETAPA DE PRUEBAS	58
PRUEBA 1	58
PRUEBA 2.	76
PRUEBA 3.	79
5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	83
REFERENCIAS	86

Introducción

La industria del calzado en México es un sector importante en la economía por su participación en el PIB total y manufacturero, por su generación de divisas vía exportaciones y por el número de empleos que genera. Adicionalmente, la producción de calzado es importante porque es un artículo de primera necesidad, ubicado sólo después de la alimentación, vivienda y vestido.

Dentro del proceso de fabricación del calzado existe el procedimiento de corte de las diferentes piezas que lo conforman. Actualmente dicho proceso es realizado, en la mayoría de los casos, por obreros calificados que hacen manualmente el acomodo de las piezas dentro de la piel, previo al corte. A este acomodo se le llama “Nesting”.

El problema de Nesting no es exclusivo de la industria del calzado, es importante también para varias industrias en donde se requiere la optimización de materia prima del producto. Industrias como la textil, para diseñar el acomodo de las piezas que constituirán una prenda, en el diseño de circuitos electrónicos, productos laminados, en la industria de papel, etc.

El acomodo óptimo será aquel que desperdicie la menor cantidad de material. El algoritmo que solucione el problema, tiene que ver con la geometría de las piezas. Por ejemplo, para la industria del calzado tanto piezas como contenedor tiene una forma irregular, lo que aumenta la complejidad del problema.

En este trabajo se propone un algoritmo para el acomodo individual de piezas basado en Lógica Difusa; el cual consiste en encontrar el acomodo óptimo de una pieza dentro de un contenedor, de tal forma que el área ocupada por ésta sea la mayor posible y los huecos que genere sean lo más pequeños posibles. Para llegar a esto se requiere ir haciendo desplazamientos de la pieza dentro del contenedor lo que generará “ n ” posiciones para las cuales se formará un perfil específico.

La finalidad del perfil es tener un contorno cerrado que sea independiente de los pedazos de piel o piezas que lo conforman, de tal manera que, teniendo el contorno, el problema se reduce a acomodar una pieza dentro del mismo, dejando de lado, por un momento, las piezas acomodadas previamente.

De las “ n ” posiciones generadas, es necesario determinar cuál será la posición óptima al acomodarla de acuerdo al área que ocupe y los huecos que forme ésta con su respectivo perfil. Un acomodo óptimo será aquel que tenga una mayor área ocupada y una menor área de huecos. El área ocupada de una pieza es definida por su propia área. El área de los huecos se determina a partir del perfil, el área de la pieza y la envolvente convexa.

Cada vez que se tiene un nuevo acomodo o posición i de la pieza se evalúa área ocupada y área de los huecos de tal forma que al final se tenga el área ocupada relacionada a la posición i y el área de huecos i para la posición i . Y al final una lista de todas las posibles posiciones así como cada una de las áreas ocupada y áreas de huecos para cada posición en específico.

En el acomodo manual la calidad del mismo es evaluada por el hombre. Se propone manejar lógica difusa, ya que permite llegar rápidamente a una solución de una manera eficiente y sin tener grandes complicaciones en el algoritmo. Así por ejemplo, se forman conjuntos difusos con el área ocupada de la pieza que resuelve lo siguiente: ¿cómo saber si el área que ocupa una pieza es chica o grande? Ahí es donde la lógica difusa entra en acción y para un valor específico del conjunto *área ocupada* le asigna un valor para cada una de las funciones de membresía, si se considera que las funciones de membresía son: área chica y área grande, la lógica difusa permite que un valor este en un porcentaje dentro del área chica y en una mayor o menor en el área grande, hecho que no se tiene en la lógica convencional en la cual tendríamos que elegir entre una u otra al 100%.

Clasificar el valor del área que una pieza ocupa y además el área de los huecos que va dejando al ser acomodada en una cierta posición nos permite crear una serie de reglas para determinar una solución óptima.

DESARROLLO POR CAPÍTULOS

La organización de este trabajo es la siguiente:

Capítulo 1

En el capítulo 1 se hace referencia a los antecedentes básicos de lógica difusa. Inicia con la teoría de Conjuntos Difusos, operaciones y principios. Posteriormente se habla de la Inferencia en Lógica Difusa y de los Modelos lingüísticos, que en conjunto son los que integran la solución a los problemas basándose en este método. Finalmente se ilustra la utilidad de la lógica difusa con un ejemplo.

Capítulo 2

En este capítulo se plantea el problema a resolver que en este caso es el acomodo individual de piezas dentro de un contenedor, posteriormente se da una descripción de la solución propuesta y de los resultados a los que se debe llegar para encontrar el acomodo óptimo.

Capítulo 3

El capítulo 3 es la parte esencial de este trabajo, aquí se desarrollan paso a paso los puntos del algoritmo difuso. Primero se desarrolla la Interfaz de Difusión la cual permitirá situar valores específicos dentro de funciones de membresía que tendrán cierto grado de pertenencia. De aquí se pasa a la base de conocimiento en la cual se evaluarán los valores obtenidos de la interfaz de difusión, esto usando las FAM generadas, finalmente se llega al motor de inferencia en el cual evaluaremos las reglas difusas y se obtiene la combinación de las mismas para llegar al resultado más adecuado. Luego de obtener los valores de la evaluación y combinación de las reglas el siguiente paso es la desfusión, la cual permite conocer la posición óptima, de acuerdo al grado de pertenencia del conjunto de salida denominado *Bondad* obtenido.

Capítulo 4

Finalmente se ilustra con pruebas representativas el funcionamiento del algoritmo propuesto. Se desarrollan 3 pruebas significativas, la primera se desglosa paso a paso como indica el capítulo 3, la segunda y tercera muestran los datos más representativos, y en cada una de ellas se observa el buen funcionamiento del algoritmo propuesto.

1. Marco teórico

1.1. Lógica Difusa

La necesidad y uso de lógica de niveles múltiples existe desde los tiempos de Aristóteles, cuando utilizaban la lógica bivaluada, es decir, consideraban sólo dos valores de verdad para las expresiones lógicas: cierto o falso, con los valores numéricos 0 y 1 respectivamente. William de Occam, alrededor de los siglos XIII y XIV apoyaba la lógica de dos estados pero especulaba sobre cual podría ser el valor de verdad de la expresión “si p entonces q” si una de las dos variables no fuera ni verdadera ni falsa. Más adelante, durante el periodo de 1878 a 1956, Lukasewics propuso una lógica de tres niveles como “verdadero” (1), “falso” (0) y un “neutro” (1/2), que representaba medio verdad, medio falso. En tiempos subsecuentes, en China y otras partes del mundo, se continuó con la noción de lógica multivaluada y fue Lofti Zadeh, en su artículo “Fuzzy Sets” de 1965, quien terminó la tarea siguiendo las especulaciones de estudiosos de la lógica anteriores y mostrando que a lo que él llamó “conjuntos difusos” eran las bases de cualquier lógica, independientemente del número de niveles de verdad que se consideraran. [1]

La lógica difusa, es esencialmente una lógica multivaluada que extiende a la clásica. Esta última impone a sus enunciados únicamente valores falso o verdadero.

En el mundo existe mucho conocimiento ambiguo e impreciso por naturaleza. El razonamiento humano con frecuencia actúa con este tipo de información, es decir, el razonamiento humano utiliza valores de verdad que no necesariamente son “tan deterministas”. Las lógicas difusas procuran crear aproximaciones matemáticas en la resolución de ciertos tipos de problemas. Pretenden producir resultados exactos a partir de datos imprecisos, por lo cual son particularmente útiles en aplicaciones electrónicas o computacionales. El adjetivo “difuso” aplicado a ellas se debe a que los valores de verdad no deterministas utilizados en ellas tienen, por lo general, una connotación de incertidumbre. Un vaso medio lleno, independientemente de que también esté medio vacío, no está lleno completamente ni está vacío completamente. Qué tan lleno puede estar es un elemento de incertidumbre, es decir, de difusidad, entendida esta última como una propiedad de indeterminismo.

La lógica difusa fue investigada, por primera vez, a mediados de los años sesenta en la Universidad de Berkeley (California) por el Ingeniero Lotfi A. Zadeh, cuando se dio cuenta

de lo que él llamó principio de incompatibilidad: “Conforme la complejidad de un sistema aumenta, nuestra capacidad para ser precisos y construir instrucciones sobre su comportamiento disminuye hasta el umbral más allá del cual, la precisión y el significado son características excluyentes”. Introdujo entonces el concepto de conjunto difuso (Fuzzy Set) bajo el que reside la idea de que los elementos sobre los que se construye el pensamiento humano no son números sino etiquetas lingüísticas. La lógica difusa permite representar el conocimiento común, que es mayoritariamente del tipo lingüístico cualitativo y no necesariamente cuantitativo, en un lenguaje matemático a través de la teoría de los conjuntos difusos y funciones características asociadas a ellos. Permite trabajar a la vez con datos numéricos y términos lingüísticos; los términos lingüísticos son inherentemente menos precisos que los datos numéricos pero en muchas ocasiones aportan una información más útil para el razonamiento humano.

El aspecto central de los sistemas basados en la teoría de la lógica difusa es que, a diferencia de los que se basan en la lógica clásica, tienen la capacidad de reproducir aceptablemente los modos usuales del razonamiento, considerando que la certeza de una proposición es una cuestión de grado. Más formalmente se dice que la lógica es la ciencia de los principios formales del razonamiento aproximado, considerando el razonamiento preciso (lógica clásica) como caso límite. Así pues, las características más atractivas de la lógica difusa son su flexibilidad, su tolerancia con la imprecisión, su capacidad para modelar problemas no lineales y su base en el lenguaje natural. [1] [2]

1.1.1. Teoría de conjuntos difusos.

Un conjunto clásico se define como una colección de elementos que existen dentro de un Universo. Así, si el universo consta de los números enteros no negativos menores que 10:

$$A=\{0,1,2,3,4,5,6,7,8,9\}$$

Entonces se pueden definir algunos conjuntos como, por ejemplo:

$$B=\{0,2,4,6,8\}$$

$$C=\{1,3,5,7,9\}$$

$$D=\{1,4,7\}$$

entre otros.

Con estas definiciones se ha establecido que cada uno de los elementos del Universo pertenecen o no a un determinado conjunto. Por lo tanto, cada conjunto puede definirse

completamente por una función de pertenencia, que opera sobre los elementos del Universo, y que le asigna un valor de 1 si el elemento pertenece al conjunto, y de 0 si no pertenece.

La necesidad de trabajar con conjuntos difusos surge del hecho que existen conceptos que no tienen límites claros. Un conjunto difuso se encuentra asociado por un valor lingüístico que está definido por una palabra, etiqueta lingüística o adjetivo. En los conjuntos difusos la función de pertenencia puede tomar valores del intervalo entre 0 y 1, y la transición del valor entre cero y uno es gradual y no cambia de manera instantánea como pasa con los conjuntos clásicos. Un conjunto difuso en un universo en discurso puede definirse como lo muestra la siguiente ecuación:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in U\}$$

Donde $\mu_A(x)$ es la función de pertenencia de la variable x , y U es el universo. Cuanto más cerca este la pertenencia del conjunto A al valor del 1, mayor será la pertenencia de la variable x al conjunto A, esto se puede ver en la figura 1.1.

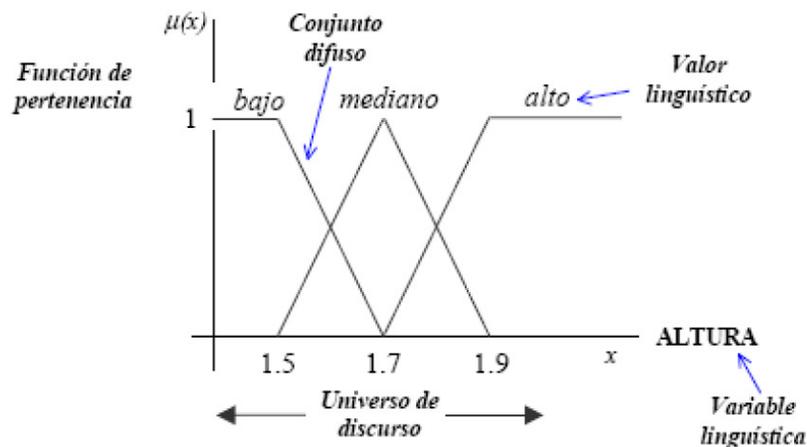


Figura 1.1. Ejemplo de Conjuntos Difusos.

Muchos conceptos de teoría clásica de conjuntos pueden hacerse extensivos a los conjuntos difusos, otros son exclusivamente inherentes a la teoría de los conjuntos difusos. Algunos de los más utilizados son los siguientes:

- El soporte de un conjunto difuso A en el universo de discurso U es un conjunto "crisp" (numérico) que contiene todos los elementos de U que tiene un valor de pertenencia distinto de cero en A, esto es,

$$sop(x) = \{x \in U | \mu_A(x) > 0\}$$

Si el soporte de un conjunto difuso no contiene ningún elemento se tiene un conjunto difuso vacío. Si el soporte de un conjunto difuso es un solo punto se tiene lo que se conoce como “singleton” difuso.

- El conjunto de cruce de conjunto difuso es el punto de U cuyo valor de pertenencia al conjunto es igual a 0.5.
- Dos conjuntos difusos A y B son iguales si y sólo si sus funciones características $\mu_A(x)$ y $\mu_B(x)$ son iguales
- El conjunto difuso B contiene al conjunto difuso A , esto es $A \subset B$, si y sólo si $\mu_A(x) \leq \mu_B(x)$ para todo $x \in U$

Variables lingüísticas

Una Variable Lingüística es aquella cuyos valores son palabras o sentencias que van a enmarcarse en un lenguaje predeterminado. Para estas variables lingüísticas se utilizará un nombre y un valor lingüístico sobre un Universo de Discurso. Además, podrán dar lugar a sentencias generadas por reglas sintácticas, a las que se les podrá dar un significado mediante distintas reglas semánticas.

En 1973, el Profesor Lofti Zadeh propuso un concepto de variables lingüísticas o difusas. Se piensa en ellas como los objetos lingüísticos o palabras, más que en números. La entrada del sensor es un sustantivo, por ejemplo, “temperatura”, “velocidad”, “flujo”, “presión”, etc. Dado que un error es sólo la diferencia de valores, no se puede pensar en él de la misma manera. Las mismas variables lingüísticas son adjetivos que modifican las variables (por ejemplo: error “grande y positivo”, error “cero”, error “pequeño y negativo” y error “grande y negativo”). Como mínimo, uno podría simplemente tener variables “positivas”, “cero” y “negativas” para cada uno de los parámetros. Rangos adicionales como “muy grandes” y “muy pequeñas” podrían también ser agregadas para extender la respuesta a condiciones excepcionales y no lineales, pero no son necesarias en sistemas básicos.

El centro de las técnicas de modelado difuso es la idea de variable lingüística. Desde su raíz, una variable lingüística es el nombre de un conjunto difuso. Si se tiene un conjunto difuso llamado "largo" éste es una simple variable lingüística y puede ser empleada como una regla-base en un sistema basado en la longitud de un proyecto en particular. Si la duración-proyecto es larga entonces la terminación de tareas es DECRECIENTE. Una variable lingüística encapsula las propiedades de aproximación o conceptos de imprecisión en un sistema y da una forma de calcular adecuada. Esto reduce la aparente complejidad

de describir un sistema que debe concordar con su semántica. Una variable lingüística siempre representa un espacio difuso.

Lo importante del concepto de variable lingüística es su estimación de variable de alto orden más que una variable difusa. En el sentido de que una variable lingüística toma variables difusas como sus valores. En el campo de la semántica difusa cuantitativa al significado de un término "x" se le representa como un conjunto difuso $\mu(x)$ del universo de discusión. Desde este punto de vista, uno de los problemas básicos en semántica es que se desea calcular el significado de un término compuesto.

La idea básica sugerida por Zadeh es que una etiqueta lingüística tal como "muy", "más o menos", "ligeramente", etc... puede considerarse como un operador que actúa sobre un conjunto difuso asociado al significado de su operando. Por ejemplo en el caso de un término compuesto "muy alto", el operador "muy" actúa en el conjunto difuso asociado al significado del operando "alto". Una representación aproximada para una etiqueta lingüística se puede lograr en términos de combinaciones o composiciones de las operaciones básicas. Es importante aclarar que se hará mayor énfasis en que estas representaciones se proponen principalmente para ilustrar el enfoque, más que para proporcionar una definición exacta de las etiquetas lingüísticas.

Zadeh también considera que las etiquetas lingüísticas pueden clasificarse en dos categorías que informalmente se definen como sigue:

- Tipo I: las que pueden representarse como operadores que actúan en un conjunto difuso: "muy", "más o menos", "mucho", "ligeramente", "altamente", "bastante", etc. y,
- Tipo II: las que requieren una descripción de cómo actúan en los componentes del conjunto difuso (operando): "esencialmente", "técnicamente", "estrictamente", "prácticamente", "virtualmente".

En otras palabras, las variables lingüísticas pueden ser caracterizadas como operadores más que construcciones complicadas sobre las operaciones primitivas de conjuntos difusos.

Funciones de pertenencia

La función de pertenencia proporciona una medida del grado de similaridad de un elemento de U con el conjunto difuso. La forma de la función de pertenencia utilizada depende del criterio aplicado en la resolución de cada problema y cambia en función del

punto de vista del usuario. La única condición que debe cumplir una función de pertenencia es que tome valores entre 0 y 1 con continuidad. Las funciones de pertenencia más comúnmente utilizadas por su simplicidad matemática y su manejabilidad son: triangular (Figura 1.2), trapezoidal (Figura 1.3), singleton (Figura 1.4).

$$\mu(x) \begin{cases} 0 & \text{para } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{para } a < x \leq b \\ \frac{x-b}{c-b} & \text{para } b < x \leq c \\ 0 & \text{para } x > c \end{cases}$$

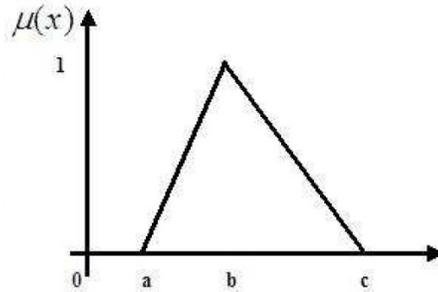


Figura 1.2. Función Triangular

$$\mu(x) \begin{cases} 0 & \text{para } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{para } a < x \leq b \\ 1 & \text{para } b < x \leq c \\ \frac{x-c}{d-c} & \text{para } c < x \leq d \\ 0 & \text{para } x > d \end{cases}$$

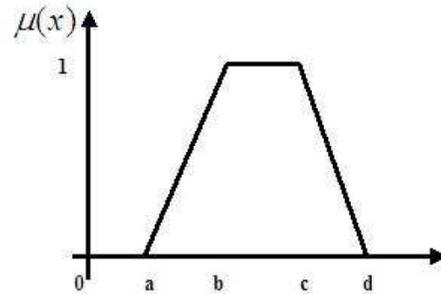


Figura 1.3. Función Trapezoidal

$$\mu(x) \begin{cases} 0 & \text{para } x < a \\ m & \text{para } x = a \\ 0 & \text{para } x > a \end{cases}$$

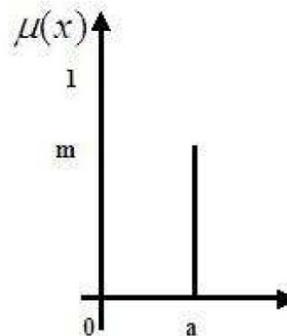


Figura 1.4. Función Singleton

Conceptualmente existen dos aproximaciones para determinar la función de pertenencia asociada a un conjunto: la primera aproximación está basada en el conocimiento humano de los expertos, y la segunda aproximación es utilizar una colección de datos para diseñar una función. El número de funciones de pertenencia asociadas a una misma variable es elegido por el experto: a mayor número de funciones de pertenencia se tiene mayor resolución pero también mayor complejidad computacional; además estas funciones pueden estar superpuestas o no, el hecho de estar una sobre otra pone de manifiesto un aspecto clave de la lógica difusa: una variable puede tener diferentes grados de pertenencia de varios conjuntos difusos, es decir el vaso puede estar medio lleno y medio vacío a la vez.[5]

1.1.2. Operaciones entre conjuntos difusos.

Las tres operaciones básicas entre conjuntos clásicos, Unión, Intersección y Complemento, se definen también para los conjuntos difusos, intentando mantener el significado de tales operaciones. La definición de estas operaciones se hace empleando el concepto de función de pertenencia de los conjuntos.

Dados dos conjuntos difusos A y B en el mismo universo X, con funciones de pertenencia $\mu_A(x)$ y $\mu_B(x)$ respectivamente, se pueden definir las siguientes operaciones básicas:

Unión. La función de pertenencia de la unión de A y B se define como:

$$\mu_{A \cup B} = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$$

Intersección. La función de pertenencia de la intersección de A y B es:

$$\mu_{A \cap B} = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$$

Complemento. La función de pertenencia del complemento de A se define como:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$$

1.1.3. Principios de lógica difusa.

Es sabido que la teoría de conjuntos, el álgebra booleana y la lógica clásica son isomorfas, bajo transformaciones adecuadas. Esto significa que tienen una estructura subyacente similar, y que, por tanto, las definiciones que se hagan en una cualquiera de las tres teorías se puede llevar a las otras dos, mediante transformaciones adecuadas. La Tabla 1 muestra la correspondencia de algunos operadores.

Teoría de Conjuntos	Álgebra Booleana	Lógica Tradicional
Intersección	Conjunción	AND
Unión	Disyunción	OR
Complemento	Negación	NOT

Tabla 1. Correspondencia entre operadores de la Teoría de Conjuntos, el Álgebra Booleana y la Lógica Tradicional.

Ahora bien, el razonamiento lógico consiste en la combinación de proposiciones para producir nuevas proposiciones; así, la combinación de las proposiciones "X es A" y "Y es B" mediante el operador AND da como resultado la proposición "X es A AND Y es B". La tabla 1 sugiere que puede representarse esta combinación mediante un operador análogo a la Intersección de Conjuntos.

Lo anterior es posible porque en la lógica tradicional toda proposición puede tener uno de dos valores: verdadero o falso, lo que corresponde en la teoría de conjuntos clásicos a los únicos dos valores que puede tomar la función de pertenencia para cualquier conjunto: 1 ó 0. Ahora bien, en lógica difusa una proposición puede representarse por un conjunto difuso: "X es A" corresponde a un conjunto A con función de pertenencia $\mu_A(x)$, mientras que "Y es B" corresponde a un conjunto B con función de pertenencia $\mu_B(x)$, y la combinación de estas dos proposiciones con el operador AND, es decir la proposición "X es A AND Y es B" corresponde a un nuevo conjunto difuso A AND B con función de pertenencia.

$$\mu_{AandB}(x, y) = \min(\mu(x), \mu_B(y))$$

En donde se ha utilizado el operador *min* para efectuar la intersección de los dos conjuntos. [5]

1.1.4. Operador de implicación.

Debe Hacerse un análisis especial con el operador lógico de implicación \Rightarrow , que combina dos proposiciones con la expresión *SI... ENTONCES... (IF ...THEN...)*, y que es el fundamento de las inferencias realizadas en sistemas de lógica difusa.

Ante todo, conviene precisar la importancia del operador \Rightarrow consiste en encontrar una forma de interpretar proposiciones semejantes a las utilizadas en la experiencia común para describir conocimientos. Es decir, encontrar un camino matemático para evaluar proposiciones como las siguientes: *"Si las vibraciones son altas Entonces el rodamiento está desgastado"*, o *"Si los ingresos del cliente son bajos Entonces su capacidad de endeudamiento es poca"*.

Ahora bien, la implicación \Rightarrow de la lógica tradicional tiene una tabla de verdad que se muestra en la Tabla 2.

p	q	P\Rightarrowq
Verdad	Verdad	Verdad
Verdad	Falso	Falso
Falso	Verdad	Verdad
Falso	Falso	Verdad

Tabla 2 *Tabla de verdad de la implicación lógica tradicional*

Esta tabla de verdad puede obtenerse también con los operadores básicos Conjunción, Disyunción y Negación.

Para combinar dos proposiciones "X es A" y "Y es B" en la forma "IF X es A THEN Y es B", debe representarse a cada una de dichas proposiciones por conjuntos difusos con funciones de pertenencia $\mu_A(x)$ y $\mu_B(x)$ respectivamente, y entonces la proposición combinada estará representada por un conjunto difuso $A \Rightarrow B$, cuya función de pertenencia estará dada por:

$$\mu_{A \Rightarrow B}(x, y) = 1 - \min(\mu_A(x), (1 - \mu_B(y))) \quad \text{ó bien}$$

$$\mu_{A \Rightarrow B}(x, y) = \max(1 - \mu_A(x), \mu_B(y))$$

No obstante, las expresiones anteriores (llamadas implicaciones lógicas o implicaciones IF-THEN) no son necesariamente las más útiles para efectuar inferencias, particularmente en aplicaciones de ingeniería. La razón puede hallarse revisando la Tabla 2: La implicación de la lógica tradicional es verdadera en tres condiciones, y sólo es falsa si la primera proposición es verdadera y la segunda es falsa, lo que puede interpretarse con la máxima "La verdad nunca implica falsedad".

La tabla de verdad de la implicación indica en qué condiciones un razonamiento es formalmente correcto, pero no necesariamente útil. Por ejemplo:

"Si $1=2$ Entonces $3=3$ " es una implicación formalmente correcta, porque una falsedad ($1=2$) puede implicar una verdad ($3=3$), y para ello basta con sumar al lado izquierdo 2 y al lado derecho 1 (recordando que se partió de $1=2$).

De igual forma la proposición "Si $1=2$ Entonces $2=3$ " también es formalmente correcta, porque una falsedad puede implicar una falsedad, y para ello basta con sumar 1 a cada lado de la igualdad.

Los dos ejemplos anteriores son formalmente correctos, pero qué utilidad puede extraerse de ellos en aplicaciones de ingeniería. En realidad sólo implicaciones en las que ambas proposiciones sean verdaderas pueden tener utilidad práctica, y esto es así porque las relaciones causa-efecto son las que interesan en Ingeniería, y no el formalismo de una implicación

1.1.5 Inferencia en Lógica difusa

La Inferencia lógica consiste en la combinación de proposiciones para producir nuevas proposiciones. Así, al combinar la proposición "X es A" con la proposición "IF X es A THEN Y es B", se puede inferir la proposición "Y es B" (ver figura 1.5).

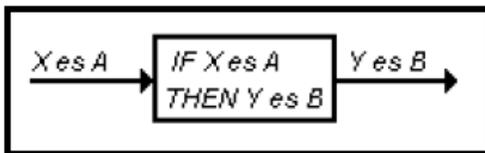


Figura 1.5. Inferencia en Lógica Tradicional

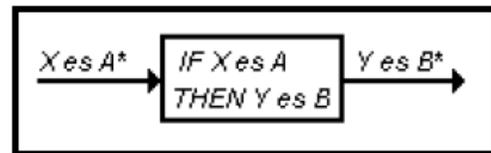


Figura 1.6. Inferencia en Lógica Difusa

Una inferencia como la mencionada en el párrafo anterior sólo es posible en la lógica tradicional si la primera proposición ("X es A") es idéntica a la primera parte de la segunda proposición ("IF X es A"); sin embargo, en la lógica difusa estas dos proposiciones no necesariamente deben ser idénticas, ya que las fronteras de los conjuntos no son precisas. Así, al combinar la proposición "X es A*" con la proposición "IF X es A THEN Y es B", puede obtenerse la proposición "Y es B*" (ver figura 1.6).

La combinación de estas proposiciones para efectuar la inferencia tiene su soporte matemático en la *Extensión Cilíndrica* y en la *Composición de Relaciones*, la figura 1.7 muestra gráficamente cómo puede interpretarse esta inferencia. [4]

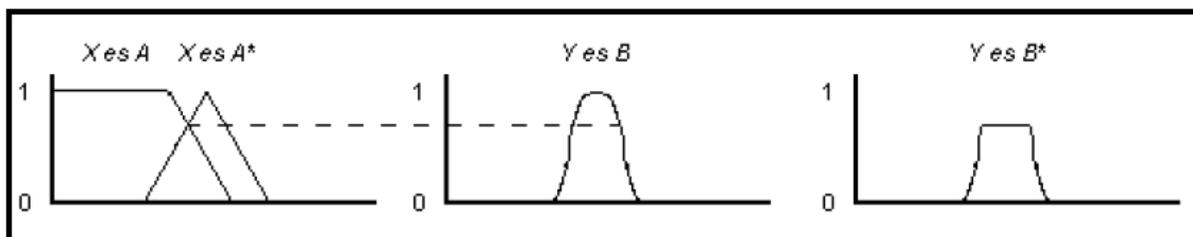
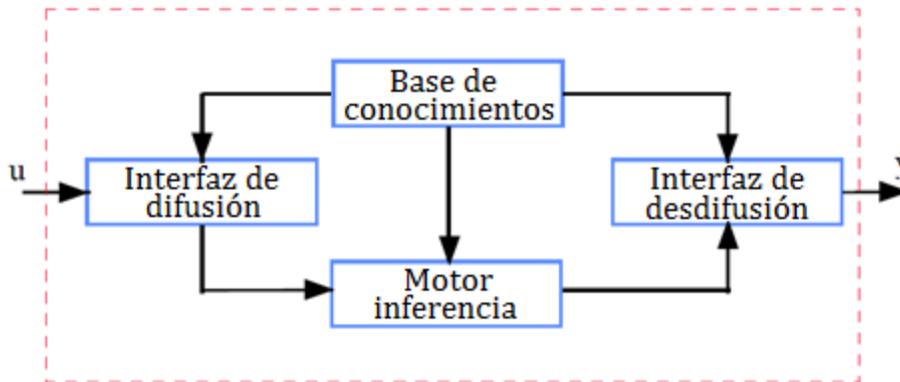


Figura 1.7. Representación gráfica de los mecanismos de Inferencia en Lógica Difusa

1.1.6. Modelos difusos lingüísticos

Estos modelos se basan en un conjunto de reglas heurísticas donde las variables lingüísticas de las entradas y salidas se representan por conjuntos difusos.

La siguiente figura muestra los principales componentes de un modelo difuso lingüístico: interfaz de difusión, base de conocimientos, motor de inferencia e interfaz de desdifusión.



Interfaz de difusión. Este elemento transforma las variables de entrada del modelo (u) en variables difusas. Para esta interfaz se deben tener definidos los rangos de variación de las variables de entrada y los conjuntos difusos asociados con sus respectivas funciones de pertenencia.

Base de conocimientos. Contiene las reglas lingüísticas del control y la información referente a las funciones de pertenencia de los conjuntos difusos.

Estas reglas lingüísticas, tienen típicamente la siguiente forma:

$$\text{Si } u_1 \text{ es } A \text{ y } u_2 \text{ es } B \text{ entonces } y \text{ es } C$$

donde A , B y C son los conjuntos difusos de las variables de entrada u_1 y u_2 , y de la variable de salida y respectivamente.

Existen varias formas de derivar las reglas, entre las que destacan las basadas en:

- La experiencia de expertos y el conocimiento de ingeniería de control. La base de reglas se determina a partir de entrevistas con el operador o a través del conocimiento de la dinámica del proceso.
- La modelación del proceso. Los parámetros de la base de conocimiento se obtienen a partir de datos de entrada y salida del proceso.

Motor de inferencia. Una vez obtenidos los valores difusos, el objetivo de la inferencia difusa es transportarlos de la premisa a la conclusión de cada regla. Esto resulta en un conjunto difuso para cada variable de salida de cada regla. En este proceso, los métodos más usados son Mínimo y Producto.

- Producto

En este método, la función de pertenencia de salida graduada por el grado de pertenencia calculado para la premisa de la regla.

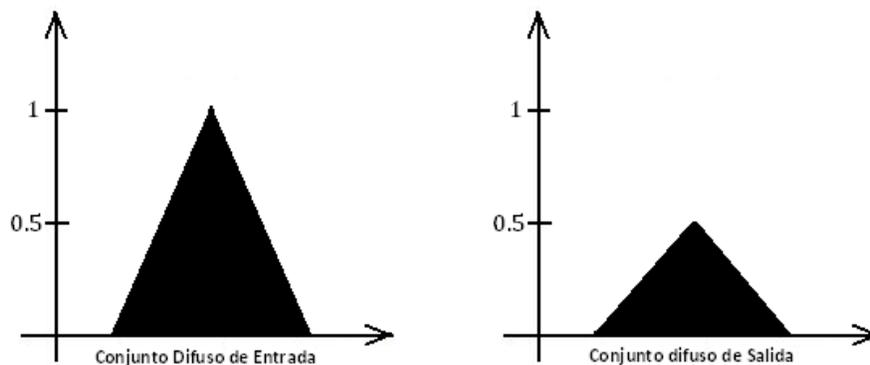


Figura 1.8. Conjuntos difusos de entrada y salida aplicando el método de inferencia difuso: Producto

Por ejemplo si el grado de pertenencia es de 0.5 y el conjunto difuso es triangular la figura que se obtendrá es la siguiente:

- Mínimo

En el método de inferencia Mínimo, la función de pertenencia de salida es recortada a la altura correspondiente al grado de verdad calculado para la premisa de la regla, La forma de la salida resultante se afecta por este método formando un trapecio.

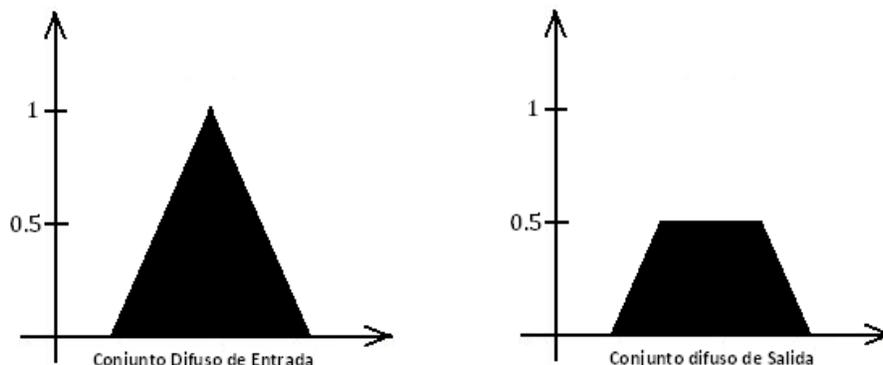


Figura 1.9. Conjuntos difusos de entrada y salida aplicando el método de inferencia difuso: Mínimo

Esta nueva figura del conjunto difuso de salida es la forma cómo influye específicamente esta regla en la variable de salida.

Combinación de reglas. En éste paso todos los subconjuntos difusos de salida asignados para cada variable de salida de las diferentes reglas se combinan en un solo conjunto difuso.

Para determinar la forma del conjunto difuso de salida a partir del conjunto de respuestas obtenidas de las diversas reglas, Lógica Difusa cuenta con los métodos Máximo y Suma.

- Máximo

Este método evalúa el contorno de todos los conjuntos de salida formando un solo contorno de salida.

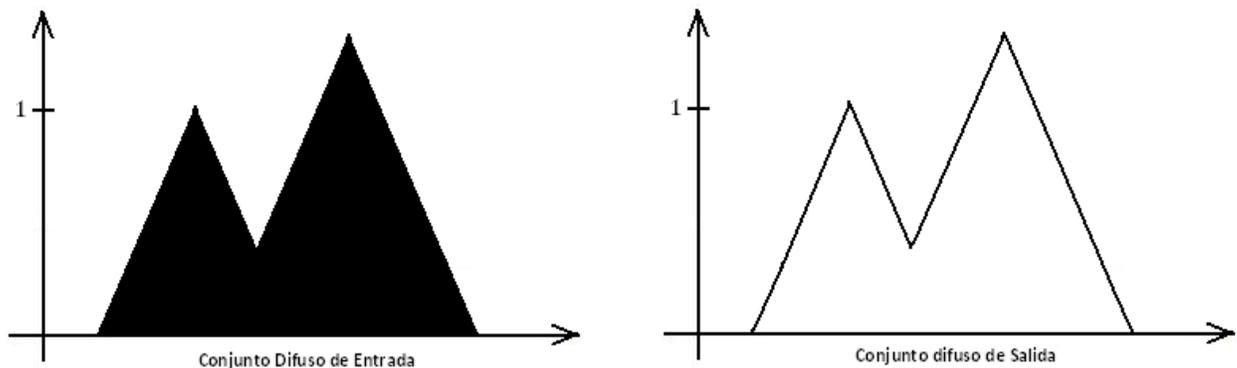


Figura 1.10.Conjuntos difusos de entrada y salida aplicando el método de combinación de reglas máximo

En este método, la combinación de los subconjuntos difusos se construye tomando el punto máximo de todos los subconjuntos difusos asignados por las reglas de inferencia utilizando el operador OR.

- Por Suma

Otra forma es la combinación por suma de los puntos máximos de los conjuntos de salida difusos. Por ejemplo es la figura 1.11, el punto que se encuentra señalado se obtiene sumando el grado de pertenencia en ese punto para cada conjunto difuso, dando como resultado $0.6+0.2=0.8$.

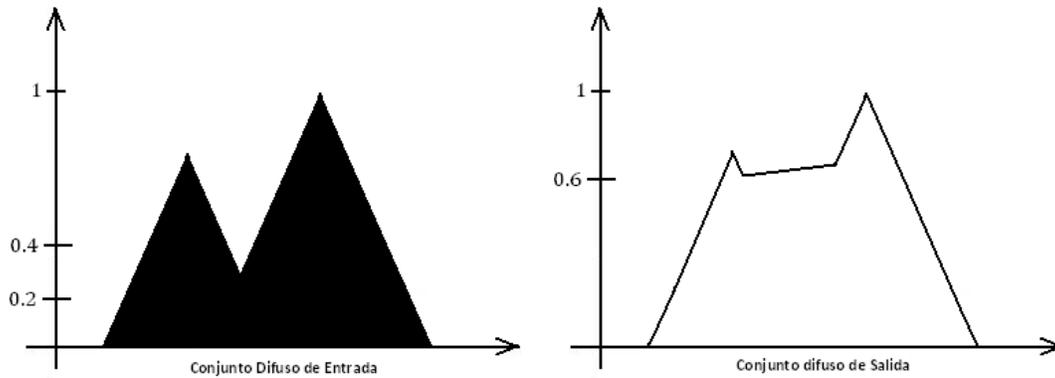


Figura 1.11. Conjuntos difusos de entrada y salida aplicando el método de combinación de reglas por suma

Interfaz de desdifusión. Este elemento provee salidas discretas y determinísticas a partir de los conjuntos difusos C' obtenidos como resultado de la inferencia.

- **Método del centroide.** Consiste en determinar el punto de equilibrio de la figura formada por los conjuntos difusos de salida, con la expresión:

$$z^* = \frac{\int x\mu(x)dx}{\int \mu(x)dx}$$

El punto de equilibrio obtenido se utiliza para representar a los conjuntos difusos de salida.

- **Método del centro de gravedad.** Este método determina el centro del área perteneciente a la combinada función de membresía. Esta operación es computacionalmente compleja y por lo tanto resultan ciclos lentos de inferencia. El punto representativo de los conjuntos de salida se determina con la expresión:

$$z^* = \frac{\sum z_i\mu(z_i)}{\sum \mu(z_i)}$$

- **Método de altura máxima.** Consiste en realizar un barrido de todos los elementos de los conjuntos difusos de salida para localizar el elemento con mayor grado de pertenencia. El elemento obtenido se utiliza para representar los conjuntos difusos de

salida. Al realizar un barrido de todos los elementos de los conjuntos difusos de la figura 1.12 se determina que el elemento con mayor grado de pertenencia es z^* .

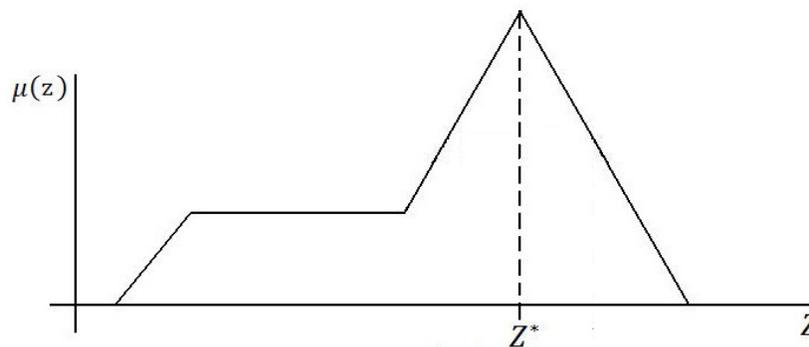


Figura 1.12. Desdifusión con el método de altura máxima.

- **Método de primero de los máximos.** Se realiza un barrido de izquierda a derecha, de los elementos de los conjuntos difusos, hasta obtener el primer elemento con valor de pertenencia máximo, el cual se utiliza para representar a los conjuntos difusos de salida. Al realizar un barrido de los elementos de los conjuntos difusos de salida en la figura 1.13, se determina que el primer valor de pertenencia máximo se encuentra en el elemento z^* .

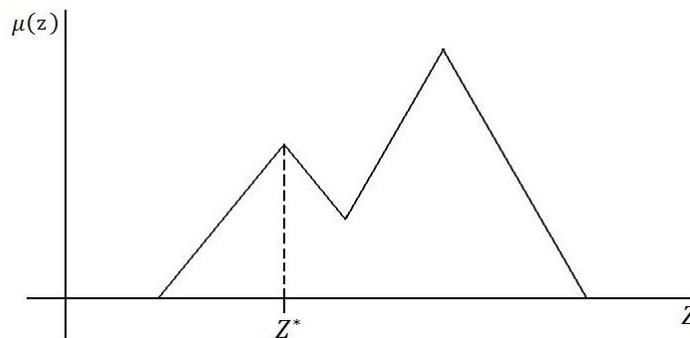


Figura 1.13. Desdifusión con el método de primero de los máximos.

- **Método de último de los máximos.** Se realiza un barrido de izquierda a derecha, de los elementos de los conjuntos difusos hasta obtener el último valor de pertenencia máximo, el cual se utiliza para representar a los conjuntos difusos de salida. Al realizar un barrido de los elementos de los conjuntos difusos de salida de la figura 1.14, se determina que el último valor de pertenencia máximo se encuentra en el elemento z^* .

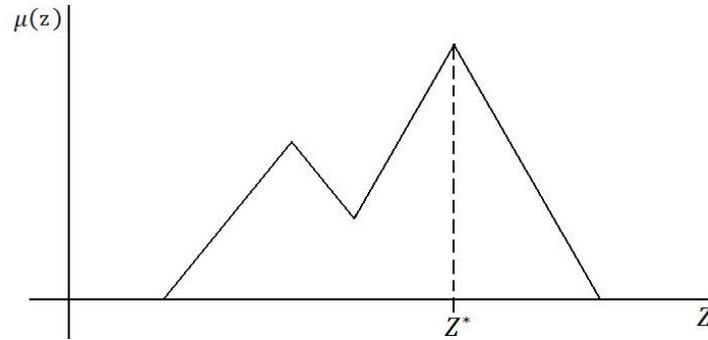


Figura 1.14. Desdifusión con el método de último de los máximos.

- **Método de promedio pesado.** Se aplica cuando los conjuntos difusos de salida están formados por figuras simétricas. Para aplicarlo se siguen los siguientes pasos:
 1. Se identifican las figuras simétricas.
 2. Se obtiene el punto $(z_1, \mu(z_1))$, localizado sobre el eje de simetría de cada figura.
 3. Se aplica la expresión:

$$z^* = \frac{\sum z_i \mu(z_i)}{\sum \mu(z_i)}$$

En los conjuntos difusos de salida de la figura 1.15 se tienen dos figuras simétricas, las cuales se representan con los puntos $(z_1, \mu(z_1))$ y $(z_2, \mu(z_2))$ ubicados en los ejes de simetría de cada una. El valor representativo de los conjuntos difusos se calcula como:

$$z^* = \frac{z_1 \mu(z_1) + z_2 \mu(z_2)}{\mu(z_1) + \mu(z_2)}$$

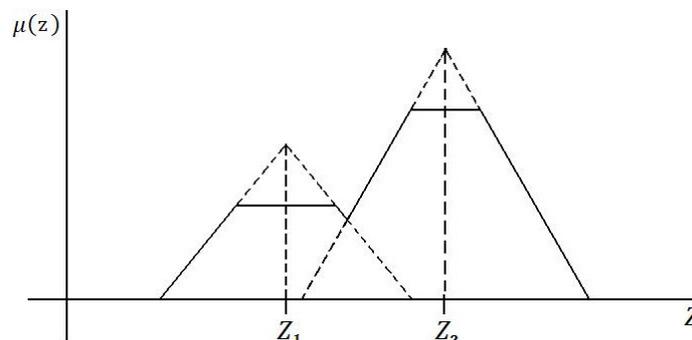


Figura 1.15. Desdifusión con el método de promedio pesado.

- **Método de centro de sumas.** Para de todos los conjuntos difusos con la expresión aplicar este método se siguen los siguientes pasos:

1. Se determina un punto representativo z_i para cada conjunto difuso.
2. Se calcula el área A_i de cada conjunto difuso.
3. Se obtiene un punto representativo de todos los conjuntos con la expresión:

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n z_i A_i}{\sum_{i=0}^n A_i}$$

En la figura 1.16 se tiene que z_1 y z_2 son los puntos representativos de los conjuntos difusos, donde A_1 y A_2 representan las áreas de cada conjunto, al aplicar el método de centro de sumas se obtiene que

$$z^* = \frac{z_1 A_1 + z_2 A_2}{A_1 + A_2}$$

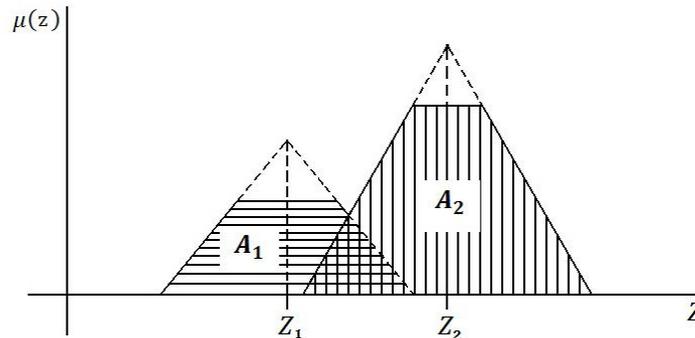


Figura 1.16. Desdifusión con el método de centro de sumas.

- **Método de promedio de máximos.** Consiste en realizar un barrido de todos los elementos de los conjuntos difusos para localizar el primero y el último elemento con mayor grado de pertenencia, representados como z_1 y z_2 respectivamente. El valor representativo z^* de los conjuntos difusos se calcula con la expresión:

$$z^* = \frac{z_1 + z_2}{2}$$

Al realizar un barrido de todos los elementos del conjunto difuso de la figura 1.17, se encuentra el primer valor máximo de pertenencia en el elemento z_1 y el último valor máximo de pertenencia en el elemento z_2 . El valor representativo de los conjuntos se calcula como el valor promedio de estos dos elementos.

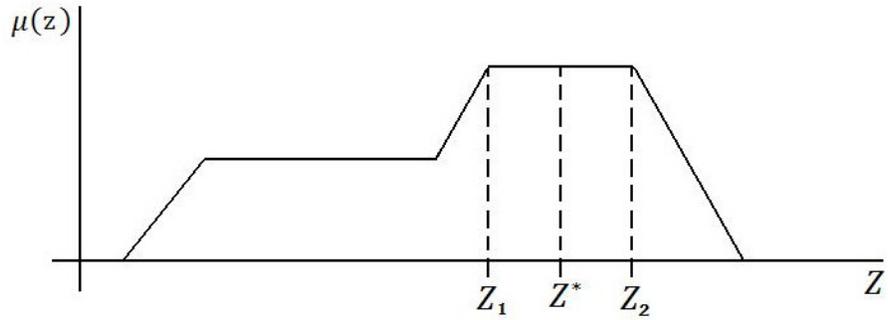


Figura 1.17. Desdifusión con el método de promedio de máximos.

- **Método de centro de área mayor.** Para aplicar este método se siguen los siguientes pasos:
 1. Se identifican los conjuntos convexos que forma la figura.
 2. Se calcula el área de cada conjunto convexo.
 3. Se comparan las áreas.
 4. Se obtiene el centroide del área mayor.

En la figura 1.18 se tienen los conjuntos convexos A y B , cuyas áreas son A_1 y A_2 respectivamente. Si al comparar las áreas se obtiene que $A_1 > A_2$, entonces el punto representativo de los conjuntos difusos se obtiene con el centroide del conjunto convexo de área mayor con la expresión:

$$z^* = \frac{\int z_{A1} \mu_{A1}(z) dz}{\int \mu(z)_{A1} dz}$$

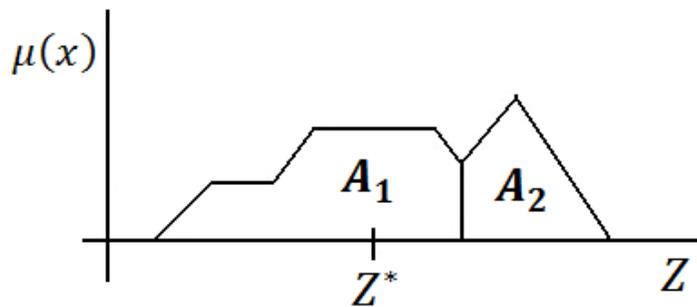


Figura 1.18. Desdifusión con el método de centro de área mayor. [4] [5] [6]

1.2. Ejemplo de Caso Resuelto con Lógica Difusa

La meta es la de ubicar el vehículo en un estacionamiento específico, en medio de otros vehículos y en forma paralela. El vehículo puede empezar de cualquier posición y orientación en el parque de estacionamiento, como puede apreciarse en la figura 1.19

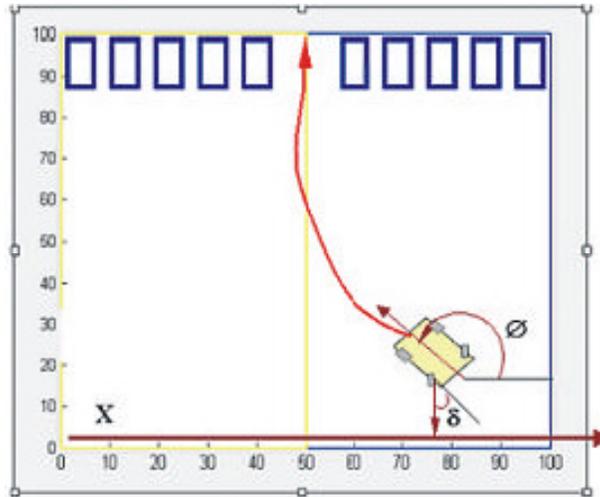


Figura 1.19. Posición Inicial del móvil.

Paso 1: Definición de las variables lingüísticas:

Según la figura 1.19, se consideran las siguientes variables:

X : Espacio horizontal donde el móvil podrá desplazarse.

Φ : Ángulo referencial del eje del vehículo, cuya dirección y sentido va de la parte delantera del vehículo hacia la parte posterior, con relación al eje horizontal; se asume que el vehículo sólo puede retroceder.

δ : Ángulo de giro de timón del vehículo, que guarda estrecha relación con el desplazamiento del vehículo, es decir, a mayor giro del timón, mayor será la curvatura en el desplazamiento del vehículo.

Del análisis de las variables se concluye que X y Φ son independientes, mientras δ , que es el ángulo de giro del timón dependerá de X y Φ . Ver figura 1.20.



Figura 1.20. Variables Independientes y Dependientes.

Paso 2: Definición de rangos y valores lingüísticos de las variables:

a) Para la variable X (desplazamiento Horizontal del móvil):

El espacio de desplazamiento horizontal varía entre 0 y 100. Este rango se divide en siete regiones simétricamente proporcionales. A cada uno de estos segmentos se les asigna valores Lingüísticos difusos, los mismos que son totalmente simétricos respecto al segmento medio o centro. Es decir, la simetría es tanto en tamaño del segmento como en los valores lingüísticos.

A continuación se describen en detalle los valores y rangos mencionados para la variable X. Ver figura 1.21.

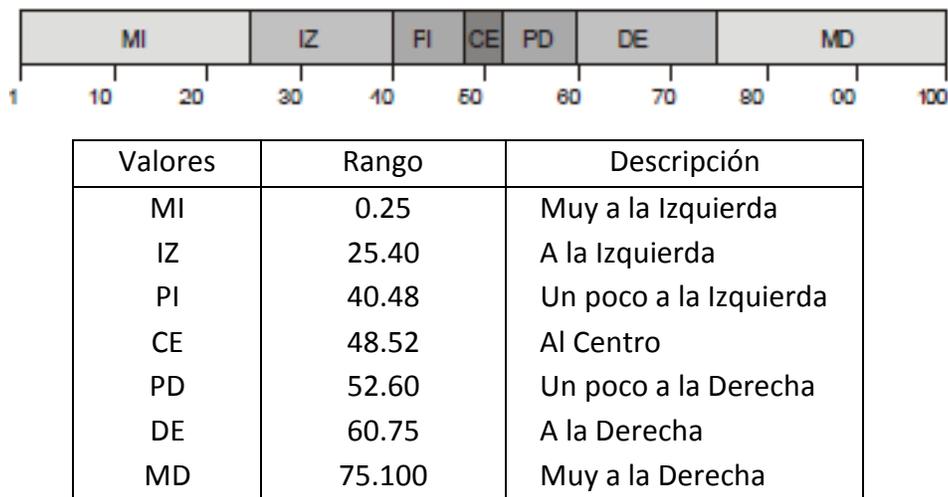
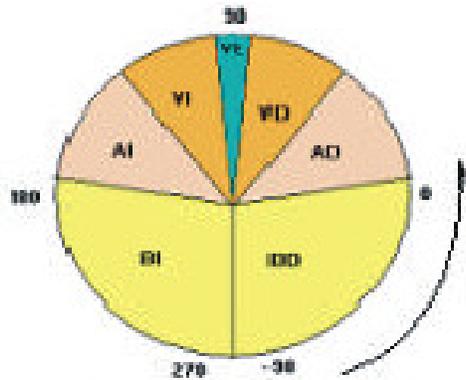


Figura 1.21. Valores y rangos para la Variable X.

b) Para la variable Φ (Angulo Referencial del Vehículo):

El móvil podrá tener una libertad de giro total es decir de 360 grados. Pero por consideraciones del problema debe existir una distribución simétrica respecto a la posición vertical del móvil, por lo tanto el rango de esta variable será desde 90 hasta los 270 grados. Este rango también es dividido en siete sectores simétricamente proporcionales, los mismos que se describen a continuación.

Para tener una mejor idea de los rangos mencionados, se pueden graficar de la siguiente manera. Ver figura 1.22.

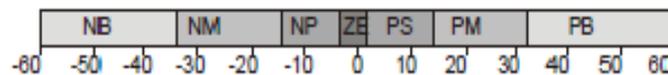


Valores	Rango	Descripción
BD	-90.5	Hacia Abajo a la Derecha
AD	5.45	Hacia Arriba a la Derecha
VD	45.81	Vertical Derecha
VE	81.99	Vertical
VI	99.135	Vertical Izquierda
AI	135.1775	Hacia Arriba a la Izquierda
BI	175.270	Hacia Abajo a la Izquierda

Figura 1.22. Valores y rangos para la Variable Φ .

c) Para la variable δ (Ángulo de giro del timón):

El timón tendrá una libertad de giro entre +60 y -60 grados. Este rango también ha sido dividido en siete sectores simétricamente proporcionales, los mismos que se describen a continuación. Ver figura 1.23.



Valores	Valores Numéricos	Rango	Descripción
NB	1	-60 -34	Hacia Abajo a la Derecha
NM	2	-34 -15	Hacia Arriba a la Derecha
NP	3	-15 1.5	Vertical Derecha
ZE	4	1.5 15	Vertical
PP	5	1.5 15	Vertical Izquierda
PM	6	15 34	Hacia Arriba a la Izquierda
PB	7	34 60	Hacia Abajo a la Izquierda

Figura 1.23. Valores y rangos para la Variable δ .

Paso 3: Asignar función de pertenencia a los rangos de las variables:

La función de pertenencia la definimos en forma detallada en la figura 1.24.

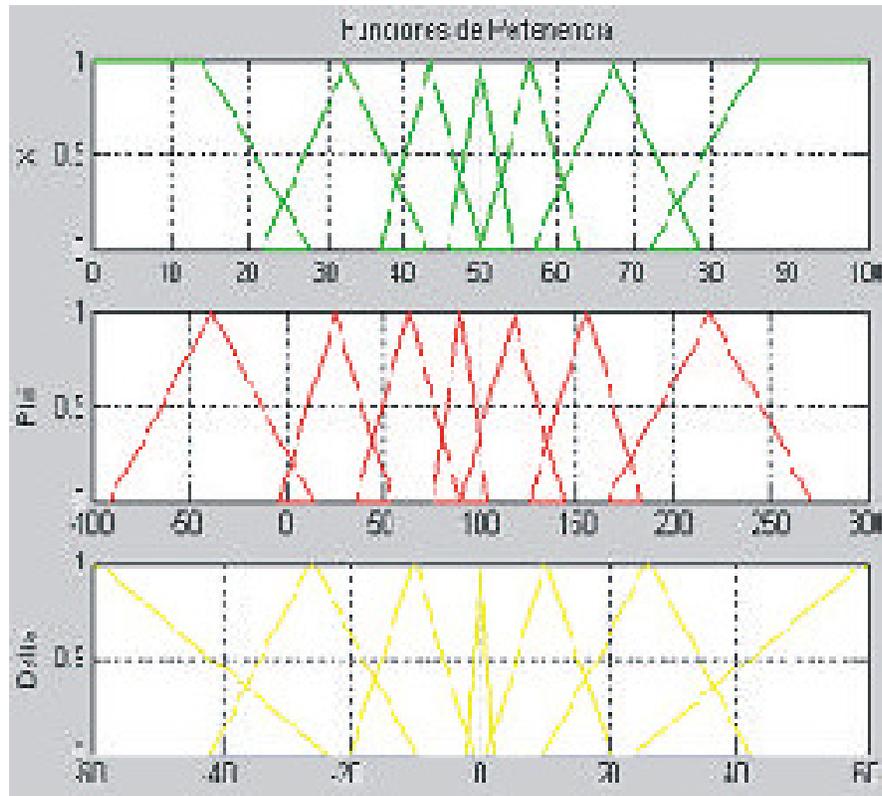


Figura 1.24. Funciones de Pertenencia para las variables X, Φ , δ .

a) Base de reglas con valores lingüísticos

La base de reglas son los comandos u órdenes de movimiento que se le asigna al móvil según la ubicación actual y el ángulo que forma con la base. Estos valores están especificados en la figura 1.25.

	MI	IZ	PI	CE	PD	DE	MD
BD	PM	PM	PM	PM	PB	PB	PB
AD	NS	PM	PB	PM	PB	PB	PB
VD	NB	NM	PB	PB	PM	PB	PB
VE	NB	NB	NM	ZE	PM	PB	PB
VI	NB	NB	NM	NB	NB	PM	PB
AI	NB	NB	NB	NM	NB	NM	NB
BI	NB	NB	NB	NM	NM	NM	NM

Figura 1.25. Matriz de Base de reglas con Valores Lingüísticos.

b) Base de reglas con valores numéricos

Los valores lingüísticos que se aprecian en esta matriz deben ser reasignados a valores numéricos para que pueda ser procesado por la computadora, esta equivalencia se aprecia en la figura 1.26.

	MI	IZ	P1	CE	PD	DE	MD
BD	6	6	6	6	7	7	7
AD	3	6	7	6	7	7	7
VD	1	2	7	7	6	7	7
VE	1	1	2	4	6	7	7
VI	1	1	2	1	1	6	7
AI	1	1	1	2	1	2	5
BI	1	1	1	2	2	2	2

Figura 1.26. Matriz de Base de reglas con Valores Numéricos.

IV. RESULTADOS

La simulación fue implementada en programa Matlab, se puede apreciar la precisión de como el móvil llega a su destino desde cualquier ubicación. Ver figura 1.27. [7]

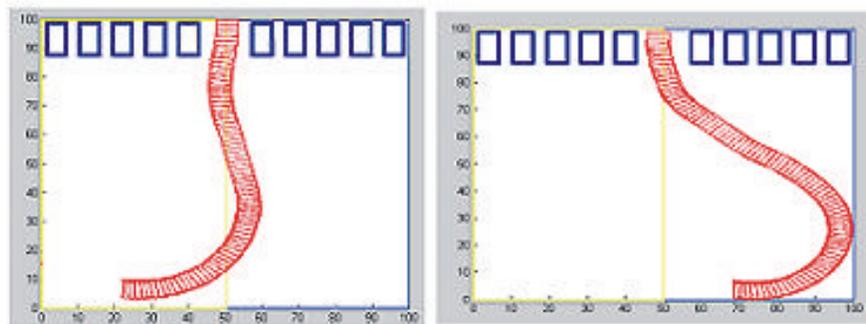


Figura 1.27. Resultado de la simulación en Matlab.

1.3. Software usado

1.3.1. Origen de Java

Sun Microsystems desarrolla el lenguaje Java en un intento de resolver simultáneamente una amplia variedad de problemas que se planteaban a los desarrolladores de software. Estos problemas eran debido a la proliferación de arquitecturas incompatibles, tanto entre las diferentes máquinas como entre los diversos sistemas operativos y sistemas de ventanas que funcionaban sobre una misma máquina; añadiendo la dificultad de crear aplicaciones distribuidas en una red como Internet.

Los lenguajes que se usaban, como C o C++, se compilaban para que los ejecutara un chip, y si se cambiaba el chip, todo el software debía compilarse de nuevo. Esta situación encarecía mucho los desarrollos y el problema era especialmente grave en el campo de la electrónica de consumo. La aparición de un chip más barato y, generalmente, más eficiente, conduce inmediatamente a los fabricantes a incluirlo en las nuevas series de sus cadenas de producción, porque por pequeña que sea la diferencia en precio, si se multiplica por la emisión masiva de los aparatos, supone un ahorro considerable. Por tanto, Gosling decidió mejorar las características de Oak y utilizarlo.

Este lenguaje se aplicó a dos proyectos relacionados con una interfaz de usuario bastante ambiciosa. Ninguno de estos proyectos se convirtió nunca en un sistema comercial, aunque fueron desarrollados enteramente en un Java primitivo y fueron como su bautismo de fuego. Pese a que finalmente FirstPerson cerró en la primavera de 1994, la historia del lenguaje no terminó.

Pese a lo que parecía ya un olvido definitivo, Bill Joy, cofundador de Sun y uno de los desarrolladores principales del Unix de Berkeley, juzgó que Internet podría llegar a ser el campo de juego adecuado para disputar a Microsoft su primacía casi absoluta en el terreno del software, y vio en Oak el instrumento idóneo para llevar a cabo estos planes. Tras un cambio de nombre y algunos cambios de diseño, el lenguaje Java fue presentado en sociedad en agosto de 1995.

1.3.2. Características de Java

El lenguaje Java cuenta con una serie de características que lo hacen interesante, las cuales se pueden resumir como sigue:

Simple

- Simple en su sintaxis, por lo que es más sencillo para programar.
- Tiene un recolector de basura que le permite al programador despreocuparse de liberar memoria.
- Elimina características que provocan errores en otros lenguajes como C y C++.

Orientado a Objetos.

- Soporta encapsulación, herencia y polimorfismo.
- Cuenta con resolución dinámica de métodos al modo de Objective-C.
- Proporciona soporte para identificar clases en tiempo de ejecución.

Características de interconexión.

- Cuenta con extensas capacidades de interconexión mediante TCP/IP.
- Existen librerías de rutinas para acceder e interactuar con protocolos como http y ftp.

Portable.

- Implementa otros estándares de portabilidad para facilitar el desarrollo. Los enteros se representan con 32 bits en complemento a 2.
- Construye sus interfaces de usuario a través de un sistema abstracto de ventanas de forma que las ventanas puedan ser implantadas en entornos Unix, Pc o Mac.

Seguro.

- Java elimina características como los punteros o el casting implícito, mecanismo que usa para asociar datos el compilador de C y C++, con el fin de prevenir el acceso ilegal a la memoria.
- Los ambientes de ejecución de Java aplican un probador de teoremas a los programas, para detectar fragmentos de código ilegal, como lo sería el tipo de ataque Caballo de Troya.
- Cuenta con firmas digitales, que se verifican antes de crear cualquier objeto.
- Imposibilita, también, abrir algún archivo de la máquina local. Siempre que se realizan operaciones con archivos, éstas trabajan sobre el disco duro de la máquina de donde partió el applet
- No permite ejecutar ninguna aplicación nativa de una plataforma e impide que se utilicen otros ordenadores como puente, es decir, nadie puede utilizar nuestra máquina para hacer peticiones o realizar operaciones con otra.
- Sin embargo, puede ser descompilado.

Neutral a la arquitectura.

- El compilador Java genera su código a un archivo objeto de formato independiente de la arquitectura de la máquina en que se ejecutará.
- Cualquier máquina que tenga el sistema de ejecución (run-time) puede ejecutar ese código objeto, sin importar en modo alguno la máquina en que ha sido generado.

Interpretado.

- El intérprete Java puede ejecutarse en diversas plataformas
- Java es más lento que C.

Multihilo.

- Al ser Multihilo, Java permite muchas actividades simultáneas en un programa. Los hilos, a veces llamados procesos ligeros o hilos de ejecución, son pequeños procesos o piezas independientes de un gran proceso.
- Al estar estos hilos contruidos en el mismo lenguaje, son más fáciles de usar y más robustos que sus homólogos en C o C++.
- El beneficio de ser multihilo consiste en un mejor rendimiento interactivo y mejor comportamiento en tiempo real. Aunque el comportamiento en tiempo real está limitado a las capacidades del sistema operativo subyacente (Unix, Windows, etc.) de la plataforma, aún supera a los entornos de flujo único de programa (single-threaded) tanto en facilidad de desarrollo como en rendimiento.

Dinámico.

- No intenta conectar todos los módulos que comprenden una aplicación hasta el mismo tiempo de ejecución. Las librerías nuevas o actualizadas no paralizarán la ejecución de las aplicaciones actuales -siempre que mantengan el API anterior.
- Simplifica el uso de protocolos nuevos o actualizados. Si su sistema ejecuta una aplicación Java sobre la red y encuentra una pieza de la aplicación que no sabe manejar, Java es capaz de traer automáticamente cualquier pieza que el sistema necesite para funcionar.
- Para evitar que los módulos de ByteCode o los objetos o nuevas clases, haya que estar trayéndolas de la red cada vez que se necesiten, Java implementa las opciones de persistencia, para que no se eliminen cuando se limpie la caché de la máquina.

1.3.3. Ventajas

Primero: No se debe volver a escribir el código si se quiere ejecutar el programa en otra máquina. Un solo código funciona para todos los browsers compatibles con Java o donde se tenga una Máquina Virtual de Java (Mac's, PC's, Sun's, etc).

Segundo: Java es un lenguaje de programación orientado a objetos, y tiene todos los beneficios que ofrece esta metodología de programación.

Tercero: Un browser compatible con Java deberá ejecutar cualquier programa hecho en Java, esto ahorra a los usuarios tener que estar insertando "plug-ins" y demás programas que a veces quitan tiempo y espacio en disco.

Cuarto: Java es un lenguaje y por lo tanto puede hacer todas las cosas que puede hacer un lenguaje de programación: Cálculos matemáticos, procesadores de palabras, bases de datos, aplicaciones gráficas, animaciones, sonido, hojas de cálculo, etc.

Quinto: Si lo que interesa son las páginas de Web, ya no tienen que ser estáticas, se le pueden poner toda clase de elementos multimedia y permiten un alto nivel de interactividad, sin tener que gastar en paquetes carísimos de multimedia. [8] [9]

2. ANÁLISIS DEL PROBLEMA

2.1. Descripción del problema de Nesting

2.1.1. Situación de la industria del calzado.

La industria del calzado en México es un sector importante en la economía por su participación en el PIB total y manufacturero, por su generación de divisas vía exportaciones y por el número de empleos que genera. Adicionalmente, la producción de calzado es importante porque es un artículo de primera necesidad, ubicado sólo después de la alimentación, vivienda y vestido. [10]

A pesar de su importancia, la participación de la industria del calzado en la economía se ha reducido de forma significativa debido al bajo crecimiento de su producción. Lo anterior se debe a que la industria del calzado es altamente globalizada y, por lo tanto, altamente sensible a los cambios en la competitividad internacional y a las estrategias de las principales compañías transnacionales. [10]

Ante este escenario, y considerando que este sector es de gran importancia en la producción, empleo y exportaciones a escala nacional y regional, la necesidad de una estrategia y de un programa para fortalecer y aprovechar las ventajas competitivas de las empresas de la cadena cuero-proveeduría-calzado tiene un carácter prioritario. [10]

La estrategia de competitividad internacional de México debe ser una estrategia basada en la calidad y servicio integral al cliente que permita un modelo de respuesta rápida cumplir con un sistema de producto correcto → cantidad correcta → tiempo correcto → lugar correcto → precio correcto, esto es, una estrategia de competitividad internacional que supere a la clásica ventaja comparativa basada en mano de obra barata. Pensando en ello la Secretaría de Economía, crea el “Programa para la Competitividad de la Industria del Cuero y Calzado”, cuya prioridad es diseñar estrategias capaces de fortalecer a la industria de calzado en México; estrategias que permitan aumentar el valor agregado de los productos, tiempos cortos de manufactura y entrega, manteniendo la calidad de la manufactura así como del producto final. [10]

Dentro del proceso de fabricación del calzado existe el procedimiento de corte de las diferentes piezas que lo conforma. Actualmente dicho proceso es realizado por obreros calificados que hacen manualmente el acomodo de las piezas que constituirán el calzado dentro de la piel, previo al corte. A este acomodo se le llama “Nesting”. [10]

Automatizar el proceso de acomodo en la piel de las piezas que conforman el calzado representa una solución para reducir los tiempos de manufactura y costos. [10]

2.1.2. Definición de Nesting.

El problema de Nesting no es exclusivo de la industria del calzado, es importante también para varias industrias en donde se involucra la optimización de materia prima del producto. Industrias como la textil, para diseñar el acomodo de las piezas que constituirán una prenda, en el diseño de circuitos electrónicos, productos laminados, en la industria de papel, etc. El acomodo de las piezas del producto difiere de industria a industria, así como las restricciones de acomodo. [11]

En general el problema del Nesting puede definirse como sigue. Dado un conjunto de N modelos (piezas, partes), debe encontrarse el acomodo de tal forma que no se sobrepongan las piezas a lo largo de un contenedor (superficie, placa). El acomodo óptimo es aquel en el que todas las piezas se tocan lo más ajustadamente posible. El hueco resultante del espacio entre las piezas y alrededor del acomodo de la pieza es un desperdicio del material y se traduce en pérdidas al realizarse el corte. En la industria del calzado la geometría de las piezas es irregular en la mayoría de los casos. El problema de acomodar piezas irregulares es conocido como Nesting. [12]

Para hacer un par de zapatos el costo de la materia prima es aproximadamente 70% del costo total del proceso de manufactura. [12] De aquí se destaca que lo primordial es obtener una reducción de las pérdidas del material puesto que se traduce en reducción de costos.

La geometría de las piezas que serán cortadas puede variar desde un simple rectángulo hasta una forma irregular. En el caso de piezas irregulares, su geometría puede contener líneas rectas y curvas. Además las piezas de dos dimensiones pueden tener características internas tales como hoyos, también de geometría regular e irregular. De manera similar el contenedor puede ser de geometría regular o irregular y con o sin defectos. [13]

Debido a que el proceso de Nesting incluye muchos tipos de combinaciones es difícil y computacionalmente se consume mucho tiempo para encontrar la solución óptima mediante el uso de métodos de programación que utilizan matemáticas tradicionales. Así las técnicas heurísticas se aplican para resolver el problema, sin embargo, pueden ser lentos y poco aplicables a problemas reales. Existen otras propuestas basadas en algoritmos genéticos, sin embargo, aún su velocidad no se ha mejorado como para aplicaciones prácticas. [13]

El presente trabajo no resuelve el Nesting completo, sino que se enfoca en el acomodo de una sola pieza en un área específica. Es decir, se considera que el Nesting se resuelve acomodando pieza por pieza. Aquí se plantea una solución para acomodar una sola pieza con el auxilio de un perfil que se forma no sólo con el contenedor, sino con las piezas ya acomodadas, sin considerar como éstas fueron acomodadas. Se plantea un método, que se detallará posteriormente, para seleccionar un acomodo óptimo dentro de un conjunto de posibilidades de acomodar una sola pieza dentro de un contorno determinado.

2.2. Solución propuesta.

Una vez que se determinó el seguimiento para el acomodo entre el contenedor y la pieza a ser acomodada, el problema a resolver consiste en saber cuál será la siguiente pieza a acomodar y la posición óptima, de tal forma que el área ocupada por la pieza y área de todos los huecos que queden entre la pieza y el contenedor sean mínima.

El problema se reduce, ya que no se toman en cuenta las piezas que han sido acomodadas previamente; únicamente se involucra la pieza que se quiere acomodar y el espacio disponible donde será colocada. El espacio en que la pieza puede acomodarse puede estar restringido únicamente por el contorno de la piel, sin embargo; si ya se han acomodado piezas, el espacio disponible de acomodo queda restringido por las piezas que ya han sido acomodadas, o bien por piel y piezas.

Debido a que los resultados obtenidos sólo son evidentes al ojo humano se propone manejar lógica difusa, ya que nos permite llegar rápidamente a una solución de una manera eficiente y sin tener grandes complicaciones en el algoritmo. Así por ejemplo, se forman conjuntos difusos con el área ocupada de la pieza que resuelve lo siguiente: ¿cómo saber si el área que ocupa una pieza es chica o grande? Ahí es donde la lógica difusa entra en acción y para un valor específico del conjunto *área ocupada* le asigna un valor para cada una de las funciones de membresía, si consideramos que las funciones de membresía son: área chica y área grande, la lógica difusa permite que un valor este en un porcentaje dentro del área chica y en una mayor o menor en el área grande, hecho que no se tiene en la lógica convencional en la cual tendríamos que elegir entre una u otra al 100%.

Clasificar el valor del área que una pieza ocupa y además el área de los huecos que va dejando al ser acomodada en una cierta posición nos permite crear una serie de reglas para determinar una solución óptima.

2.3. Cómo aplicar Lógica Difusa.

2.3.1. Requerimientos para el sistema fuzzy: generación del perfil y envolvente convexa.

Como se mencionó anteriormente, y haciendo énfasis en que no se resuelve el Nesting completo, se tiene que el problema se reduce a un acomodo de una única pieza dentro de un contenedor y encontrar la posición óptima de la pieza. Por la definición del Nesting sabemos que el objetivo es acomodar la pieza lo más pegada al contenedor y a las piezas adjuntas, en este caso como el contorno de las piezas adjuntas y el contenedor ya forman un perfil, y al acomodar una pieza irregular es posible que existan varios huecos, lo que se busca para llegar a un acomodo óptimo es reducir el área que conforman todos los huecos. Puesto que esos huecos se traducen en desperdicio del material.

A continuación se explica de manera breve y general el procedimiento antes de aplicar lógica difusa; a su vez se listan los requerimientos para que funcione el sistema difuso: el perfil y la envolvente convexa.

Para definir el perfil es necesario determinar el espacio disponible de acomodo que estará delimitado por un contorno o perímetro. Para construirlo se coloca la pieza lo más cercana a la piel o piezas contiguas, sin que ésta se encime o traslape, como se observa en la figura 2.1

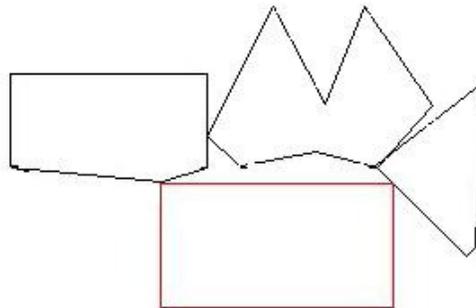


Figura 2.1. Colocando la pieza para generar perfil

Una vez que se colocó la pieza de manera temporal, se procede a definir el perfil que será usado para esa pieza en específico; el perfil obtenido para este caso es el que se muestra en la figura 2.2

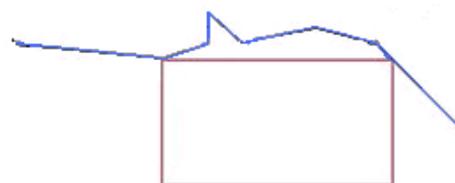


Figura 2.2. Perfil generado

La finalidad del perfil es tener un contorno cerrado que sea independiente de los pedazos de piel o piezas que lo conforman, de tal manera que teniendo el contorno el problema se reduzca a acomodar una pieza dentro del mismo, dejando de lado por un momento las piezas acomodadas previamente.

Siguiendo con el procedimiento, cada vez que quiera acomodar una nueva pieza es necesario construir su correspondiente perfil. La posición de la pieza es temporal pues sólo funciona como auxiliar en la construcción del perfil. Dentro del perfil generado la pieza tiene “n” posibles posiciones en ese perfil.

De las “n” posiciones generadas, es necesario determinar cuál será la posición óptima al acomodarla de acuerdo al área que ocupe y los huecos que forme ésta con su respectivo perfil.

Un acomodo óptimo será aquel que tenga una mayor área ocupada y una menor área de huecos. Nótese que los términos *mayor* y *menor* están definiendo los conjuntos difusos que ayudarán a seleccionar posteriormente la pieza así como la condición que ayudará a crear una de las reglas empleadas.

El área ocupada de una pieza es definida por su propia área. El área de los huecos se determinan a partir del perfil, el área de la pieza y la envolvente convexa.

La envolvente convexa de un conjunto de puntos S es el polígono convexo P que contiene a todos los elementos S con menor área (o perímetro) posible. La envolvente convexa se aplica al conjunto de puntos que conforman la pieza y al conjunto de puntos que conforman el perfil, de tal manera que se pueda obtener el área estimada de los huecos que deja el acomodar una pieza de cierta manera.

Para saber si una pieza cumple con los requisitos de área mayor y menor área de huecos es preciso acomodarla y calcular su área de huecos, para posteriormente seleccionar la más adecuada.

Para tener todas las posibilidades de acomodo de una pieza, se coloca la pieza de tal manera que pueda ir recorriendo el perfil poco a poco y barra todas las posibles posiciones que sean válidas de esa pieza. Una posición es válida siempre y cuando no se traslape con otra pieza o se salga de la piel, es decir, no se salga del perfil. Cada vez que se tiene un nuevo acomodo o posición *i* de la pieza se evalúa área y huecos de tal forma que al final se tenga el área ocupada relacionada a la posición *i* y el área de huecos *i* para la posición *i*. Y al final una lista de todas las posibles posiciones así como cada una de las áreas ocupada y áreas de huecos para cada posición en específico, listos para entrar al sistema difuso que será el que elija la pieza cuyo acomodo sea el óptimo.

2.3.2. Entradas del sistema difuso: eficiencia de área ocupada, tasa de huecos.

Las variables de entrada para el sistema difuso propuesto son: *la eficiencia de área ocupada* η_A y *la tasa de huecos* T_H , para cada una de ellas existen conjuntos difusos que le otorgan un nivel de pertenencia a una entrada numérica específica y así por medio ciertas reglas se obtenga una salida.

La η_A es la propia área de la pieza y representa el porcentaje de área que ocupa la pieza o geometría con respecto al perfil, entre mayor sea la η_A se aprovecha más el espacio. Sin embargo, no es suficiente con que se ocupe una mayor cantidad de área, también es necesario verificar si tal área es, en efecto aprovechada, es decir, si el área no es demasiado grande el área de todos los huecos que quedan cuando es “acomodada” la pieza respecto al perfil. La forma de calcular la eficiencia de área ocupada es:

$$\eta_A = \frac{A_P}{A_E} \times 100$$

donde,

- η_A Eficiencia de área ocupada
- A_E Área de la envolvente
- A_P Área de la pieza

A continuación se muestran, en la figura 2.3, imágenes que representando algunos de los conjuntos para el Área Ocupada.

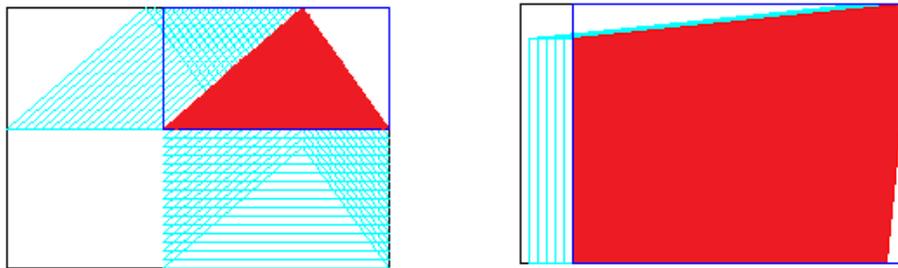


Figura 2.3 ejemplo de los conjuntos Área Ocupada Chica y Área Ocupada Muy Grande

La T_H representa el área de todos los huecos que deja la pieza al ser “acomodada” con respecto al perfil. Si una pieza tiene una mayor tasa de huecos implica que la suma total

de las áreas de los huecos que se tienen al hacer el “acomodo” es muy grande. La tasa de huecos se calcula como sigue:

$$T_H = \frac{A_E - A_P}{A_E} \times 100$$

donde,

T_H Tasa de huecos

A_E Área de la envolvente

A_P Área de la pieza

Así un acomodo óptimo será el que tenga una alta eficiencia de área ocupada y una baja tasa de huecos.

A continuación se muestran en la figura 2.4, imágenes que representando algunos de los conjuntos para la Tasa de Huecos.

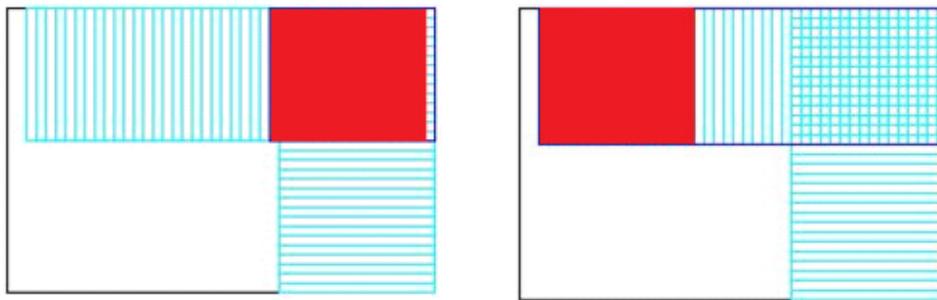


Figura 2.4. Ejemplo de los conjuntos Tasa de Huecos Muy Chica y Tasa de Huecos Grande

En la figura 2.5 se muestra una parte del sistema difuso propuesto.

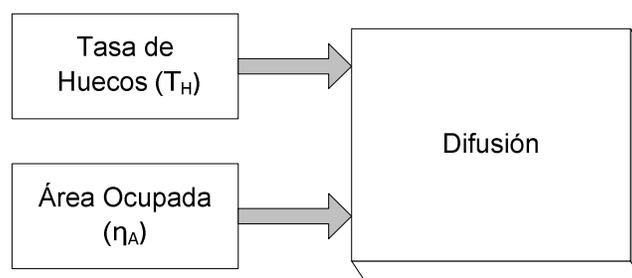


Figura 2.5. Entradas al Sistema Difuso

2.3.3. Definición de los conjuntos de entrada.

Una de las características de un conjunto difuso es que permite trabajar con datos numéricos y términos lingüísticos, así para una entrada determinada que es un valor numérico se le asigna un valor de pertenencia para uno o varios conjuntos difusos (que son lingüísticos).

Los conjuntos que conforman la Tasa de Huecos son: *Muy chica*, *Chica*, *Media*, *Grande* y *Muy grande*. La figura 2.6 muestra los conjuntos definidos para la Tasa de Huecos y los rangos que los definen.

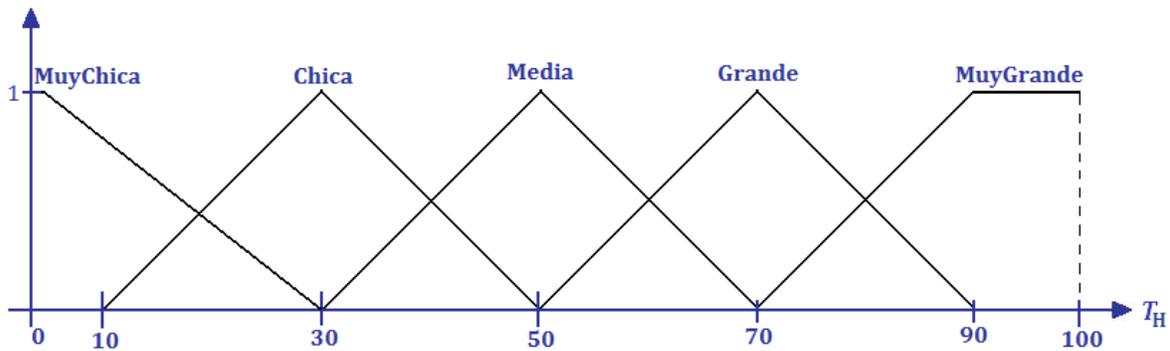


Figura 2.6. Conjunto de entrada Tasa de Huecos

Los conjuntos para la eficiencia de Área Ocupada son cinco: *Muy chica*, *Chica*, *Media*, *Grande* y *Muy grande*. La figura 2.7 muestra los conjuntos difusos y los rangos que los definen.

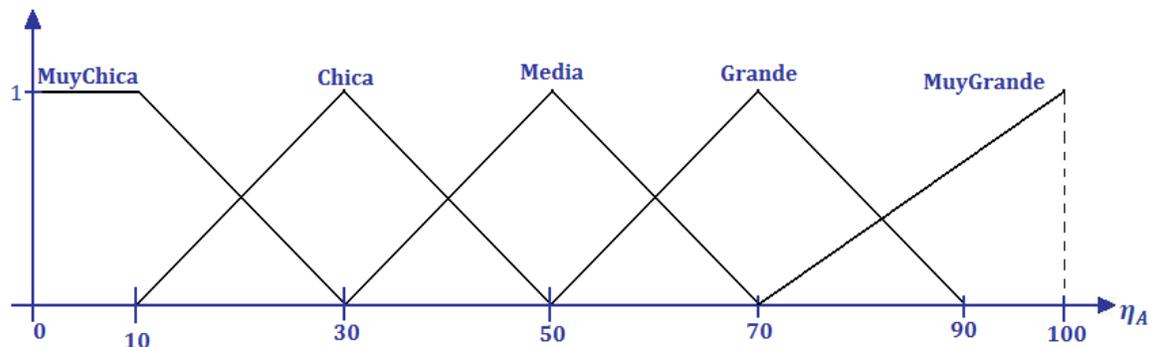


Figura 2.7. Conjunto de entrada eficiencia de Área Ocupada

Cuando el área pertenece en mayor medida al conjunto *Muy chica* implica que el área de la pieza abarca poco espacio del área del perfil. Así un área *Muy grande* implica que la pieza abarca casi la totalidad del área del perfil.

2.3.4. Definición de los conjuntos de salida.

En este apartado se define la salida del sistema difuso que es el resultado de las entradas una vez que han pasado por la difusión.

Se define como *Bondad* a la variable de salida, que sirve para determinar que tan eficiente es un acomodo. La bondad está definida en porcentaje, así entre más se acerque al 100% el acomodo se acerca al óptimo.

La figura 2.8 muestra la totalidad del sistema, conjuntos de entrada y salida.

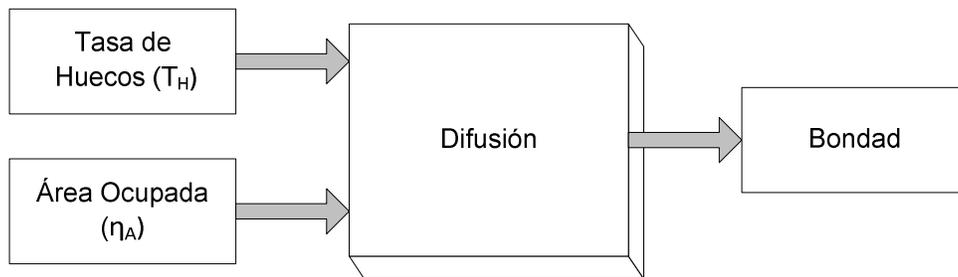


Figura 2.8. Sistema Difuso con entradas y salidas

Los conjuntos difusos para la salida se muestran en la figura 2.9 junto con los rangos que los definen. Los conjuntos de salida son: Muy Mala, Mala, Media, Buena y Muy Buena.

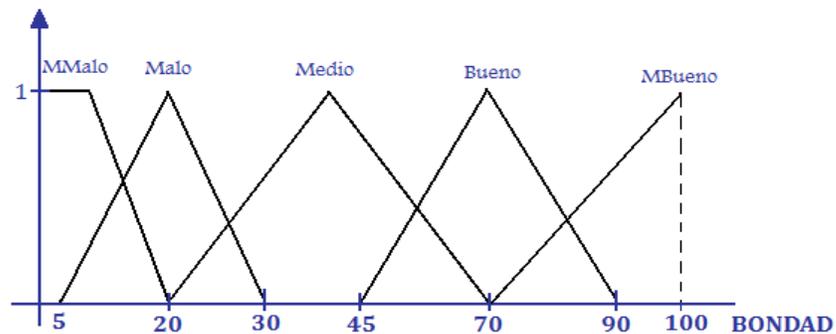


Figura 2.9. Conjunto de Salida

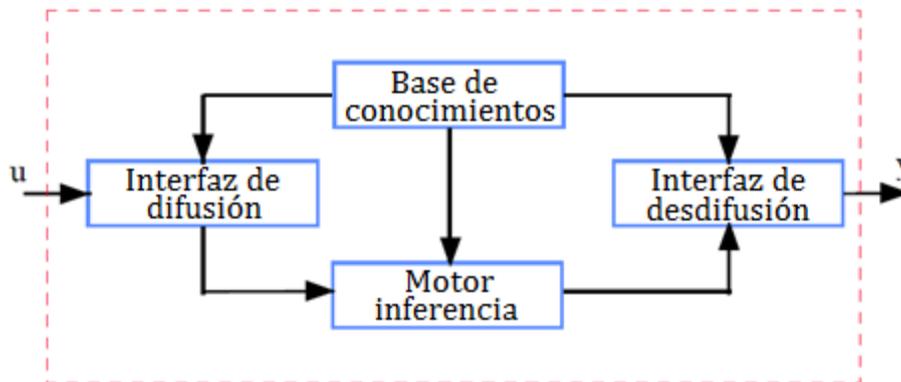
Los conjuntos de la Bondad fueron modificados a lo largo de las pruebas a fin de calibrar el sistema difuso. Es importante aclarar que al plantear los conjuntos difusos de entrada se deben conocer los valores que pueden tomar con piezas reales, lo que puede obtenerse de un estudio estadístico de la producción de la empresa que lo requiera, lo cual sale del alcance de esta tesis.

3. Diseño de la solución

3.1. Diseño del Algoritmo

En el siguiente capítulo se desarrollará cada de las variables y requerimientos en el sistema de lógica difusa desarrollado.

3.2. Diagrama de bloques



Interfaz de difusión. El objetivo es convertir los valores de las variables en valores difusos. Esto se realiza traduciendo los valores de entrada, en un grado de pertenencia a uno o más conjuntos difusos diseñados para estas variables. Es, por lo tanto, un mapeo de los valores de una variable en valores difusos asociados a los grados de pertenencia de los diferentes conjuntos difusos de la variable.

Base de conocimientos. En ella están contenidas las reglas lingüísticas del control y la información referente a las funciones de pertenencia de los conjuntos difusos.

Motor de inferencia. Una vez obtenidos los valores difusos, el objetivo del motor de inferencia es transportarlos de la premisa a la conclusión de cada regla. Esto resulta en un conjunto difuso para cada variable de salida de cada regla.

Interfaz de desdifusión. La desdifusión reduce el conjunto de salidas difusas producido en el paso de Combinación de Reglas y lo convierte de un valor difuso en un valor específico e interpretable.

3.2.1. Interfaz de difusión

Se le llama difusión a la acción de transformar una señal de entrada crisp a una forma lingüística, de esta manera, se le asigna un grado de pertenencia dentro de algún conjunto difuso definido.

En el proceso de difusión, las entradas siempre serán valores numéricos crisp contenidos en el universo del discurso y la salida serán los grados de membresía para los diferentes valores lingüísticos.

A continuación se muestra la representación gráfica de los valores de las funciones de membresía de los conjuntos difusos utilizados, y la ecuación que dará su correspondencia con sus valores difusos.

Las siguientes son los gráficos que representan cada una de las funciones de membresía, cuyos valores determinaran los intervalos de los valores difusos de las variables de entrada: *Tasa de Huecos* (η_H) y *Eficiencia de Área Ocupada* (η_A).

Tasa de Huecos.

La figura 3.1 (a) muestra el intervalo de valores para la función de membresía denominada Muy Chica, definida por la siguiente función:

$$Muy\ Chica = \begin{cases} 1 & T_H \leq 1 \\ \frac{T_H - 30}{1 - 30} & 1 < T_H \leq 30 \end{cases}$$

La figura 3.1.(b) muestra un ejemplo de acomodo que pertenece al conjunto Tasa de Huecos Muy Chica

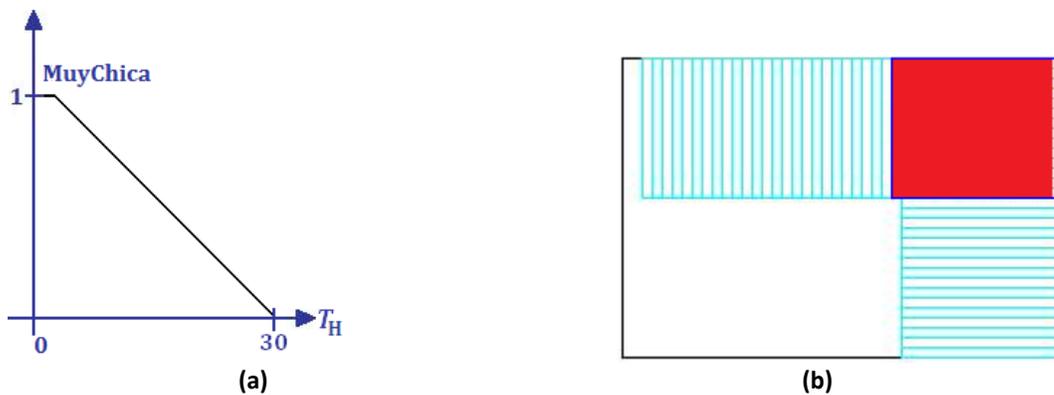


Figura 3.1. (a) Función de Membresía “Muy Chico”. (b) Acomodo Tasa de Huecos Muy chica

La figura 3.2 (a) muestra el intervalo de valores para la función de membresía denominada Chica, definida por la siguiente función:

$$Chica = \begin{cases} \frac{T_H - 10}{30 - 10} & 10 < T_H \leq 30 \\ \frac{T_H - 50}{30 - 50} & 30 < T_H \leq 50 \end{cases}$$

La figura 3.2.(b) muestra un ejemplo de un acomodo que pertenece al conjunto eficiencia a huecos Chica

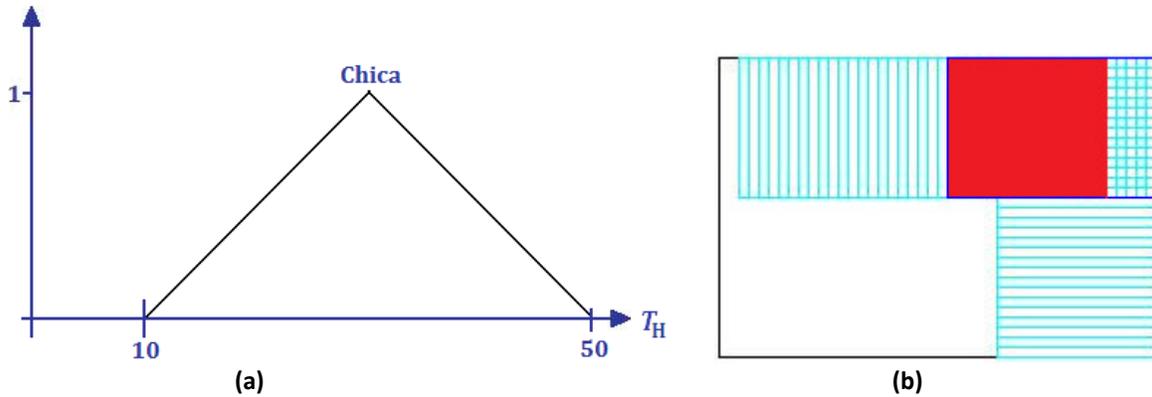


Figura 3.2. (a) Función de Membresía “Chica”. b) Acomodo Tasa de Huecos Chica

La figura 3.3 (a) muestra el intervalo de valores para la función de membresía denominada Media, definida por la siguiente función:

$$Media = \begin{cases} \frac{T_H - 30}{50 - 30} & 30 < T_H \leq 50 \\ \frac{T_H - 70}{50 - 70} & 50 < T_H \leq 70 \end{cases}$$

La figura 3.3 (b) muestra un ejemplo de un acomodo que pertenece al conjunto eficiencia a huecos Media

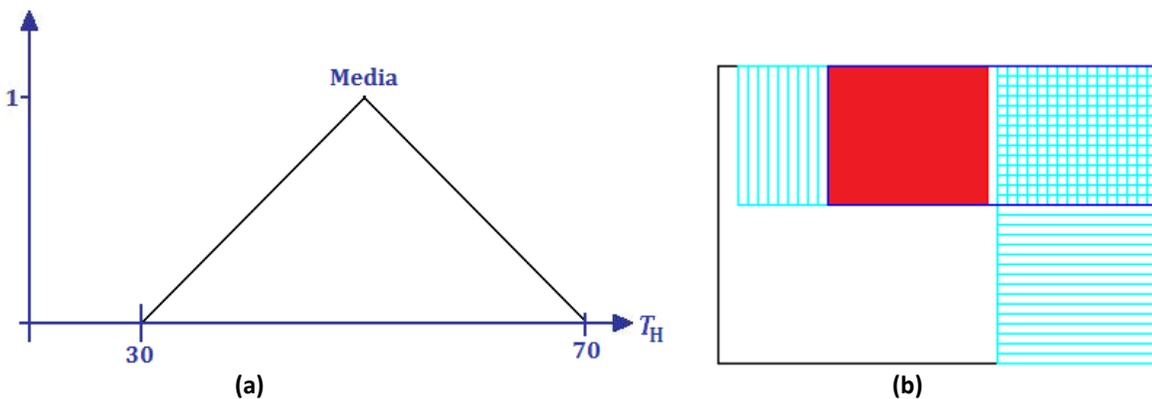


Figura 3.3. a) Función de Membresía “Media”. b) Acomodo Tasa de Huecos Media

La figura 3.4 (a) muestra el intervalo de valores para la función de membresía denominada Grande, definida por la siguiente función:

$$Grande = \begin{cases} \frac{T_H - 50}{70 - 50} & 50 < T_H \leq 70 \\ \frac{T_H - 90}{70 - 90} & 70 < T_H \leq 90 \end{cases}$$

La figura 3.4 (b) muestra un ejemplo de un acomodo que pertenece al conjunto eficiencia a huecos Grande

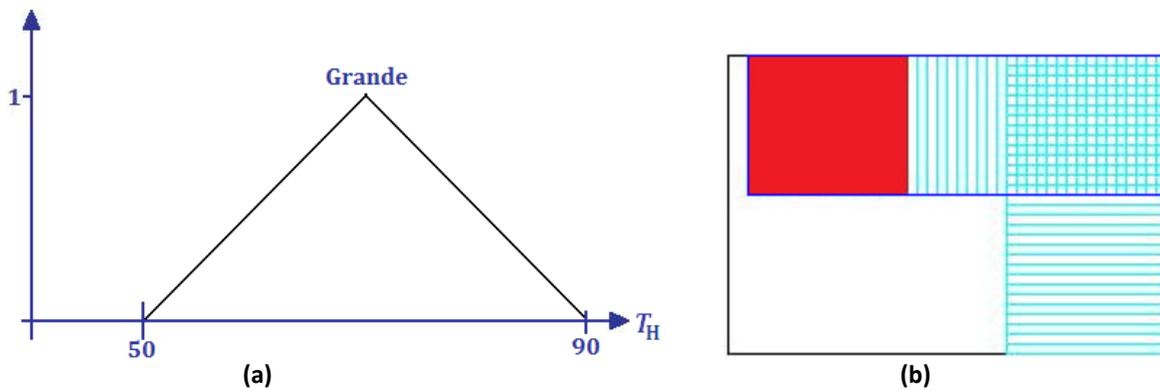


Figura 3.4. a) Función de Membresía "Grande". b) Acomodo Tasa de Huecos Grande

La figura 3.5 (a) muestra el intervalo de valores para la función de membresía denominada Muy Grande, definida por la siguiente función:

$$Muy Grande = \begin{cases} \frac{\eta_H - 70}{90 - 70} & 70 < T_H \leq 90 \\ 1 & T_H > 90 \end{cases}$$

La figura 3.5 (b) muestra un ejemplo de un acomodo que pertenece al conjunto eficiencia a huecos Muy Grande

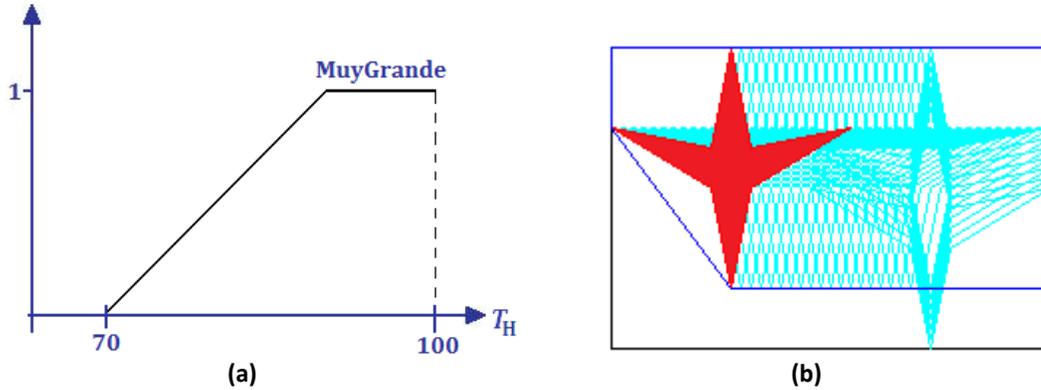


Figura 3.5. a) Función de Membresía "Muy Grande". b) Acomodo Tasa de Huecos Muy Grande

Eficiencia de Área Ocupada.

La figura 3.6 (a) muestra el intervalo de valores para la función de membresía denominada Muy Chica, definida por la siguiente función:

$$Muy\ Chica = \begin{cases} 1 & \eta_A \leq 10 \\ \frac{\eta_A - 30}{10 - 30} & 10 < \eta_A \leq 30 \end{cases}$$

La figura 3.6 (b) muestra un ejemplo de un acomodo que pertenece al conjunto eficiencia de área ocupada Muy Chica

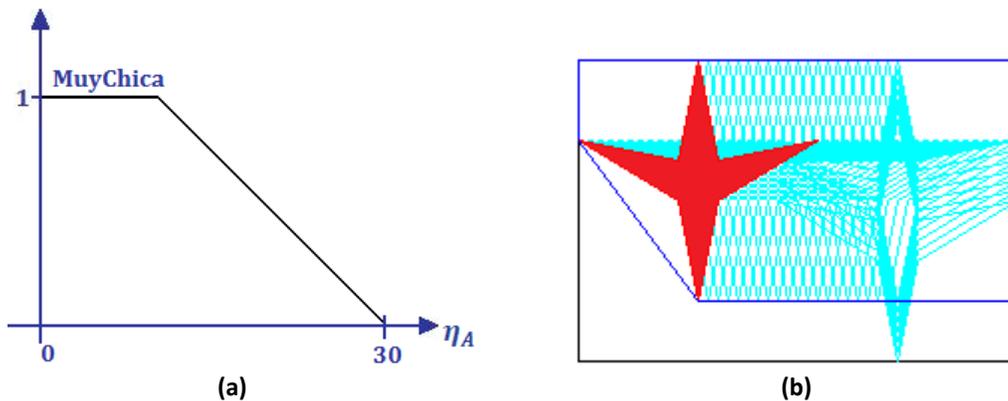


Figura 3.6. a) Función de Membresía "Muy Chica". b) Acomodo Área Ocupada Muy Chica

La figura 3.7 (a) muestra el intervalo de valores para la función de membresía denominada Chica, definida por la siguiente función:

$$Chica = \begin{cases} \frac{\eta_A - 10}{30 - 10} & 10 < \eta_A \leq 30 \\ \frac{\eta_A - 50}{30 - 50} & 30 < \eta_A \leq 50 \end{cases}$$

La figura 3.7 (b) muestra un ejemplo de un acomodo que pertenece al conjunto eficiencia de área ocupada Chica

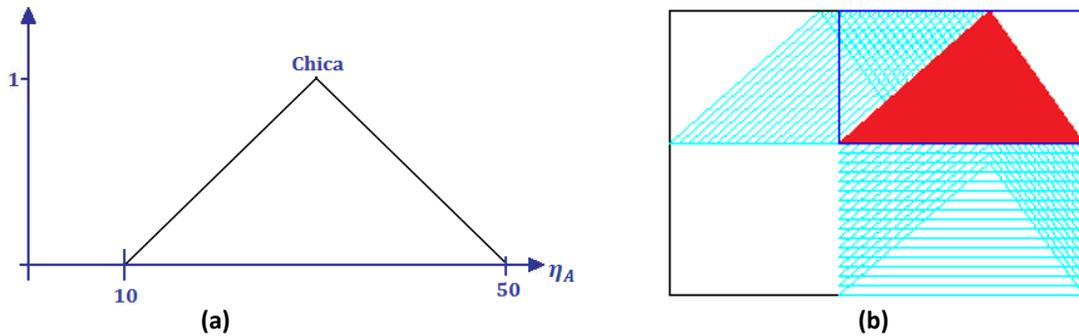


Figura 3.7. a) Función de Membresía “Chica” . b) Acomodo Área Ocupada Chica

La figura 3.8 (a) muestra el intervalo de valores para la función de membresía denominada Media, definida por la siguiente función:

$$Media = \begin{cases} \frac{\eta_A - 30}{50 - 30} & 30 < \eta_A \leq 50 \\ \frac{\eta_A - 70}{50 - 70} & 50 < \eta_A \leq 70 \end{cases}$$

La figura 3.8 (b) muestra un ejemplo de un acomodo que pertenece al conjunto eficiencia de área ocupada Media

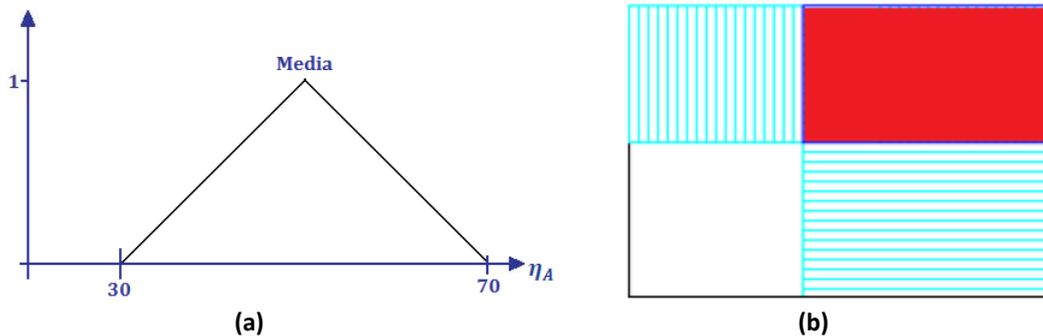


Figura 3.8. a) Función de Membresía “Media” . b) Acomodo Área Ocupada Media

La figura 3.9 (a) muestra el intervalo de valores para la función de membresía denominada Grande, definida por la siguiente función:

$$Grande = \begin{cases} \frac{\eta_A - 50}{70 - 50} & 50 < \eta_A \leq 70 \\ \frac{\eta_A - 90}{70 - 90} & 70 < \eta_A \leq 90 \end{cases}$$

La figura 3.9 (b) muestra un ejemplo de un acomodo que pertenece al conjunto eficiencia de área ocupada Grande

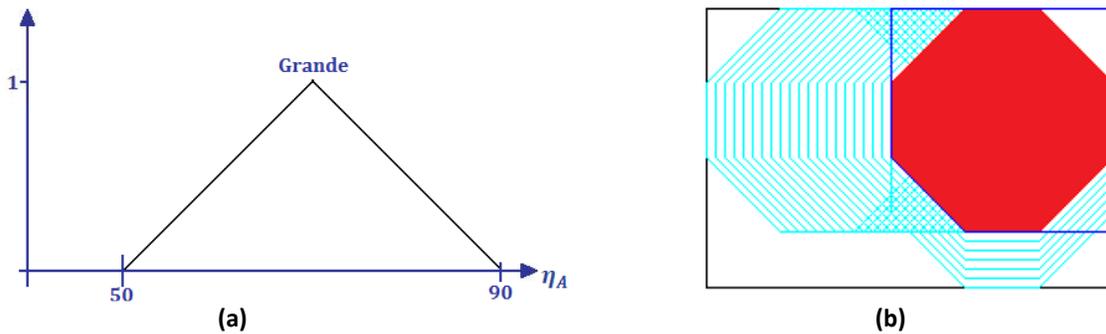


Figura 3.9. a) Función de Membresía "Grande" . b) Acomodo Área Ocupada Grande

La figura 3.10 (a) muestra el intervalo de valores para la función de membresía denominada Muy Grande, definida por la siguiente función:

$$Muy Grande = \begin{cases} \frac{\eta_A - 70}{100 - 70} & 70 < \eta_A \leq 100 \end{cases}$$

La figura 3.10 (b) muestra un ejemplo de un acomodo que pertenece al conjunto eficiencia de área ocupada Muy Grande

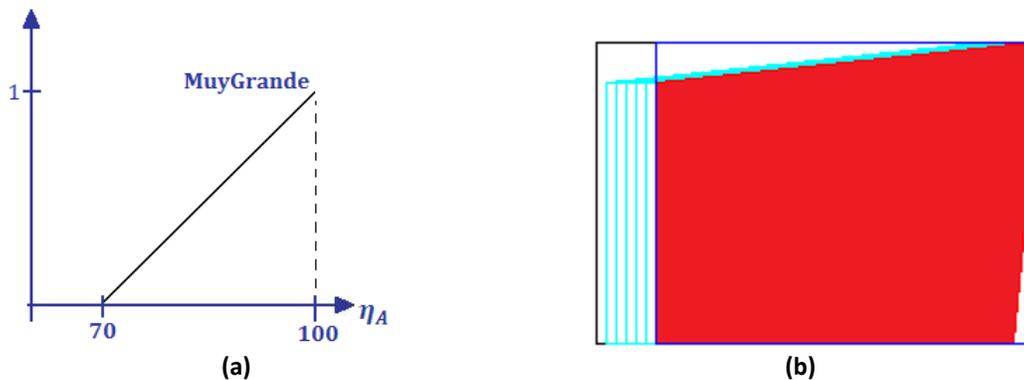


Figura 3.10. a) Función de Membresía "Muy Grande" . b) Acomodo Área Ocupada Muy Grande

Finalmente se presenta el conjunto de salida denominado “Bondad”, que se obtiene al evaluar los conjuntos de entrada.

Bondad

La figura 3.11 (a) muestra el intervalo de valores para la función de membresía denominada Muy Mala, definida por la siguiente función:

$$Muy\ Mala = \begin{cases} 1 & Bondad \leq 2 \\ \frac{Bondad - 20}{2 - 20} & 2 \leq Bondad \leq 20 \end{cases}$$

La figura 3.11 (b) muestra un ejemplo de un acomodo que pertenece al conjunto bondad Muy Mala

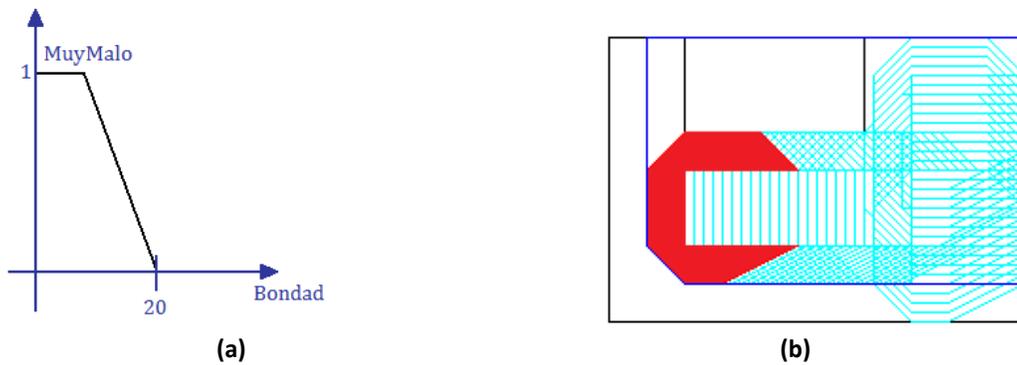


Figura 3.11. a) Función de Membresía “Muy Mala”. b) Acomodo con Bondad Muy Mala

La figura 3.12 (a) muestra el intervalo de valores para la función de membresía denominada Mala, definida por la siguiente función:

$$Mala = \begin{cases} \frac{Bondad - 20}{5 - 20} & 5 < Bondad \leq 20 \\ \frac{Bondad - 38}{20 - 38} & 20 < Bondad \leq 38 \end{cases}$$

La figura 3.12 (b) muestra un ejemplo de un acomodo que pertenece al conjunto bondad Mala

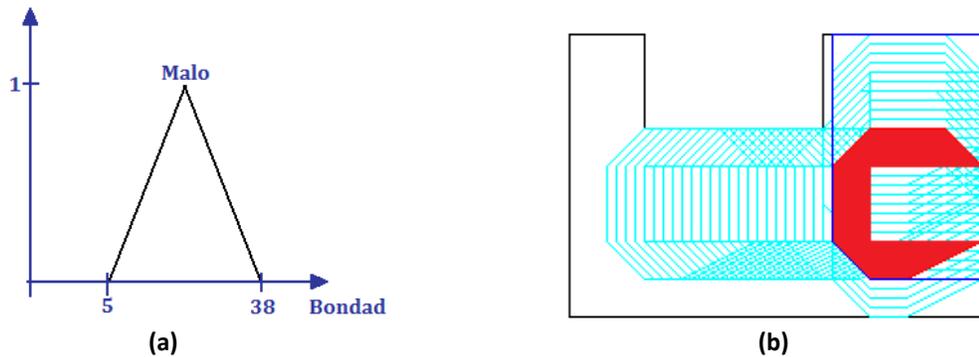


Figura 3.12. a) Función de Membresía "Malo" . b) Acomodo con Bondad Mala

La figura 3.13 (a) muestra el intervalo de valores para la función de membresía denominada Media, definida por la siguiente función:

$$Media = \begin{cases} \frac{Bondad - 10}{30 - 10} & 10 < Bondad \leq 30 \\ \frac{Bondad - 50}{30 - 50} & 30 < Bondad \leq 50 \end{cases}$$

La figura 3.13 (b) muestra un ejemplo de un acomodo que pertenece al conjunto bondad Media

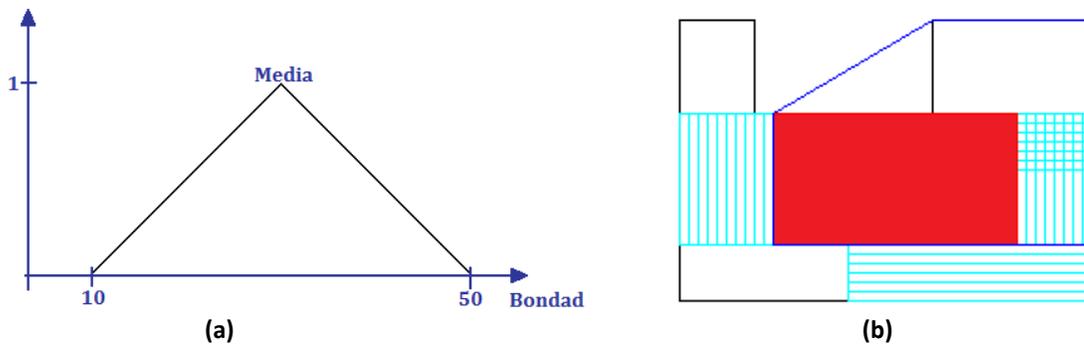


Figura 3.13. a) Función de Membresía "Media" . b) Acomodo con Bondad Media

La figura 3.14 (a) muestra el intervalo de valores para la función de membresía denominada Buena, definida por la siguiente función:

$$Buena = \begin{cases} \frac{Bondad - 30}{60 - 30} & 30 < Bondad \leq 60 \\ \frac{Bondad - 90}{60 - 90} & 60 < Bondad \leq 90 \end{cases}$$

La figura 3.14 (b) muestra un ejemplo de un acomodo que pertenece al conjunto bondad Media

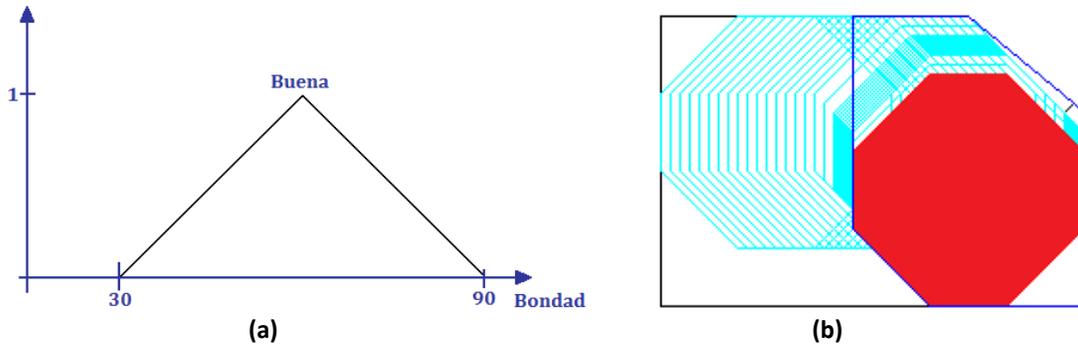


Figura 3.14. a) Función de Membresía “Buena” . b) Acomodo con Bondad Buena

La figura 3.15 (a) muestra el intervalo de valores para la función de membresía denominada Muy Buena, definida por la siguiente función:

$$Muy Buena = \begin{cases} \frac{Bondad - 70}{100 - 70} & 70 < Bondad \leq 100 \end{cases}$$

La figura 3.15 (b) muestra un ejemplo de un acomodo que pertenece al conjunto bondad Muy Buena

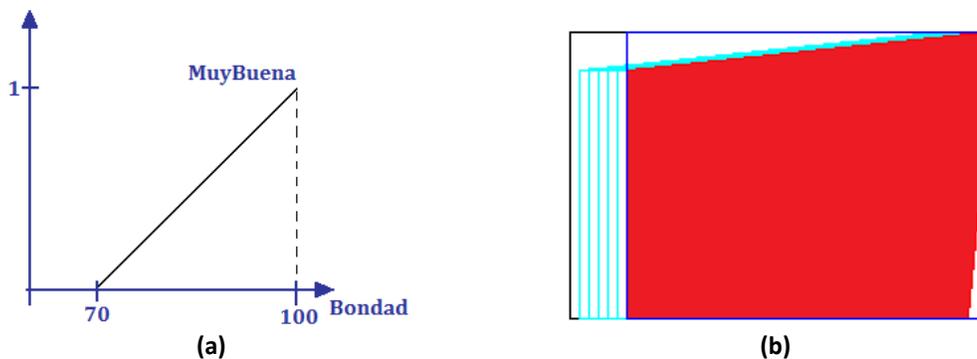


Figura 3.15. a) Función de Membresía “Muy Buena”. . b) Acomodo con Bondad Muy Buena

3.2.2. Base de Conocimiento

La base de conocimiento está conformada básicamente por las reglas lingüísticas y la información referente a las funciones de pertenencia de los conjuntos difusos.

La elaboración de las reglas difusas corresponde a la etapa más importante del trabajo de diseño del algoritmo difuso ya que en estas reglas se plasma la respuesta del algoritmo a las diferentes situaciones con las que se enfrenta, tanto en lo referente a las áreas de las envolventes como a la Tasa de Huecos.

Para la elaboración de las reglas difusas es necesaria la utilización de variables lingüísticas, esto debido a que las reglas difusas son una descripción lingüística que describe el sistema difuso de entradas y salidas. Para elaborar las reglas difusas se establece inicialmente las funciones de membresía, estas son agrupaciones de uno o varios conjuntos difusos correspondientes a una misma variable lingüística. Estas funciones de membresía son definidas por el operador experto, en este caso, el rol de operador experto fue adoptado por los desarrolladores del proyecto de tesis.

Las entradas y salidas del sistema difuso se denominan valores “crisp”, esto significa que las entradas y salidas del sistema son valores numéricos, dado que el sistema difuso, como se explicó anteriormente, está basado en un sistema lingüístico, es necesario transformar las entradas crisp a valores difusos, esta transformación se denomina difusión, mientras que el caso inverso se denomina desdifusión. La difusión y desdifusión se llevan a cabo a través de las funciones de membresía, definiendo el grado de relación (membresía) del valor crisp a cada conjunto difuso.

En este caso se trabajó con dos variables lingüísticas de entrada: *Tasa de Huecos* y *Área ocupada*. Por otro lado se tiene una variable lingüística de salida: *Bondad*.

La figura 3.16 ilustra las variables de entrada y salida al algoritmo difuso.



Figura 3.16. Variables de Entrada y Salida

Las variables de entrada son obtenidas mediante la medición de las áreas de la pieza que se va a acomodar, así como del área de la envolvente que forma con la zona donde va a ser ubicada. Ambas obtenidas a través de programación y teniendo los puntos que conforman tanto la pieza que se va a colocar como los de la envolvente que forma.

En las figuras 3.17 y 3.18 se muestran los conjuntos variables de entrada, con sus respectivas funciones de membresía.

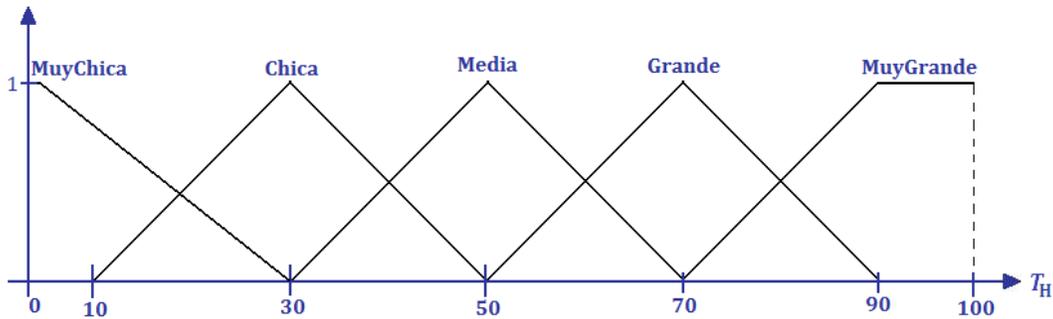


Figura 3.17. Funciones de membresía del conjunto *Tasa de Huecos*

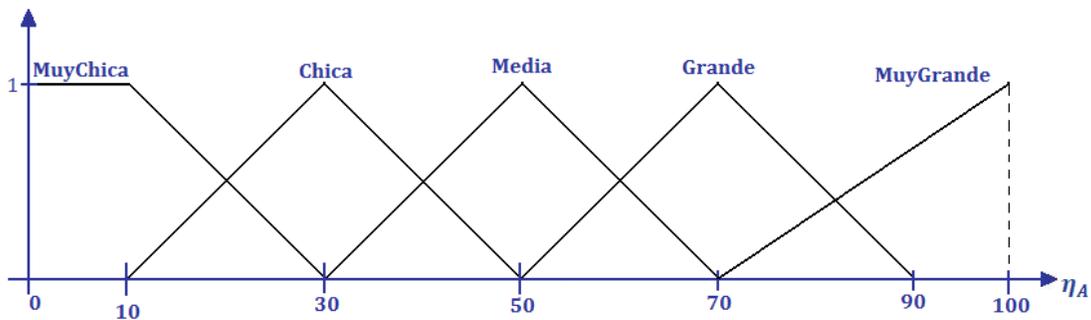


Figura 3.18. Funciones de membresía del conjunto *Eficiencia de Área Ocupada*

En la figura 3.19 se muestra el conjunto de salida con sus respectivas funciones de membresía.

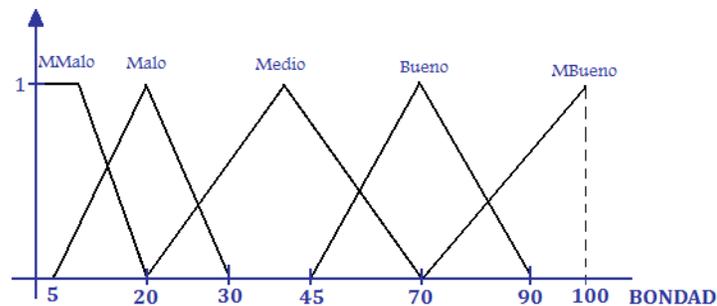


Figura 3.19. Funciones de membresía del conjunto *Bondad*

Luego de diseñar las funciones de membresía y los conjuntos difusos se debe generar las reglas de asociación entre los diferentes conjuntos. Estas reglas se establecen mediante matrices llamadas “FAM” (Fuzzy Associative Memory). Las “FAM” son el componente principal de procesamiento del algoritmo difuso y correlacionan las variables difusas de entrada y de salida, guiando el comportamiento de elección de la pieza óptima.

La tabla 3.1, muestra las FAM usada tomando en cuenta los conjuntos de entrada y salida mencionados.

Área Ocupada Tasa de Huecos	Muy Chica	Chica	Media	Grande	Muy Grande
Muy grande	Muy Mala	Muy Mala	Muy Mala	Mala	Mala
Grande	Muy Mala	Mala	Mala	Media	Media
Media	Mala	Mala	Media	Buena	Buena
Chica	Buena	Buena	Buena	Buena	Buena
Muy chica	Buena	Buena	Buena	Muy Buena	Muy Buena

Tabla 3.1. Tabla de Reglas Difusas

3.2.3. Motor de Inferencia

Reglas difusas

Las reglas difusas son relaciones que se utilizan para expresar la relación existente entre los conceptos imprecisos y el comportamiento que gobierna al algoritmo, se elaboran un conjunto de reglas --tantas como sean necesarias-- para lograr una buena descripción del sistema. Cada regla tiene la forma de una declaración IF – THEN. La parte IF de la regla contiene una o más condiciones, llamadas antecedentes. La parte THEN de la regla contiene una o más acciones, llamadas consecuencias. Los antecedentes de las reglas corresponden directamente al grado de membresía (entrada difusa) calculada durante el proceso de difusión.

La cantidad de reglas depende de todas las posibles combinaciones que se puedan dar entre las funciones de membresía de la entrada y la salida; para nuestro caso tenemos dos variable de entrada y una de salida todas con 5 FAM cada una, se generaran un total de 25 (5x5=25) reglas de control (Tabla 3.1). Cada una de estas reglas cuenta con un grado de

soporte o prioridad, el cual indica que regla contribuirá en mayor o menor parte a la salida generada por el sistema en determinado momento. El grado de soporte permite no ser tan radical en la evaluación de las reglas ya que permite tener una evaluación parcial de las mismas.

A continuación se listan las reglas difusas usadas en este caso:

IF $T_H = \text{Muy Grande}$ y $\eta_A = \text{Muy Chica}$ ENTONCES $\text{Bondad} = \text{Muy Mala}$

IF $T_H = \text{Muy Grande}$ y $\eta_A = \text{Chica}$ ENTONCES $\text{Bondad} = \text{Muy Mala}$

IF $T_H = \text{Muy Grande}$ y $\eta_A = \text{Media}$ ENTONCES $\text{Bondad} = \text{Muy Mala}$

IIF $T_H = \text{Muy Grande}$ y $\eta_A = \text{Grande}$ ENTONCES $\text{Bondad} = \text{Mala}$

IF $T_H = \text{Muy Grande}$ y $\eta_A = \text{Muy Grande}$ ENTONCES $\text{Bondad} = \text{Mala}$

IF $T_H = \text{Grande}$ y $\eta_A = \text{Muy Chica}$ ENTONCES $\text{Bondad} = \text{Muy Mala}$

IF $T_H = \text{Grande}$ y $\eta_A = \text{Chica}$ ENTONCES $\text{Bondad} = \text{Mala}$

IF $T_H = \text{Grande}$ y $\eta_A = \text{Media}$ ENTONCES $\text{Bondad} = \text{Mala}$

IF $T_H = \text{Grande}$ y $\eta_A = \text{Grande}$ ENTONCES $\text{Bondad} = \text{Media}$

IF $T_H = \text{Grande}$ y $\eta_A = \text{Muy Grande}$ ENTONCES $\text{Bondad} = \text{Media}$

IF $T_H = \text{Media}$ y $\eta_A = \text{Muy Chica}$ ENTONCES $\text{Bondad} = \text{Mala}$

IF $T_H = \text{Media}$ y $\eta_A = \text{Chica}$ ENTONCES $\text{Bondad} = \text{Mala}$

IF $T_H = \text{Media}$ y $\eta_A = \text{Media}$ ENTONCES $\text{Bondad} = \text{Media}$

IF $T_H = \text{Media}$ y $\eta_A = \text{Grande}$ ENTONCES $\text{Bondad} = \text{Buena}$

IF $T_H = \text{Media}$ y $\eta_A = \text{Muy Grande}$ ENTONCES $\text{Bondad} = \text{Buena}$

IF $T_H = \text{Chica}$ y $\eta_A = \text{Muy Chica}$ ENTONCES $\text{Bondad} = \text{Buena}$

IF $T_H = \text{Chica}$ y $\eta_A = \text{Chica}$ ENTONCES $\text{Bondad} = \text{Buena}$

IF $T_H = \text{Chica}$ y $\eta_A = \text{Media}$ ENTONCES $\text{Bondad} = \text{Buena}$

IF $T_H = \text{Chica}$ y $\eta_A = \text{Grande}$ ENTONCES $\text{Bondad} = \text{Muy Buena}$

IF $T_H = \text{Chica}$ y $\eta_A = \text{Muy Grande}$ ENTONCES $\text{Bondad} = \text{Muy Buena}$

IF $T_H = \text{Muy Chica}$ y $\eta_A = \text{Muy Chica}$ ENTONCES $\text{Bondad} = \text{Buena}$

IF $T_H = \text{Muy Chica}$ y $\eta_A = \text{Chica}$ ENTONCES $\text{Bondad} = \text{Muy Buena}$

IF $T_H = \text{Muy Chica}$ y $\eta_A = \text{Media}$ ENTONCES $\text{Bondad} = \text{Muy Buena}$

IF $T_H = \text{Muy Chica}$ y $\eta_A = \text{Grande}$ ENTONCES $\text{Bondad} = \text{Muy Buena}$

IF $T_H = \text{Muy Chica}$ y $\eta_A = \text{Muy Grande}$ ENTONCES $\text{Bondad} = \text{Muy Buena}$

Las reglas difusas constituyen las relaciones entre las variables lingüísticas establecidas en un sistema, estas reglas determinan el curso de acción que se debe seguir. Cuando existen reglas que cuentan con más de un antecedente, se utilizan los operadores difusos MAX, MIN; para simplificarlos a uno solo. Del proceso de difusión, se conoce el grado para el cual cada parte del antecedente ha satisfecho cada regla. Este valor será aplicado posteriormente a la función de salida.

En general, una regla por sí misma no es muy útil dentro del proceso difuso, por tanto, es necesario contar con dos o más reglas relacionadas entre sí. El consecuente de una regla difusa es utilizado para asignar completamente un conjunto de salida; si el antecedente es parcialmente verdadero, entonces el conjunto de salida es truncado de acuerdo a un método de evaluación-combinación de reglas.

El método de evaluación-combinación de reglas es definido como la forma que tendrá el consecuente basado en un antecedente. Este proceso ocurre para cada regla. Dado que la salida de cada regla es un conjunto difuso, es necesario que se calcule un valor único de salida para una colección de reglas. A este proceso se le conoce como composición. Los procedimientos más utilizados para llevarlo a cabo son MÍNIMO - MÁXIMO y PRODUCTO - MÁXIMO.

El método MÍNIMO - MÁXIMO evalúa las magnitudes de los antecedentes para cada una de las reglas asignando el valor mínimo al consecuente de estas. Posteriormente simplifica los consecuentes de cada conjunto difuso de salida seleccionando el mayor como valor único.

El método PRODUCTO - MÁXIMO multiplica las magnitudes de los antecedentes para cada una de las reglas asignando el producto al consecuente de estas. Posteriormente simplifica los consecuentes de cada conjunto difuso de salida seleccionando el mayor como valor único.

Para los fines de este trabajo usaremos MÍNIMO - MÁXIMO, ya que con ello garantizamos que los valores obtenidos sean de mayor precisión.

Evaluación de la Reglas

Una vez obtenidos los valores difusos, el objetivo de la evaluación de reglas es transportarlos de la premisa a la conclusión de cada regla. Esto resulta en un conjunto difuso para cada variable de salida de cada regla.

Para este trabajo se usó del Método de *Inferencia Mínimo*.

En este método la función de pertenencia de salida es recortada a la altura correspondiente al grado de pertenencia calculado para la premisa de la regla. La forma de la salida resultante se afecta drásticamente por este método formando un trapecio (figura 3.20)

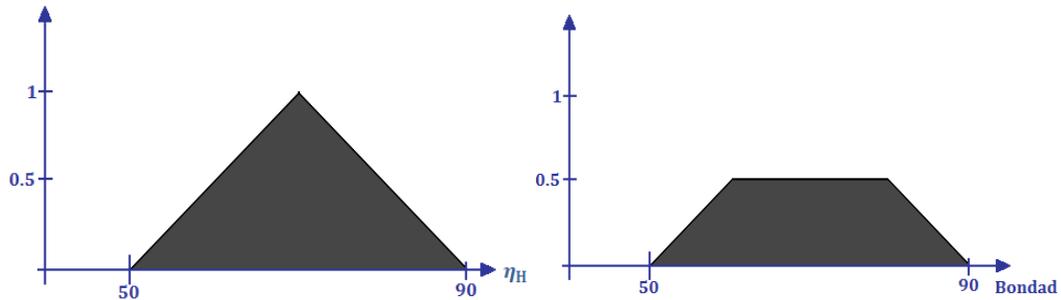


Figura 3.20. Conjuntos Difusos de entrada y salida, aplicando el método de Inferencia Difusa

La nueva figura del conjunto difuso de salida es la forma cómo influye específicamente esta regla en la variable de salida.

Las funciones de pertenencia pueden cambiar varias veces en el desarrollo del sistema, para producir las respuestas deseadas a partir de ciertas entradas.

Combinación de Reglas

En este paso los subconjuntos difusos de salida asignados para cada variable de salida de las diferentes reglas se combinan en un solo conjunto difuso.

Para determinar la forma del conjunto difuso de salida a partir del conjunto de respuestas obtenidas de las diversas reglas difusas, se puede recurrir al método de Máximo y Suma. Siendo que el método de Máximo es el más consistente con la lógica difusa y uno de los sistemas más comunes en control difuso, se hará uso de él.

Este método evalúa el contorno de todos los conjuntos de salida, formando un solo contorno de salida (figura 3.21).



Figura 3.21. Conjuntos Difusos de salida, aplicando el método de Máximo

En este método, la combinación de los subconjuntos difusos se construye tomando el punto máximo de todos los subconjuntos difusos asignados por las reglas difusas utilizando la operación OR.

3.2.4. Interfaz de desdifusión

El método más utilizado para realizar el proceso de desdifusión, es el método del Centro de Gravedad. Este método determina el centro del área perteneciente a la función combinada de membresía. El punto representativo de los conjuntos de salida se determina con la expresión:

$$z^* = \frac{\sum z_i \mu(z_i)}{\sum \mu(z_i)}$$

donde:

z_i posiciones de los centroides de las funciones de membresía de salida

$\mu(z_i)$ grado de pertenencia de la función de membresía modificada

Este método presenta dos inconvenientes. El primero se debe a que no todas las funciones de membresía son iguales por lo que aquellas con una mayor área tendrán mayor impacto.

De hecho, una de las razones al escoger una función de membresía con un área pequeña es para lograr un control más sensible cerca del punto de equilibrio. El segundo se debe a que requiere un esfuerzo computacional considerable para realizar los cálculos de integración requeridos. Cuando se utilizan singletons como conjuntos de salida se reduce significativamente el efecto de ambos inconvenientes. Es importante mencionar que para este caso se hará uso de singletons para un mejor resultado, por lo que cabe mencionar los valores que serán usados al automatizar este proceso. Los siguientes son los grados de pertenencia para cada conjunto difuso de salida.

Conjunto Bondad

$$z(\text{Muy Mala}) = 2$$

$$z(\text{Mala}) = 20$$

$$z(\text{Media}) = 30$$

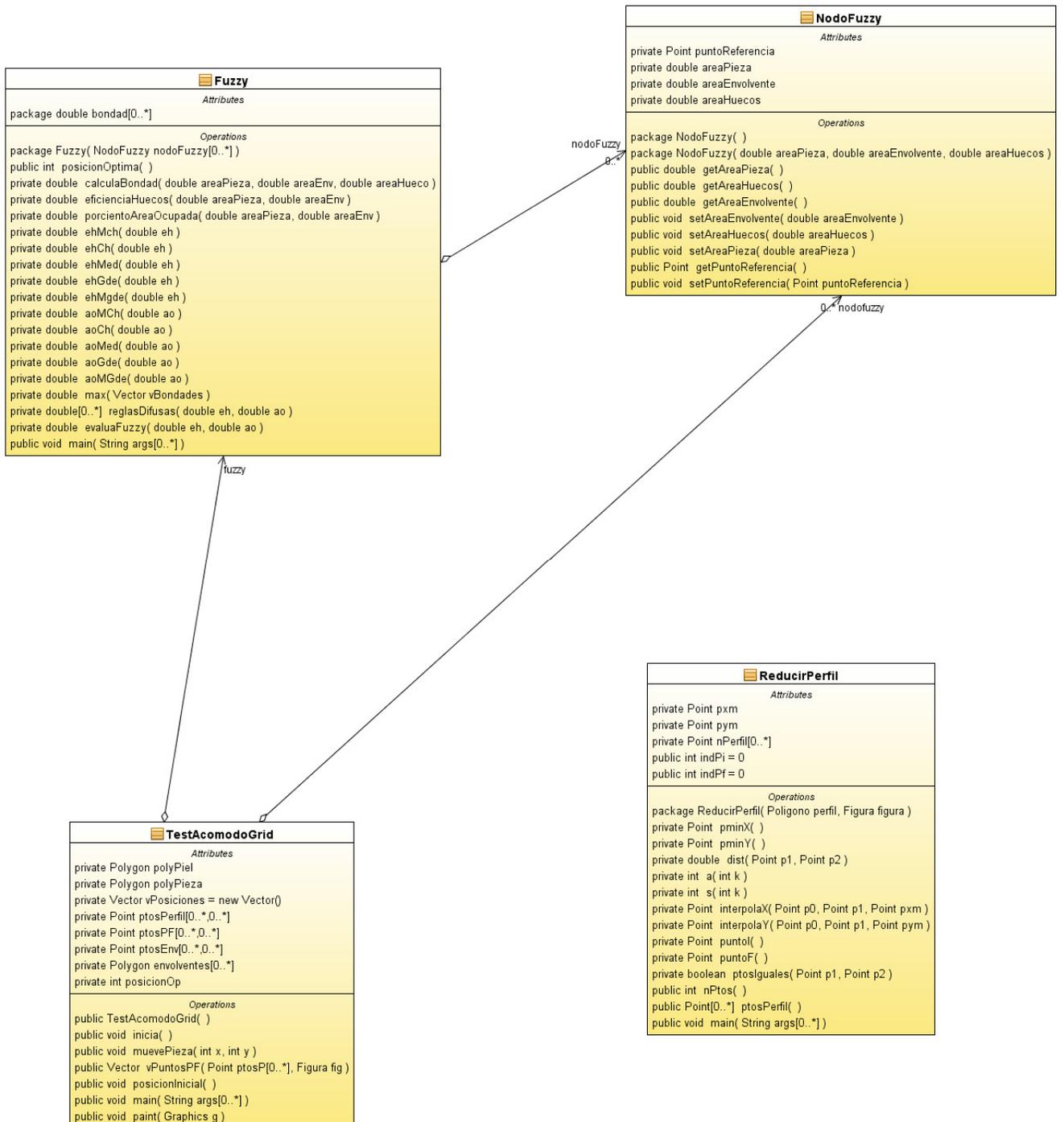
$$z(\text{Buena}) = 60$$

$$z(\text{Muy Buena}) = 100$$

3.3. Implementación de la solución

3.3.1. Definición de las clases

Para llegar a la solución del problema de manera eficiente se hizo de las siguientes clases para llevar a cabo el algoritmo difuso.



4. Pruebas

4.1. Etapa de Pruebas

PRUEBA 1

Para fines de ilustrar las pruebas y aplicar lo visto en el capítulo anterior se tomaron las figuras de la figura 4.1 para llevar a cabo el procedimiento que realiza el programa basado en lógica difusa.

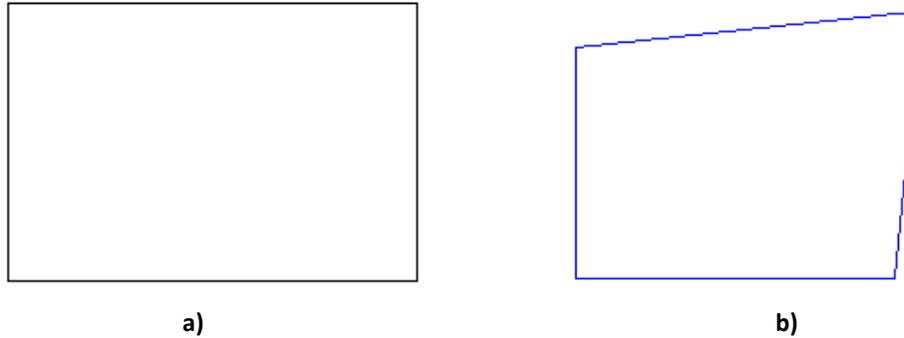


Figura 4.1. a) Perfil usado; b) Pieza que será ubicada en el perfil

Se inicia el movimiento de la pieza, ubicándola en el perfil, cuidando que no se encime y no se salga del mismo (figura 4.2), para fines ilustrativos se tomarán las tres posiciones más significativas de acomodo: a la izquierda, en medio, y a la derecha.



Figura 4.2. Posición 1

Posición 1.

La figura 4.2 ilustra lo que se denomina como “Posición 1”, cada posición generará una envolvente entre la pieza y el perfil, cada envolvente es única para cada nueva posición. Dicha envolvente, como se mencionó en el capítulo 2, sirve para el cálculo de la Tasa de Huecos (T_H), la eficiencia de área ocupada (η_A) está dada propiamente por el área de la pieza.

Para esta posición 1 la envolvente obtenida se muestra en la figura 4.3



Figura 4.3. Envoltura correspondiente a la posición 1

Para esta posición corresponden los siguientes datos:

$$\text{Área de la Pieza} \quad A_P = 26100$$

$$\text{Área de la Envoltura} \quad A_E = 32250$$

Se deduce que el Área de la Pieza es constante y, por lo tanto, lo es la *eficiencia de área ocupada*. De estos datos se deriva que:

$$\text{Área de los Huecos} \quad A_H = 6150$$

El siguiente paso es calcular la *Tasa de Huecos* y la *eficiencia de Área Ocupada*, ya que son estas las variables de entrada al algoritmo difuso.

$$T_H = \frac{A_E - A_P}{A_E} \times 100$$

$$T_H = \frac{32250 - 26100}{32250} \times 100 = 19.0697$$

$$\eta_A = \frac{A_P}{A_E} \times 100$$

$$\eta_A = \frac{26100}{32250} \times 100 = 80.9302$$

Difusión

Una vez obtenidos los valores de $T_H = 19.0697$ y $\eta_A = 80.9302$, los ubicamos en nuestros conjuntos de entrada para iniciar la difusión; la figura 4.4 muestra las posiciones dentro del conjunto de entrada *Tasa de Huecos*. Y la figura 4.5 muestra las posiciones para el conjunto de entrada *eficiencia de área ocupada*.

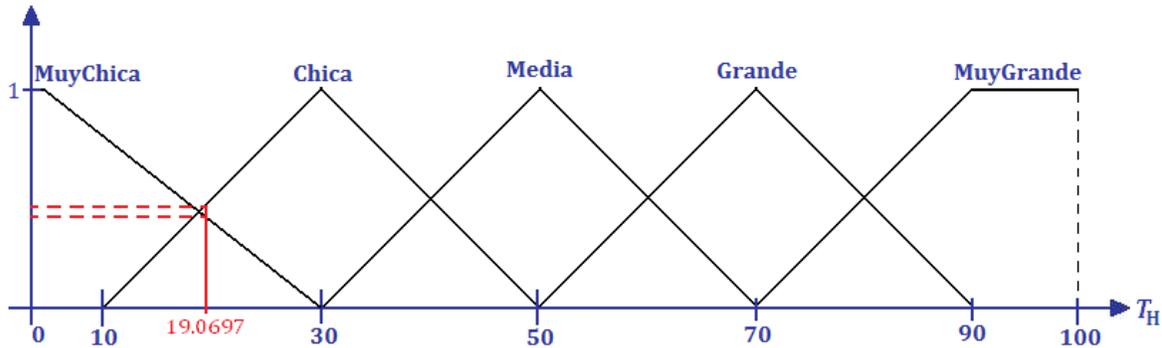


Figura 4.4. Posiciones para $T_H = 19.0697$

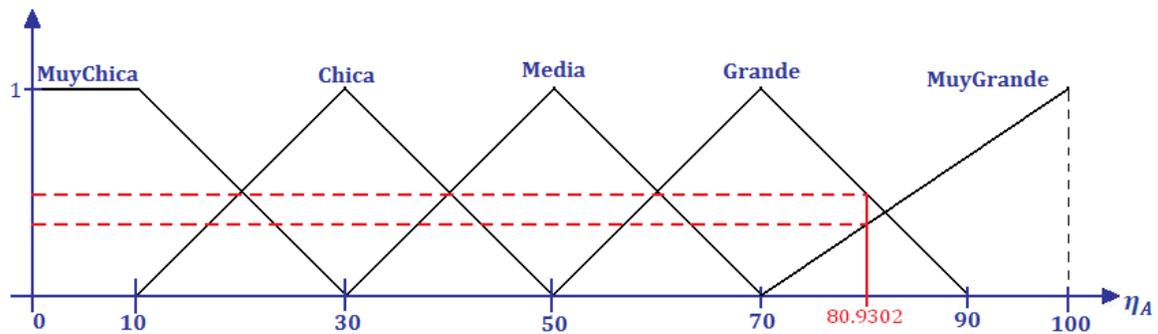


Figura 4.5. Posiciones para $\eta_A = 80.9302$

Con las fórmulas definidas en el capítulo 3 se obtienen los grados de pertenencia, tanto de $T_H = 19.0697$ como de $\eta_A = 80.9302$.

De la figura 4.4 se puede apreciar que en el caso de $T_H = 19.0697$ se está dentro de las funciones de membresía *Muy Chica* y *Chica*. Ahora se procede a calcular el grado de pertenencia para cada una de las funciones de membresía a las que corresponda:

$$Muy\ Chica = \begin{cases} 1 & T_H \leq 1 \\ \frac{T_H - 30}{1 - 30} & 1 < T_H \leq 30 \end{cases}$$

Sustituyendo valores:

$$\text{Muy Chica} = \begin{cases} \frac{T_H - 30}{1 - 30} & 1 < T_H \leq 30 \end{cases}$$

$$\text{Muy Chica} = \begin{cases} \frac{19.0697 - 30}{1 - 30} = 0.3769 \end{cases}$$

Para el caso de *Chica*

$$\text{Chica} = \begin{cases} \frac{T_H - 10}{30 - 10} & 10 < T_H \leq 30 \\ \frac{T_H - 50}{30 - 50} & 30 < T_H \leq 50 \end{cases}$$

Sustituyendo valores:

$$\text{Chica} = \begin{cases} \frac{T_H - 10}{30 - 10} & 10 < T_H \leq 30 \end{cases}$$

$$\text{Chica} = \begin{cases} \frac{19.0697 - 10}{30 - 10} = 0.4534 \end{cases}$$

De la figura 4.5 se puede apreciar que en el caso de $\eta_A = 80.9302$ se está dentro de las funciones de membresía *Grande* y *Muy Grande*, ahora se procede a calcular el grado de pertenencia para cada una de las funciones de membresía a las que corresponda:

$$\text{Grande} = \begin{cases} \frac{\eta_A - 50}{70 - 50} & 50 < \eta_A \leq 70 \\ \frac{\eta_A - 90}{70 - 90} & 70 < \eta_A \leq 90 \end{cases}$$

Sustituyendo valores:

$$\text{Grande} = \begin{cases} \frac{\eta_A - 90}{70 - 90} & 70 < \eta_A \leq 90 \end{cases}$$

$$\text{Grande} = \begin{cases} \frac{80.9302 - 90}{70 - 90} = 0.4534 \end{cases}$$

Para el caso de *Muy Grande*

$$\text{Muy Grande} = \begin{cases} \frac{\eta_A - 70}{100 - 70} & 70 < \eta_A \leq 100 \end{cases}$$

Sustituyendo valores

$$\text{Muy Grande} = \left\{ \frac{80.9302 - 70}{100 - 70} = 0.3643 \right.$$

Se procede a usar la base de conocimiento definida por la siguiente tabla, con la cual se obtienen los posibles valores del conjunto de salida *bondad* resultantes:

Área Ocupada Tasa de Huecos	Muy Chica	Chica	Media	Grande	Muy Grande
Muy grande	Muy Mala	Muy Mala	Muy Mala	Mala	Mala
Grande	Muy Mala	Mala	Mala	Media	Media
Media	Mala	Mala	Media	Buena	Buena
Chica	Buena	Buena	Buena	Buena	Buena
Muy chica	Buena	Buena	Buena	Muy Buena	Muy Buena

Ahora se debe calcular cual de las funciones de membresía tiene mayor grado de pertenencia.

Primero se evalúan las reglas difusas, considerando sólo aquellas obtenidas de los valores de entrada de T_H y η_A

IF $T_H = \text{Muy Chica}$ y $\eta_A = \text{Grande}$ ENTONCES *Bondad* = *Muy Buena*

IF $T_H = \text{Muy Chica}$ y $\eta_A = \text{Muy Grande}$ ENTONCES *Bondad* = *Muy Buena*

IF $T_H = \text{Chica}$ y $\eta_A = \text{Grande}$ ENTONCES *Bondad* = *Buena*

IF $T_H = \text{Chica}$ y $\eta_A = \text{Muy Grande}$ ENTONCES *Bondad* = *Buena*

Sustituyendo los valores, y usando el método de inferencia mínima, se tiene:

IF $T_H = 0.3769$ y $\eta_A = 0.4534$ ENTONCES *Bondad* = 0.3769

IF $T_H = 0.3769$ y $\eta_A = 0.3643$ ENTONCES $Bondad = 0.3643$

IF $T_H = 0.4534$ y $\eta_A = 0.4534$ ENTONCES $Bondad = 0.4534$

IF $T_H = 0.4534$ y $\eta_A = 0.3643$ ENTONCES $Bondad = 0.3643$

Lo siguiente es combinar en un sólo conjunto difuso las diferentes reglas para cada uno de los subconjuntos difusos de salida asignados para cada función de membresía.

Para determinar la forma del conjunto difuso de salida a partir del conjunto de respuestas obtenidas de las diversas reglas difusas, se recurre al método de Máximo. De donde se obtienen el grado de pertenencia para cada una de las funciones de membresía de salida.

$$\mu(\text{Muy Mala}) = 0$$

$$\mu(\text{Mala}) = 0$$

$$\mu(\text{Media}) = 0$$

$$\mu(\text{Buena}) = 0.4534$$

$$\mu(\text{Muy Buena}) = 0.3769$$

Desdifusión

Para la desdifusión se usará el método de Centro de Gravedad. El punto representativo de los conjuntos de salida se determina con la expresión:

$$z^* = \frac{\sum z_i \mu(z_i)}{\sum \mu(z_i)}$$

donde:

z_i posiciones de los centroides de las funciones de membresía de salida

$\mu(z_i)$ grado de pertenencia de la función de membresía modificada

Del capítulo 3 sabemos que los valores de los centroides para las funciones de membresía de salida son:

$$z(\text{Muy Mala}) = 2$$

$$z(\text{Mala}) = 20$$

$$z(\text{Media}) = 30$$

$$z(\text{Buena}) = 60$$

$$z(\text{Muy Buena}) = 100$$

Sustituyendo valores:

$$z^* = \frac{z_1\mu(z_1) + z_2\mu(z_2) + z_3\mu(z_3) + z_4\mu(z_4) + z_5\mu(z_5)}{\mu(z_1) + \mu(z_2) + \mu(z_3) + \mu(z_4) + \mu(z_5)}$$
$$z^* = \frac{(2)(0) + (20)(0) + (30)(0) + (60)(0.4534) + (100)(0.3769)}{0 + 0 + 0 + 0.4534 + 0.3769}$$
$$z_1^* = 78.1573$$

Posición 2.

La figura 4.6 ilustra lo que se denomina como "Posición 2".

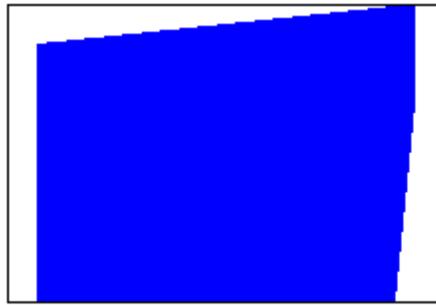


Figura 4.6. Posición 2

La figura 4.7 muestra la envolvente para esta posición.

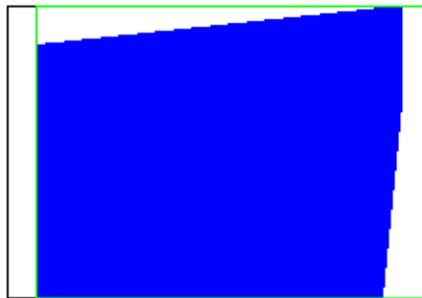


Figura 4.7. Envolvente correspondiente a la posición 2

Los datos para esta posición son:

Área de la Pieza $A_P = 26100$

Área de la Envolvente $A_E = 30750$

Con los cuales se calcula la *Tasa de Huecos* y la *Eficiencia de Área Ocupada*

$$T_H = \frac{30750 - 26100}{30750} \times 100 = 15.1219$$

$$\eta_A = \frac{26100}{30750} \times 100 = 84.8780$$

Difusión

Una vez obtenidos los valores de $T_H = 15.1219$ y $\eta_A = 84.8780$, los ubicamos en nuestros conjuntos de entrada para iniciar la difusión; la figura 4.8 muestra las posiciones dentro del conjunto de entrada *Tasa de Huecos*. Y la figura 4.9 muestra las posiciones para el conjunto de entrada *eficiencia de área ocupada*.

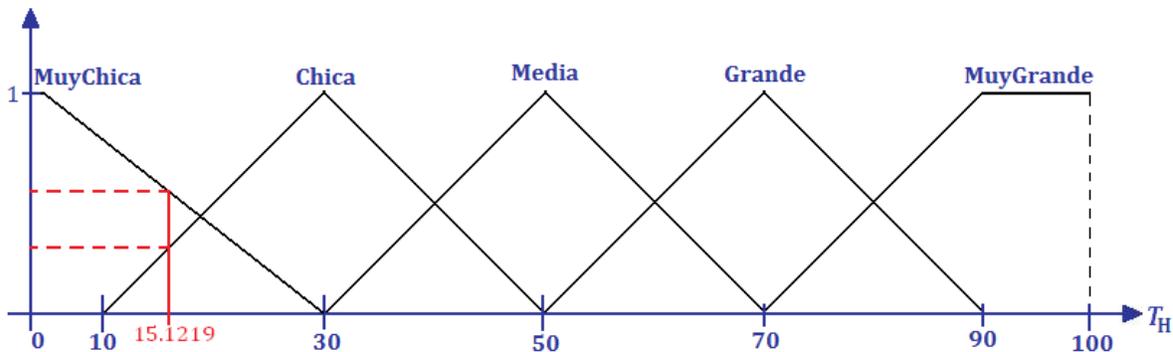


Figura 4.8. Posiciones para $T_H = 15.1219$

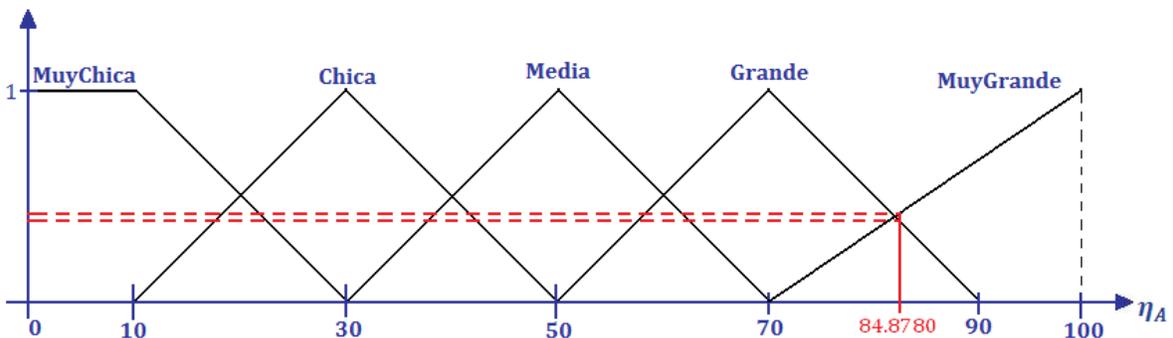


Figura 4.9. Posiciones para $\eta_A = 84.8780$

Con las fórmulas definidas en el capítulo 3 se obtienen los grados de pertenencia, tanto de $T_H = 15.1219$ como de $\eta_A = 84.8780$

De la figura 4.8 se puede apreciar que en el caso de $T_H = 15.1219$ se está dentro de las funciones de membresía *Muy Chica* y *Chica*, ahora se procede a calcular el grado de pertenencia para cada una de las funciones de membresía a las que corresponda:

$$Muy\ Chica = \begin{cases} 1 & T_H \leq 1 \\ \frac{T_H - 30}{1 - 30} & 1 < T_H \leq 30 \end{cases}$$

Sustituyendo valores:

$$Muy\ Chica = \begin{cases} \frac{T_H - 30}{1 - 30} & 1 < T_H \leq 30 \end{cases}$$

$$Muy\ Chica = \begin{cases} \frac{15.1219 - 30}{1 - 30} = 0.5130 \end{cases}$$

Para el caso de *Chica*

$$Chica = \begin{cases} \frac{T_H - 10}{30 - 10} & 10 < T_H \leq 30 \\ \frac{T_H - 50}{30 - 50} & 30 < T_H \leq 50 \end{cases}$$

Sustituyendo valores:

$$Chica = \begin{cases} \frac{T_H - 10}{30 - 10} & 10 < T_H \leq 30 \end{cases}$$

$$Chica = \begin{cases} \frac{15.1219 - 10}{30 - 10} = 0.2561 \end{cases}$$

De la figura 4.9 se puede apreciar que en el caso de $\eta_A = 84.8780$ se está dentro de las funciones de membresía *Grande* y *Muy Grande*, ahora se procede a calcular el grado de pertenencia para cada una de las funciones de membresía a las que corresponda:

$$Grande = \begin{cases} \frac{\eta_A - 50}{70 - 50} & 50 < \eta_A \leq 70 \\ \frac{\eta_A - 90}{70 - 90} & 70 < \eta_A \leq 90 \end{cases}$$

Sustituyendo valores:

$$Grande = \left\{ \frac{\eta_A - 90}{70 - 90} \quad 70 < \eta_A \leq 90 \right.$$

$$Grande = \left\{ \frac{84.8780 - 90}{70 - 90} = 0.2561 \right.$$

Para el caso de *Muy Grande*

$$Muy Grande = \left\{ \frac{\eta_A - 70}{100 - 70} \quad 70 < \eta_A \leq 100 \right.$$

Sustituyendo valores

$$Muy Grande = \left\{ \frac{84.8780 - 70}{100 - 70} = 0.4959 \right.$$

Se procede a usar la base de conocimiento definida por la siguiente tabla, con la cual se obtienen los posibles valores del conjunto de salida *bondad* resultantes:

Área Ocupada Tasa de Huecos	Muy Chica	Chica	Media	Grande	Muy Grande
Muy grande	Muy Mala	Muy Mala	Muy Mala	Mala	Mala
Grande	Muy Mala	Mala	Mala	Media	Media
Media	Mala	Mala	Media	Buena	Buena
Chica	Buena	Buena	Buena	Buena	Buena
Muy chica	Buena	Buena	Buena	Muy Buena	Muy Buena

Ahora se debe calcular cual de las funciones de membresía tiene mayor grado de pertenencia.

Primero se evalúan las reglas difusas, considerando sólo aquellas obtenidas de los valores de entrada de T_H y η_A

IF $T_H = \text{Muy Chica}$ y $\eta_A = \text{Grande}$ ENTONCES $Bondad = \text{Muy Buena}$

IF $T_H = \text{Muy Chica}$ y $\eta_A = \text{Muy Grande}$ ENTONCES $Bondad = \text{Muy Buena}$

IF $T_H = \text{Chica}$ y $\eta_A = \text{Grande}$ ENTONCES $Bondad = \text{Buena}$

IF $T_H = \text{Chica}$ y $\eta_A = \text{Muy Grande}$ ENTONCES $Bondad = \text{Buena}$

Sustituyendo los valores y usando el método de inferencia mínima se tiene:

IF $T_H = 0.5130$ y $\eta_A = 0.2561$ ENTONCES $Bondad = 0.2561$

IF $T_H = 0.5130$ y $\eta_A = 0.4959$ ENTONCES $Bondad = 0.4959$

IF $T_H = 0.2561$ y $\eta_A = 0.2561$ ENTONCES $Bondad = 0.2561$

IF $T_H = 0.2561$ y $\eta_A = 0.4959$ ENTONCES $Bondad = 0.2561$

Lo siguiente es combinar en un solo conjunto difuso las diferentes reglas para cada uno de los subconjuntos difusos de salida asignados para cada función de membresía.

Para determinar la forma del conjunto difuso de salida a partir del conjunto de respuestas obtenidas de las diversas reglas difusas se recurre al método de Máximo, de donde se obtienen el grado de pertenencia para cada una de las funciones de membresía de salida.

$$\mu(\text{Muy Mala}) = 0$$

$$\mu(\text{Mala}) = 0$$

$$\mu(\text{Media}) = 0$$

$$\mu(\text{Buena}) = 0.2561$$

$$\mu(\text{Muy Buena}) = 0.4959$$

Desdifusión

Para la desdifusión se usará el método de Centro de Gravedad. El punto representativo de los conjuntos de salida se determina con la expresión:

$$z^* = \frac{\sum z_i \mu(z_i)}{\sum \mu(z_i)}$$

donde:

z_i posiciones de los centroides de las funciones de membresía de salida

$\mu(z_i)$ grado de pertenencia de la función de membresía modificada

Del capítulo 3 sabemos que los valores de los centroides para las funciones de membresía de salida son:

$$z(\text{Muy Mala}) = 2$$

$$z(\text{Mala}) = 20$$

$$z(\text{Media}) = 30$$

$$z(\text{Buena}) = 60$$

$$z(\text{Muy Buena}) = 100$$

Sustituyendo valores:

$$z^* = \frac{z_1\mu(z_1) + z_2\mu(z_2) + z_3\mu(z_3) + z_4\mu(z_4) + z_5\mu(z_5)}{\mu(z_1) + \mu(z_2) + \mu(z_3) + \mu(z_4) + \mu(z_5)}$$

$$z^* = \frac{(2)(0) + (20)(0) + (30)(0) + (60)(0.2561) + (100)(0.4959)}{0 + 0 + 0 + 0.2561 + 0.4959}$$

$$z_2^* = \mathbf{86.38.12}$$

Posición 3.

La figura 4.10 ilustra lo que se denomina como "Posición 3".

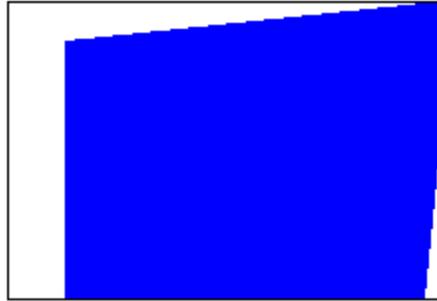


Figura 4.10. Posición 3

La figura 4.11 muestra la envolvente para esta posición.

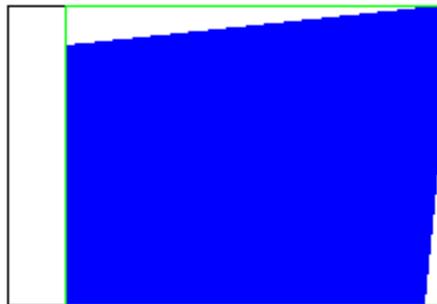


Figura 4.11. Envolvente correspondiente a la posición 3

Los datos para esta posición son:

Área de la Pieza $A_P = 26100$

Área de la Envolvente $A_E = 29250$

Con los cuales se calcula la *Tasa de Huecos* y la *Eficiencia de Área Ocupada*

$$T_H = \frac{29250 - 26100}{29250} \times 100 = 10.7692$$

$$\eta_A = \frac{26100}{29250} \times 100 = 89.2307$$

Difusión

Una vez obtenidos los valores de $T_H = 10.7692$ y $\eta_A = 89.2307$, los ubicamos en nuestros conjuntos de entrada para iniciar la difusión; la figura 4.12 muestra las posiciones dentro del conjunto de entrada *Tasa de Huecos*. Y la figura 4.13 muestra las posiciones para el conjunto de entrada *eficiencia de área ocupada*.

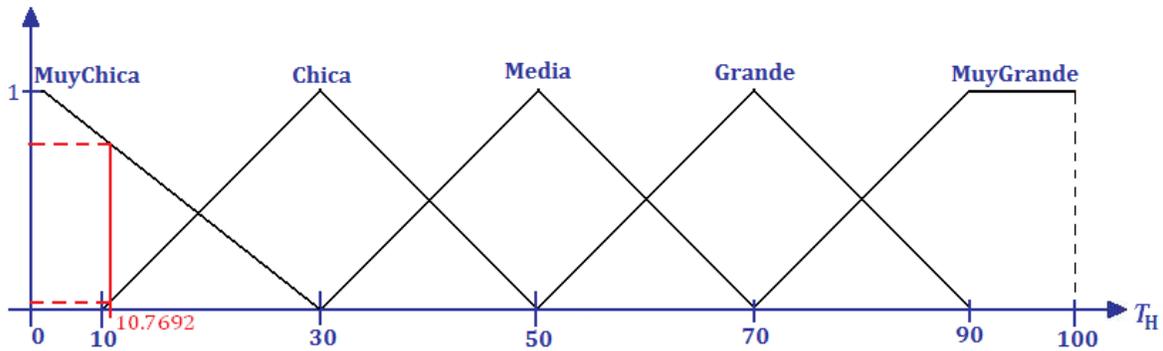


Figura 4.12. Posiciones para $T_H = 10.7692$

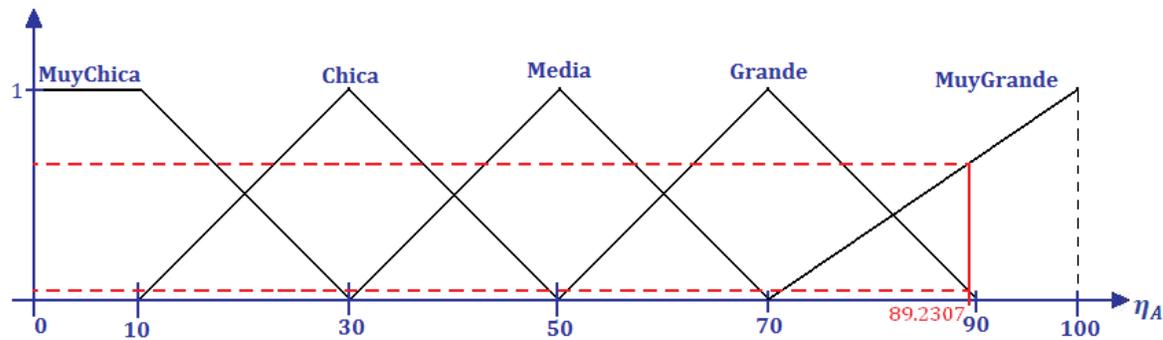


Figura 4.13. Posiciones para $\eta_A = 89.2307$

Con las fórmulas definidas en el capítulo 3 se obtienen los grados de pertenencia, tanto de $T_H = 10.7692$ como de $\eta_A = 89.2307$

De la figura 4.12 se puede apreciar que en el caso de $T_H = 10.7692$ se está dentro de las funciones de membresía *Muy Chica* y *Chica*, ahora se procede a calcular el grado de pertenencia para cada una de las funciones de membresía a las que corresponda:

$$Muy\ Chica = \begin{cases} 1 & T_H \leq 1 \\ \frac{T_H - 30}{1 - 30} & 1 < T_H \leq 30 \end{cases}$$

Sustituyendo valores:

$$\text{Muy Chica} = \begin{cases} \frac{T_H - 30}{1 - 30} & 1 < T_H \leq 30 \end{cases}$$

$$\text{Muy Chica} = \begin{cases} \frac{10.7692 - 30}{1 - 30} = 0.6631 \end{cases}$$

Para el caso de *Chica*

$$\text{Chica} = \begin{cases} \frac{T_H - 10}{30 - 10} & 10 < T_H \leq 30 \\ \frac{T_H - 50}{30 - 50} & 30 < T_H \leq 50 \end{cases}$$

Sustituyendo valores:

$$\text{Chica} = \begin{cases} \frac{T_H - 10}{30 - 10} & 10 < T_H \leq 30 \end{cases}$$

$$\text{Chica} = \begin{cases} \frac{10.7692 - 10}{30 - 10} = 0.03846 \end{cases}$$

De la figura 4.13 se puede apreciar que en el caso de $\eta_A = 89.2307$ se está dentro de las funciones de membresía *Grande* y *Muy Grande*, ahora se procede a calcular el grado de pertenencia para cada una de las funciones de membresía a las que corresponda:

$$\text{Grande} = \begin{cases} \frac{\eta_A - 50}{70 - 50} & 50 < \eta_A \leq 70 \\ \frac{\eta_A - 90}{70 - 90} & 70 < \eta_A \leq 90 \end{cases}$$

Sustituyendo valores:

$$\text{Grande} = \begin{cases} \frac{\eta_A - 90}{70 - 90} & 70 < \eta_A \leq 90 \end{cases}$$

$$\text{Grande} = \begin{cases} \frac{89.2307 - 90}{70 - 90} = 0.0385 \end{cases}$$

Para el caso de *Muy Grande*

$$\text{Muy Grande} = \begin{cases} \frac{\eta_A - 70}{90 - 70} & 70 < \eta_A \leq 100 \end{cases}$$

Sustituyendo valores

$$\text{Muy Grande} = \left\{ \frac{89.2307 - 70}{90 - 70} = 0.6410 \right.$$

Se procede a usar la base de conocimiento definida por la siguiente tabla, con la cual se obtienen los posibles valores del conjunto de salida *bondad* resultantes:

Área Ocupada Tasa de Huecos	Muy Chica	Chica	Media	Grande	Muy Grande
Muy grande	Muy Mala	Muy Mala	Muy Mala	Mala	Mala
Grande	Muy Mala	Mala	Mala	Media	Media
Media	Mala	Mala	Media	Buena	Buena
Chica	Buena	Buena	Buena	Buena	Buena
Muy chica	Buena	Buena	Buena	Muy Buena	Muy Buena

Ahora se debe calcular cual de las funciones de membresía tiene mayor grado de pertenencia.

Primero se evalúan las reglas difusas, considerando sólo aquellas obtenidas de los valores de entrada de T_H y η_A

IF $T_H = \text{Muy Chica}$ y $\eta_A = \text{Grande}$ ENTONCES *Bondad* = *Muy Buena*

IF $T_H = \text{Muy Chica}$ y $\eta_A = \text{Muy Grande}$ ENTONCES *Bondad* = *Muy Buena*

IF $T_H = \text{Chica}$ y $\eta_A = \text{Grande}$ ENTONCES *Bondad* = *Buena*

IF $T_H = \text{Chica}$ y $\eta_A = \text{Muy Grande}$ ENTONCES *Bondad* = *Buena*

Sustituyendo los valores y usando el método de inferencia mínima, se tiene:

$$\text{IF } T_H = 0.6631 \text{ y } \eta_A = 0.0385 \text{ ENTONCES } \textit{Bondad} = 0.0385$$

$$\text{IF } T_H = 0.6631 \text{ y } \eta_A = 0.6410 \text{ ENTONCES } \textit{Bondad} = 0.6410$$

$$\text{IF } T_H = 0.0385 \text{ y } \eta_A = 0.0385 \text{ ENTONCES } \textit{Bondad} = 0.0385$$

$$\text{IF } T_H = 0.0385 \text{ y } \eta_A = 0.6410 \text{ ENTONCES } \textit{Bondad} = 0.0385$$

Lo siguiente es combinar en un solo conjunto difuso las diferentes reglas para cada uno de los subconjuntos difusos de salida asignados para cada función de membresía.

Para determinar la forma del conjunto difuso de salida a partir del conjunto de respuestas obtenidas de las diversas reglas difusas, se recurre al método de Máximo. De donde se obtienen el grado de pertenencia para cada una de las funciones de membresía de salida.

$$\mu(\textit{Muy Mala}) = 0$$

$$\mu(\textit{Mala}) = 0$$

$$\mu(\textit{Media}) = 0$$

$$\mu(\textit{Buena}) = 0.0385$$

$$\mu(\textit{Muy Buena}) = 0.6410$$

Desdifusión

Para la desdifusión se usará el método de Centro de Gravedad. El punto representativo de los conjuntos de salida se determina con la expresión:

$$z^* = \frac{\sum z_i \mu(z_i)}{\sum \mu(z_i)}$$

donde:

z_i posiciones de los centroides de las funciones de membresía de salida

$\mu(z_i)$ grado de pertenencia de la función de membresía modificada

Del capítulo 3 sabemos que los valores de los centroides para las funciones de membresía de salida son:

$$z(\textit{Muy Mala}) = 2$$

$$z(\textit{Mala}) = 20$$

$$z(\textit{Media}) = 30$$

$$z(\text{Buena}) = 60$$

$$z(\text{Muy Buena}) = 100$$

Sustituyendo valores:

$$z^* = \frac{z_1\mu(z_1) + z_2\mu(z_2) + z_3\mu(z_3) + z_4\mu(z_4) + z_5\mu(z_5)}{\mu(z_1) + \mu(z_2) + \mu(z_3) + \mu(z_4) + \mu(z_5)}$$

$$z^* = \frac{(2)(0) + (20)(0) + (30)(0) + (60)(0.0385) + (100)(0.6410)}{0 + 0 + 0 + 0.0385 + 0.6410}$$

$$z_3^* = 97.7336$$

De las tres posiciones se tienen los siguientes valores de bondad:

$$z_1^* = 78.1573$$

$$z_2^* = 86.38.12$$

$$z_3^* = 97.7336$$

Se tiene que la mejor bondad es la $z_3^* = 97.7336$ por lo que la posición óptima de acomodo para esta pieza es la que se muestra en la figura 4.14.

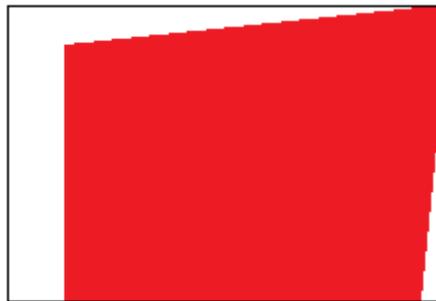
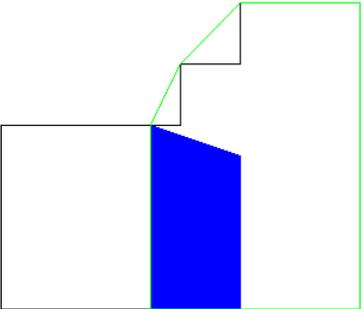
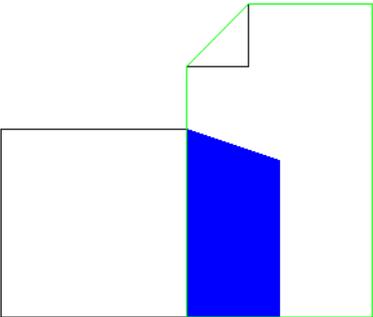
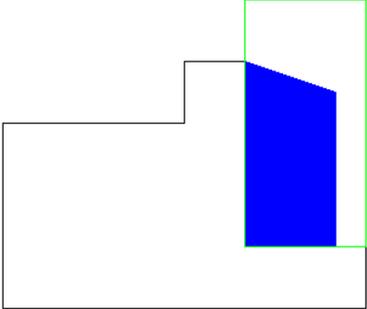
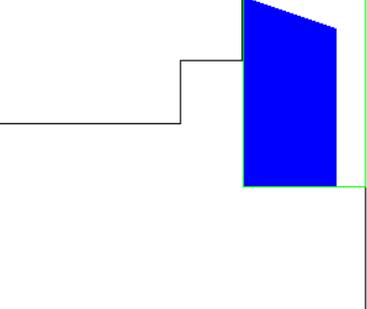
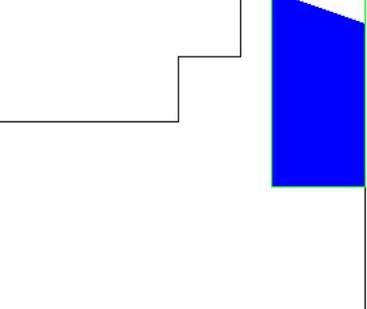


Figura 4.14. Posición Óptima

PRUEBA 2.

Posición	Imagen	Variables de entrada	Difusión	Desdifusión										
1		$A_P = 10312.5$ $A_E = 40625.0$ $T_H = 74.6153$ $\eta_A = 25.3846$	<table border="1"> <tr> <td rowspan="2">Tasa de Huecos</td> <td>Muy Grande</td> <td>0.2307</td> </tr> <tr> <td>Grande</td> <td>0.7692</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Eficiencia de Área Ocupada</td> <td>Muy Chica</td> <td>0.2307</td> </tr> <tr> <td>Chica</td> <td>0.7692</td> </tr> </table>	Tasa de Huecos	Muy Grande	0.2307	Grande	0.7692	Eficiencia de Área Ocupada	Muy Chica	0.2307	Chica	0.7692	$z_1^* = 15.8461$
Tasa de Huecos	Muy Grande	0.2307												
	Grande	0.7692												
Eficiencia de Área Ocupada	Muy Chica	0.2307												
	Chica	0.7692												
2		$A_P = 10312.5$ $A_E = 36250.0$ $T_H = 71.5517$ $\eta_A = 28.4482$	<table border="1"> <tr> <td rowspan="2">Tasa de Huecos</td> <td>Muy Grande</td> <td>0.0775</td> </tr> <tr> <td>Grande</td> <td>0.9224</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Eficiencia de Área Ocupada</td> <td>Muy Chica</td> <td>0.0775</td> </tr> <tr> <td>Chica</td> <td>0.9224</td> </tr> </table>	Tasa de Huecos	Muy Grande	0.0775	Grande	0.9224	Eficiencia de Área Ocupada	Muy Chica	0.0775	Chica	0.9224	$z_2^* = 18.6034$
Tasa de Huecos	Muy Grande	0.0775												
	Grande	0.9224												
Eficiencia de Área Ocupada	Muy Chica	0.0775												
	Chica	0.9224												

3		$A_P = 10312.5$ $A_E = 20000.0$ $T_H = 48.4375$ $\eta_A = 51.5625$	<table border="1"> <tbody> <tr> <td rowspan="2">Tasa de Huecos</td> <td>Media</td> <td>0.9218</td> </tr> <tr> <td>Chica</td> <td>0.0781</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Eficiencia de Área Ocupada</td> <td>Media</td> <td>0.9218</td> </tr> <tr> <td>Grande</td> <td>0.0781</td> </tr> </tbody> </table>	Tasa de Huecos	Media	0.9218	Chica	0.0781	Eficiencia de Área Ocupada	Media	0.9218	Grande	0.0781	$z_3^* = 32.3437$
Tasa de Huecos	Media	0.9218												
	Chica	0.0781												
Eficiencia de Área Ocupada	Media	0.9218												
	Grande	0.0781												
4		$A_P = 10312.5$ $A_E = 14850.0$ $T_H = 30.5555$ $\eta_A = 69.4444$	<table border="1"> <tbody> <tr> <td rowspan="2">Tasa de Huecos</td> <td>Media</td> <td>0.0277</td> </tr> <tr> <td>Chica</td> <td>0.9722</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Eficiencia de Área Ocupada</td> <td>Media</td> <td>0.0277</td> </tr> <tr> <td>Grande</td> <td>0.9722</td> </tr> </tbody> </table>	Tasa de Huecos	Media	0.0277	Chica	0.9722	Eficiencia de Área Ocupada	Media	0.0277	Grande	0.9722	$z_4^* = 59.1666$
Tasa de Huecos	Media	0.0277												
	Chica	0.9722												
Eficiencia de Área Ocupada	Media	0.0277												
	Grande	0.9722												
5		$A_P = 10312.5$ $A_E = 11250.0$ $T_H = 8.3333$ $\eta_A = 91.6666$	<table border="1"> <tbody> <tr> <td>Tasa de Huecos</td> <td>Muy Chica</td> <td>0.7471</td> </tr> <tr> <td>Eficiencia de Área Ocupada</td> <td>Muy Grande</td> <td>0.7222</td> </tr> </tbody> </table>	Tasa de Huecos	Muy Chica	0.7471	Eficiencia de Área Ocupada	Muy Grande	0.7222	$z_5^* = 100.0$				
Tasa de Huecos	Muy Chica	0.7471												
Eficiencia de Área Ocupada	Muy Grande	0.7222												

De las cinco posiciones se tienen los siguientes valores de bondad:

$$z_1^* = 15.8461$$

$$z_2^* = 18.6034$$

$$z_3^* = 32.3437$$

$$z_4^* = 59.1666$$

$$z_5^* = 100.00$$

Se tiene que la mejor bondad es la $z_5^* = 100.00$ por lo que la posición óptima de acomodo para esta pieza es la que se muestra en la figura 4.15.

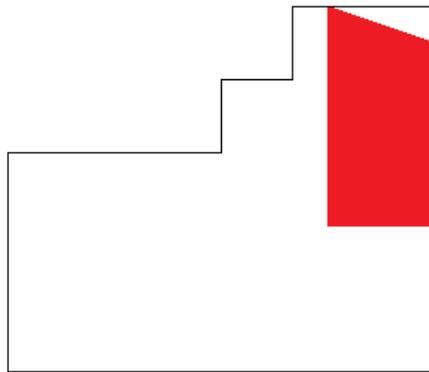
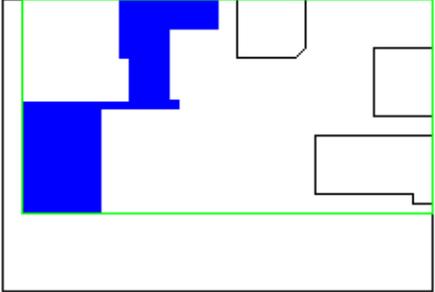
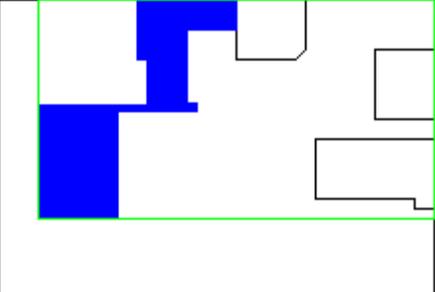
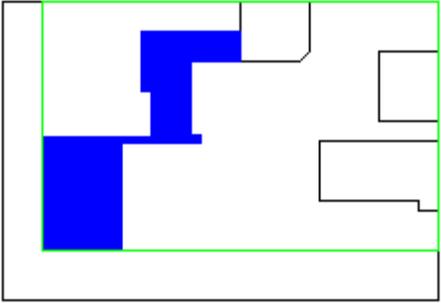
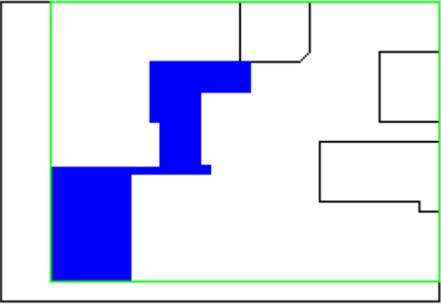
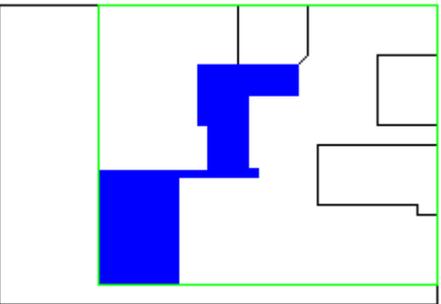
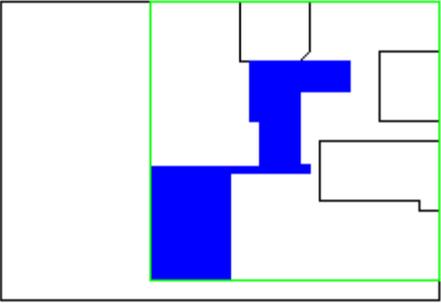
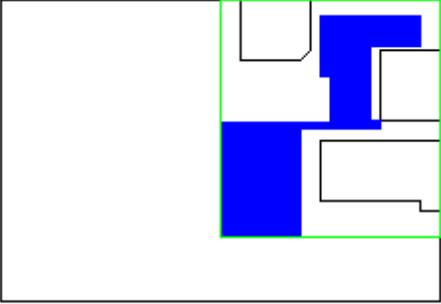
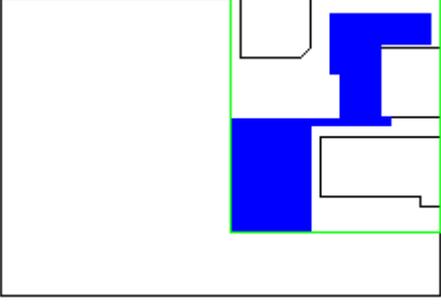


Figura 4.15. Posición Óptima

PRUEBA 3.

Posición	Imagen	Variables de entrada	Difusión	Desdifusión										
1		$A_p = 3990.0$ $A_E = 23100.0$ $T_H = 82.7272$ $\eta_A = 17.2727$	<table border="1"> <tr> <td rowspan="2">Tasa de Huecos</td> <td>Muy Grande</td> <td>0.6363</td> </tr> <tr> <td>Grande</td> <td>0.3636</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Eficiencia de Área Ocupada</td> <td>Muy Chica</td> <td>0.6363</td> </tr> <tr> <td>Chica</td> <td>0.3636</td> </tr> </table>	Tasa de Huecos	Muy Grande	0.6363	Grande	0.3636	Eficiencia de Área Ocupada	Muy Chica	0.6363	Chica	0.3636	$z_1^* = 8.5454$
Tasa de Huecos	Muy Grande	0.6363												
	Grande	0.3636												
Eficiencia de Área Ocupada	Muy Chica	0.6363												
	Chica	0.3636												
2		$A_p = 3990.0$ $A_E = 22000.0$ $T_H = 81.8636$ $\eta_A = 18.1363$	<table border="1"> <tr> <td rowspan="2">Tasa de Huecos</td> <td>Muy Grande</td> <td>0.5931</td> </tr> <tr> <td>Grande</td> <td>0.4068</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Eficiencia de Área Ocupada</td> <td>Muy Chica</td> <td>0.5931</td> </tr> <tr> <td>Chica</td> <td>0.4068</td> </tr> </table>	Tasa de Huecos	Muy Grande	0.5931	Grande	0.4068	Eficiencia de Área Ocupada	Muy Chica	0.5931	Chica	0.4068	$z_2^* = 9.3227$
Tasa de Huecos	Muy Grande	0.5931												
	Grande	0.4068												
Eficiencia de Área Ocupada	Muy Chica	0.5931												
	Chica	0.4068												

3		$A_P = 3990.0$ $A_E = 25000.0$ $T_H = 84.04$	<table border="1"> <tbody> <tr> <td rowspan="2">Tasa de Huecos</td> <td>Muy Grande</td> <td>0.7020</td> </tr> <tr> <td>Grande</td> <td>0.2979</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Eficiencia de Área Ocupada</td> <td>Muy Chica</td> <td>0.7020</td> </tr> <tr> <td>Chica</td> <td>0.2979</td> </tr> </tbody> </table>	Tasa de Huecos	Muy Grande	0.7020	Grande	0.2979	Eficiencia de Área Ocupada	Muy Chica	0.7020	Chica	0.2979	$z_3^* = 7.3639$
Tasa de Huecos	Muy Grande	0.7020												
	Grande	0.2979												
Eficiencia de Área Ocupada	Muy Chica	0.7020												
	Chica	0.2979												
4		$A_P = 3990.0$ $A_E = 27300.0$ $T_H = 85.3846$ $\eta_A = 14.6153$	<table border="1"> <tbody> <tr> <td rowspan="2">Tasa de Huecos</td> <td>Muy Grande</td> <td>0.7692</td> </tr> <tr> <td>Grande</td> <td>0.2307</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Eficiencia de Área Ocupada</td> <td>Muy Chica</td> <td>0.7692</td> </tr> <tr> <td>Chica</td> <td>0.2307</td> </tr> </tbody> </table>	Tasa de Huecos	Muy Grande	0.7692	Grande	0.2307	Eficiencia de Área Ocupada	Muy Chica	0.7692	Chica	0.2307	$z_4^* = 6.1538$
Tasa de Huecos	Muy Grande	0.7692												
	Grande	0.2307												
Eficiencia de Área Ocupada	Muy Chica	0.7692												
	Chica	0.2307												
5		$A_P = 3990.0$ $A_E = 23800.0$ $T_H = 83.2352$ $\eta_A = 16.7647$	<table border="1"> <tbody> <tr> <td rowspan="2">Tasa de Huecos</td> <td>Muy Grande</td> <td>0.6617</td> </tr> <tr> <td>Grande</td> <td>0.3382</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Eficiencia de Área Ocupada</td> <td>Muy Chica</td> <td>0.6617</td> </tr> <tr> <td>Chica</td> <td>0.3382</td> </tr> </tbody> </table>	Tasa de Huecos	Muy Grande	0.6617	Grande	0.3382	Eficiencia de Área Ocupada	Muy Chica	0.6617	Chica	0.3382	$z_5^* = 8.0882$
Tasa de Huecos	Muy Grande	0.6617												
	Grande	0.3382												
Eficiencia de Área Ocupada	Muy Chica	0.6617												
	Chica	0.3382												

6		$A_P = 3990.0$ $A_E = 20300.0$ $T_H = 80.3448$ $\eta_A = 19.6551$	<table border="1"> <tbody> <tr> <td rowspan="2">Tasa de Huecos</td> <td>Muy Grande</td> <td>0.5172</td> </tr> <tr> <td>Grande</td> <td>0.4827</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Eficiencia de Área Ocupada</td> <td>Muy Chica</td> <td>0.5172</td> </tr> <tr> <td>Chica</td> <td>0.4827</td> </tr> </tbody> </table>	Tasa de Huecos	Muy Grande	0.5172	Grande	0.4827	Eficiencia de Área Ocupada	Muy Chica	0.5172	Chica	0.4827	$z_6^* = 10.6896$
Tasa de Huecos	Muy Grande	0.5172												
	Grande	0.4827												
Eficiencia de Área Ocupada	Muy Chica	0.5172												
	Chica	0.4827												
7		$A_P = 3990.0$ $A_E = 12980.0$ $T_H = 69.2604$ $\eta_A = 30.7395$	<table border="1"> <tbody> <tr> <td rowspan="2">Tasa de Huecos</td> <td>Grande</td> <td>0.9630</td> </tr> <tr> <td>Media</td> <td>0.0369</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Eficiencia de Área Ocupada</td> <td>Chica</td> <td>0.9630</td> </tr> <tr> <td>Media</td> <td>0.0369</td> </tr> </tbody> </table>	Tasa de Huecos	Grande	0.9630	Media	0.0369	Eficiencia de Área Ocupada	Chica	0.9630	Media	0.0369	$z_7^* = 20.3697$
Tasa de Huecos	Grande	0.9630												
	Media	0.0369												
Eficiencia de Área Ocupada	Chica	0.9630												
	Media	0.0369												
8		$A_P = 3990.0$ $A_E = 12390.0$ $T_H = 67.7966$ $\eta_A = 32.2033$	<table border="1"> <tbody> <tr> <td rowspan="2">Tasa de Huecos</td> <td>Grande</td> <td>0.8898</td> </tr> <tr> <td>Media</td> <td>0.1101</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Eficiencia de Área Ocupada</td> <td>Chica</td> <td>0.8898</td> </tr> <tr> <td>Media</td> <td>0.1101</td> </tr> </tbody> </table>	Tasa de Huecos	Grande	0.8898	Media	0.1101	Eficiencia de Área Ocupada	Chica	0.8898	Media	0.1101	$z_8^* = 21.1016$
Tasa de Huecos	Grande	0.8898												
	Media	0.1101												
Eficiencia de Área Ocupada	Chica	0.8898												
	Media	0.1101												

De las ocho posiciones se tienen los siguientes valores de bondad:

$$z_1^* = 8.5454$$

$$z_2^* = 9.3227$$

$$z_3^* = 7.3639$$

$$z_4^* = 6.1538$$

$$z_5^* = 8.0882$$

$$z_6^* = 10.6896$$

$$z_7^* = 20.3697$$

$$z_8^* = 21.1016$$

Se tiene que la mejor bondad es la $z_8^* = 21.1016$ por lo que la posición óptima de acomodo para esta pieza es la que se muestra en la figura 4.16.

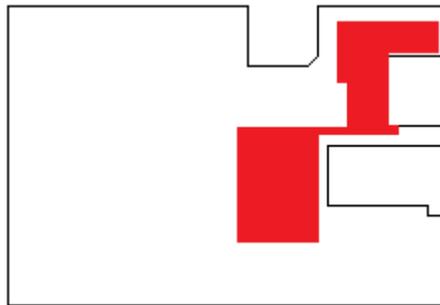


Figura 4.16. Posición Óptima

5. Discusión de Resultados

De manera general se presentan tres de las pruebas más significativas hechas con el algoritmo difuso. Las piezas seleccionadas van desde geometrías tan simples como lo es un rectángulo, hasta geometrías que presentan mayores irregularidades, tanto de perfil como de pieza, tales irregularidades conllevan huecos en el acomodo. De tal forma que se muestra como trabaja el algoritmo con cualquier tipo de geometría.

La primera prueba es la más básica, pues muestra un perfil sencillo y una pieza a acomodar similar. En ella se observa claramente cómo se van reduciendo los huecos al ir recorriendo el contorno.

En la segunda prueba se propone un perfil con tres irregularidades y una pieza a acomodar que tendrá un hueco, de tal forma que en cualquier acomodo y por la forma del perfil ese hueco no puede evitarse, a pesar de este hueco se logra llegar a la posición óptima, teniéndose una bondad de 100%. Esta prueba pasa por bondades que van desde muy mala a muy buena pues sus valores de bondad son desde 15% a 100%.

Finalmente se tiene un perfil de forma aún más irregular y una pieza a acomodar irregular. Se observa claramente que se tienen desde bondades que van de 6% a 20%, debido a los huecos que no pueden evitarse dadas las complejidades de ambas geometrías. Sin embargo, a pesar de estos valores bajos de bondad, el algoritmo es capaz de seleccionar la posición óptima.

Ahora bien de estas conclusiones generales se puede resaltar lo siguiente, siendo que se va de un contenedor sencillo hasta uno muy irregular y de una pieza a acomodar sencilla hasta una irregular, y dado que en los tres casos el algoritmo fue capaz de elegir la posición óptima, se puede decir que el algoritmo es general, es decir, que funciona para perfiles y piezas a acomodar de toda geometría. Lo anterior se observa más claramente en la prueba 3.

También es importante resaltar que se buscó que las variables a tomar en cuenta en el algoritmo fueran las que proporcionaran la suficiente información como para tomar la posición óptima. Se concluye que las variables seleccionadas, la Tasa de Huecos y la Eficiencia de Área Ocupada son las adecuadas puesto que se logra seleccionar una posición óptima en cualquier caso. Esto es evidente en los tres ejemplos, sobre todo al hablar de la Tasa Huecos, ya que en cada una de las pruebas se manejó la misma pieza a acomodar en sus distintas posiciones al recorrer el perfil, así la Eficiencia de Área Ocupada

se vuelve constante en cada prueba. Por lo que la Tasa de Huecos se vuelve predominante, dato que se observa desde el planteamiento de las FAM. Conjuntamente se puede decir que fue suficiente manejar dos conjuntos difusos, lo que resulta evidente en la prueba 3, pues a pesar de ser geometrías irregulares, y de que la posición 7 se asimila a la posición 8, el algoritmo logra discernir cual es el mejor acomodo entre las dos posiciones. Tomando como referencia las posiciones antes mencionadas se puede notar otro punto de vital importancia. Anteriormente en el capítulo 1 se menciona que la lógica difusa se aproxima al pensamiento humano, que no es una lógica absoluta, que permite ver en qué grado el vaso está medio lleno o medio vacío, es decir los acomodos que se eligen después de llevar a cabo el algoritmo difusos son los que elegiría una persona con un grado de conocimiento empírico en cuanto a acomodo de piezas, de manera inmediata esta persona se daría cuenta que la posición 8 es mejor por sobre la posición 7, por el simple hecho que la primera está pegada al contorno del contenedor y la segunda deja un pequeño hueco.

De lo anterior se puede aseverar que el algoritmo propuesto y los conjuntos elegidos permiten tomar la decisión que tomaría una persona capacitada para la labor de acomodar piezas en un contenedor. Lo que nos lleva a concluir que no sólo se eligieron bien los conjuntos de entrada, sino que además se llevó a cabo una buena calibración de las funciones de membresía, pues de no ser así no se llegaría a las soluciones óptimas en todos los casos. Una mala calibración nos llevaría al funcionamiento del algoritmo sólo en ciertos casos, dejando a los más complejos fuera de su ámbito de solución. Esto se puede apreciar claramente en los tres casos, pues en los tres toma la posición óptima, sin importar las irregularidades, ya sean del contenedor o de la pieza a acomodar.

Siendo que las pruebas muestran que el algoritmo toma la decisión que tomaría una persona capacitada para esta labor, se puede decir que una vez implementado en la industria textil podrían reducir los costos de mano de obra, permitiendo utilizar esa mano de obra en otras actividades. Además de los costos de manos de obra se reducen los costos en el gasto de material, ya que el algoritmo permite que se desperdicie la menor cantidad posible de material. Y como se ha mencionado en varias ocasiones es lo primordial en el problema de Nesting y tomando en cuenta que entre mejor sea el ahorro del material será menor el gasto de manufactura de un par de zapatos, lo que es proporcional también con la cantidad de zapatos producidos.

En el Nesting es deseable reducir el tiempo, pero no es prioritario. El algoritmo hace la elección de la posición óptima en un tiempo de 484 milisegundos para la prueba 1, 624 ms para la prueba 2 y 702 ms para la prueba 3. Tomando en cuenta que el algoritmo se ejecutó en un equipo con un procesador Intel Core 2 Duo a 2GHz con memoria de 3GB. El

tiempo de ejecución pudiera mejorarse con un equipo más potente si se utilizara en la industria. Y los milisegundos ahorrados en cada ejecución serían más significativos en la industria puesto que se trata de acomodar la mayor cantidad de piezas en grandes contenedores.

Trabajo a Futuro

Como se mencionó en el capítulo dos, este trabajo no resuelve el problema de Nesting, sin embargo se encamina hacia poder resolverlo. A futuro se podría considerar la ampliación del algoritmo de tal manera que resuelva el Nesting de forma óptima.

Cabe mencionar que para resolver el Nesting, y pensando propiamente en la industria del calzado, habría que considerar otros conjuntos difusos en el algoritmo. Tales conjuntos deberán considerar que las pieles no son de constitución perfecta no homogénea, sino que tienen varias imperfecciones y en ocasiones perforaciones.

La no homogeneidad se refiere a que la piel está dividida en diferentes zonas de calidad; para dar una solución a esto es necesario agregar un conjunto que nos permita situar las piezas del calzado en la zona de calidad de la piel que le corresponde, considerando que una pieza del calzado de calidad x solo puede ir en una zona de la piel de igual o mejor calidad.

El problema de los defectos y perforaciones en la piel se podría resolver marcando esas zonas y para desperdiciar la menor cantidad de piel se podría considerar un conjunto ángulo que permitiera que la pieza rotara ciertos grados, de tal forma que se pudiera acoplar. Esto sin duda mejoraría y resolvería el problema del Nesting.

Referencias

- [1] Cisneros Enriquez Axel Javier, Sósol Díaz Omar Alejandro. Desarrollo de un sistema de AGVs (vehículos guiados automáticamente) guía, de lazo abierto y perseguidor, con control por lógica difusa. Facultad de Ingeniería, UNAM, 2005.
- [2] Kosko, Bart an Isaka, Satoru; Lógica Borrosa, Investigación y Ciencia, septiembre, 1993
- [3] Escamilla Ambrosio Ponciano Jorge. Planteamiento y prueba de un nuevo método para realizar el proceso de defuzificación en controladores difusos. División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, 2000
- [4] Arostegui Bautista Noel, Pérez Montaña Luis Miguel, Torres Hernández Jonatan. Diseño e Implementación de un controlador difuso para mantener una plataforma de cuatro rotores suspendida en le aire. Facultad de Ingeniería, UNAM, 2005.
- [5] Ross, Timothy J. Fuzzy Logic with Engineering Applications. McGraw Hill 1995
- [6] Kosko, Bart. Fuzzy Engineering. Prentice Hall 1997
- [7] RISI 1(1), 83-86 (2004). Rev. investig. sist. inform. Facultad de Ingeniería de Sistemas e Informática. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
ISSN: 1815-0268
- [8] David Cruz Rojas. Guía de Java Básico. Instituto Politécnico Nacional, 2005
- [9] Ricardo Sandoval Vázquez. Fundamentos de Java. Facultad de Ingeniería, Unidad de Servicios de Cómputo Académico, 2007.
- [10] Programa para la Competitividad de la Industria del Cuero y Calzado. Secretaria de Economía. (inédito)
- [11] Alev Soke y Zafer Bingul (2006). Hybrid genetic algorithm and simulated annealing for two-dimensional non-guillotine rectangular packing problems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 19 (2006) 557–567
- [12] Hsu-Hao Yang, Chien-Li Lin. On genetic algorithms for shoe making nesting - A Taiwan case. *Expert Systems with Applications*, 36 (2009) 1134-1141.
- [13] A Ramesh Babu y N. Ramesh Babu (2001). A generic approach for nesting of 2-D parts in 2-D sheets using genetic and heuristics algorithms. *Computer-Aided Design*, 33 (2001) 879-891.