



*Trabajo final presentado
en opción al Título de
Máster en Automática*

Autor: Ing. Ángel Raúl Ricardo Rodríguez

Tutores: Dr. Israel Francisco Benítez Pina

Dr. Guillermo González Yero

Santiago de Cuba

2022



UNIVERSIDAD
DE ORIENTE

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Ingeniería en Automática

*Trabajo final presentado en
opción al Título de Máster en
Automática*

Título: Automatización integrada para la planificación y control del proceso en la acería.

Autor: Ing. Ángel Raúl Ricardo Rodríguez

Tutores: Dr. Israel Francisco Benítez Pina

Dr. Guillermo González Yero

Pensamientos

“Podemos mirar el estado presente del universo como el efecto del pasado y la causa de su futuro. Se podría condensar un intelecto que en cualquier momento dado sabría todas las fuerzas que animan la naturaleza y las posiciones de los seres que la componen, si este intelecto fuera lo suficientemente vasto para someter los datos al análisis, podría condensar en una simple fórmula de movimiento de los grandes cuerpos del universo y del átomo más ligero; para tal intelecto nada podría ser incierto y el futuro así como el pasado estarían frente sus ojos.”

Pierre Simon Laplace

Dedicatoria

A la memoria de Amelia Esther Concepción López:

A la memoria de Ángel Tomás Rodríguez Velazco:

A ustedes, queridos Abuelos.

Agradecimientos

Agradezco a todas las personas que de alguna u otra forma aportaron a la realización de este trabajo, en especial

A mi esposa por darme la fuerza en los momentos difíciles.

A mi nené Amelia Lucía por llegar y estar ahí dando su radiante felicidad.

A toda la familia que de alguna forma me aportaron su granito de arena.

A mis tutores por su entrega, dedicación y disposición de siempre brindar sus conocimientos sin pedir nada más que esfuerzo y empeño.

A mis compañeros y amigos por haber permitido que estos años no fueran tan difíciles.

A todos muchas gracias.

Resumen

Este trabajo fue realizado en la empresa ACINOX Las Tunas, Cuba, con el objetivo de diseñar una arquitectura de automatización integrada basadas en agentes inteligentes para el control, monitoreo y tomas de decisiones en el proceso de producción que garantice una mejoría en la planificación y gestión del proceso en la acería. Las grandes diferencias de tecnologías y sistemas de cada acería y las múltiples restricciones, métodos y técnicas, dentro de una amplia dinámica particular fuertemente concatenada, no hacen viable la generalización de sistemas de automatización. En esta investigación, se parte de la actualidad internacional y la experiencia de los tecnólogos de la planta para crear tres niveles de arquitectura inteligente distribuida: Negocio, Planificación-control de producción y el de Fabricación de acero. Cada nivel logra integrar y balancear los intereses particulares y generales para una eficiente toma de decisiones combinada entre jerarquía y heterarquía en esta acería, lo cual se verá reflejado en una disminución de al menos el 99 % del tiempo empleado para la toma de decisiones con respecto al sistema actual, lo cual puede incidir en una disminución de los gastos de refractarios, del consumo energético y del costo de producción. Se demuestra la efectividad de la solución con una validación por escenarios y una evaluación de expertos.

Abstract

This work was carried out at the company ACINOX Las Tunas, Cuba, with the aim of designing an integrated automation architecture based on intelligent agents for control, monitoring and decision-making in the production process that guarantees an improvement in planning and management. of the process in the steel mill. The great differences in technologies and systems of each steel mill and the multiple restrictions, methods and techniques, within a wide particular dynamic strongly linked, do not make the generalization of automation systems feasible. In this research, it is based on international news and the experience of the technologists of the plant to create three levels of distributed intelligent architecture: Business, Planning-production control and Steel Manufacturing. Each level manages to integrate and balance the particular and general interests for an efficient decision-making combined between hierarchy and heterarchy in this steel mill, which will be reflected in a reduction of at least 99% of the time used for decision-making with respect to the current system, which can lead to a decrease in refractory costs, energy consumption and production cost. The effectiveness of the solution is demonstrated with a scenario validation and expert evaluation.

Índice

Introducción.....	1
Capítulo 1. Marco teórico	4
1.1. Caracterización gnoseológica de la automatización industrial integrada en los modelos de automatización	5
1.1.1. Descripción del flujo tecnológico en la acería	7
1.1.2. Caso de Estudio.....	12
1.1.3. Los sistemas multiagentes para la automatización industrial integrada	18
1.1.4. Sistema Automatizado Distribuido Inteligente Basado en Agentes.	29
1.1.5. Bases de Conocimiento	33
Conclusiones	34
Capítulo 2. Sistema de automatización distribuido inteligente basado en agentes	36
Introducción.....	36
2.1. Arquitectura del Sistema Multi-Agente propuesto para el sistema de automatización de la acería.....	36
2.1.1. Primera etapa de diseño	36
2.1.2. Modelado y Simulación de la estructura.....	45
2.1.3. Programación, Simulación y validación de la propuesta	46
Descripción de la estructura del programa	49
POU Descripción general	49
2.2. Descripción de la Inteligencia Artificial implementada	51
Conclusiones del capítulo.....	74
Conclusiones generales	75
Recomendaciones	77
Bibliografía	78
Anexos	86

Lista de símbolos, términos especiales y abreviaturas no normalizadas

IA Inteligencia Artificial

CIM Manufactura Integrada por Computadoras

MAS Sistemas Multi-Agentes

MGS Medio de Gestión de Servicios

SADIA Sistema Automatizado Distribuido Inteligente Basado en Agentes

SCDIA Sistema de Control Distribuido Inteligente Basado en Agentes

HAE Horno de Arco Eléctrico

HC Horno cuchara

IVC Instalación de Vaciado Continuo

ASG Aseguramiento

POU Unidad de Organización de Programa

MVA Mega Volt Amper

ERP Sistema de planificación de recursos empresariales

MES Sistemas de ejecución de fabricación

SCADA Sistemas de control y adquisición de datos

HMI Interface Hombre Máquina

PLC Controlador Lógico Programable

MASID Sistema Multi-Agentes para la Integración dinámica

FAES Sistema experto basado en lógica difusa

TS Algoritmo de búsqueda de Tabú

GA Algoritmo Genético

ACO Algoritmo de optimización basado en colonias de hormigas

PSO Algoritmo de optimización basado en lluvias de partículas

CFC Lenguaje de diagramas de función continua

FOA Optimización de la mosca de la fruta

ST Texto estructurado

SCL Lenguaje de control estructurado

INTRODUCCIÓN

La industria del acero se caracteriza por tener grandes, complejos y variados procesos. Para el control de estos procesos se requiere una plataforma tecnológica que pueda manejar e interpretar grandes volúmenes de datos de forma automática como apoyo de las tomas de decisiones ante el surgimiento de incertidumbres, indispensable para una adecuada planificación de la producción [1].

Con un clásico modelo piramidal jerárquico de manufactura integrada por computadoras CIM (del inglés *Computer Integrated Manufacturing*) existente en la fábrica actual [2], no se da respuesta a las necesidades actuales de la industria [3], debido, fundamentalmente, a los retrasos en la transmisión de la información y toma de decisiones derivadas de la rigidez y poca flexibilidad de la estructura existente en la actualidad [2].

Por esto se estudian las arquitecturas distribuidas basadas en agentes con características de reactividad y flexibilidad insertadas en la plataforma de automatización ante perturbaciones en el proceso productivo. Se integra la experiencia internacional y la de los tecnólogos de la planta para crear una arquitectura de inteligencia artificial distribuida para la plataforma de automatización de la industria del acero en ACINOX Las Tunas que garantice una mejoría en la planificación y gestión del proceso en la acería, logrando así aumentar la productividad y disminuir los costos de producción [2, 3].

Por lo anterior expuesto se define como **problema científico**: Los bajos índices de productividad, eficiencia y “calidad inestable”, derivados una pobre respuesta ante las incertidumbres y elevados tiempos de reconfiguración, que afecta la gestión de tiempo en el cronograma de producción en las acerías [4].

Objeto de Investigación.

La automatización industrial integrada en los modelos de automatización.

Campo de Acción.

Los Sistemas Multi-agentes para la automatización industrial integrada en acerías.

Objetivo.

Diseño de un sistema multi-agentes que logre un equilibrio entre reactividad y proactividad para una mejor gestión de la producción en la acería de ACINOX Las Tunas.

Hipótesis.

Si se logra la integración de la Automática mediante el diseño de un Sistema Automatizado Distribuido Inteligente basado en Agentes para la gestión de la producción en una acería, estaríamos en presencia de un sistema con mejor respuesta ante las incertidumbres logrando mejorías en los índices de eficiencia del proceso de producción de acero.

Tareas de la investigación.

1. Caracterizar la automatización industrial integrada y la aplicación de sistemas Multi-agentes reportados para acerías, así como el estado actual del caso de estudio.
2. Seleccionar métricas para comparar con la gestión actual del proceso en la acería.
3. Identificación de los procedimientos de operación para la producción de acero, a partir de una selección de métodos de recolección de la información.
4. Realizar el diseño de simulación de la propuesta en Redes Petri.
5. Validación de la propuesta mediante el diseño de un experimento.
6. Realizar la valoración del sistema de automatización industrial integrada con sistema Multi-agentes propuesto para el caso de estudio, a través de la valoración de las métricas planteadas, así como la corroboración de su viabilidad y factibilidad mediante la obtención de criterios de especialistas.

Los **métodos** usados para la investigación fueron los siguientes:

1. Observación y Encuesta. Este método permitió recopilar información referente al proceso de fabricación de acero para la elaboración del diseño de la investigación.

2. Medición. Método que permitió la obtención de los valores numéricos de las variables del proceso para su posterior análisis.

3. Análisis y Síntesis. La aplicación de este método permitió el análisis de las variables utilizadas en el proceso después de aplicada la arquitectura de control de automatización Integrada.

4. Histórico-Lógico. Permitted conocer la evolución, desarrollo y variación de los variables del proceso después de haber aplicado la arquitectura de control de Automatización Integrada.

Este trabajo está organizado de la siguiente manera: el primer capítulo contiene el marco teórico que fue requerido para el desarrollo de la propuesta de investigación, el segundo capítulo presenta una descripción general del diseño de la arquitectura de referencia desarrollada y estudio de la aplicación de la arquitectura al proceso de producción de acero. Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones derivadas del trabajo.

Capítulo 1. MARCO TEÓRICO

Introducción

En esta sección se presentará una descripción de los aspectos teóricos utilizados como base para el planteamiento de este trabajo de investigación. En primer lugar, se realiza una breve reseña de la automatización industrial, tipos de automatización industrial existentes, dentro de ellos la automatización integrada, objetivos, definición y modelos. Se definen los Agentes, sus propiedades, caracterización, descripción práctica y sistemas multiagentes. También se hace una descripción del flujo tecnológico en la acería y gestión de proceso en la misma. Para esto se parte de dos conceptos básicos:

1. Gerencia Integrada de Producción es el proceso en el cual la información acerca de todos los aspectos de la producción de la empresa es manejada integralmente para definir y actualizar continuamente el plan óptimo de producción. La Gerencia Integrada de Producción permite la reconfiguración flexible de los procesos de la empresa para adaptarlos en tiempo real a los cambios de estrategia, táctica y de condiciones de operación de la empresa.[5]

2. Tipos de automatización industrial:

- Automatización fija: Su objetivo es la producción de grandes volúmenes de piezas idénticas, donde no se plantea la posibilidad de personalización. Este tipo de automatización representa costes muy bajos, pero no contemplan nuevas configuraciones para la producción de productos diferentes. Por ejemplo, la máquina de fabricación de platos.
- Automatización programable: Producción de volúmenes bajos. Con una variedad de productos y la posibilidad de reconfigurar y reajustar las máquinas y el software. Por ejemplo, una fresadora.
- Automatización flexible: Este tipo de automatización es la combinación de fija y programable. Se dedica a la producción de medianos volúmenes, permitiendo ajustes periódicos en la línea de producción. Ejemplo, la industria del plástico.
- Automatización integrada: Los procesos cada vez más complejos de fabricación industrial generan más requisitos para la tecnología de la automatización en

relación con el rendimiento, la funcionalidad y la eficacia. La clave es la automatización integrada donde la programación es más rápida e incluso fácil [6].

Dadas las ventajas de este último tipo de automatización para el control y supervisión de la acería y su relación con la gerencia integrada de la producción, este capítulo se centra en presentar el estado del arte internacional en el tema y su relación con el problema científico a resolver en la tesis.

1.1. CARACTERIZACIÓN GNOSEOLÓGICA DE LA AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL INTEGRADA EN LOS MODELOS DE AUTOMATIZACIÓN.

Arquitecturas de Automatización Industrial

Un modelo de automatización consiste en una manera genérica de organizar e integrar componentes del sistema; especificando la estructura general del sistema y mostrando cuales tareas han de ser ejecutadas. Además, permite al diseñador el uso del modelo para especificar una arquitectura que establezca los aspectos más importantes que deben considerarse durante el proceso de modelado e integración empresarial y su verificación y validación antes de la implementación.

Se han propuesto varios enfoques de Arquitecturas de Automatización para modelar una empresa desde el punto de vista de automatización y abordar así el problema de la complejidad de sus procesos [7-17]. Entre estos enfoques, el mayormente implantado es el modelo jerárquico piramidal de fabricación integrada por computadora CIM propuesto por la norma ANSI/ISA [18], que se muestra en la figura 1.

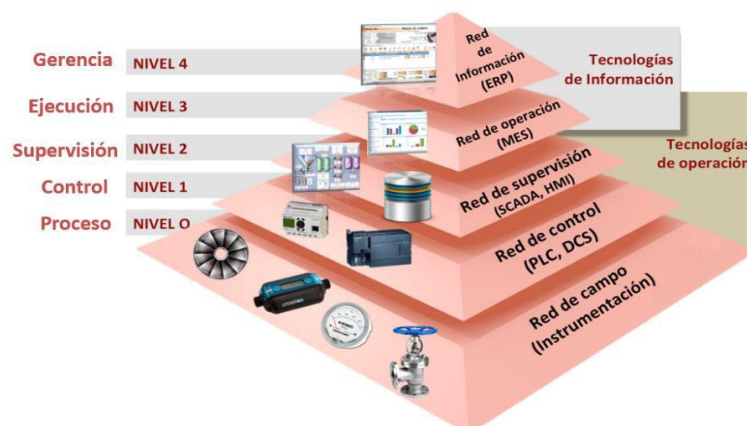


Fig. 1 Modelo CIM jerárquico clásico. Aguilar et al 2013 [19]

Este tipo de arquitectura plantea una jerarquía en donde la información del proceso va desde los niveles más bajos a los más altos y las órdenes y consignas de operación van desde los niveles más altos a los más bajos. Este enfoque provee control sobre los sistemas de la empresa, ya que los subsistemas de los niveles altos definen el comportamiento de los subsistemas en los niveles de proceso. Sin embargo, este tipo de arquitecturas pueden ser extremadamente rígida a medida que aumenta la complejidad de los procesos a automatizar.

Otro enfoque es el de la arquitectura de un modelo heterárquico [9, 12, 13, 16, 19, 20] representado en la figura 2

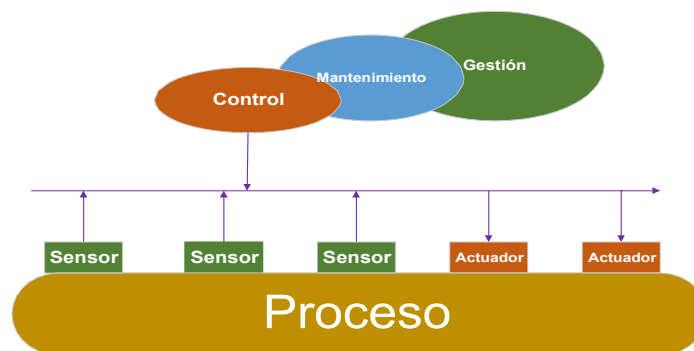


Fig. 2 Modelo Heterárquico Aguilar et al. 2013 [19]

La implementación de este último tipo de modelos, en general, se ha realizado a través de Sistemas Multiagentes y la incorporación de dispositivos de control local inteligentes. Sin embargo, la implantación en ambientes industriales de los modelos heterárquicos todavía es incipiente, siendo los procesos de manufactura donde mayormente se ha incursionado, presentando como ventajas la flexibilidad del sistema para reaccionar y reconfigurarse antes cambios en los procesos productivos. Sin embargo, presentan desventajas como son la demora en la toma de decisiones y negociaciones no efectivas. Un tercer enfoque son los Modelos Híbridos [21-28]. Están constituidos por aquellos modelos que combinan las ventajas de los sistemas jerárquicos y heterárquicos, al mismo tiempo que evitan sus desventajas. Se caracterizan por otorgar autonomía a los módulos individuales en cada nivel jerárquico para evitar las estructuras rígidas de los sistemas jerárquicos. Esto dota al sistema de un mecanismo para generar respuestas

rápidas ante perturbaciones y la habilidad para reconfigurarse así mismo ante nuevos requerimientos. Poseen ciertas heterarquías para prevenir las desventajas de jerarquía total, como sucede en los sistemas piramidales. Los elementos de la arquitectura pueden pertenecer a múltiples jerarquías flexibles, o formar jerarquías temporales, donde no existe dependencia de niveles para el funcionamiento del modelo. La existencia de jerarquías flexibles asegura el desempeño controlable y predecible de la arquitectura.

El enfoque presentado en este trabajo consiste en una propuesta de una arquitectura de MAS (del inglés *Multi-agent systems*) basado en un modelo híbrido [21], que integra las diferentes arquitecturas. No obstante, se requiere entender el proceso de la acería para comprender la necesidad de esta propuesta.

1.1.1. DESCRIPCIÓN DEL FLUJO TECNOLÓGICO EN LA ACERÍA

Se explican a continuación sus partes fundamentales representadas en la Fig.3:

1. Aseguramiento de la producción: El proceso tecnológico comienza con la descarga de chatarra de acero almacenándolas en fosos de acuerdo al tipo y densidad con la ayuda de dos grúas de 15 Toneladas equipadas con electroimanes y pulpos para la carga en las cestas con capacidad de 40m³. En aras de optimizar tiempo, una grúa se pone en función de la descarga del vagón y la otra de la carga en la cesta. Las cestas se encuentran ubicadas sobre un carro porta-cesta dotados con sistema de pesaje donde es pesado el contenido de las mismas. La primera cesta se carga con una capacidad de 25 Toneladas de acero, la segunda cesta con una capacidad de 20 Toneladas y la tercera con una capacidad de 15 toneladas para completar las 60 Toneladas de la colada. Luego de ser pesada la chatarra, el carro porta-cesta se desplaza hasta la nave o zona de la cesta. Mediante la ayuda de una grúa de 100 Toneladas, la cesta se desmonta del carro y se deposita en el área, en espera de la disponibilidad del Horno Arco Eléctrico (HAE) este proceso transcurre en un tiempo de aproximadamente 45 minutos.[29]

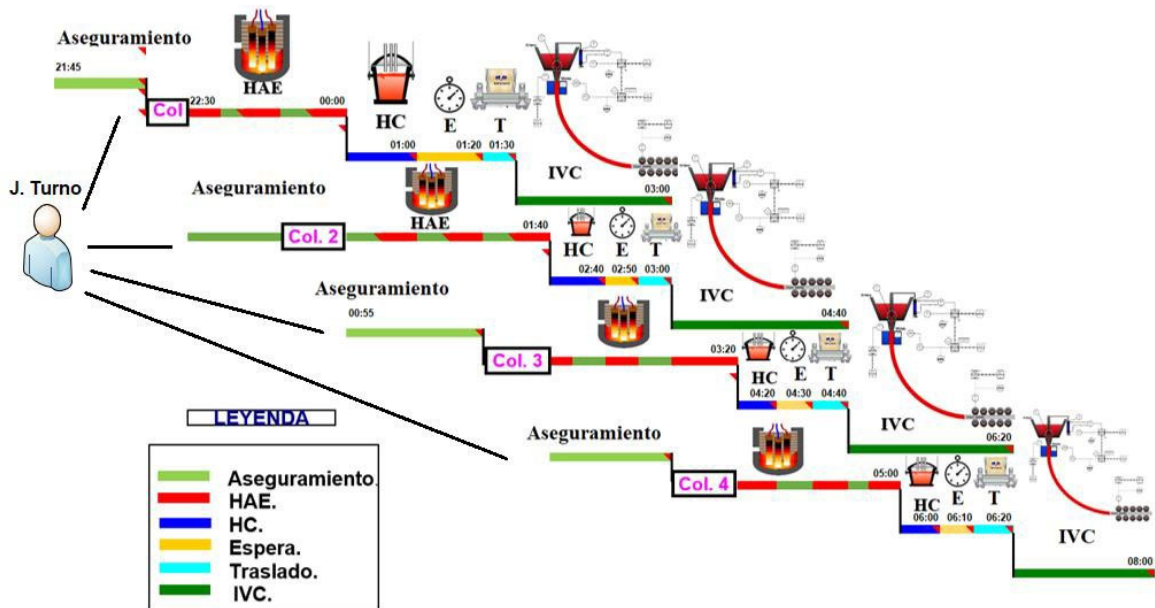


Fig. 3 Diagrama de tiempo del proceso de producción de acero. Elaboración propia.

2. Fusión de chatarra en el HAE: Las cestas son cargadas al HAE por medio de una grúa de 100 ton. El HAE trabaja con electrodos de grafito de 500 mm, consta con un transformador de 40 MVA de corriente alterna, paneles y Bóveda refrigerada con agua. Además, en el área de fusión existen otros equipos auxiliares: Manipulador de oxígeno supersónico de tres lanzas, dos de oxígeno y una de carbono, rampa de oxígeno, máquina para inyección de grafito, estación de preparación de electrodos y máquina para reparar el horno. La capacidad del Horno es de 60 ton y el vertido es por piqueta convencional. El proceso de fusión de la carga metálica es totalmente automatizado por un autómata programable ubicado en la cabina de mando acoplado a dos computadoras. El proceso de elaboración del acero se realiza por las siguientes etapas:

- Fusión de la carga (Intensificación con Oxígeno).
- Desfosforación.
- Calentamiento del acero (Escoria Espumosa).
- Reducción.
- Vertido.

La fusión de la carga se realiza durante la carga de tres cestas (ver tabla 2), luego de verter el acero de la colada precedente. Al terminar de verter y antes de la primera carga se realiza la revisión profiláctica del horno, donde se valora el estado del refractario, de los paneles enfriados con agua, y el largo de los electrodos. Luego se procede a la carga de la primera cesta, se cierra la bóveda y se conecta la corriente, descendiendo automáticamente los tres electrodos, que antes de hacer contacto con la chatarra, se forma un corto-circuito entre los electrodos-ánodo y la chatarra-cátodo, formándose el arco eléctrico, alcanzando una temperatura de 3000 a 5000°C, ocurriendo de esta forma la fusión de la chatarra.

Al inicio de la fusión se trabaja con potencia baja, luego se va aumentando paulatinamente hasta la máxima potencia permisible de acuerdo a la energía disponible en la línea de suministro de alta tensión. El proceso de Fusión es igual para todas las cestas. Durante la fusión de la primera y segunda cestas se adicionan aproximadamente 1.100kg de Cal para formar la escoria y lograr un Índice de Basicidad mayor de 2. Durante la fusión de carga metálica se inyecta Oxígeno al 99.5% de pureza para intensificar la fusión de la chatarra y disminuir el tiempo de fusión de la misma, que debe durar entre 65 y 70 min., momento en que se alcanza la temperatura de transformación de sólido a líquido que se encuentra en el rango 1535-1539°C.

Tabla 1 Tiempos de operación en el HAE.

Operación	Tiempo (Minutos)
Carga 1era cesta	3
Fusión de la 1era cesta al 80-90%	27
Carga 2da cesta	3
Fusión de la 2da cesta al 80-90%	22
Carga 3ra Cesta	3
Fusión 3era cesta al 100%	17
Calentamiento y afinado del metal (acero)	25
Tiempo total de fusión de la carga metálica	100

3. Afino del acero: Una vez fundida la 3ra. Cesta al 80-90%, se inyecta por una Lanza Oxígeno y por la otra Carbón Grafito en la interfase Metal-Escoria, con la formación de CO(g) a través de la reacción de $[C] + \frac{1}{2}O_2 = CO_{(g)}$, que Espuma la Escoria, cubriendo

el arco de los 3 electros, aprovechándose prácticamente toda la Energía (calor) suministrada por el arco eléctrico en calentar el metal líquido hasta la temperatura de vertido, en un mínimo de tiempo, con ahorro de Energía Eléctrica, Electroodos de 500mm y Refractario Formación. Se debe mantener un equilibrio estequiométrico entre el Carbón Grafito y el Oxígeno Inyectado, para evitar sobre-oxidación ó re-carburación del acero. Al formarse la Escoria Espumosa, sale espontáneamente por la ventana de trabajo del horno, eliminándose el Fósforo, que se encuentra en la Escoria en forma de (P_2O_5), porque en este momento están creadas las condiciones para que ocurra la Defosforación.

Aunque la Desulfuración del acero es favorecida por las altas temperaturas, en el Horno de Arco Eléctrico, no existen las condiciones reductoras necesarias para una profunda eliminación del Azufre, realizándose en el proceso en Horno Cuchara, que existen las condiciones reductoras de la escoria.

Una vez terminado el proceso de fusión de la carga en el Horno de Arco Eléctrico, el acero es vertido a una cazuela con capacidad de 60 ton, donde ocurre una desoxidación primaria del acero y se ajusta el metal al 80% de la marca. La cazuela es trasladada con ayuda de un carro porta-cuchara dotado de un sistema de pesaje y de inyección de gases (N_2 o Ar) al Horno Cuchara (HC) o al desescoriador para la eliminación de la escoria en caso de ser necesario [30, 31].

El HC es de corriente alterna con bóveda enfriada por agua, trabaja con electrodos de grafito de 300 mm y posee un transformador de 20 MW de potencia. El proceso de calentamiento es automático controlado por un autómatas acoplado a dos computadoras. En éste agregado se realiza el ajuste de composición química, calentamiento, homogenización de la temperatura y decantación de las inclusiones no metálicas del acero[32].

4. IVC: Después que se realiza el ajuste final del acero tanto en composición como en temperatura el acero es enviado al área de vaciado (IVC), empleando una grúa de 100 ton en cuya área se encuentra una máquina con la posibilidad de vaciar planchones y palanquillas [33-37].

Con una idea general del proceso de la acería se pasa a estudiar su caracterización en base al estado del arte tecnológico internacional en el tema.

Características del proceso de fabricación de acero: En una revisión bibliográfica realizada se encontraron varios autores en revistas de prestigio internacional que destacan sus investigaciones hacia los procesos en las acerías. En la tabla 2 se resumen algunas características que fueron abordadas en las mismas.

Tabla 2 Características del proceso de fabricación de acero según varios autores.

Características del proceso	Autores									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Proceso complejo	x			x	x	x				
Entornos altamente dinámicos		x								
Proceso de múltiples etapas	x			x						
Es un proceso de mucho consumo energético	x			x						x
Continuos cambios en exigencias del clientes		x						x		
Necesidad de programación en línea			x	x					x	x
Lógica y geográficamente distribuido					x					
Costos de producción elevados	x									x
Variedad de procesos de producción					x	x		x		
Necesidad de elevar la calidad del producto	x	x						x		x
Diferentes etapas					x				x	
Elevados tiempos de producción	x	x				x				
Diferentes métodos de resolución de problemas					x					
Retrazo en el tiempo de los agregados										
Necesidad de una planificación efectiva	x			x					x	
Técnicas basadas en conocimiento experto					x					
Necesidad de integración	x								x	x
Variedad de productos							x			
Entorno propenso a incertidumbres		x	x			x		x	x	
Necesidad de descentralización										x
Gran demanda de pedidos						x		x		

A partir de la experiencia internacional resumida en la tabla 2 se concluye que la producción de acero es compleja y requiere la consideración de varias restricciones y objetivos diferentes de una gama de procesos en un entorno dinámico [38]. Incluye múltiples etapas, está distribuido lógicamente y geográficamente, e involucra una variedad de procesos de producción. Los procesos tienen diferentes limitaciones tecnológicas y pueden usar diferentes modelos y métodos para resolver el problema de programación, por lo tanto, los sistemas de programación distribuidos y autónomos parecen más apropiados que las soluciones centralizadas, complejas y no autónomas [39].

Debido a la naturaleza dinámica del proceso de fabricación del acero, a menudo es difícil mantener el programa original a corto plazo, donde la gestión de las perturbaciones del horario es un proceso manual y requiere muchos años de experiencia, [40]. Tiene una cadena de suministro que comprende varios procesos críticos y altamente susceptibles a las interferencias [41]. La solución a la gran demanda de pedidos y problemas del proceso [42] es complicada debido a su largo flujo de producción, con una gran cantidad de categorías de productos y máquinas [43, 44]. Los planes de producción estáticos generalmente deben asignarse repetidamente cuando ocurren circunstancias inesperadas [45].

El actual sistema de producción de acero para fundición continua se está volviendo más complicado debido a la competencia en el mercado mundial del acero y los mayores requisitos de los clientes [46]. También se ve afectado por la alta dependencia de los recursos y la creciente demanda de una producción más sostenible, con la necesidad de integración para un mayor desarrollo. Por esto se busca un modelado específico de dominio y la utilización de inteligencia artificial y aprendizaje automático [47] con características particulares para cada aplicación.

El proceso del acero es una cadena compleja de procesos de transformación, desde materias primas (mineral de hierro, carbón, chatarra, etcétera) hasta productos terminados (bobinas, placas, rieles, tubos, entre otros). Como en muchas otras industrias de transformación, la planificación y la programación juegan un papel capital en el sector del acero [48]. Para lograr una reconfiguración en la industria, se requiere la comunicación entre los diferentes niveles de automatización, tanto en la línea vertical como en la horizontal, permitiendo el intercambio oportuno de la información entre dichos niveles.

En todos estos estudios se evidencian características propias de cada proceso de fabricación de acero y nos dan herramientas que podemos usar en nuestra aplicación, pero aún es necesario conocer las características de nuestro caso de estudio.

1.1.2. CASO DE ESTUDIO.

La investigación realizada considera una ventana de tiempo de seis años en el funcionamiento de ACINOX Las Tunas, periodo suficiente para conocer las

afectaciones por concepto de errores operacionales y malas decisiones. En la figura 4 se puede notar que, a partir del 2016, año en que se llevó a cabo un nuevo procedimiento para la toma de decisiones, disminuyeron los errores operacionales (Avila Zambrano, 2015). Factores como fluctuación de la fuerza de trabajo e inadecuada preparación del personal técnico influyeron negativamente en el comportamiento estable del cronograma de la producción, además, hay que adicionar a estos factores las innumerables incertidumbres del proceso. Estas son las razones por las cuales se necesita una herramienta que ayude en la toma de decisiones y reduzca el error humano, ya que en la actualidad el procedimiento es ejecutado a nivel de jefe de turno.

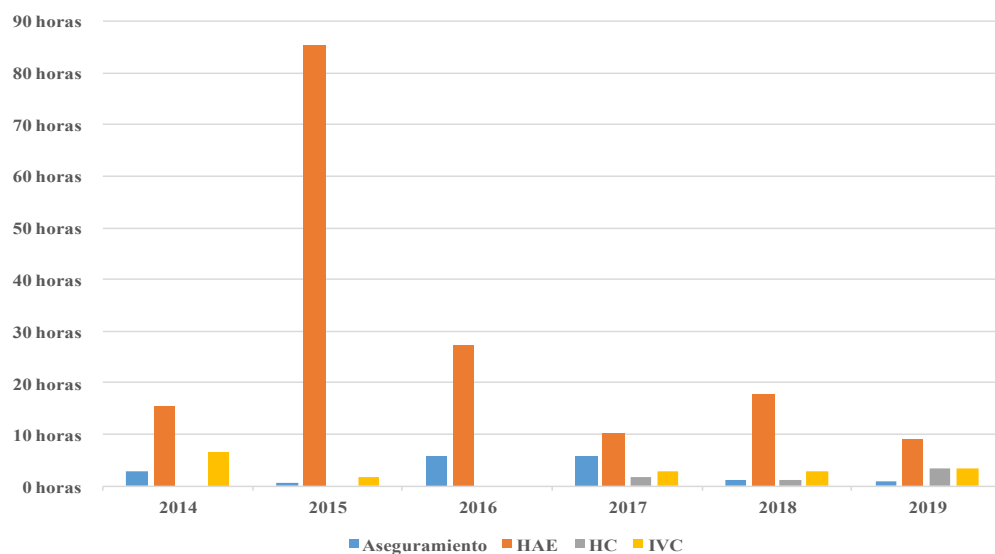


Fig. 4 Errores de operación durante 6 años en ACINOX Las Tunas. Elaboración propia.

En uno de los trabajos [48] realiza un estudio sobre las incertidumbres a corto plazo en las acerías y las clasifican en dos grupos principales, uno relacionado con el trabajo y otro relacionado con los recursos. Dentro del primer grupo se encuentran situaciones como llegada tarde del personal, cancelación de trabajo y cambio de fechas de vencimiento (retraso o avance), cambio en la prioridad del trabajo. En el grupo relacionado con los recursos podemos encontrar las fallas o roturas de las máquinas, demora en la llegada o escasez de materiales, deficiente estimación del tiempo del proceso, problemas de calidad del producto final y ausencia de operadores. Todas

estas situaciones de incertidumbres tienen mucha influencia en los cronogramas de la producción.

La figura 5 demuestra que los escenarios principales de las malas decisiones han sido el HAE y el Aseguramiento, donde existe una alta dependencia del actuar de tecnólogos y operadores. En ellos la decisión del actor humano tiene gran influencia en el cronograma de producción. El estudio realizado por [3] en ACINOX Las Tunas arrojó que una de las causas significativas que provocan afectaciones al proceso productivo son las malas decisiones tomadas a nivel operativo, principalmente ante la ocurrencia de averías. Por esto, es de suma importancia la preparación, cualidades y herramientas que deben poseer los administradores o jefes principales de turno para la toma correcta de decisiones en aras de lograr la eficiencia productiva de la acería, o sea, incrementar la productividad y reducir los costos de producción.

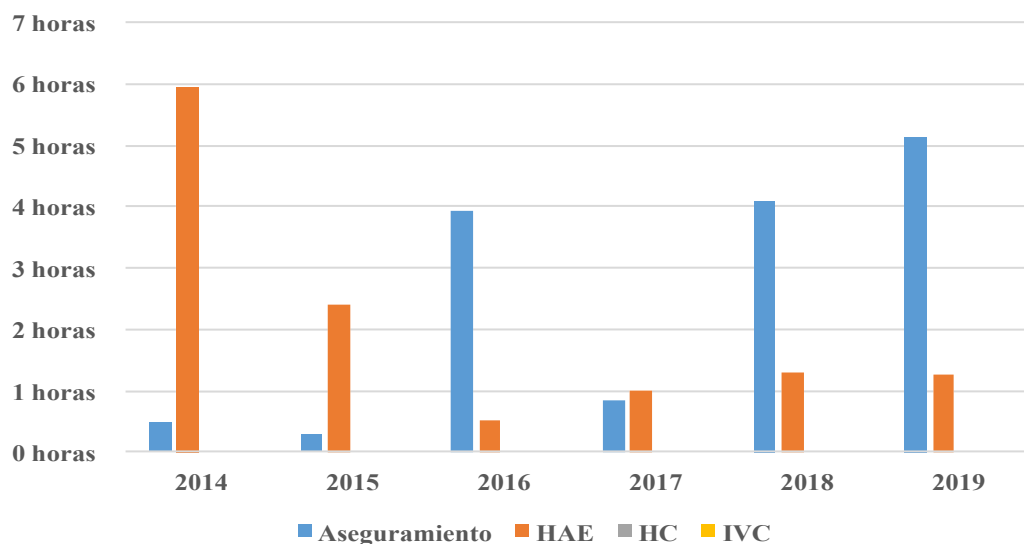


Fig. 5 Afectaciones debido a malas decisiones durante 6 años en ACINOX Tunas. Elaboración propia.

Las afectaciones por malas decisiones del personal se diferencian de los errores operacionales que son causados por descuidos. Las afectaciones por malas decisiones muchas veces están fundamentadas en la preparación ante el rol que desempeña el actor expuesto a una situación particular. Este es el caso de las decisiones no programadas, las cuales deben tomarse cuando ocurren eventos poco frecuentes, o aquellas que necesitan de un modelo o proceso específico de solución. La aplicación

del procedimiento operativo de [3] no ha evitado las afectaciones por esos eventos, inclusive se puede observar un incremento en los últimos años, sobre todo en aseguramiento donde el rol del actor humano es elevado, ver figura 5.

En la acería existe una relación entre la energía eléctrica y las toneladas producidas llamada índice de consumo de energía eléctrica. Este índice no es más que la relación que existe entre las toneladas producidas y la energía eléctrica empleada para producir las mismas. La figura 6 muestra los resultados del estudio realizado por [3] teniendo en cuenta la baja calidad de la chatarra nacional utilizada (ligera, oxidada y contaminada), la deficiente hermeticidad del horno y la vida útil promedio del refractario. Esto demuestra que si la parada o la detención del proceso es superior a la hora (60 minutos), el charco de acero que se va formando, producto del derretimiento de la chatarra cuando se está cortando con oxígeno, se va estratificando en la solera del horno y comienza a irradiar calor hacia el exterior y paredes del horno, aproximadamente a 4 °C/min con incremento en el tiempo. Como puede apreciarse en la figura 6, existe una relación directa entre el índice de consumo de electricidad y la producción de acero, por consiguiente, a mayor producción menor índice de consumo de electricidad, mayor eficiencia en el uso de portadores energéticos y menor costo de producción.

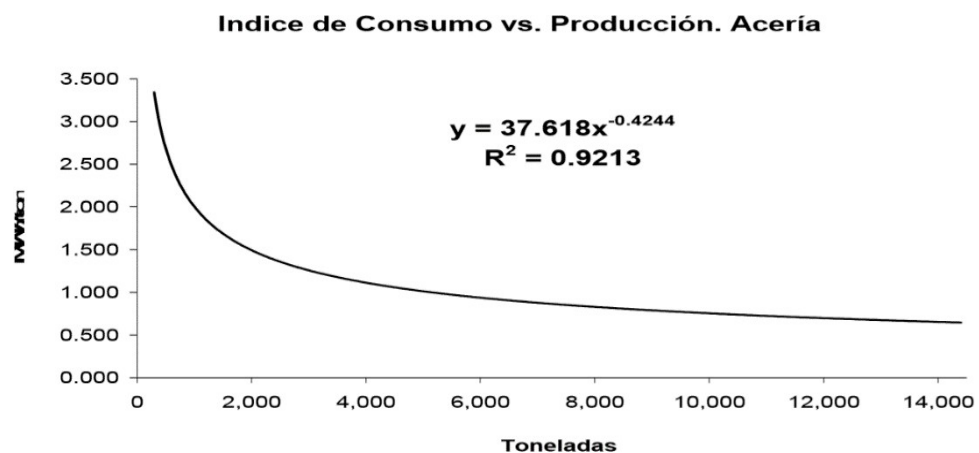


Fig. 6 Relación entre energía eléctrica consumida y producción en la acería Tunas. Zambrano 2015 [3].

Con el procedimiento que se ejecuta actualmente, aún no se logra la mejoría deseada en el índice de consumo de energía eléctrica. En la figura 7 se puede apreciar el estudio

realizado en el HAE, agregado que realiza el mayor consumo de energía. En el transcurso de los años este índice ha mostrado inestabilidad, incluso se puede apreciar que dentro del mismo año 2020 el índice experimentó variaciones. En las incertidumbres que afectaron a este índice están las relacionadas con la toma de decisiones y los errores operacionales.

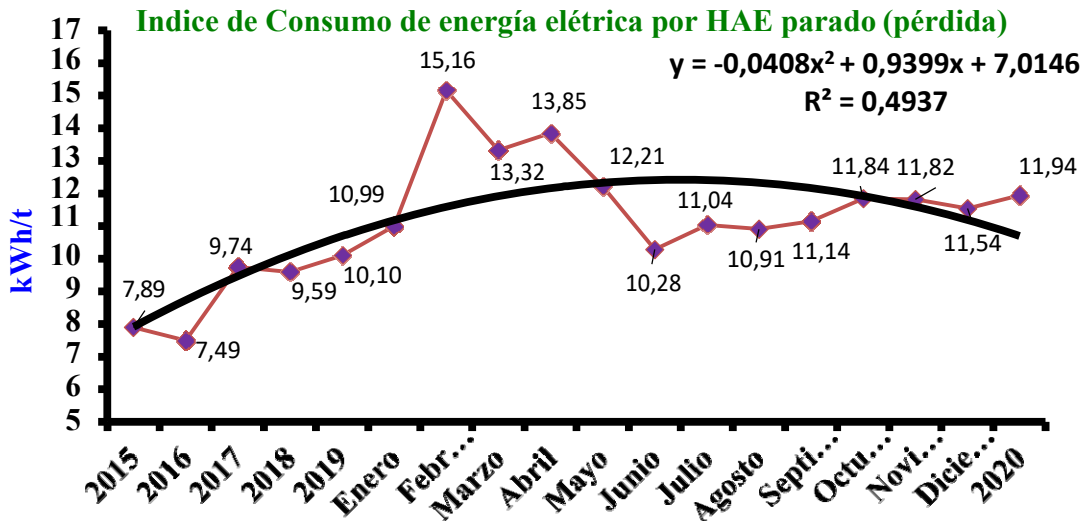


Fig. 7 Índice de consumo de energía eléctrica en el HAE. Elaboración propia.

Para garantizar que la producción de acero sea económicamente más factible, se suele chequear el índice de secuencialidad o la razón que existe entre las coladas realizadas y el consumo de artesas. Este se encuentra condicionado por el tiempo óptimo de permanencia de una colada en el HC. En el caso de estudio, según los precios del 2020 y el estudio de [3], se obtiene como resultado que el tiempo óptimo de espera en el HC es de 90 minutos. Esto significa que luego de estar lista la colada en el HC, el costo que se incurre por la espera es mayor que el ahorro por hacer la secuencia con la próxima colada.

Para determinar el tiempo de espera máximo que puede estar la cazuela en el Horno Cuchara y realizar la secuencia con la próxima colada en función del costo es necesario tener en cuenta que, si la colada en cuestión se vacía individualmente en la IVC, se incurre en un costo adicional de refractario, de la artesa y piezas especiales, respecto a si se logra mantener la secuencia con la próxima colada. Por ello, el tiempo de espera

máximo en el HC se determina cuando se iguale este costo adicional respecto a la secuencia. Para calcular el Tiempo de permanencia de la colada en el HC para la secuencia $T_{E(min)}$ en minutos, se presenta la siguiente expresión empírica (1):

$$T_{E(min)} = \frac{12275}{\left\{ \frac{P_{01}E_{01}P_{EE}}{[A_T(min)]} + \frac{P_{01}C_{01}P_{EL}}{[A_T(min)]} \right\} [C_{02}P_{Ref} + C_{03}P_{si}]} \div 60 \quad (1.1)$$

Donde:

- P_{01} Pérdidas de temperatura en función del tiempo ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$).
- E_{01} Energía eléctrica del arco en el tiempo (kWh/min).
- A_T Temperatura en función del tiempo de arco ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$).
- C_{01} Consumo de electrodos en función del tiempo (kg/min).
- C_{02} Consumo de refractarios en función del tiempo (kg/min).
- C_{03} Consumo de silicio en función del tiempo (kg/min).
- P_{Ref} Precio del revestimiento de refractario (CUP/t).
- P_{EE} Precio de la energía eléctrica en Cuba (CUP/Mwh).
- P_{EL} Precio de los electrodos de 300 mm (CUP/t).
- P_{EL} Precio del revestimiento de refractarios (CUP/t).
- P_{si} Precio del Silicio contenido en el FeSi-75 (CUP/t).
- 60 Acero líquido promedio (t).

El consumo de electrodos de 300 mm se determina conociendo que el consumo del arco durante la espera es de 1 kg/min, el cual se determina en función del tiempo de arco durante este período para compensar las pérdidas de temperatura, y para su cálculo se utiliza la expresión (2), [3]:

$$P_E = \frac{P_T(min)T_E(min)}{A_T(min)} C_E(min) \quad 1.2$$

- P_E Pérdida de electrodos para reponer la temperatura (kg).
- $C_E(min)$ Consumo de electrodos en función del tiempo (kg/min).
- $P_T(min)$ Pérdida de temperatura en función del tiempo de espera ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$).
- $A_T(min)$ Aumento de la temperatura producto del arco ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$).
- $T_E(min)$ Tiempo de permanencia de la colada en el HC para la secuencia (min).

El procedimiento propuesto por [3], el cual emplea (1) y (2), constituye una guía útil. Sin embargo, en la práctica ha sido insuficiente para disminuir el número de errores de operación y de malas decisiones que se ilustraron en las figuras 4 y 5, respectivamente. Por lo tanto, podría considerarse incluir toda esta experiencia en una arquitectura Distribuida basada en Agentes inteligentes para lograr un análisis dinámico y en tiempo

real, lo cual puede ser una vía para lograr que el proceso de producción sea más rentable mediante una toma de decisiones más eficiente.

La Inteligencia Artificial Distribuida (IAD) es un subcampo de la Inteligencia Artificial (IA) con capital importancia debido a su capacidad para resolver problemas complejos del mundo real. Centra su estudio en los comportamientos inteligentes colectivos, producto de la colaboración de diversas entidades llamadas agentes. Las investigaciones en este campo son enfocadas en tres direcciones diferentes: la IA paralela, la Solución Cooperativa de Problemas Distribuida (SCPD) y los MAS [49]. Este trabajo se centra en la tercera dirección.

1.1.3. LOS SISTEMAS MULTIAGENTES PARA LA AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL INTEGRADA

Agente: Existen versiones del concepto agente, todas concuerdan con autonomía como la característica principal [50] lo que da la opción de actuar sin la intervención humana ni de sistemas externos, donde el sistema reacciona a estímulos externos basándose en sus estados internos. Un agente debe ser reactivo para poder tomar decisiones rápidas en entornos dinámicos [51], proactivos para tomar iniciativas y planificar acciones para conseguir objetivos del sistema [52, 53]. La comunicación es la capacidad que tiene cada agente para negociar entre ellos y el resto de otras comunidades de agentes que puede ser por método indirecto basándose en el uso de espacio compartido o la sociabilidad que implica obrar y cooperar de forma recíproca con otros agentes y posibles seres humanos siempre que los objetivos comunes no entren en conflicto con los objetivos propios por lo que no ejecutan ninguna acción fuera de estos (Racionalidad) [54].

Las soluciones proactivas son muy eficaces en la respuesta ante incertidumbres, pero suelen ser muy rígidas impidiendo la dinámica de reconfiguración. Las soluciones reactivas por lo contrario son usadas para tener una dinámica de reconfiguración muy alta pero la respuesta ante incertidumbre es pobre. Es por esto que se combina ambas (híbridas) para tener un sistema que aproveche las potencialidades de ambas soluciones para obtener una respuesta dinámica y estable ante incertidumbres. Ver Fig. 8.

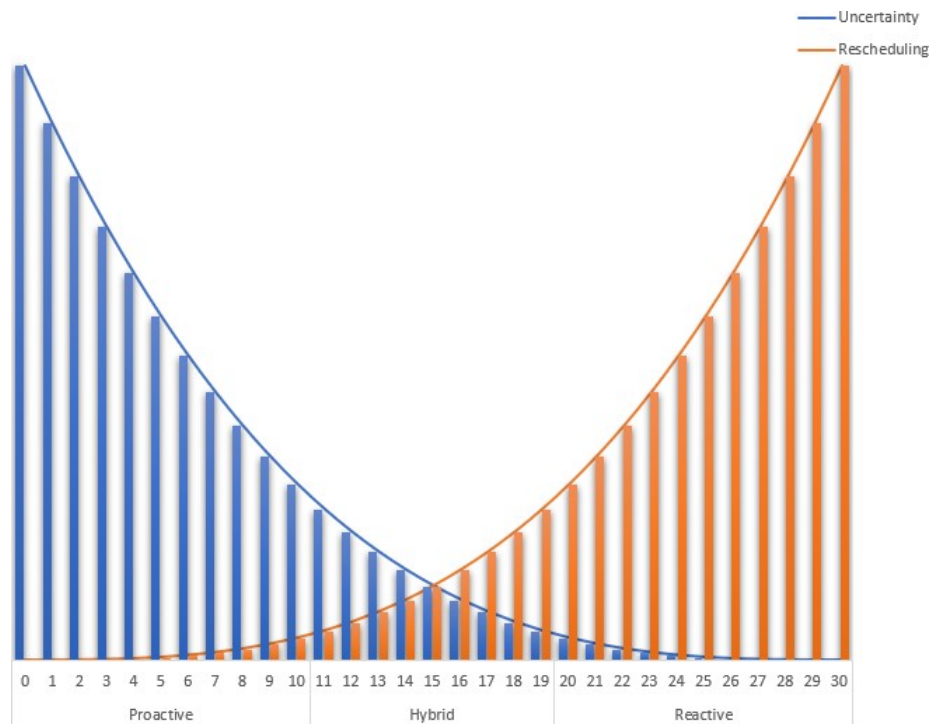


Fig. 8 Clasificación de acuerdo a incertidumbres y capacidades de reconfiguración. Elaboración propia.

También se pueden incluir cualidades como la veracidad de la información manejada que depende del objetivo de diseño; la movilidad como la habilidad del agente de moverse en el ambiente permitiéndoles la migración a través de una red de nodos de procesamiento para ejecutar tareas específicas [55]. La inteligencia provee al agente de capacidad para analizar y ordenar conocimiento sobre el entorno y usarlo adecuadamente y basándose en este conocimiento adquirido auto-reconfigurarse para adaptarse a su entorno [56].

A pesar de todas estas cualidades de un agente, debido al nivel de complejidad existente en la arquitectura y el proceso de la acción un solo agente no da respuesta a la problemática abordada por lo que se decide analizar las comunidades de agentes.

Sistemas Multiagentes: Los MAS son comunidades de agentes en un entorno social, en el cual dichos agentes cooperan para lograr tanto sus metas individuales como las metas colectivas de la comunidad [23, 55, 57], garantizando resolver dos problemas fundamentales de funcionamiento: comunicación y coordinación [58]. Para esto se

deben disponer de protocolos que permitan establecer las responsabilidades o compromisos adquiridos por los agentes del MAS y sus interrelaciones [59]. En esta comunidad cada agente tiene la capacidad para solucionar parcialmente el problema, no debe existir un sistema centralizado que los controle, los datos deben estar descentralizados y se usa una computación asincrónica [23].

Un MAS puede ser visto como un sistema distribuido compuesto por agentes donde la conducta combinada de ellos arroje un resultado en conjunto. En este sistema se distinguen tres niveles organizacionales, microsociales, de grupo y el global, por ende, pueden definirse como subclases de sistemas concurrentes predominando tres aspectos muy propios de los mismos: la autonomía, las técnicas de sincronización y la coordinación, los cuales vienen implantadas en las plataformas computacionales que les da soporte y los encuentros entre los componentes del MAS que es por interés propio [60]. Las formas para alcanzar acuerdos (negociaciones) y coordinarse dinámicamente sin conocerse es una diferencia de los sistemas concurrentes [56], esto permite lograr que las incertidumbres se resuelvan de forma distribuida sin necesidad de consumo de tiempo de un actor principal y solo se coordinen las soluciones y las decisiones que requieran de un ente superior.

El acoplamiento entre los componentes del MAS determina la flexibilidad, ya que un acoplamiento fijo impide la reorganización y la adaptación al ambiente, y un acoplamiento variable presenta estructuras fijas con instanciaciones variables permitiendo relaciones flexibles entre agentes, pero a través de mecanismos predefinidos bien precisos. Con el acoplamiento evolutivo se tienen estructuras organizativas variables donde las instanciaciones pueden variar o no y las relaciones abstractas entre agentes pueden evolucionar en función de resultados organizativos en el MAS [61]. Es por esto que fue seleccionada una estructura con acoplamiento variable para garantizar que en caso que las características estructurales y tecnológicas de la fábrica evolucionen el sistema sea capaz de asimilar y evolucionar con las mejoras tecnológicas.

La relación de subordinación del MAS presenta dos estructuras típicas, la jerárquica donde la relación de subordinación forma una estructura piramidal, una estructura jerárquica con acoplamiento fijo es una estructura clásica de los programas informáticos

donde puede expresarse como una llamada a un subprograma. Sin embargo, un acoplamiento igualitario variable (heterárquico) de la estructura de subordinación generalmente produce una competición entre los componentes de bajo nivel, donde los componentes de alto nivel se encargan de arbitrar la misma [62]. El MAS presenta una estructura híbrida, aún con las condiciones tecnológicas actuales la toma de decisiones está comprometida a solo asesoría en algunos ámbitos donde el rol del actor es fundamental (jerarquía) y los agentes deben ser capaces de resolver incertidumbres locales, sin necesidad de tomas de decisiones a niveles superiores (heterarquía).

A partir de todo este estudio se define una estructura regida por un modelo SIM [2] y existe dependencia de actores humanos, por lo que es importante la interacción del MAS con dichos actores. La inexistencia de una plataforma tecnológica para el soporte de una total autonomía brinda a dichos actores el protagonismo para tomar importantes decisiones del proceso y limitan secuencialidades del cronograma. En estos casos el sistema tiene un comportamiento asesor (Piramidal jerárquico fijo), pero ya entre sus diferentes agentes, el MAS debe tomar ciertas decisiones que no involucren actores humanos para garantizar reducir incertidumbres en el proceso y una adecuada reconfiguración. De esta forma será posible [3] que garantice más rapidez y seguridad que con la consulta a los actores humanos [63].

Los elementos anteriormente presentados fueron considerados para proponer la subordinación igualitaria variable que puede notarse en la estructura seleccionada en la figura 9. Se combina una subordinación jerárquica fija en los niveles superiores con una subordinación igualitaria variable en el nivel superior. Esto permite que los niveles superiores establezcan los objetivos de negocios y planificación de la producción para el nivel inferior, pero en este nivel inferior los cinco agentes principales coordinan entre sí sus decisiones con igual nivel de importancia, pero donde la prioridad varía según el tipo de incertidumbre y la situación actual de cada uno en el ciclo del proceso.

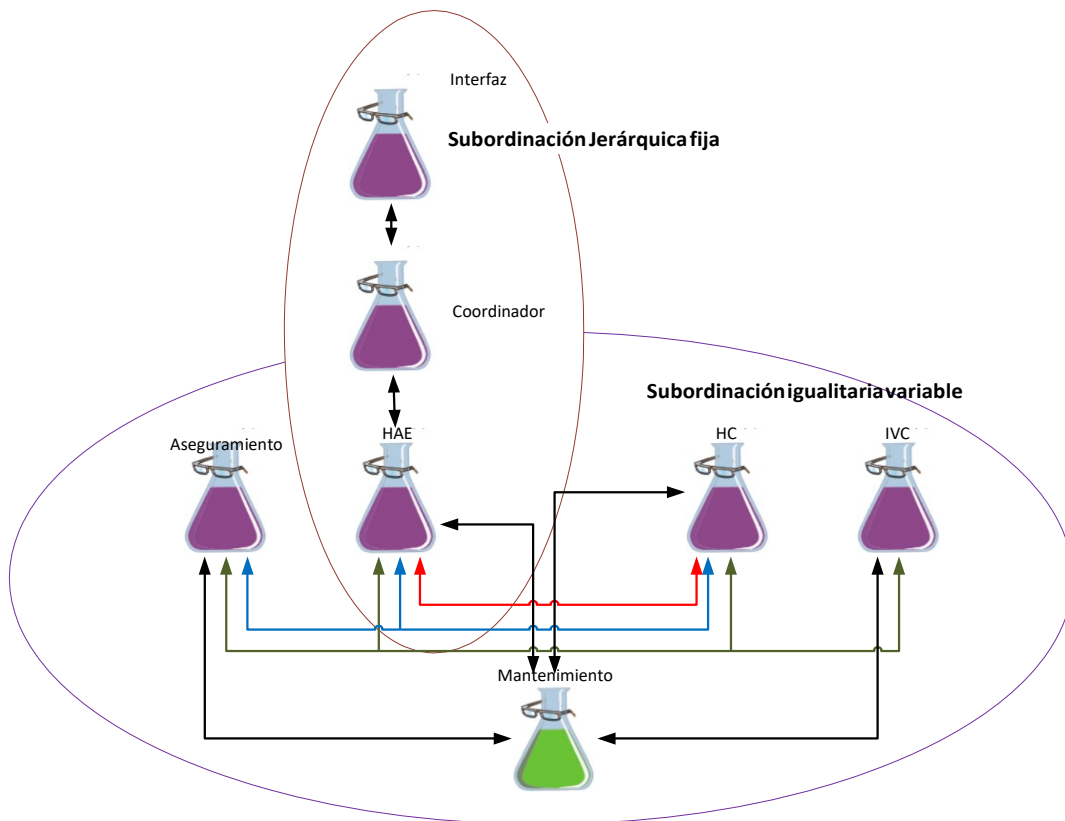


Fig. 9 Ejemplo de estructura de subordinación. Elaboración propia.

Basados en esta idea básica general se estudian los avances internacionales en automatización de acerías para completar las particularidades de la propuesta.

Aplicaciones del MAS a la industria del acero: Entre los estudios previos de aplicaciones de MAS en la industria del acero está la arquitectura MASID (del inglés Multi agent System for Integrated Dynamic), que es un sistema multi-agente para optimización y programación dinámica integrada propuesta por Ouelhadj et al. 2004 [39]. Un estudio con enfoque cuantitativo de alcance descriptivo y diseño experimental puro, donde la autora propone un protocolo de negociación para la cooperación entre agentes dentro de un sistema multi-agente. Demostrando que los MAS complementados con algoritmos heurísticos mejoran la estabilidad del calendario de producción, dotando de robustez a la arquitectura. El estudio se realiza enfocado a la instalación de vaciado continuo, y no abarca el resto del proceso donde existen otras tomas de decisiones muy importantes y un grupo considerable de incertidumbres que

no son analizadas y por ende el estudio presenta una necesidad de integración con el resto del proceso, destacamos que el sistema incluye una solución reactiva presentando una respuesta ante incertidumbre pobre, los autores de esta solución logran obtener una mejoría de un 23% en la productividad del proceso y una mejoría de un 15% en la capacidad de reconfiguración en comparación con esquemas anteriores. Ver figura 10.

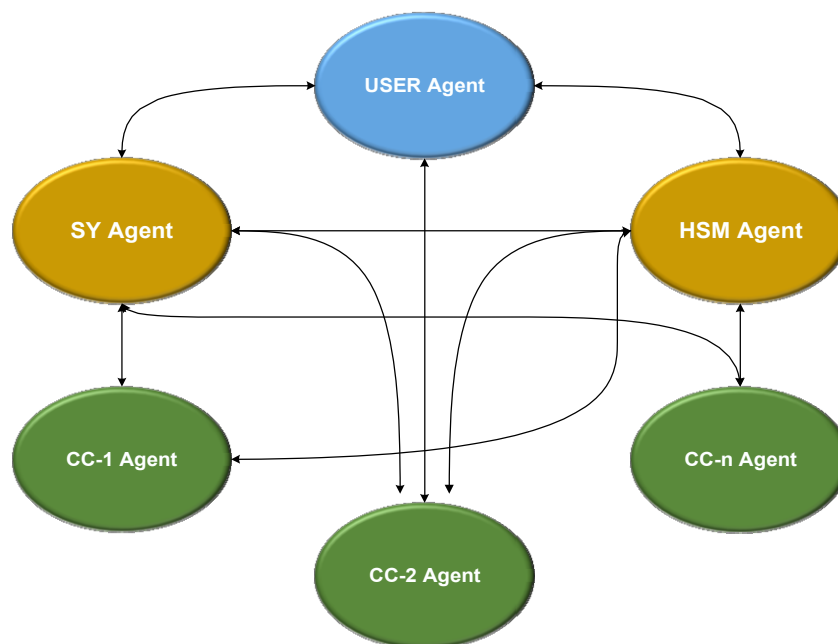


Fig. 10 Comunidad de agentes colaborativos propuestos por Djamila Ouelhadj para el rendimiento de la programación de la producción de acero.

Zarandi and Azad 2013 [43] proponen la arquitectura del Sistema Experto basado en Lógica Difusa FAES (del inglés Fuzzy Agent Expert System), compuesta por una comunidad de agentes cognitivos, autónomos y heterogéneos, ver figura 11. Dicha arquitectura está conformada por seis agentes inteligentes con base de conocimiento ANFIS (del inglés Adaptative Neuro-fuzzy inference system), donde cada agente es responsable de ejecutar localmente las tareas del recurso a cargo y tiene la capacidad de cooperar y comunicarse con otros agentes, el autor en su investigación da un enfoque cuantitativo de alcance descriptivo y un diseño experimental puro Estas arquitecturas presentan un MAS donde se le asigna un agente a cada proceso de fabricación de acero mientras coordina y coopera; que podría trabajar de forma

independiente. . Aquí el sistema está basado en una perspectiva general de los procesos manteniendo una arquitectura rígida y el proceso de negocio no es gestionado por la comunidad de agentes, siendo un factor importante en la calidad del producto, en esta arquitectura los autores presentan una solución reactiva con buenos tiempos de reconfiguración, pero una baja respuesta ante las incertidumbres. Los autores en su investigación logran mejoras de un 60% en la productividad y un 84% en los tiempos de reconfiguración dinámica.

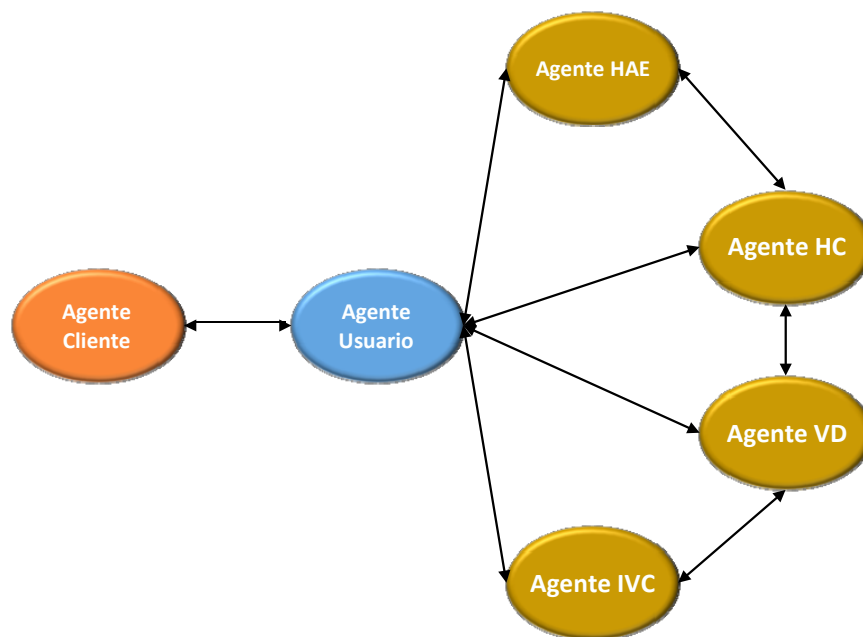


Fig. 11 Comunidad de agentes propuestas por el profesor Zarandi para la gestión del proceso en la industria del acero.

Las ventajas de estas aplicaciones de MAS son considerables y en ocasiones varios autores lo refieren, pero pueden ser mejoradas en su integralidad a todo el proceso y en la combinación de subordinación fija y variable para mejorar la respuesta según cada proceso específico y su variabilidad de eventos aleatorios.

La programación dinámica es un tema importante en la producción de acero debido a la presencia de una variedad de eventos en tiempo real que generalmente perturban el proceso de producción [39]. Un sistema eficiente debe ser capaz de lograr respuesta rápida a incertidumbres manteniendo la productividad con una ágil reorganización.

En la Tabla 4 se presenta un resumen comparativo entre aplicaciones de varios autores internacionales que demuestra que las variantes analizadas no logran resolver todos los requisitos funcionales de la complejidad de una acería moderna.

Se puede destacar que en ninguno de los casos de estudio el MAS es capaz de atender más de dos indicadores de los cuatro más importantes representados en la tabla 3. Para una actuación eficiente es necesario que el MAS sea capaz de incrementar la gestión de los cuatro parámetros de la tabla 3.

Tabla 3 Indicadores que deben aumentar en un MAS según varios autores, elaboración propia.

	Aumenta			
	Eficiencia	Respuesta ante incertidumbres	Productividad	Reconfiguración
Ouelhdadj et al. 2004		15%	23%	
Cowling et al. 2004			35%	
Roy et al. 2004	10%		14%	
Jacobi et al. 2005				10%
Ozoe and Konishi 2009		12,80%		
Wang et al. 2011				80%
Fazel and Azad 2013			60%	
Sun et al. 2017	13%			
Aguilar et al. 2013				90%

La programación efectiva de la producción trae como consecuencia un proceso de fabricación eficiente, una disminución del tiempo de entrega de los productos, mejoras en la calidad, menores costos de inventario y mayor productividad [38]. El reajuste dinámico efectivo de dicha programación ante múltiples eventos aleatorios del proceso de una acería es lo que puede lograr esa efectividad requerida. Donde el conocimiento experto y los planes de producción estáticos generalmente deben asignarse repetidamente cuando ocurren circunstancias inesperadas y pueden ser resueltos mediante la aplicación de técnicas basadas en MAS [45]. En los sistemas complejos y variados la aplicación de los MAS son de gran influencia en la productividad [43]. En la producción de acero se requieren métodos adecuados para eliminar el impacto de las incertidumbres en el proceso, siendo las técnicas MAS apropiadas en estas

circunstancias [46]. En la tabla 4 se comparan algunos índices de productividad en reportes de aplicaciones recientes. Solo hay una propuesta que es capaz de disminuir tres de los cuatro indicadores de productividad, lo que demuestra que tampoco estos indicadores están totalmente resueltos en las propuestas internacionales.

Tabla 4 Indicadores que deben disminuir en un MAS según varios autores, elaboración propia

	Disminuir			
	Costos de producción	Consumo energético	Reprogramación innecesaria	Tiempos de producción
Oueldhadj et al. 2004	5%	12%		
Cowling et al. 2004	8,90%			30%
Roy et al. 2004			13%	
Ozoe and Konishi 2009	5%	22%		
Fazel and Azad 2013	87%	34%		
Sun et al. 2017			63%	
Aguilar et al. 2013	90%	64%		

Se puede utilizar un sistema de soporte de decisiones para mejorar la gestión de las perturbaciones del horario y evitar una reprogramación innecesaria [40]. La flexibilidad, la robustez y la rápida reorganización son requisitos indispensables en un sistema responsable de la planificación de la producción [41]. El método puede hacer frente al cambio en las circunstancias de operación, como una caída inesperada de la temperatura por perturbación o cambio en la fecha de vencimiento [42].

La arquitectura MTSPC (del inglés Multi-agent Technology for Steel Production and Control) propuesta por Jacobi et al. 2005 [41] centra el problema en la gestión del tiempo de planificación de la producción, teniendo en cuenta la gestión del negocio y un sistema de supervisión. Sin embargo, no hay un sistema de control presentando una estructura heterárquica donde aún es necesario acciones de control, la comunidad de agentes de esta estructura sigue el protocolo de negociación basado en contrato-neto CNP (del inglés Contract Net Protocol).

Sun et al. 2017 [46] presenta la arquitectura SCCVRS (del inglés Research on Steelmaking - Continuous Casting Production Scheduling System Based on Virtual Real Fusion), donde propone un método para establecer una dinámica de sistema virtual en

el entorno de producción de fundición continua de acero, utilizado para ajustar las listas de tiempo de los cargos afectados debido a las incertidumbres. El sistema analiza la problemática centrada en los cambios en las solicitudes, retrasos en el tiempo de llegada de la carga, fallas de la máquina en el tiempo de procesamiento, sin embargo, las simulaciones computacionales generalmente se realizan dentro de los sistemas virtuales, y existen muchas incertidumbres en los sistemas reales que no se pueden predecir con precisión en los sistemas virtuales. El establecimiento temprano del modelo virtual no siempre simula con precisión los cambios complejos y dinámicos en el proceso de producción.

Las aplicaciones de los MAS muchas veces se encuentran localizadas en partes del proceso y no existe un ente coordinador entre ellos dejando la sincronización del cronograma de la producción sin atención. En la figura 12 se resumen las áreas de actuación de las aplicaciones estudiadas. Un punto importante en dicha producción es que el 31 % de los trabajos revisados se encontraban enfocados a la instalación de vaciado continuo (IVC) siendo uno de los procesos en los que más estudios se han realizado; seguidamente los rodillos calientes con el 25 %, el HAE, HC y productos terminados con un 12,4% y por último el aseguramiento que solo ocupa el 6% de las investigaciones en esta zona. Sin embargo, el aseguramiento es un factor muy importante en la acería, ya que muchas veces la producción se puede ver comprometida por la falla de una de sus grúas de 15 Ton o los carros porta cestas que tienen gran influencia en los tiempos del cronograma de producción. Actualmente en la acería ACINOX Las Tunas, los operarios implementan un grupo de estrategias en función de la incertidumbre, por ejemplo, ante la falla de uno de los carros porta-cesta, las grúas uno y dos se desincronizan y se pone una en función de la carga y la otra en función de la descarga, con el objetivo de compensar el tiempo que le toma a un carro mover el equivalente de la carga de dos carros [3]. Esta experiencia particular puede incluirse en un sistema asesor ante incertidumbres conocidas del MAS para dicha acería. En la propuesta que establecen los autores de este trabajo se abarca la mayor cantidad de variaciones posibles, por lo que también se estudian aplicaciones en otros campos que puedan ampliar las ideas para mejorar la actuación ante incertidumbres de otros procesos que luego sean aplicables en una acería.

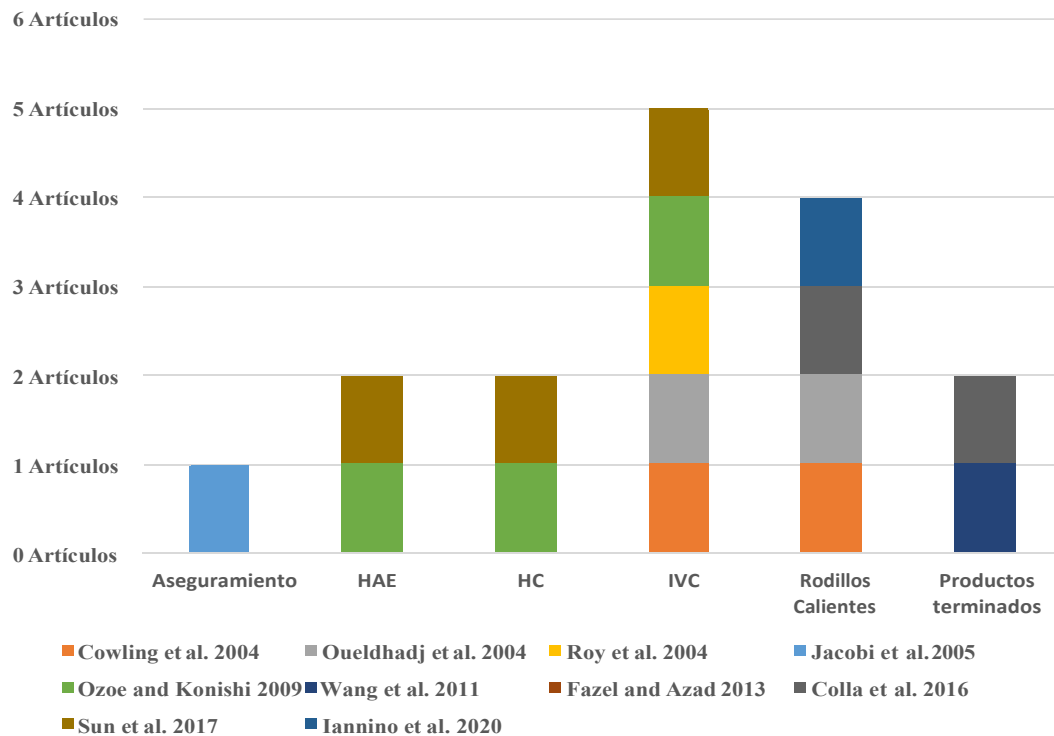


Fig. 12 Aplicaciones del MAS en la industria del acero. Elaboración propia.

Estudios en el sector petrolero han arrojado resultados como la arquitectura propuesta en la acería. Aguilar et al. 2013 [19] plantean en su trabajo el Sistema de Automatización Distribuido Inteligente basado en Agentes (SADIA) en el proceso continuo de extracción de petróleo usando 11 agentes inteligentes mediante el cual fue posible acceder a toda la información requerida para conocer estado del proceso productivo, realizar la interpretación de dicha información conociendo los flujos de trabajo de la empresa para la toma de decisiones, y la ejecución de acciones automáticas. Un estudio con enfoque cuantitativo de alcance descriptivo y un diseño experimental puro Esta es una de las arquitecturas más completas para el control del proceso, pero está enfocada a la extracción del petróleo y su estudio tiene como núcleo del problema el sistema de control donde enfoca sus mayores aportes. Estos aportes del sistema de automatización son analizados de forma general lo cual garantiza que la mayor cantidad de incertidumbres sean analizados en el proceso y por ende una reconfiguración dinámica más efectiva, presentando buen desempeño en un ambiente diverso, complejo y cargado de perturbaciones. Debido esto se considera que constituye un

buen sistema para el soporte de decisiones por lo que se propone una arquitectura similar pero adaptada a la acería bajo estudio.

De ahí la necesidad de Modificar la arquitectura CIM existente (ver figura 13) presentada en Cancio 2017 [2] por un MAS que de soporte a la toma de decisiones con capacidad de reconfiguración dinámica (Reactividad) para modificar el cronograma de producción actual, introduciendo flexibilidad a la producción y posibilidad de asimilar las incertidumbres que puedan surgir en el cronograma inicial (proactividad) Bravo et al. 2004 [64].

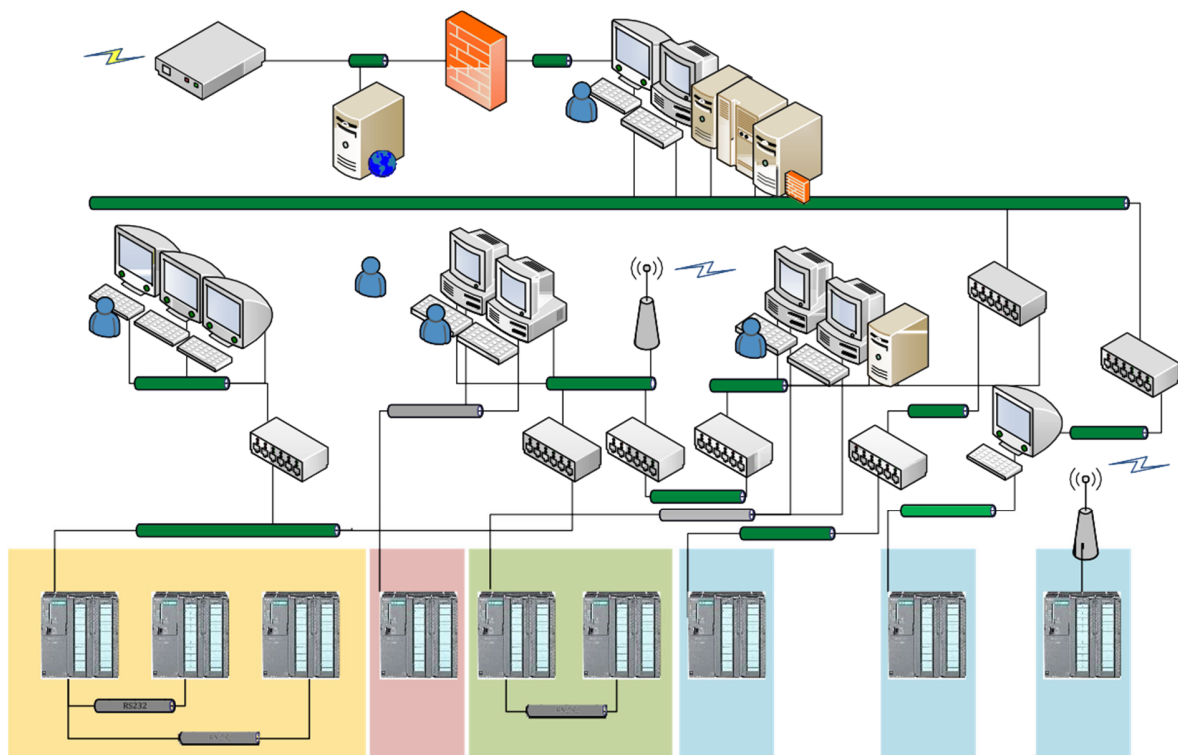


Fig. 13 Arquitectura existente en la acería Las Tunas. Elaboración propia.

1.1.4. SISTEMA AUTOMATIZADO DISTRIBUIDO INTELIGENTE BASADO EN AGENTES.

SADIA [19] es un modelo híbrido compuesto por tres niveles de abstracción, cada uno representado por un MAS que, en el nivel más alto, modela los elementos componentes del proceso productivo, y en los niveles inferiores modelan la arquitectura de las aplicaciones que dan apoyo a dicho proceso, tales como control de proceso, supervisión o manejo de fallas.

Con el fin de dotar de inteligencia a los niveles más bajos de la pirámide de la Figura 14 y maximizar los beneficios de producción enfatizando los requisitos de seguridad, confiabilidad, eficiencia y calidad de la producción, se propone el aplanamiento de las estructuras jerárquicas clásicas, como se observa en la Figura 15. Esta concepción permite pensar en modelos basados en agentes que permiten distribuir la mayor cantidad de actividades de la plataforma directamente sobre los procesos, y cuya consecuencia inmediata es la mayor autonomía de las unidades de producción.

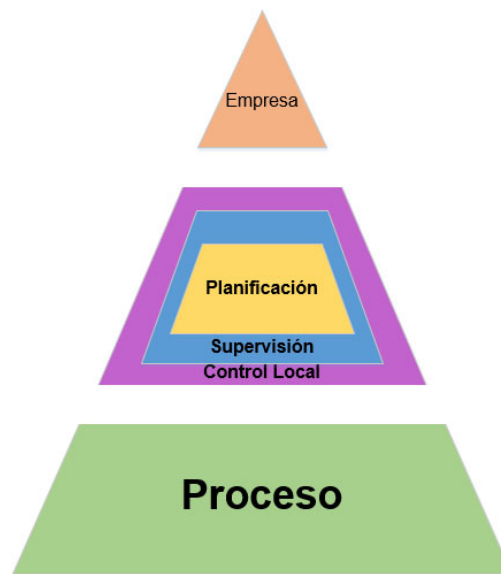


Fig. 14 Modelo de plataforma de automatización industrial distribuida. Aguilar et al 2013 [45].

El modelo de referencia Sistema Automatizado Distribuido Inteligente basado en Agentes (SADIA) es una propuesta, que se enmarca en el modelo aplanado de la Figura 15. Esta figura muestra el modelo SADIA con sus diferentes niveles de abstracción que incluyen conjuntos de agentes inteligentes.

Niveles de abstracción de SADIA: A continuación, se escriben los niveles de abstracción del modelo SADIA y los diferentes MAS definidos en cada nivel.

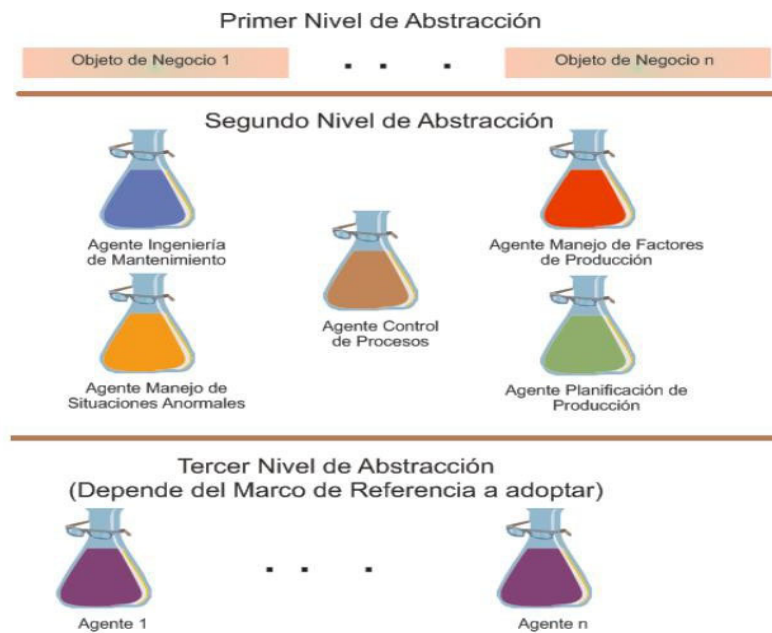


Fig. 15 Modelo de referencia SADIA. Aguilar et al 2013 [45]

Primer nivel de abstracción: El primer nivel de abstracción del SADIA del proceso productivo es visto como un MAS, donde las diversas unidades de producción son modeladas como agentes. Los agentes de este nivel negocian entre sí para llegar a acuerdos que permitan cumplir con las metas establecidas en la gestión financiera de la producción, y dichos acuerdos representan la lógica del negocio que rige el proceso productivo.

La representación de los objetos del negocio como agentes está fundamentada en la idea de otorgar inteligencia y autonomía a cada elemento del proceso productivo. La arquitectura de este nivel es metamórfica, esto es, la cantidad y naturaleza de los agentes que componen este nivel dependerán del proceso que se está modelando, haciendo posible que la arquitectura, aquí propuesta, pueda ser adaptada a cualquier organización orientada a la producción. La naturaleza metamórfica de la arquitectura del primer nivel tiene que ver con cuáles son los objetos de negocio a ser representados como agentes y no con la estructura interna de los mismos.

Segundo nivel de abstracción: En este nivel se distribuyen, entre una colección de agentes, las actividades que se deben desarrollar para cumplir con los objetivos de cada agente del primer nivel (objetos de negocio) para crear y controlar los planes de

producción. De esta manera, cada agente del primer nivel puede asociarse con un agente, o un MAS, del segundo nivel que realizan actividades del plan de producción para cumplir con las metas de cada objeto del negocio. Estas actividades pueden ser generales y comunes a todo agente del primer nivel de abstracción, como organización y control de procesos, mantenimiento, manejo de situaciones anormales, manejo de los factores de producción y planificación de la producción.

Tercer nivel de abstracción: Finalmente, ya que las actividades que desempeñan los agentes del segundo nivel son complejas, se propone un tercer nivel de abstracción en donde los agentes del segundo nivel son vistos como un MAS superior que establece los objetivos del nivel inferior, distribuyendo las tareas involucradas en el desarrollo de cada actividad entre los diversos agentes, bajo un modelo de referencia determinado. Todos los agentes de cada uno de los niveles de abstracción hacen uso de los servicios provistos por el Medio de Gestión de Servicios (MGS), garantizándose así la comunicación entre todos los agentes y la gestión eficiente de los recursos y servicios requeridos por los mismos [65-67].

La descomposición en niveles de abstracción permite abordar el modelado de sistemas complejos de forma genérica, por medio de la definición de un MAS en cada nivel, lo que permite programar agentes autónomos y flexibles que desempeñan tareas específicas que pueden evolucionar de acuerdo a sus objetivos y los del MAS en el cual están inmersos.

Cada agente del segundo nivel de abstracción materializa sus objetivos al modelar los agentes del tercer nivel bajo un marco de referencia basado en MAS, con arquitecturas que van a depender de los objetivos de cada uno de ellos. El modelo del Sistema de Control Distribuido Inteligente Basado en Agentes (SCDIA) puede usarse como marco de referencia para modelar los agentes del tercer nivel, ya que el SCDIA ofrece una visión de diseño que permite abordar cada una de las actividades involucradas en la automatización de procesos industriales como multiagentes interactuantes con otros agentes superiores [5, 68]. El SCDIA está inspirado en los componentes de un sistema de control de procesos, en consecuencia, su uso para modelar a los agentes del tercer nivel requiere concebir a cada agente del segundo nivel como una referencia para los lazos de control internos de los agentes del tercer nivel.

Para recrear las arquitecturas SADIA y SCDA es necesaria la aplicación de una metodología de diseño en nuestro caso hacemos uso de MASINA, una metodología que ha sido usada con mucha efectividad por diferentes autores [5, 19, 69, 70]. Para tener agentes con autonomía es necesario dotar los mismos con inteligencia para esto estudiamos las bases de conocimiento basados en lógica difusa que nos permite dotar a los mismos con el conocimiento acumulado de expertos en el proceso productivo.

1.1.5. BASES DE CONOCIMIENTO

La lógica difusa se aplica principalmente en sistemas de control difusos que utilizan expresiones ambiguas para formular reglas que controlen el sistema. Un sistema de control difuso trabaja de manera muy diferente a los sistemas de control convencionales. Estos usan el conocimiento de un experto para generar una base de conocimientos que dará al sistema la capacidad de tomar decisiones sobre ciertas acciones que se presentan en su funcionamiento.

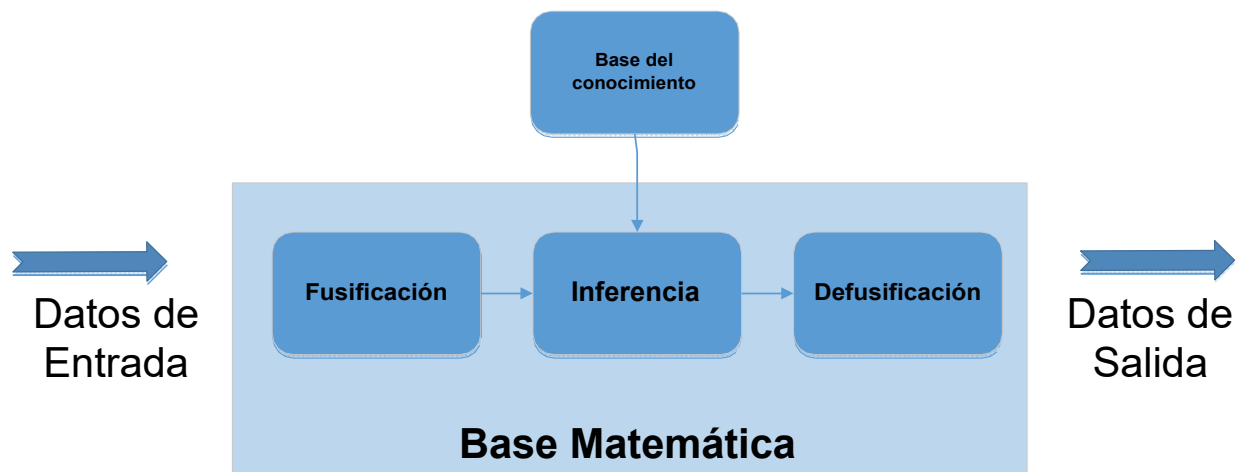


Fig. 16 Estructura de un modelo difuso.

Fusificación

La fusificación tiene como objetivo convertir los valores reales en valores difusos. En la fusificación se asignan grados de pertenencia a cada una de las variables de entrada con relación a los conjuntos difusos previamente definidos utilizando las funciones de pertenencia asociados a los conjuntos difusos [71, 72].

Bases del conocimiento

La base del conocimiento contiene el conocimiento asociado con el dominio de la aplicación y los objetivos del control. En esta etapa se deben definir las reglas lingüísticas de control que realizarán la toma de decisiones que determina la forma en la que debe actuar el sistema.

Inferencia

La inferencia relaciona los conjuntos difusos de entrada y salida para cada situación particular estableciendo la interacción entre las reglas que se activan en cada caso para obtener una acción adecuada a cada situación. En la inferencia se utiliza la información de la base del conocimiento integrada a las reglas para responder convenientemente a cada una de las condiciones.

Defusificación

La defusificación realiza el proceso de adecuar los valores difusos generados en la inferencia en valores que posteriormente se utilizaran en el proceso de control.

Tomando como base todos los avances científico-técnicos explicados en este capítulo, se desarrolla, en el próximo capítulo, la propuesta del MAS para elevar la eficiencia de la gestión productiva de la acería ACINOX-Las Tunas.

CONCLUSIONES

- La arquitectura actual es una estructura rígida, no existe autonomía, la toma de decisiones se realizan a niveles jerárquico por el personal sin un sistema asesor consumiendo tiempo de producción e introduciendo incertidumbres en el cronograma de producción.
- La resolución distribuida de problemas utilizando MAS se centra en el problema y en concreto en cómo construir colectivos de agentes que muestren las propiedades externas deseadas de robustez y calidad de respuesta.
- La solución ideal es un MAS con una arquitectura SADIA de 22 agentes donde el problema se distribuye entre los mismos, presentando una gestión asincrónica, donde no existe un sistema de control global y los datos no se encuentran

centralizados, donde se analiza tanto el proceso de negocio y la planificación productiva como los sistemas de control.

- Es necesario la implementación de una arquitectura híbrida pues se requiere que el MAS no tome el control total del proceso, permitiendo una asesoría inteligente.
- Es necesario el diseño de una arquitectura que permita asimilar paulatinamente la tecnología moderna, y así ir dando pasos firmes hacia una total autonomía de la gestión productiva automatizada en la acería y por tanto creando las bases para la Industria 4.0 en la empresa ACINOX-Las Tunas.
- Las arquitecturas existentes no tienen buena relación entre Proactividad y reactividad.

Capítulo 2. SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN DISTRIBUIDO INTELIGENTE BASADO EN AGENTES

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describe cada uno de los pasos a seguir para la realización de la investigación científica aplicada en la acería de ACINOX-Las Tunas, en la cual se desarrolla la metodología para el Modelado de Sistemas de Ingeniería Orientado a Agentes (MASINA)[69] adaptada al caso de esta acería, para el diseño de la arquitectura MAS. Se describen los agentes propuestos y sus características y por último se diseña un experimento con la finalidad de cumplir los objetivos y demostrar la hipótesis planteada.

2.1. ARQUITECTURA DEL SISTEMA MULTI-AGENTE PROPUESTO PARA EL SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN DE LA ACERÍA.

2.1.1. PRIMERA ETAPA DE DISEÑO.

1. Análisis y diseño del sistema integrado inteligente mediante UML (Lenguaje de Modelado Unificado [73] y metodología MAS [19]: Gracias a la herramienta UML se obtuvieron los requerimientos generales de integración por encima de los particulares de cada sección del proceso lo cual permitió su definición de acuerdo a los requerimientos del sistema y sus posibilidades de acuerdo a tecnología accesible.

2.1.1.1. SISTEMA AUTOMATIZADO DISTRIBUIDO INTELIGENTE BASADO EN AGENTES

Partiendo del estudio de varias arquitecturas se seleccionó SADIA, una arquitectura que integra todos los niveles de gestión del proceso desde la gestión del negocio pasando por niveles productivos hasta el nivel de control. Esta arquitectura es la que mejor se adapta a los requerimientos específicos de nuestra planta, por lo que con la menor cantidad de modificaciones se logró el objetivo propuesto. Se pretende abarcar la mayor cantidad de niveles en los cronogramas de gestión del proceso, lo que se traduce en más detalles acerca de las incertidumbres y la posibilidad de tomar decisiones más

acertadas para un mejor uso del tiempo de producción con el consecuente ahorro económico.

El sistema se propone con tres niveles de abstracción, donde se describe todo el proceso productivo del acero, y que cada nivel se analiza como un MAS, donde las diversas unidades de producción son modeladas como agentes. Los agentes del nivel inferior negocian entre sí para llegar a acuerdos y cumplir metas de producción establecidas de forma igualitaria variable, interactuando con los MAS de una jerarquía superior en producción, recursos y negocios. Los objetos del negocio también son representados como agentes para otorgar inteligencia y autonomía a cada elemento del proceso productivo. Además, varios agentes realizan la gestión del proceso productivo, que adquiere gran importancia ya que a este nivel se tramita la materia prima y se reajusta el tiempo de gestión de estas en dependencia de la demanda del proceso y la experiencia de tecnólogos y operadores almacenada en el MAS, garantizando una disponibilidad permanente sin derroche de recursos.

Existen áreas en las que es fundamental saber datos de precios para poder realizar una gestión adecuada de la dinámica de producción como es el caso del HC. Este mantiene un intercambio con el agente de gestión de materias primas, el cual, en correspondencia con el costo de refractarios y materiales necesarios en la Artesa, podría determinar si la producción es económicamente factible. Actualmente, este cálculo estadístico lo realiza un actor humano, el cual trabaja con un coeficiente mensual, por lo engorroso de dicha tarea; de haber un actor basado en IA se ahorraría un tiempo considerable y se tendría una información más dinámica y precisa para una toma de decisiones más certera [3]. Este ejemplo demuestra la necesidad de la interacción vertical desde la gestión financiera de la producción a nivel del negocio, atravesando la planificación hasta llegar al control del proceso en el HC, que puede lograrse la toma de decisiones con rapidez y eficacia si se integran los tres niveles del MAS.

Primer nivel (nivel superior) de abstracción: Realiza la gestión del negocio y está conformado por una comunidad de cinco agentes que se seleccionaron con esta estructura después de reuniones y encuestas realizadas al personal experto en el proceso y gestión de negocio. Su resultado se presenta en la figura 17. Sus funciones se relacionan a continuación:

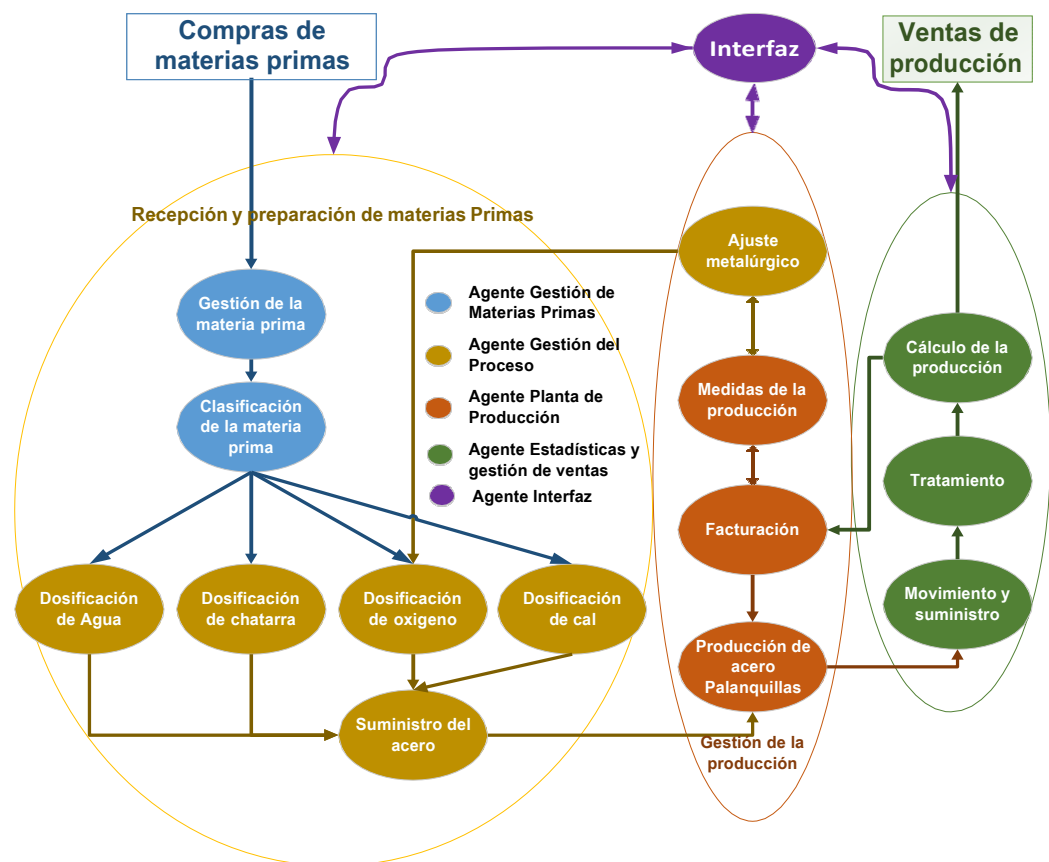


Fig. 17 Agentes del primer nivel del SADIA (gestión del negocio en la acería). Elaboración propia.

- Gestión de la materia prima: mediante el cual se realiza el estudio de mercado para la compra de la materia prima ya sea chatarra, oxígeno o cal. Realizado por el agente gestión de materias primas.
- Clasificación de la materia prima: se realiza la clasificación de la materia prima adquirida. Realizado por el agente gestión de materias primas.
- Dosificación de chatarra: se realiza la dosificación de chatarra en dependencia de las correcciones realizadas en el ajuste metalúrgico. Realizado por el agente gestión del proceso.
- Dosificación de oxígeno: se realiza la dosificación de oxígeno en dependencia de las correcciones realizadas en el ajuste metalúrgico. Realizado por el agente gestión del proceso.

- Dosificación de cal: se realiza la dosificación de cal en dependencia de las correcciones realizadas en el ajuste metalúrgico. Realizado por el agente gestión del proceso.
- Ajuste metalúrgico: realiza una comparación entre las características químicas del acero obtenido y el solicitado corrigiendo el factor de error. Realizado por el agente gestión del proceso.
- Suministro del acero: Una vez realizado los ajuste en dosificaciones se obtiene la cantidad de acero listo para palanquillas. Realizado por el agente gestión del proceso.
- Producción de acero: moldear el acero a su forma comercial (palanquillas). Realizado por el agente planta de producción.
- Facturación: Se realiza la facturación de la producción por el agente planta de producción.
- Medidas de la producción: Se realiza muestreo a la calidad del producto obtenido. Agente planta de producción.
- Movimiento y suministro: se realiza el movimiento y suministro a zonas de embalajes. Agente estadística y gestión de ventas.
- Tratamiento: se acondiciona el producto para posterior traslado. Agente estadística y gestión de ventas.
- Cálculo de la producción: se lleva la estadística de la cantidad de producto fabricado. Agente estadística y gestión de ventas.
- Debemos tener en cuenta que la gestión de negocio requiere asesoría por parte de la gerencia de la empresa es por lo que se incluye un agente interfaz que mantiene una estrecha relación con todos los agentes haciendo de puente entre el MAS y la dirección empresarial.

Como se aprecia en la figura 17, estas funciones están distribuidas en los cinco agentes de negocios, pero de forma coordinada para lograr los objetivos locales tributando a los generales. Estos agentes de negocios ocupan el nivel jerárquico superior de coordinación del proceso que determinan los objetivos generales del segundo nivel jerárquico de planificación y control de la producción.

Segundo nivel (nivel intermedio) de abstracción: En este nivel se distribuye, en una colección de agentes, las actividades que se deben desarrollar para cumplir con los objetivos de cada agente del nivel superior. La cantidad de agentes se selecciona en acuerdo con el personal experto de la producción donde se analizan las características de la planificación de la producción, el control de costos de producción, el procesamiento de las órdenes de producción, control de insumo y energía, despacho de productos, control de inventarios, control de procesos, entre otros.

En consecuencia, obtenemos un MAS constituido por un segundo grupo de agentes que responden a los intereses del agente planta de producción en el nivel superior, pero que a través de este reciben toda la sincronización de las tareas del nivel de negocios. La figura 18 establece las relaciones entre los cinco tipos de agentes de este nivel jerárquico intermedio. Constituyen el enlace entre la jerarquía fija y la heterarquía igualitaria variable del nivel inferior.

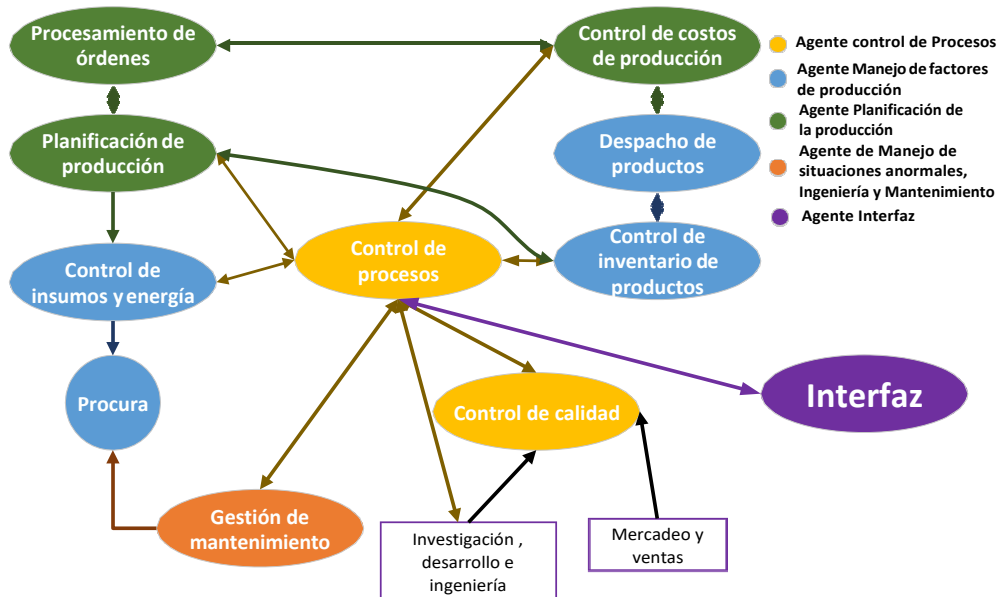


Fig. 18 Agentes del segundo nivel del SADIA (gestión de planificación y control de la producción en la acería) Elaboración propia basado en el estándar ANSI/ISA 95.00.01.

Basados en el estándar ANSI/ISA 95.00.01[19] se muestran las siguientes funciones de la colección de agentes de planificación y control de producción:

- Procesamiento de orden: manejo de las órdenes de los clientes. Desarrollada por el agente de planificación de la producción.
- Planificación de producción: elaboración y ejecución de planes de producción, determinación de los requerimientos de materia prima y estimación de la disponibilidad de los productos finales. Llevada a cabo por el agente de planificación de producción.
- Control de la producción o Control de procesos: control de la transformación de la materia prima en productos finales, de acuerdo al plan de producción. Llevada a cabo por el agente de control de procesos.
- Control de insumos y energía: gestión del inventario, transferencia y calidad de los insumos y de la energía disponible. Desarrollada por el agente manejo de los factores de producción.
- Procura: ejecución de las órdenes de requerimientos de materiales, partes, insumos y demás elementos necesarios para la producción. Llevado a cabo por el agente de manejo de factores de producción.
- Control de calidad: aseguramiento de la calidad de los productos finales, siguiendo estándares y normas. Llevado a cabo por el agente control de procesos.
- Control de inventarios de productos: manejo del inventario y la disponibilidad de los productos finales. Llevado a cabo por el agente de manejo de factores de producción.
- Control de costos de producción: cálculo y ejecución de reporte de los costos de la producción. Llevado a cabo por el agente de planificación de la producción.
- Despacho de productos: organización del despacho, transporte y entrega de los productos finales a los clientes. Llevado a cabo por el agente de manejo de factores de producción.
- Gestión de mantenimiento: mantenimiento de las instalaciones, ejecución de planes preventivos de mantenimiento, monitoreo de fallas y situaciones anormales, cálculo de confiabilidad operacional. Llevada a cabo por los agentes de manejo de situaciones anormales y de ingeniería de mantenimiento.

- La planificación de la producción también requiere inicialmente de asesoría por parte de los tecnólogos de la producción, por lo que se incluye en este nivel un agente interfaz.

Como se puede apreciar en la figura 18 existe una fuerte interacción entre las funciones de estos cinco agentes para lograr una eficiente planificación y control de la producción. Las actividades que desempeñan los agentes del nivel intermedio son complejas, porque responden a los objetivos de la planificación y control de producción, pero también a las metas del nivel superior de negocios y a la coordinación con el nivel inferior distribuido heterárquicamente. Sus agentes de base que interactúan directamente con el tercer nivel inferior son el agente de control de producción y el agente de situaciones anormales, ingeniería y mantenimiento. A través de ellos se establece la interacción del nivel inferior con toda la planificación y control de producción y con los negocios de forma jerárquica fija, pero este nivel inferior distribuido por equipamientos de producción funciona de forma heterárquica igualitaria variable como se detalla a seguir.

Tercer Nivel (inferior) de abstracción: Se propone un nivel inferior de abstracción que se concilian con los expertos del proceso, donde se analizan los sistemas de control con los sensores y actuadores involucrados y se escogen los principales componentes dentro de la arquitectura de control que puedan tener influencia sobre los tiempos de producción.

Todos los agentes de cada uno de los niveles de abstracción hacen uso de los servicios provistos por el MGS, [65-67, 74] para una eficiente gestión de servicios compartidos. El nivel inferior es ajustado de acuerdo al modelo de referencia SCDIA [19] porque ha demostrado su efectividad en procesos complejos como la producción y distribución petrolera[19, 64, 75]. El SCDIA es una plataforma multi-agentes diseñada específicamente para sistemas de automatización industrial en la que se propone una comunidad de agentes para crear lazos de control. Adaptando el SCDIA a la acería objeto de control, se crea el nivel inferior interactuando directamente con el agente control de procesos del segundo nivel, en los que podemos encontrar los siguientes agentes:

- Agente de medición en el HAE: recolecta la información necesaria para conocer el estado del proceso en el HAE.
- Agente controlador del HAE: toma acciones de control basado en la observación del estado del sistema en el HAE.
- Agente de medición en el HC: recolecta la información necesaria para conocer el estado del proceso en el HC.
- Agente controlador del HC: toma acciones basado en la observación del estado del sistema en el HC.
- Agente de medición en la IVC: recolecta la información necesaria para conocer el estado del proceso en la IVC.
- Agente controlador de la IVC: toma acciones basado en la observación del estado del sistema en la IVC.
- Agente coordinador: flexibiliza y/o modifica las decisiones de los agentes controladores de acuerdo a los objetivos superiores (negocio y planificación) y establece nuevos objetivos y servicios a este nivel. Coordina las metas de los agentes presentes en su comunidad y garantiza la comunicación con el sistema financiero VERSAT para realizar análisis de costos de la producción e intervenir en la toma de decisiones, como el ejemplo del agente actuación del HC.
- Agente de actuación del HAE: ejecuta las decisiones tomadas por los agentes controladores en el HAE, coordinador y aseguramiento.
- Agente de actuación del HC: ejecuta las decisiones tomadas por los agentes controladores en el HC, coordinador y agente financiero.
- Agente de actuación de la IVC: ejecuta las decisiones tomadas por los agentes controladores en la IVC, coordinador y agente ingeniería de mantenimiento.
- Agente aseguramiento: su función es la de verificar que exista la materia prima suficiente para comenzar la fundición en el HAE.
- Agente Interfaz: se encarga de la comunicación entre el MGS y el personal, puede funcionar como un sistema asesor proponiendo soluciones.

Como se puede observar en la figura 19 el SCDIA se puede dividir en dos subniveles: un subnivel de interacción con el ambiente, donde se encuentran los agentes de

medición y de actuación, y por otro lado, un subnivel de decisión donde se encuentran los demás agentes de la comunidad.

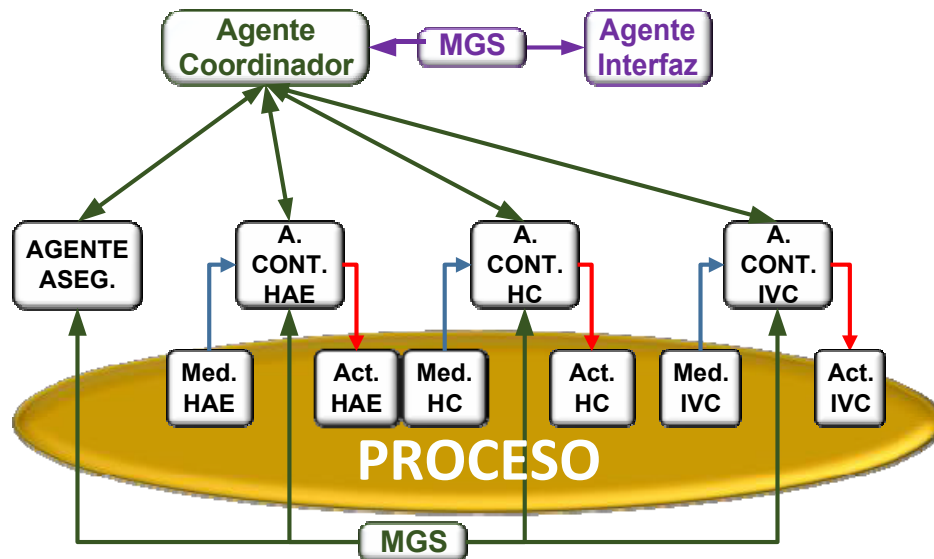


Fig. 19 Modelo SCDIA para el proceso de fabricación de acero. Elaboración propia

La heterarquía igualitaria variable de este nivel permite una toma de decisiones ante incertidumbres mucho más efectiva y rápida que si se establece un nivel de jerarquía que necesite decidir ante estas situaciones. Solamente se requiere preguntar a los otros tres agentes del mismo nivel cual es la situación del resto de los equipamientos de la acería para que la decisión se adapte a estas condiciones. El agente coordinador solamente intercambia las informaciones con el nivel superior, para garantizar cumplir en su nivel con los objetivos de negocios y planificación-control de la producción. También el agente coordinador garantiza el movimiento de información en sentido ascendente, es decir, que los niveles superiores puedan ajustar sus metas de negocios y planificación-control a la situación real del proceso de producción de acero. Ejemplos de esto se comentan en el análisis de escenarios del diseño de experimentos del epígrafe 2.2.

Dentro del SCDIA podemos encontrar también un MGS que es una comunidad de agentes encargados de las labores de gestión dentro de este nivel.

La descomposición en niveles de abstracción permite abordar el modelado de sistemas complejos de forma genérica, por medio de la definición de un MAS en cada nivel, lo que permite programar agentes autónomos y flexibles que desempeñan tareas

específicas y que pueden evolucionar de acuerdo con sus objetivos y los del MAS en el cual están inmersos.

Topología del sistema de Automatización Integrado:

Para soportar todo el MAS propuesto se requiere una topología de comunicaciones fuertemente enlazada con tecnologías compatibles al sistema de automatización existente en la planta. En la topología del Sistema de Automatización Integrado de la Figura 19 puede notarse que para conformar la red con las estaciones inteligentes se utiliza una red de comunicaciones PROFIBUS DP. Por su parte, la comunicación entre los Controladores Lógicos Programables y los Paneles Operativos o Interfaz Hombre Máquina (HMI, del inglés Human Machine Interface) se concibe con una red PROFINET y MODBUS. Por último, la conexión con una computadora personal para el software SCADA WinCC® se realiza mediante una conexión ethernet y una red inalámbrica para saber el estado de las grúas y los agentes. Esta red de comunicaciones industriales garantizará las negociaciones entre los agentes inteligentes distribuidos que resolverán las colaboraciones y conflictos con la mayor eficacia posible.

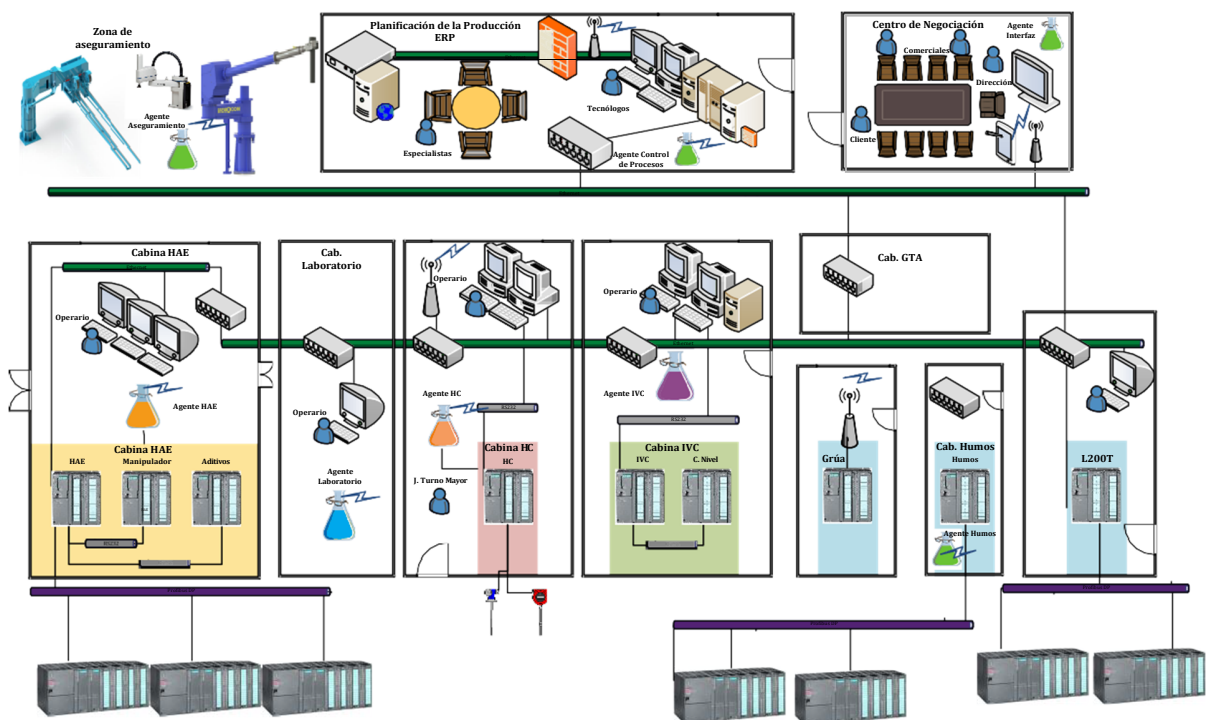


Fig. 20 Topología del sistema de automatización propuesto, elaboración propia.

2.1.2. MODELADO Y SIMULACIÓN DE LA ESTRUCTURA

En este punto se modela, simula y verifica el funcionamiento en Redes de Petri jerárquicas extendidas:

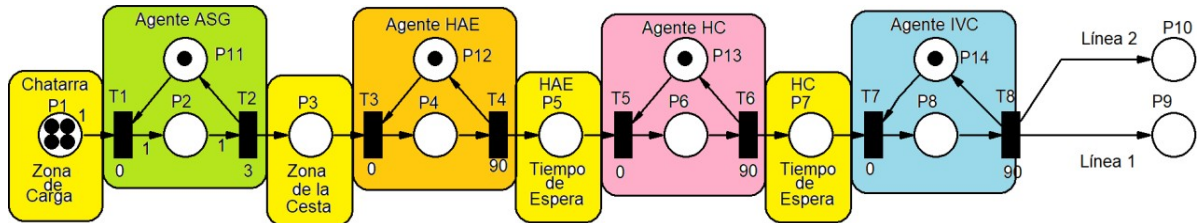


Fig. 21 Red Petri del Sistema Multiagentes, elaboración propia.

Cuando ocurre un retraso en el aseguramiento (ASG) el agente oferta información al resto de los agentes, el agente del HAE ajusta el suministro de Oxígeno para garantizar que la fundición de la chatarra se realice en un tiempo mayor, esto mismo ocurre cuando se llena la última cesta de la primera colada pues para garantizar la secuencialidad del proceso es necesario que el HAE retrase la fundición y así dar chance a llenar las cuatro cestas en la zona de carga.

Cuando ocurre una avería en una de las líneas de la IVC el agente IVC oferta información al resto de los agentes, el HAE y el HC licitan por dicha información ya que el porcentaje de funcionalidad de dicha instalación compromete la secuencialidad del proceso en el resto de la línea de producción, en este caso el agente HC determina que debe aumentar el tiempo de espera del acero líquido en la cazuela y el agente HAE disminuye el suministro de oxígeno al corte de chatarra en el horno y se usa un tap del transformador que genere menor potencia del arco eléctrico.

2.1.3. PROGRAMACIÓN, SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DE LA PROPUESTA.

En el caso que nos ocupa aprovechamos las bondades de herramientas como CoDeSys®, debido a las limitaciones tecnológicas y de recursos en la Acería se ve limitado el uso de una arquitectura SADIA es por lo que se propone comenzar por una arquitectura más simple basada en la arquitectura SCDIA donde el lazo de control de cada agente del proceso es modelado dentro de los mismos y que cumpla con las características de ser una arquitectura híbrida.

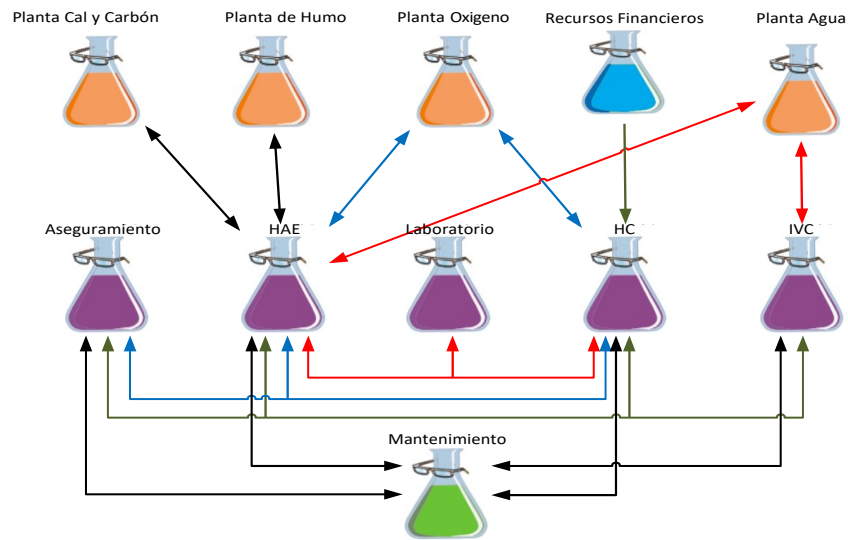


Fig. 22 Arquitectura propuesta para la validación en Industria, Elaboración propia.

Seleccionamos una estructura de 11 autómatas los cuales dotamos con un algoritmo de inteligencia Artificial (IA). Se propuso como bases del conocimiento la lógica difusa con un algoritmo basado en Takagi Sugeno para conformar los agentes de nuestra arquitectura distribuida basada en tres colecciones de Agentes Inteligentes. Se establecieron negociaciones a través de protocolo MODBUS entre los soportes de hardware del sistema multiagentes. Se sometió cada agente de la estructura a una incertidumbre equivalente a una problemática real del sistema, y se registró el tiempo que respondieron cada una de las IA ante las incertidumbres propuestas.

Primeramente, a aseguramiento llega la chatarra donde será clasificada por ferroaleación y se ingresará una receta al sistema, en este punto el agente Aseguramiento (ASG) a través de una ejecución de rutina de chequeo de fallas verifica que estén creadas todas las condiciones para efectuar correctamente un aseguramiento de la carga metálica, sin retrasos; donde determinará el estado de los pulpos, electroimanes, las grúas y los carros porta cesta, de haber alguna falla como por ejemplo avería en uno de los carros porta cesta , ejecutará una subrutina de reconfiguración dinámica, mediante la cual se determina que se debe poner una grúa en función de la carga y otra en función de la descarga, o en caso de retraso en alguna

de las zonas del proceso; seguido a esto, ofertará información al agente HAE, el cual aceptara o no la carga en dependencia del estado del resto de la línea de producción.

2.1.3.1. VALIDACIÓN DE LA PROPUESTA

Para la validación de la propuesta creamos escenarios dentro de la estructura del MAS. La empresa CEDAI Holguín, siendo *Partner* de ACINOX en el proyecto, tiene acceso a la tecnología utilizada. Schneider nos facilita software y hardware para el desarrollo del proyecto, es por esto que nuestro trabajo será ejecutado en el ambiente de desarrollo SoMachine®.

Primeramente, seleccionamos los dispositivos que simularán el comportamiento del MAS usando el configurador Machine Struxure de Schneider donde seleccionamos once autómatas Modicon M241CE40R. Este PLC es una unidad compacta de 24 entradas digitales (de ellas 8 entradas rápidas) y 16 salidas digitales (4 salidas rápidas lógicas y 12 salidas a relé) con 2 puertos de comunicación serie y un puerto Ethernet, capacidad para dos cartuchos. Se incluye un módulo de entrada analógica TM3AI4 (+-10V, 0-10V, 0-20mA, 4-20mA), de 12 bits con conexión a tornillo. La configuración utilizada está representada en la figura 23.

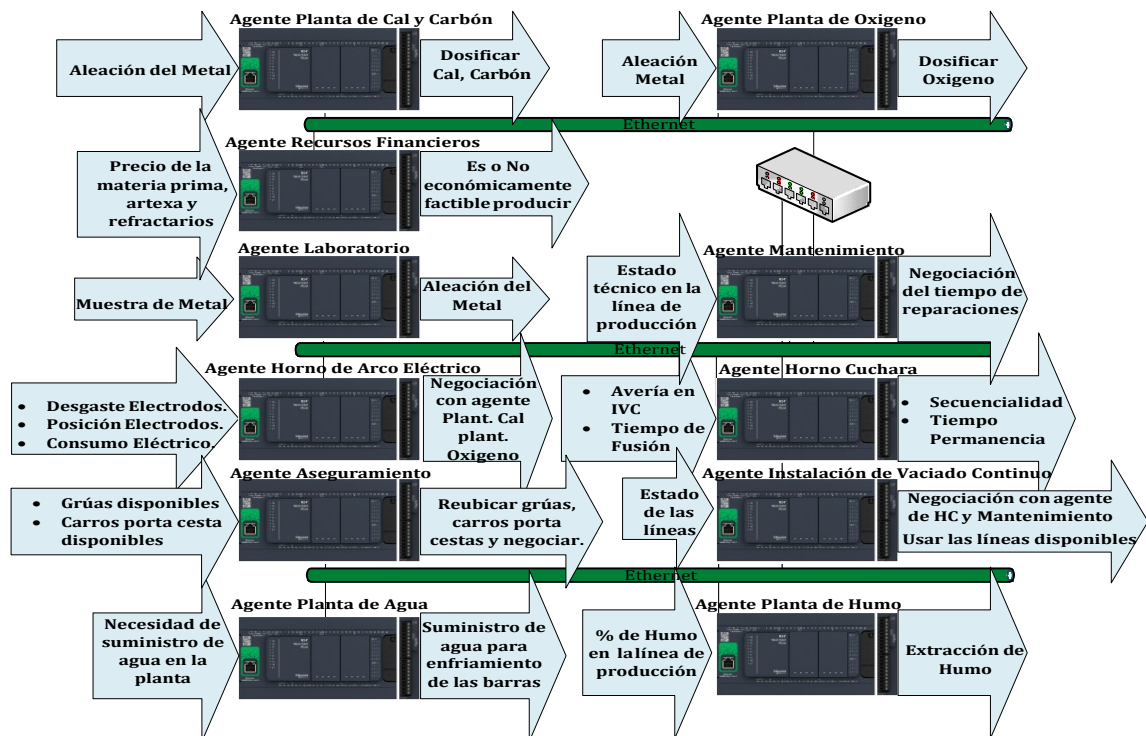


Fig. 23 Comunidad de agentes con Autómatas de Schneider Electric M241CE40R.

DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL PROGRAMA

Describiremos la estructura del programa del Agente encargado de atender el proceso en el HAE, en los anexos reflejaremos al resto de la comunidad de agentes.

Dentro de cada PLC, considerado como agente dentro de la comunidad del SCDIA se ha programado una IA (Inteligencia Artificial) en lógica difusa con un algoritmo basado en el método de Takagi Sugeno, a continuación, se describe la unidad de organización de programa principal.

POU DESCRIPCIÓN GENERAL

El término 'unidad de organización de programa' (POU) se utiliza para todos los objetos de programación (programas, bloques de funciones, funciones, etc.) que se utilizan para crear una aplicación de controlador.

En aras de recrear un escenario lo más real posible se programan los autómatas con los POU necesarios en un proceso real los cuales se mencionan a continuación:

- POU_Manual
- POU_Automatico
- POU_Simulacion
- POU_Acondicionador_Senal
- POU_Fuzzy
- POU_Control_Acceso
- POU_Alarmas
- POU_Mantenimientos_Predictivos

En el Anexo 1 se puede apreciar la estructura del programa principal programado en Lenguaje de diagramas de funciones continuas (CFC). Donde se centra la atención en la inteligencia que se encargará de atender la generación de incertidumbres que puedan surgir en la planta.

POU_Fuzzy (Figura 24)

En el POU Fuzzy tenemos como variables de entrada el habilitador de la Inteligencia Artificial, la lectura del desplazamiento de las barras, una entrada para decirle a la inteligencia donde queremos que mantenga estable nuestro sistema, y las entradas de las perturbaciones. Como salidas tenemos una variable booleana que indica cuando la

inteligencia se encuentra activada para indicarle al POU automático y un set point para el PID del POU Automático.

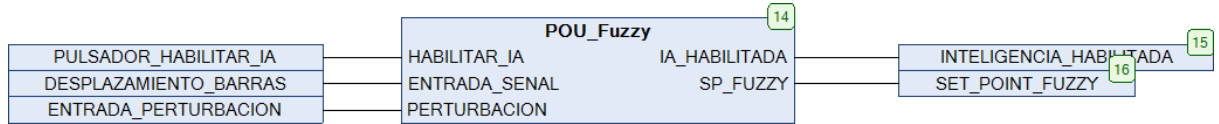


Fig. 24 POU Fuzzy visto desde el programa principal

Dentro del POU podemos observar cuando se le transfieren valores al bloque de lógica difusa para ser analizados por las funciones de pertenencia. Ver Fig.25

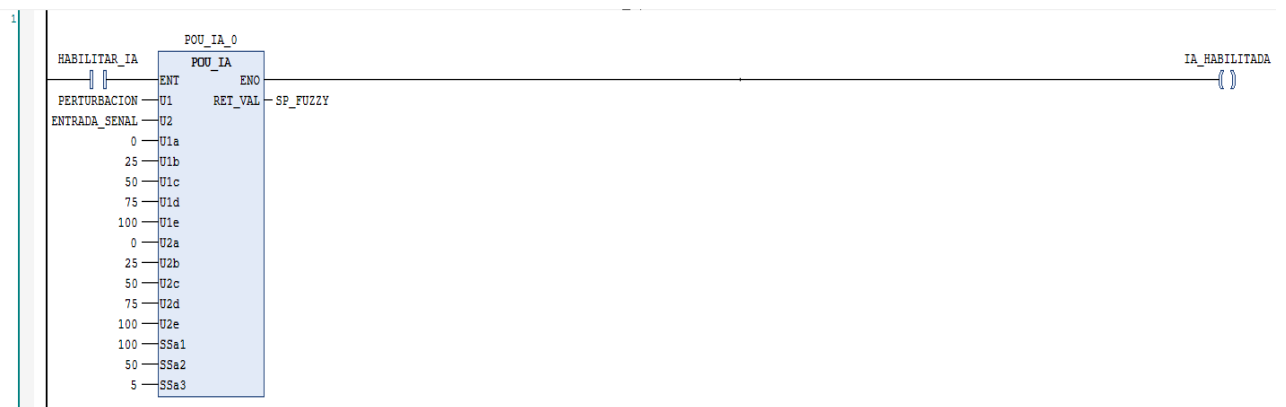


Fig. 25 Programación Interna en Ladder del POU Fuzzy.

De forma similar se programan los agentes Aseguramiento, HC e IVC en autómatas independientes y se establece una sincronización a través de un enlace mediante protocolo MODBUS®, la programación de negociaciones es transparente para el protocolo establecido y solo obtenemos el reflejo de dichas negociaciones mediante el establecimiento de variables de negociación, emulando un Protocolo de contrato Neto (CNP del inglés Contract Net Protocol), cada agente deposita información de estado en dichas variables que se encuentran dentro del mismo POU principal y el agente que necesite esta información oferta por el acceso a la misma, el agente portador de la información determinará si dará acceso a la información, de ser positiva la respuesta permite la lectura por parte del licitador. Como resultado obtenemos una comunidad de agentes para la integración del proceso en la acería, ver figura 26.

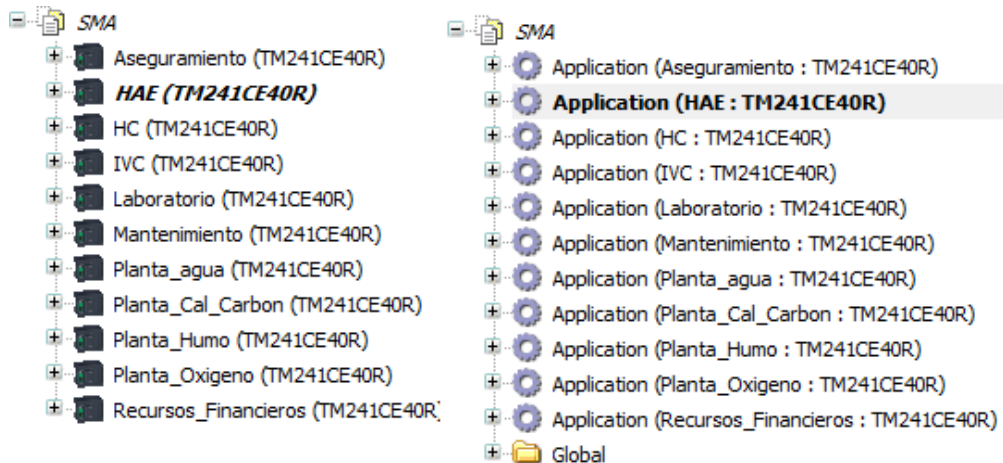


Fig. 26 Comunidad de Agentes para la acería.

2.2. DESCRIPCIÓN DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL IMPLEMENTADA

Para el desarrollo de este proyecto primero se definieron las variables lingüísticas, que en este caso del Agente HAE son:

- Como nuestra perturbación tenemos el desgaste de los electrodos (pérdida de peso), que se encuentra en función la lectura del peso de las barras o electrodos de control del arco en el HAE. Esto se base en que el desgaste de los electrodos produce perdida del peso y se debe compensar con un aumento en la apertura de la válvula de control para disminuir la impedancia en los electrodos del Horno.

$$De = f(p) \quad (2.1)$$

De=Desgaste en los electrodos.

p=peso de los electrodos

tendremos un universo de discurso de desgaste de los electrodos de 0 a 100%.

- Como entrada de señal tenemos la posición en la que se encuentran los electrodos que la tendremos en función de la impedancia en el HAE, al acercarse los electrodos al metal se produce un aumento en el arco eléctrico y por ende una disminución en la impedancia entre los electrodos y por tanto nos indica que los mismos se encuentran en la posición baja.

$$Pe = f(z) \quad (2.2)$$

Pe=posición entre electrodos

z= impedancia entre los electrodos

en nuestra impedancia tendremos un universo de discurso que quedará definido en porcentaje de impedancia 0 a 100%.

- Salida de control para la apertura de una servo-válvula.
En la salida obtenemos un porcentaje de apertura de una servo-válvula que controla un cilindro neumático para ajustar el desplazamiento efectivo del mecanismo de los electrodos.

Las variables lingüísticas antes mencionada se muestran en la figura 27.

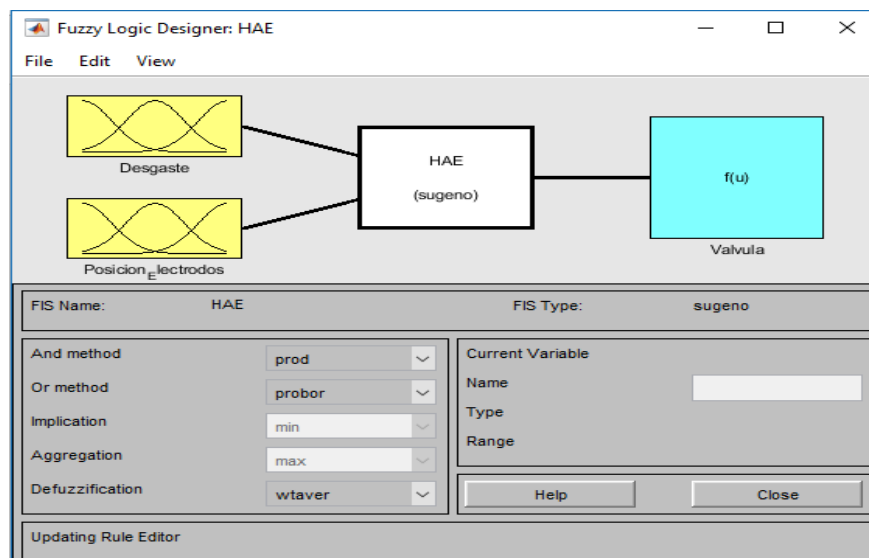


Fig. 27 Variables lingüísticas, elaboración propia.

Una vez definidas nuestras variables lingüísticas definimos los valores lingüísticos:

- Pequeño
- Medio
- Grande
- Abajo
- Medio
- Arriba

Capítulo 2. Sistema de automatización distribuido inteligente basado en agentes

En la figura 28 se muestran los valores de los conjuntos lingüísticos antes mencionados, creando las particiones del universo de discurso de cada variable.

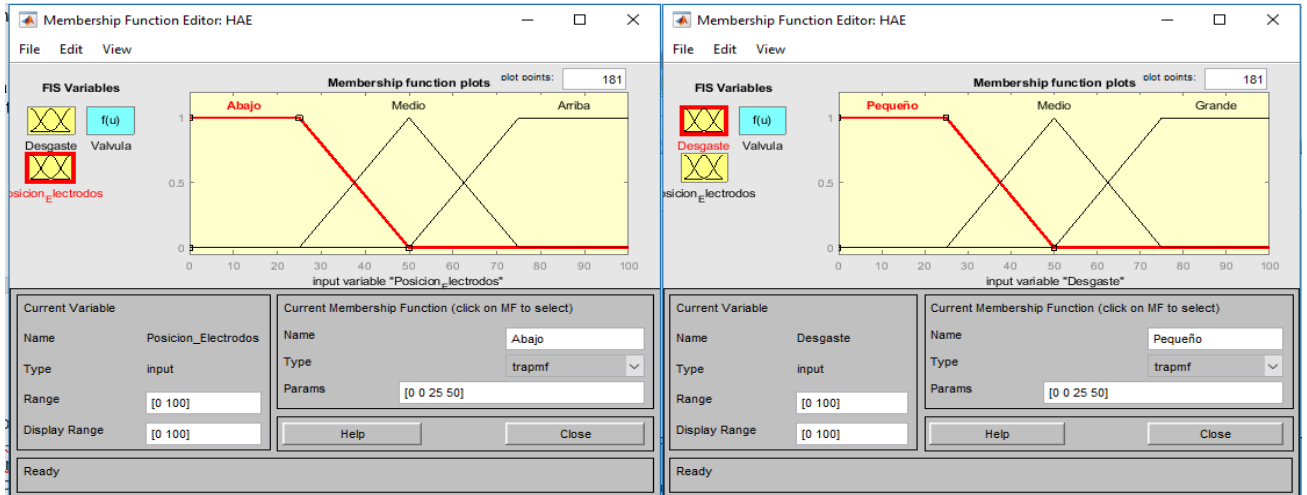


Fig. 28 Valores lingüísticos, elaboración propia.

Con ayuda de un código en Matlab generaremos los rangos de trabajo de nuestro sistema para cada uno de los valores lingüísticos que introducimos anteriormente, los cuales se muestran en la figura 29

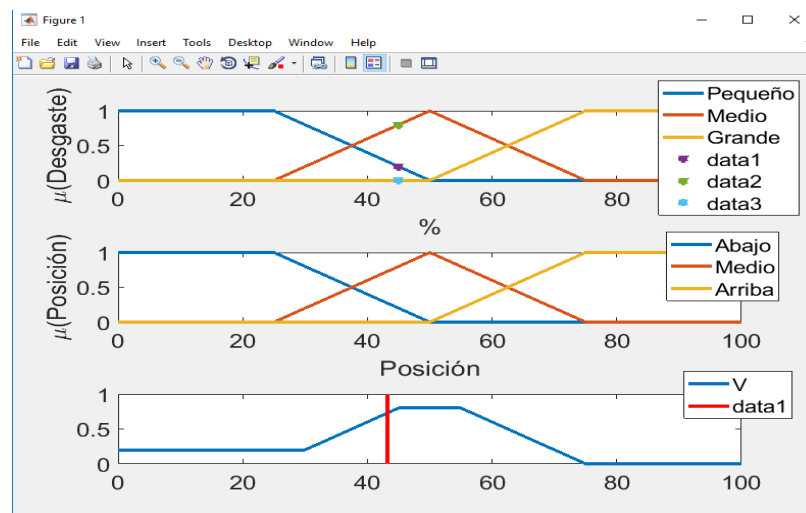


Fig. 29 Rango de trabajo, elaboración propia.

Una vez definidos todos estos parámetros se crean las reglas difusas de la forma IF A and/or B THEN C. En la figura 30 se muestran las reglas difusas en base a la experiencia de un experto.

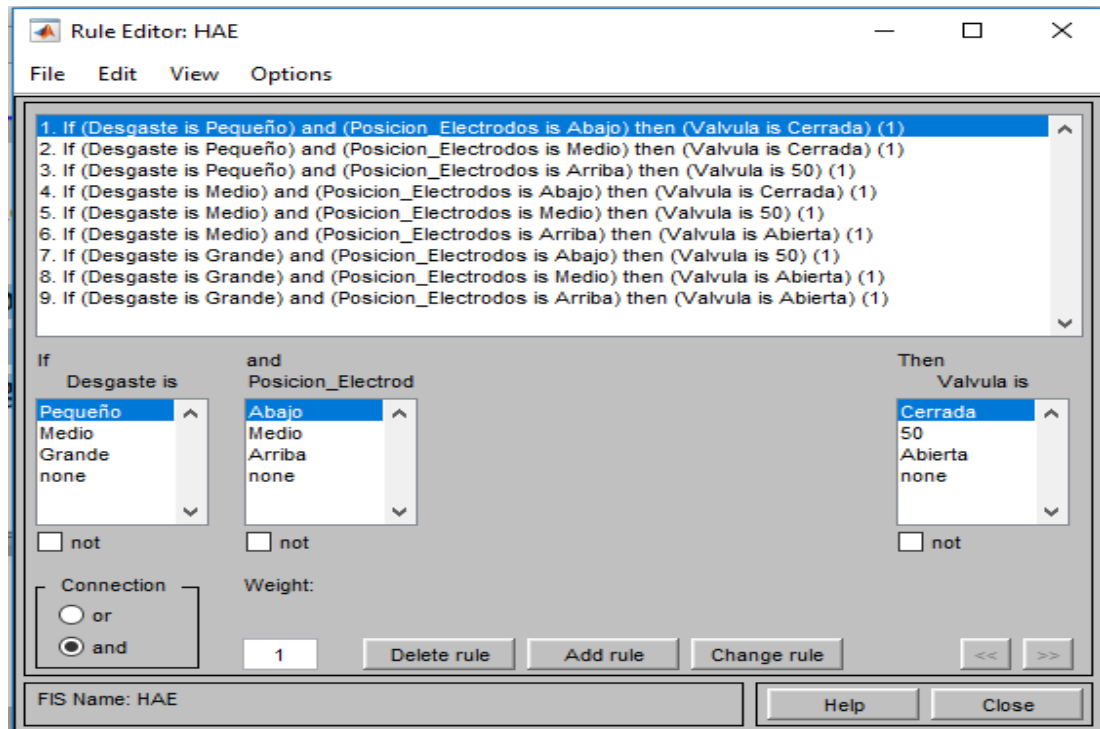


Fig. 30 Reglas difusas, elaboración propia.

Se usa el toolbox IDENT para obtener la función de transferencia de nuestro sistema y ver el comportamiento del mismo con las diferentes reglas difusas que se crearon anteriormente. El entorno del toolbox se muestra en la figura 31.

Para esto se usa el siguiente código:

```
w=[];  
clear all  
w=[];  
r=linspace(1,1,30);  
r1=18*r;  
r2=r1';  
ident
```

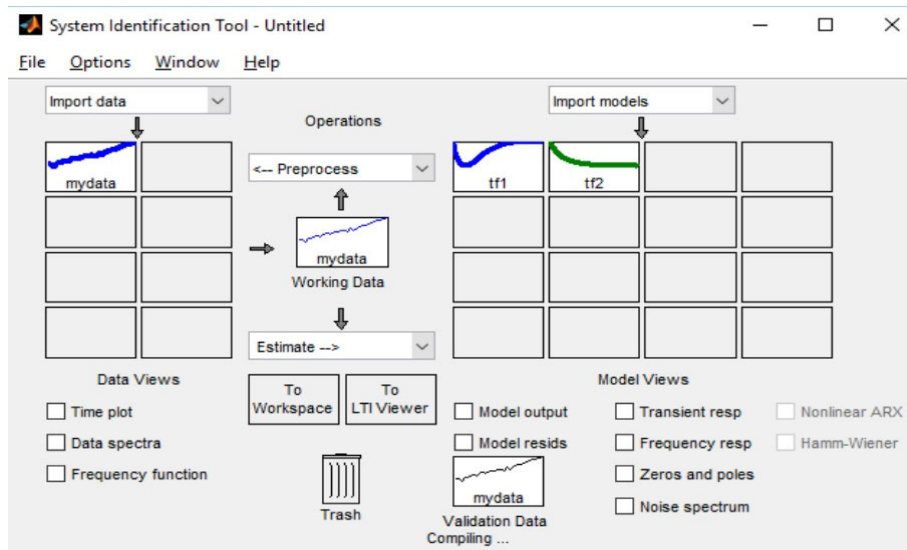


Fig. 31 Toolbox Ident, elaboración propia.

Una vez realizados estos pasos obtendremos una gráfica la cual nos muestra la respuesta tridimensional de nuestro sistema en el toolbox fuzzy, lo cual se muestra en la figura 32.

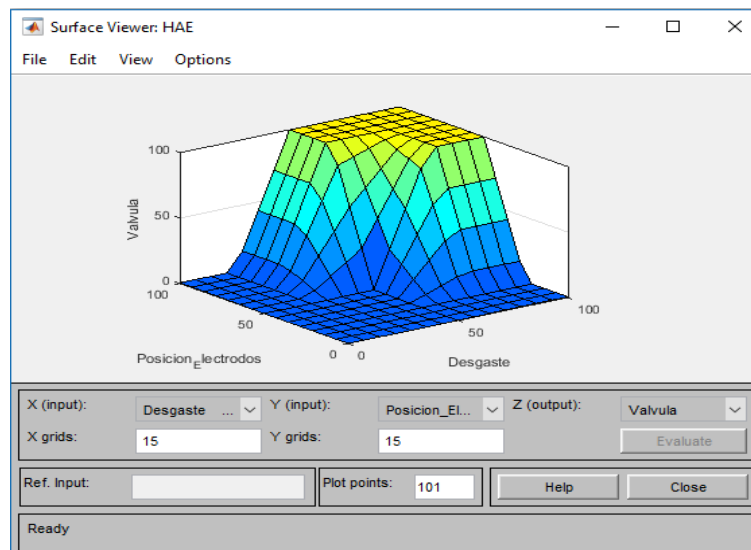


Fig. 32 Representación 3D, elaboración propia.

Así mismo, en el toolbox podemos observar, en la simulación, el comportamiento o variación en el tiempo de nuestras reglas difusas con sus respectivas salidas, lo cual se muestra en la figura 33.

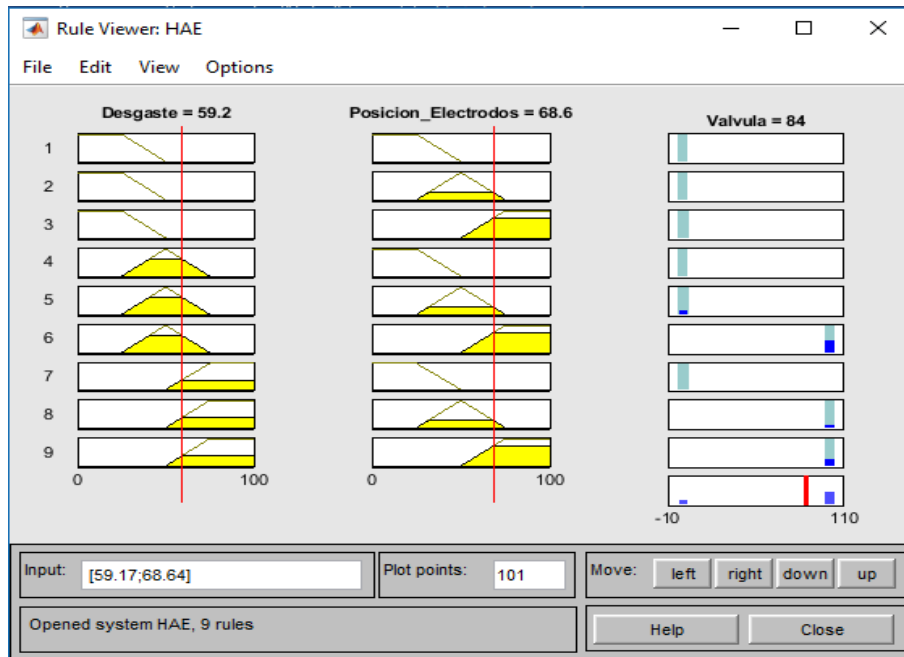


Fig. 33 Vista de nuestras difusas, elaboración propia.

Con el toolbox Ident podemos generar nuestra función de transferencia eligiendo los ceros y polos que tiene nuestro sistema, de esta manera podemos comprobar si nuestro sistema es estable o no es estable.

Finalmente hacemos uso del Simulink® del Matlab® para representar o simular nuestro sistema difuso: entrada, controlador o planta, salida, lo cual se muestra en la figura 34

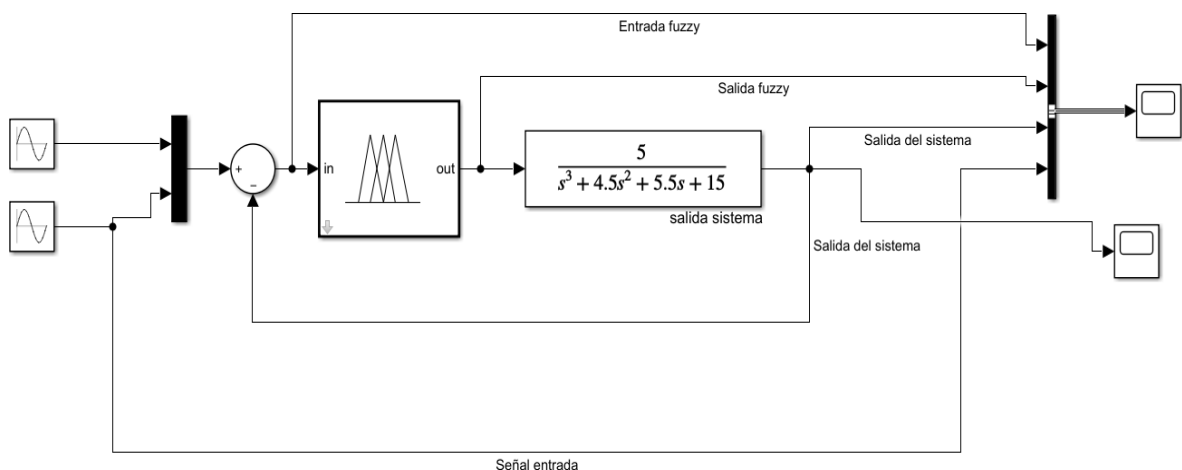


Fig. 34 Diagrama del controlador difuso en Simulink, elaboración propia.

Gracias a esta simulación se puede observar gráficamente la respuesta de nuestro sistema y comprobar si se cumplen todas las reglas difusas previamente establecidas, ver en la figura 35.

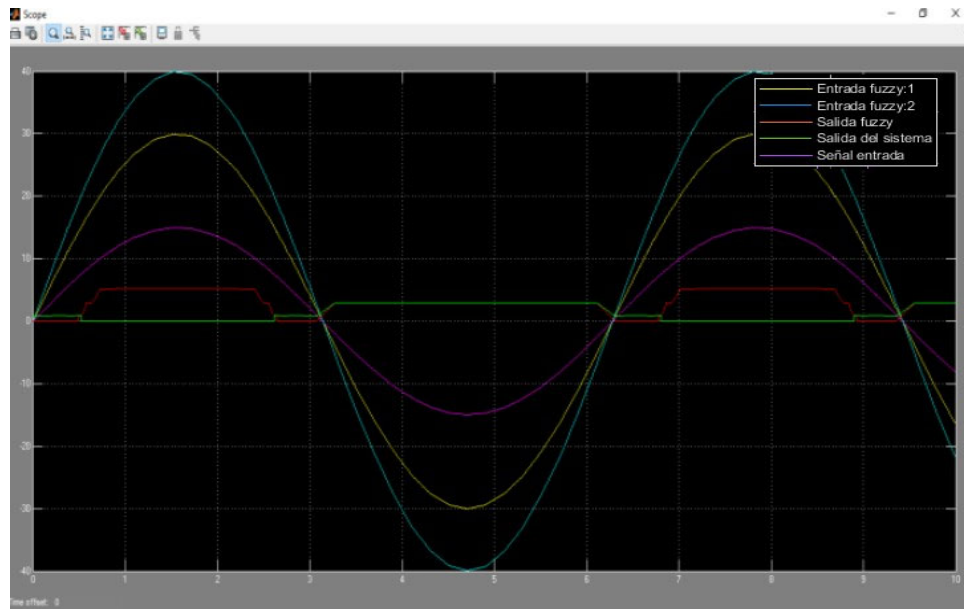


Fig. 35 Respuesta del sistema en Simulink, elaboración propia

Como se observa en la figura 35 la respuesta del control difuso garantiza la robustez del SMA ante incertidumbres que se generan en el proceso, en este caso usamos de ejemplo el desgaste de los electrodos en el HAE método que actualmente es realizado por el operador a partir de prueba y error.

Implementación de la inteligencia en el Autómata programable.

En esta sección se especifica la forma de implementar un controlador difuso tipo Takagi-Sugeno en un PLC M241CE40R. La elección del esquema Takagi-Sugeno se debe a su menor costo computacional comparado con el sistema difuso tipo Mandami. Si en el diseño inicial se dispone de un sistema difuso tipo Mandami, éste se puede convertir a Sugeno, aproximando el modelo Mandami a partir de mínimos cuadrados o algoritmos evolutivos. De esta manera cualquier sistema de inferencia o control difuso se puede implementar por medio de un Takagi-Sugeno con un costo computacional menor [72]. Si se desea reducir considerablemente el costo computacional y mejorar el desempeño del controlador difuso se pueden emplear técnicas evolutivas que decidan cuáles son

las mejores reglas, la cantidad de funciones de pertenencia y los parámetros de las funciones de membrecía de las entradas y salidas. Esto tiene el objetivo de reducir el error entre la referencia y la salida del sistema, mediante la aplicación de algoritmos genéticos (GA), colonia de hormigas (ACO) y enjambre de partículas (PSO).

En general el modelo difuso más sencillo de implementar es el tipo Takagi-Sugeno, debido a que el cálculo de la salida tiene un costo computacional mucho menor que el modelo Mandami. Los pasos de aplicación de un modelo difuso son: fusificación de las entradas, evaluar las funciones de pertenencia de cada entrada de acuerdo con el valor fusificado, evaluación de las reglas, cálculo y defusificación de la salida. Los pasos de fusificación y defusificación consisten en llevar los valores de entrada y salida a una escala definida en el sistema difuso [76].

El controlador difuso en el cual los parámetros se sintonizan de acuerdo con el error, se debe crear un bloque de función, el cual permite guardar valores y retenerlos en cada ciclo de ejecución. Al almacenar de esta forma las posiciones de las funciones de pertenencia de la entrada y la salida se pueden desarrollar algoritmos adaptativos. Pero si se requiere un modelo estático, en el cual los parámetros que definen el modelo no se reajustan, entonces se puede realizar todo el proceso en una función, donde la salida de la función solo depende de los valores de las entradas.

El lenguaje de programación de texto estructurado (ST) del estándar IEC 6113-3 es similar al lenguaje de programación Pascal. El lenguaje SCL (*del inglés* Structured Control Language) de SoMachine se basa en ST(*del Inglés* Structured Text). El diseño del sistema difuso se realiza en SCL[77].

La declaración de la función difusa y sus variables en sintaxis SCL de SoMachine®, para 2 entradas, cada una con 3 funciones de pertenencia, y una salida del sistema difuso, es:

```

FUNCTION_BLOCK POU_IA
VAR_INPUT
    ENT: BOOL; (*Habilita IA*)
    U1,U2: REAL; (* Entradas del Sistema*)
    U1a,U1b, U1c, U1d, U1e: REAL; (* Valores límites de definición de la entrada U1 Parámetros 3 Particiones*)
    U2a,U2b, U2c, U2d, U2e: REAL; (* Valores límites de definición de la entrada U2 Parámetros 3 Particiones*)
    SSa1, SSa2, SSa3: REAL; (* Tres Muestras de la Salida A = perturbaciones *)
END_VAR
(* Matriz De Inferencia Para Dos Entradas Y Una Salida *)
(* U1=Desplazamiento Bajo Normal Alto *)
(* U2=Referencia *)
(* Pequeña SSa=Máximo SSa=Medio SSa=Mínimo *)
(* Normal SSa=Máximo SSa=Medio SSa=Mínimo *)
(* Grande SSa=Máximo SSa=Medio SSa=Mínimo *)
VAR_OUTPUT
    ENO: BOOL; (*Salida de Habilitación*)
    RET_VAL: REAL; (*Salida 1*)
END_VAR
VAR
    EFP: ARRAY[1..2,1..3] OF REAL; (*EFP[Entrada,Particion]=valores de habilitación de funciones de pertenencia*)
    AFP: ARRAY[1..2,1..3] OF BOOL; (*AFP[Entrada,Particion]=TRUE=funciones de pertenencia activadas*)
    WS: ARRAY[1..3] OF REAL; (*peso en las salidas*)
    SS: ARRAY[1..3] OF REAL; (*posiciones de las constantes de funciones de salida*)
    num,den,temp: REAL;
    n: INT;
END_VAR

```

Las dimensiones de los vectores EFP y AFP dependen de la cantidad de entradas (filas) y el número de funciones de pertenencia (columnas). El vector EFP almacena los valores de la evaluación de las funciones de pertenencia, mientras que AFP almacena qué funciones de pertenencia se activaron (valor lógico verdadero sí se activó y falso de lo contrario). El vector AFP facilita posteriormente la evaluación de las reglas del sistema difuso. El vector S contiene las posiciones de los singletons (constantes) de las funciones de la salida. El vector WS contiene los pesos de cada una de las salidas. La variable temp almacena valores intermedios en la asignación de los valores de WS. La variable n se emplea para realizar el ciclo iterativo FOR para el cálculo de la salida. Finalmente, num y den son las variables del numerador y denominador para el cálculo de la salida, respectivamente.

Definición y evaluación de las funciones de pertenencia Las funciones de pertenencia recomendadas son del tipo triangular y trapezoidal, debido a su bajo costo computacional. Para evaluar las funciones de pertenencia de una entrada cualquiera,

se emplean estructuras condicionales IF. A continuación, se muestra un ejemplo con una función triangular:

```
//AFP [1 2] Medio con una Función de pertenencia triangular
IF (U1>U1b) AND (U1<U1d) THEN //Entrada 1 Partición Normal
  AFP[1,2]:=TRUE;
  IF U1<=U1c THEN
    EFP[1,2]:=(U1-U1b)/(U1c-U1b);
  ELSE
    EFP[1,2]:=1-((U1-U1c)/(U1d-U1c));
  END_IF;
ELSE
  AFP[1,2]:=FALSE;
END_IF;
```

Si la entrada se encuentra dentro del rango de definición de la función de pertenencia, entonces se hace verdadero el valor en el vector de activaciones (AFP) correspondiente a la función de pertenencia, en este caso es la columna 2. Posteriormente, dependiendo del valor de la entrada se calcula el valor de la función de pertenencia y se almacena en EFP. Se debe reducir al máximo la cantidad de operaciones que se realizan al evaluar la función de pertenencia figura 28.

Métodos de implicación

Antes de definir las reglas, se plantea cuáles son los métodos de implicación entre las funciones de pertenencia de las entradas. Los métodos de implicación unen los valores fusificados de las entradas para generar las reglas y posteriormente la salida. En general las reglas tienen la forma de la figura 30:

SI U1 es FP1 AND U2 es FP1 OR U1 es FP2 AND U2 es FP1 ENTONCES DU es S [1]

Las uniones AND generalmente se aplican seleccionando el mínimo de los valores de pertenencia obtenidos al evaluar las entradas, mientras que en las uniones OR se aplica el máximo entre los mínimos obtenidos por las uniones AND. Las uniones AND y OR se usan para definir las reglas difusas. Al final de las reglas, el consecuente está asociado con una función de pertenencia de la salida.

Definición de las reglas

Para evaluar las reglas se emplea el vector booleano de activación de las funciones de pertenencia (AFP), de esta manera se hace más fácil y rápido evaluar cada regla:

```
//AFP [1 1] y AFP[2,1]
IF AFP[1,1] AND AFP[2,1] THEN //Entrada 1 Bajo Entrada 2 Bajo
  IF EFP[1,1]>EFP[2,1] THEN
    temp:=EFP[2,1];
  ELSE
    temp:=EFP[1,1];
  END_IF;
  IF WS[1]<temp THEN
    WS[1]:=temp;
  END_IF;
END_IF;
```

Cada vez que se evalúa una regla, inicialmente se almacena el mínimo entre los valores de las funciones de pertenencia que hacen parte de la regla. Posteriormente, si existen varias reglas asociadas a una misma salida, entonces se compara el valor obtenido en la regla con el valor del peso almacenado previamente a la salida de dicha regla. Se asigna como peso el mayor entre los dos.

Calculo de la salida

La salida del sistema difuso tipo Takagi-Sugeno se calcula de la siguiente forma:

$$salida = \frac{\sum_{n=1}^n WS[n]S[n]}{\sum_{i=1}^n WS[n]} \quad 2.3$$

Donde n es el número de funciones de pertenencia de la salida, WS[n] contiene el máximo entre las reglas que comparten la salida S[n]. El programa en SCL de la Ec. (1) para 3 funciones de salida, es:

```
FOR n:=1 TO 3 DO
  num:=WS[n] * SS[n]+num;
  den:=WS[n] + den;
END_FOR

RET_VAL:=num/den;
```

donde finalmente, RET_VAL devuelve el valor de la salida del controlador difuso. Recordar que num y den se deben inicializar con 0.

Con los pasos desarrollados en las secciones previas se puede crear el bloque de función que realiza la evaluación del sistema difuso, como se muestra en figura 25.

El bloque de función finalmente diseñado se puede invocar desde cualquier otro lenguaje establecido en el estándar IEC 1131-3. Como se observa en la Fig. 25, el bloque cuenta con las entradas U1 y U2, y la salida RET_VAL, que es la salida del controlador difuso. La entrada EN, es usada para habilitar el uso del bloque, y la salida ENO indica por medio de un valor lógico si se ejecutó correctamente el bloque.

Diseño del experimento

Escenarios de Simulación.

Para la simulación del sistema se recrearon 4 escenarios programados con una estructura básica de 11 agentes en autómatas M241CE40R de Schneider Electric con el software SoMachine® y se compararon con los tiempos reales de las decisiones tomadas por los operadores en régimen de operación normal e introduciendo las diferentes incertidumbres que se analizaron en los escenarios que a continuación se describen, aprovechando las bondades de un experimento de análisis de varianza (ANOVA).

Escenario 1, contempla la avería en uno de los carros porta cestas en la zona de carga y el Agente Aseguramiento sugiere poner una grúa en función de la carga y otra en función de la descarga para compensar los tiempos de producción que son asimilados por dos carros porta cestas ver figura 37.

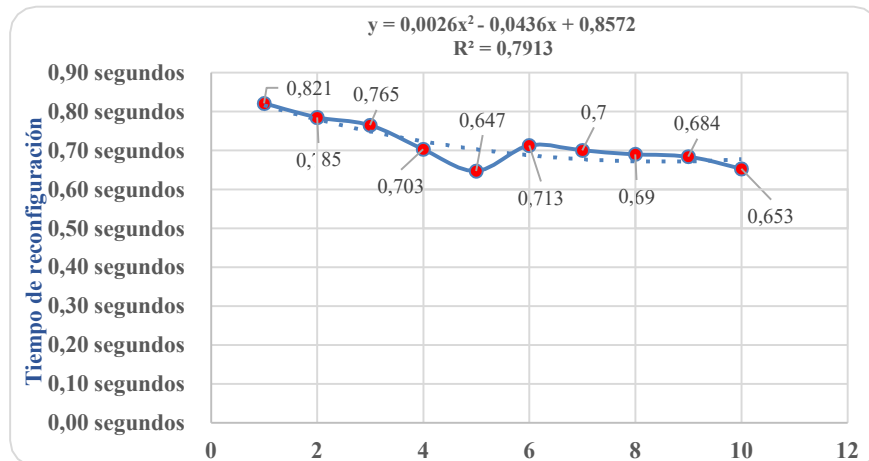


Fig. 36 Simulación del escenario 1 en el MAS, elaboración propia.

Escenario 2, analiza el consumo energético donde el agente del HAE determina que se debe aumentar la dosificación de oxígeno en el corte de chatarra para amortizar el impacto del consumo del arco durante el corte de chatarra ver figura 38.

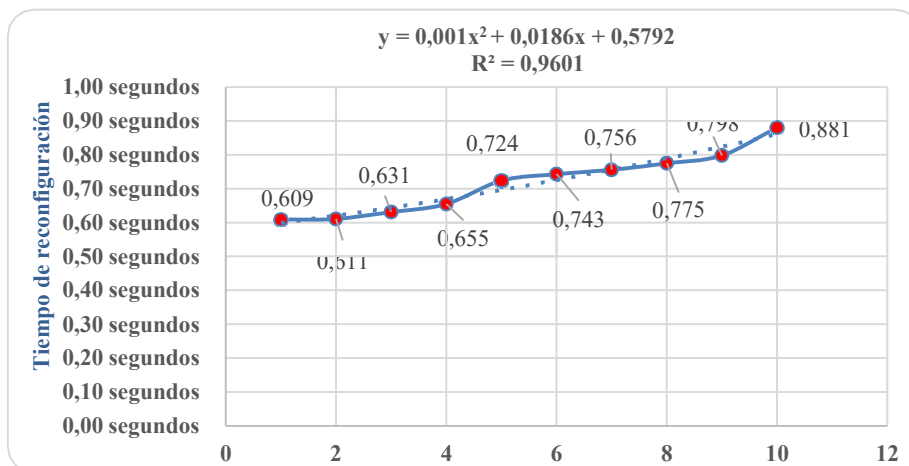


Fig. 37 Simulación del escenario 2 en el MAS.

Escenario 3, el Agente HC negocia la información con el agente financiero para conocer si la producción es económicamente factible, y dependiendo de ello, comienza otra secuencia de colada o finaliza la misma y termina el proceso de producción. Actualmente esta determinación se toma a nivel de actores humanos ver figura 39.

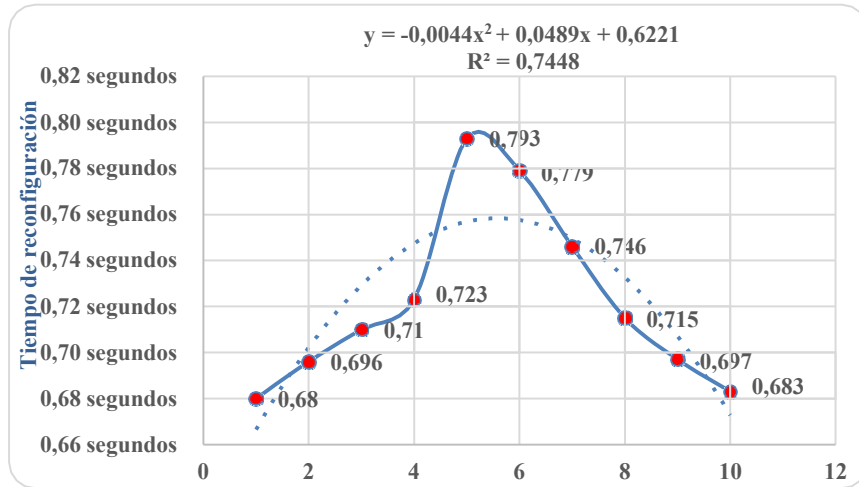


Fig. 38 Simulación del escenario 3 en el MAS.

Escenario 4, contempla una avería en una de las líneas de la IVC, cuyo agente sugiere el uso de la línea disponible, ajusta el tiempo de vaciado y negocia información con el agente HC para el ajuste del tiempo de permanencia de la colada en HC ver figura 40.

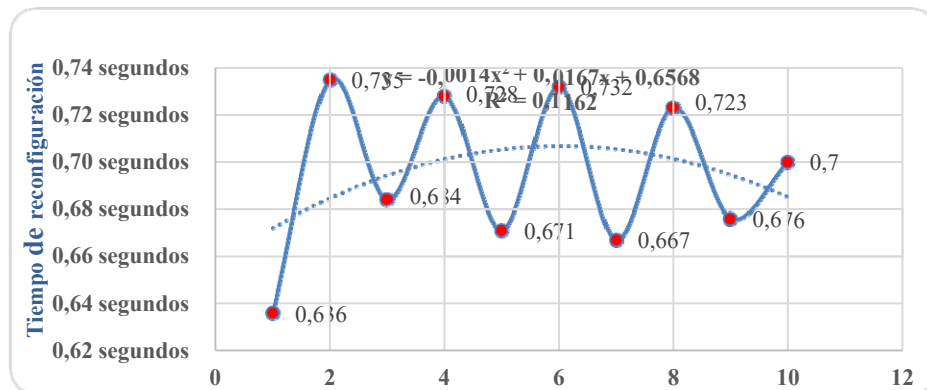


Fig. 39 Simulación del escenario 4 en el MAS.

Estos son los escenarios con las incertidumbres fundamentales y que con mayor frecuencia se generan en la acería ACINOX Las Tunas.

Como resumen presentamos en una tabla los tiempos de reconfiguración en cuatro escenarios del MAS propuesto donde se tuvieron en cuenta 10 muestra de cada escenario para el diseño de un experimento ANOVA unifactorial

Tabla 5 Tiempos de reconfiguración del MAS.

Tiempo de reconfiguración en los diferentes escenarios (segundos)				
Número de muestra	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
1	0,821	0,609	0,68	0,636
2	0,785	0,611	0,696	0,835
3	0,765	0,631	0,71	0,684
4	0,703	0,655	0,723	0,828
5	0,647	0,724	0,793	0,671
6	0,713	0,743	0,779	0,832
7	0,7	0,756	0,746	0,667
8	0,69	0,775	0,715	0,823
9	0,684	0,798	0,697	0,676
10	0,653	0,881	0,683	0,818

Escenario 1: Este escenario no presenta una buena homogeneidad de los datos puesto que su desviación estándar es la segunda más alta; esto quiere decir que los datos se distancian mucho de la media aritmética. En este escenario, existe un promedio de 0,05 segundos de dispersión, pero la media aritmética es baja, lo que significa que al sistema le toma menos tiempo reconfigurarse[78].

En este caso se demuestra que la toma de decisión del agente Aseguramiento no requiere la subordinación a los otros tres agentes de este nivel, sino solamente consultar si el resto de la secuencia de producción se mantiene sin afectaciones (HAE-HC-IVC funcionando correctamente) para decidir si mantiene la producción reconfigurando una de las grúas, lo cual fortalece la idea de subordinación heterárquica. También se comprueba que la decisión de mantener el suministro de materias primas tiene la misma prioridad que los otros tres agentes de ese nivel porque su importancia es igualitaria para la eficiencia de la acería. Además, se demuestra que la decisión ante esta incertidumbre es variable, porque si la consulta a los demás agentes radica en que el HAE, el HC o el IVC tengan un estado diferente, entonces puede mantenerse el uso de un solo carro, o dedicar las dos grúas u otra decisión diferente de acuerdo con la sincronización del sistema

Escenario 2: En este escenario disminuye la homogeneidad, la media aritmética es la segunda más alta, los datos son muy dispersos evidenciándose una desviación estándar de 0,09. Esto demuestra que no es necesaria una subordinación de los demás agentes, el Agente HAE consume menos tiempo en resolver el problema, garantizando así una correcta reconfiguración sin necesidad de consultar las decisiones en una cadena de jerarquía.

Escenario 3: En este escenario la media aritmética es la más alta, aunque tiene una buena homogeneidad gracias a la desviación estándar de 0,038 lo cual significa que los datos no se distancian mucho de la media aritmética, pero al ser la media aritmética más alta representa una respuesta muy mala ante las incertidumbres. Aunque no se obtiene una buena respuesta de reconfiguración, en este escenario se obtuvo la mejor respuesta obtenida en el HC entre los sistemas simulados, lo que demuestra que el desempeño autónomo del agente HC tiene mejor respuesta siempre y cuando no exista afectación en el resto de la secuencia de producción.

Escenario 4: En este escenario el MAS tuvo su mejor y más favorable desempeño ya que la media aritmética es la más baja por lo que toma menos tiempo en reconfigurarse. Además, presenta una baja dispersión de los datos puesto que la desviación estándar es de sólo 0,0333. Esto significa que con la arquitectura propuesta el desempeño de la IVC tuvo un aumento considerable gracias al tiempo que le toma reconfigurarse y resolver la incertidumbre local ver figura 41.

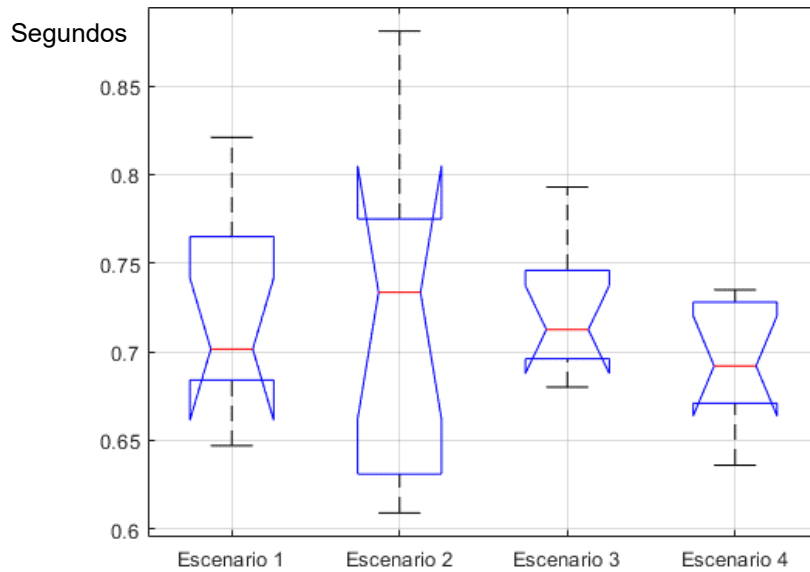


Fig. 40 Experimento ANOVA

Planteamiento de la Hipótesis.

El número de incertidumbres inciden significativamente en el tiempo reconfiguración dinámica basada en agentes inteligentes para sistemas distribuidos siempre y cuando se aplique una arquitectura Heterárquica variable.

Hipótesis Nula: H0 “El número de incertidumbres NO inciden significativamente en el tiempo reconfiguración dinámica basada en agentes inteligentes para sistemas distribuidos con una arquitectura Heterárquica variable.”

Hipótesis Alternativa: H1 “El número de incertidumbres SI inciden significativamente en el tiempo reconfiguración dinámica basada en agentes inteligentes para sistemas distribuidos con arquitectura Heterárquica variable.”

Tabla 6 Análisis de Varianza (ANOVA)

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,0043917	3	0,0014639	0,41800435	0,741148112	2,866265551
Dentro de los grupos	0,1260762	36	0,003502117			
Total	0,1304679	39				

El cálculo del ANOVA evidencia que no hay diferencia significativa en la duración de tiempos de reconfiguración dinámica en la ejecución ante las diferentes incertidumbres,

como lo expresa el p-value de 0,7411, que es muy superior al p-value de 0,05 ampliamente aceptado en las decisiones estadísticas. Esto significa que el número de incertidumbres no inciden significativamente en el tiempo empleado en la ejecución de la reconfiguración siempre y cuando se mantenga una estructura igualitaria variable. Todas las medidas de tendencia central son muy similares, como deberían ser si los tiempos de reconfiguración siguieran una distribución simétrica tal como la normal, el sesgo y la curtosis estandarizados están ambos entre -2 y 2, indicando que no hay desviación significativa en forma con respecto a una distribución normal ver tabla 6.

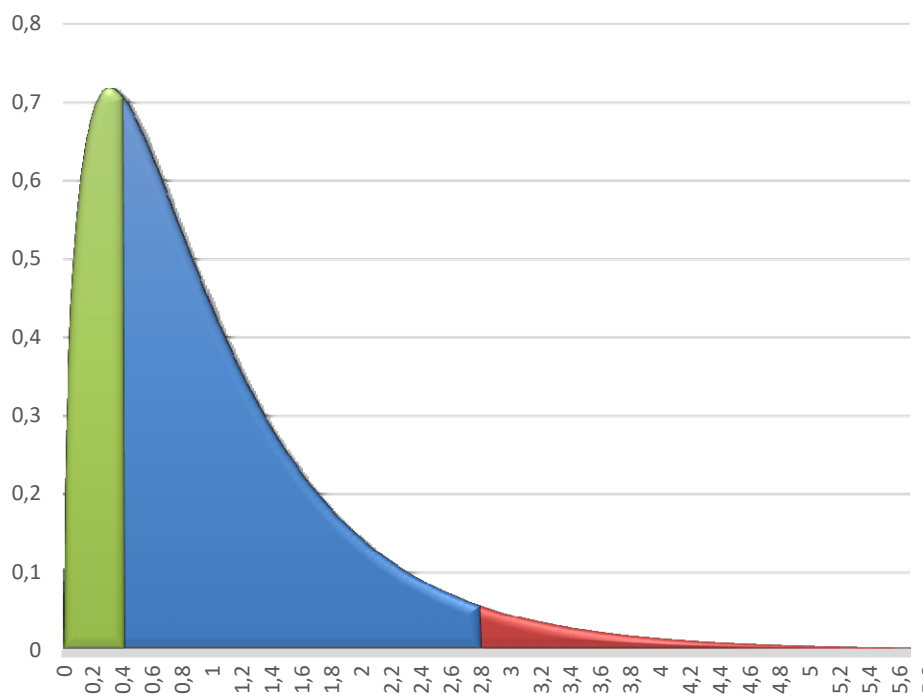


Fig. 41 Zona de aceptación del experimento ANOVA, elaboración propia.

Una vez realizado el análisis de los datos mediante Análisis de los datos (ANOVA), se evidencia que no hay diferencia estadística significativa, por lo tanto, el investigador tiene la certeza del 94.94% para aceptar la hipótesis nula esto quiere decir “El número de incertidumbres NO inciden significativamente en el tiempo reconfiguración dinámica basada en agentes inteligentes para sistemas distribuidos, concluyéndose que el

número de incertidumbres no modifican el comportamiento estable del sistema y se realiza la ejecución de reconfiguración con éxito y a un menor tiempo que la arquitectura actual[78].

Tabla 7 Tiempos de respuesta del jefe de turno mayor.

Tiempo en los diferentes escenarios, en segundos				
Número de muestra	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
1	120	102	270	105
2	117	98	267	96
3	113	105	253	102
4	116	93	241	95
5	112	95	254	97
6	111	104	253	92
7	114	84	232	98
8	113	90	247	93
9	110	106	241	96
10	112	104	237	90

Los tiempos de respuesta con la aplicación del MAS, fueron notablemente mejores que los registros de tiempos empleados en las decisiones de los jefes de turno. En el Escenario 1 el tiempo fue inferior en un 99,37%, en el Escenario 2 la mejora fue de 99,26%, en el Escenario 3 el sistema de reconfiguración del MAS realiza su mejor aporte disminuyendo el tiempo de respuesta en un 99,71% y en el Escenario 4 se logra una mejora del 99,27% ver tabla 7[78].

A continuación, se realiza las pruebas del MAS para observar las ventajas con referencias al uso de agentes independientes.

Escenario 1 en el cual se puede apreciar la coordinación y distribución de tareas es el escenario en el cual se presenta una avería en una de las líneas de la IVC automáticamente esta pasa a un 50% de disponibilidad, el agente Recursos Financieros realiza el análisis de factibilidad evaluando los costos de artesas y los precios de producción, el agente Aseguramiento disminuye su porcentaje de disponibilidad

redistribuyendo las grúas (Una para la carga y otra para la descarga) para aumentar el tiempo en que se suministra chatarra hacia el HAE y disminuir el tiempo de clasificación y descarga de la chatarra para cuando IVC esté al 100% de disponibilidad exista una reserva de chatarra clasificada y ganar tiempo, por otro lado el HAE baja la intensidad del arco y trabaja a un menor porcentaje de disponibilidad para aumentar el tiempo de fundición de chatarra y así garantizar que toda la colada se pueda vaciar a través de la línea disponible y mantener la secuencialidad pues un paro implicaría un gran consumo de artesas, al mismo tiempo el agente HC aumenta el tiempo de permanencia de la colada para garantizar la secuencialidad. Todas estas tareas son ejecutadas de formas simultaneas[78,p.2449].

Escenario 2 Avería en el carro porta cesta, el agente aseguramiento pasa a un 50% de disponibilidad el HAE disminuye potencia así disminuyendo el porcentaje de disponibilidad y el HC aumenta tiempo de permanencia disminuyendo también un porcentaje de disponibilidad y así se mantiene la secuencialidad, terminado el análisis para determinar la superioridad de nuestra arquitectura propuesta con la existente , realizamos un análisis similar que el realizado a la arquitectura SADIA a las demás arquitecturas estudiadas, obtuvimos el resultado que se aprecia en la figura 42 los cuales favorecen a la aplicación de SADIA sobre las demás arquitecturas estudiadas.

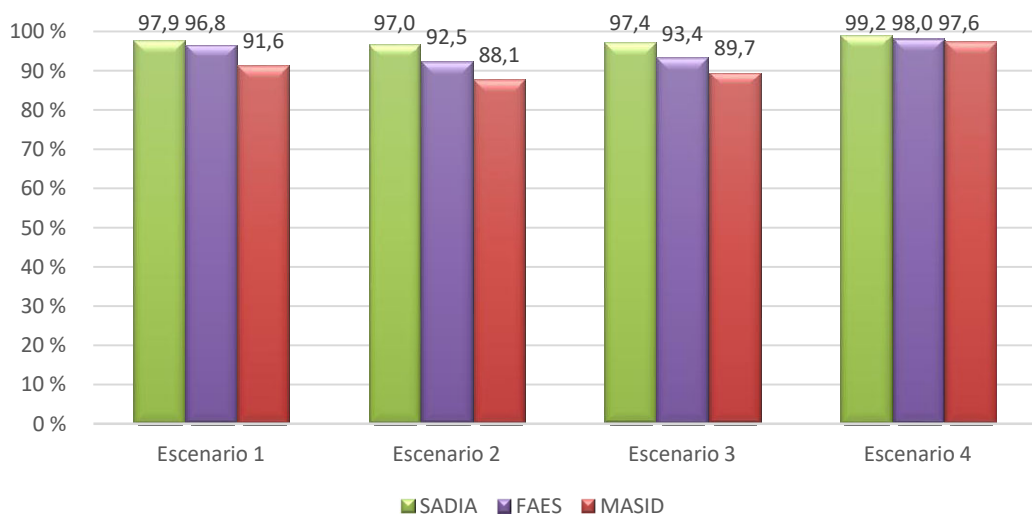


Fig. 42 Comparación con arquitecturas estudiadas

Como en nuestra investigación optamos por un enfoque mixto ya explicada la ruta cuantitativa procedemos a explicar nuestra ruta cualitativa la cual la basamos en la aplicación de una encuesta de la cual obtenemos el factor de impacto que implica la implementación de un sistema a esta magnitud, desde el punto de vista de los expertos.

Según la encuesta realizada a los tecnólogos de la acería, no solamente es necesaria la aplicación de un sistema inteligente que sea capaz de gestionar el cronograma de producción, sino también el sistema tendría muchas ventajas en cuanto a reducir los tiempos de producción y las afectaciones creadas por la dependencia de decisiones de los jefes de turno, donde las decisiones acertadas muchas veces se ven influenciadas por la preparación, la experiencia, el tiempo de trabajo y el ambiente laboral. La dinámica compleja de la acería crea posibilidades de que puedan surgir afectaciones comunes y otras no comunes, donde la velocidad de respuesta ante las mismas es fundamental para la eficiencia del sistema. El criterio de los tecnólogos encuestados demostró que el sistema que se propone en esta investigación ofrece una respuesta efectiva a esta problemática, ya que tiene herramientas que permiten dar respuesta a diferentes afectaciones abarcando la mayor cantidad de ellas y dando la posibilidad de mejorar los índices de consumo energético, de gastos de materiales y costos de producción. La flexibilidad en la toma de decisiones igualitaria variable de los cuatro agentes fundamentales en el control de procesos de la acería, permite mayor rapidez y eficiencia de respuesta, a la vez que almacena en sus bases de conocimiento las mejores experiencias de trabajo de la acería[78].

Para lograr un ahorro significativo del consumo energético es fundamental esta rapidez y eficiencia, pues el HAE es la fuente de mayor consumo eléctrico y su parada por no estar en producción trae consigo un aumento considerable de las pérdidas de energía. También el consumo de Artesa en la IVC puede provocar pérdidas por encima de las ganancias de producción, por lo que actualmente se realiza el estudio de factibilidad cada 70 días según una función matemática. Un sistema que fuese capaz de realizar un cálculo oportuno pudiese influir en una toma de decisiones más dinámica, y, por ende, contribuir al ahorro de materiales y disminuir los costos de producción. Es por

ello, que se propone incluir estos cálculos en el trabajo de los agentes de control de procesos[78].

La encuesta fue realizada a un grupo de tecnólogos, jefes de turno y expertos. En la encuesta se detallaron problemáticas que podían surgir durante la producción a modo de incertidumbres; el 86,6% dieron respuestas favorables, demostrándose que aún con una buena preparación del personal, siempre existe la posibilidad de cometer errores. Esto corrobora la necesidad de almacenar las mejores experiencias por métodos de inteligencia artificial. Otras preguntas de la encuesta estuvieron enfocadas a la importancia de la aplicación de un sistema inteligente, obteniendo el 100% de las respuestas a favor de la aplicación de este. Por último, se compartieron características del SADIA adaptado a la acería ACINOX Las Tunas y se debatieron los resultados de la aplicación de este en otros ámbitos industriales. Como resultado de la encuesta se obtuvo que un 80% estuvo a favor de la implementación de este método y un 20 % alegó no tener criterio ya que no se cuenta con la experiencia previa de la aplicación de un trabajo similar, los estudios de los SMF realizados en el campo del acero no son muchos y no se han llevado a escala de implementación. Además, se debatieron con los especialistas otros aspectos, como el cronograma de ejecución y sus tiempos, las propuestas de reconfiguración, las negociaciones entre agentes y las bases de conocimiento propuestas para el sistema multi-agente en desarrollo. A partir del debate, un 100% estuvo de acuerdo en el uso del sistema asesor. No obstante, el 86,6% opinó que la propuesta debe utilizarse inicialmente como soporte a la toma de decisiones, mientras un 13,3% es del criterio que el sistema debe comenzar tomando ciertas decisiones en los subsistemas de la acería cuyas condiciones tecnológicas favorecen la implementación[78]. Por lo antes expuesto, se propone que la implementación inicial del sistema sea para utilizarlo como asesor, contribuyendo así a una adecuada gestión sobre el tiempo de producción para evitar pérdidas, reducir las afectaciones por errores de operación y malas decisiones. Los detalles de los resultados afirmativos de la encuesta se pueden ver en la tabla 7.

Capítulo 2. Sistema de automatización distribuido inteligente basado en agentes

Tabla 8 Resultados de encuesta realizada a tecnólogos del proceso.

Resultado de la encuesta	Cantidad de entrevistados
Respondieron correctamente la respuesta a preguntas del proceso	13
Importancia de la aplicación de un sistema inteligente	15
SADIA como una de las mejores soluciones	12
De acuerdo con el cronograma de ejecución propuesto	15
De acuerdo con las propuestas de reconfiguración	15
De acuerdo con las propuestas de negociaciones entre agentes	15
De acuerdo con las bases del conocimiento utilizadas	15
De acuerdo con los tiempos del cronograma	15
Debe ser un sistema asesor	13
Debe tomar decisiones en la producción	2
Necesidad de un mayor desarrollo tecnológico para infraestructura	13
Actuando sobre el tiempo de gestión del proceso se evitan pérdidas	15
Los errores de operación y malas decisiones se evitan con esta técnica	15
Total, de encuestados	15

Valoración Técnico económica

Teniendo en cuenta que 1 hora de afectación representan pérdidas de 49.968,7 CUP en un tiempo de 6 años ACINOX perdió por afectaciones debido a errores operacionales un total de 10.264.403 CUP. Y 1.356.317,08 CUP por concepto de malas decisiones, para un total de pérdidas de 11.620.720,87 CUP ver figuras 4 y 5 y tabla 9.

Tabla 9 Perdidas por errores operacionales y afectaciones

	Error Operaciona					
	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Horas Totales	24,83 horas	87,58 horas	32,98 horas	20,52 horas	22,77 horas	16,73 horas
CUP Total	\$1.240.889,38	\$4.376.425,31	\$1.648.134,29	\$1.025.191,16	\$1.137.620,74	\$836.142,91
	Malas decisiones					
	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Horas Totales	6,40 horas	2,70 horas	4,43 horas	1,83 horas	5,40 horas	6,38 horas
CUP Total	\$319.799,68	\$134.915,49	\$221.361,34	\$91.609,28	\$269.830,98	\$318.800,31

Si el sistema garantiza una mejora en las tomas de decisiones y evita los errores de operación en al menos un 60% podemos decir que garantiza un ahorro económico de 6.972.432,52 CUP en un término de 6 años.

Impacto Social y Medioambiental

El impacto social de este sistema se verá reflejado en las condiciones de trabajo facilitando las labores cotidianas del personal, mejorando los procesos de producción, permitiendo la competitividad empresarial y la generación de riquezas, se reduce la participación de un actor humano en labores peligrosas y un menor desgaste para el personal.

Uno de los factores que genera contaminación en una planta industrial es el trabajo a máxima potencia de bombas o ventiladores, entre otros sistemas, cuando no es necesario. Más trabajo implica más consumo de energía, y más consumo de energía significa más emisiones contaminantes.

Pues bien, el estudio reciente arrojó como resultado que con la aplicación del MAS se garantiza un ahorro de al menos un 30% en el consumo de energía eléctrica contribuyendo con la eficiencia energética, que ayuda tanto al medio ambiente como a los costos de producción.

CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

- Se diseñó una comunidad MAS basada en la arquitectura SADIA.
- Se propone una topología para el sistema de automatización.
- Se realiza un diseño básico de la red Petri
- Se realiza la validación de la propuesta y por último se realiza un diseño experimental en el cual se demuestra una eficiente gestión del cronograma de producción con el uso de una arquitectura MAS híbrida, donde se combina un acoplamiento fijo y heterárquico para garantizar rapidez y eficiencia ante las incertidumbres involucradas en la gestión del cronograma del proceso garantizando así un equilibrio entre proactividad y reactividad.

CONCLUSIONES GENERALES

Se ha demostrado que existe la necesidad de implementar un sistema que sea capaz de gestionar el cronograma de producción de la acería de forma más eficiente que el actual, que se adapte al entorno, que tenga las capacidades de reactividad y de proactividad. También se concluye que debe ser un sistema con acoplamiento híbrido ya que debe tener una estructura fija (jerárquica) y al mismo tiempo igualitaria (Heterárquica) para lograr mayor rapidez y eficiencia ante las múltiples incertidumbres. Inicialmente, será un sistema asesor para el apoyo a la toma de decisiones y se irá ampliando a un sistema de mayor autonomía, según se fortalezca la tecnología y preparación del personal de la empresa.

La arquitectura actual es una estructura rígida donde no existe autonomía, la toma de decisiones se realiza a niveles altos jerárquicos consumiendo tiempo de producción y por tanto se ven comprometidos los índices de consumo de materiales, el consumo energético y los costos de producción. La toma de decisiones se realiza por el personal sin un sistema asesor, propiciando los errores de operación. La solución propuesta cuenta con un MAS que posee una arquitectura SADIA adaptada a las particularidades de la acería ACINOX Las Tunas y posee 16 agentes, donde los problemas se distribuyen entre éstos, presentando una gestión asincrónica y no existiendo un sistema de control centralizado que analice tanto el proceso de negocio y planificación como los sistemas de control. Además, se crea una arquitectura basada en MAS que no tenga el control total del proceso, sino que trabaja permitiendo asesoría inteligente hasta asimilar la tecnología moderna, para así ir dando paso a una total autonomía y por tanto a crear una Industria 4.0.

Actualmente, existe un procedimiento de tomas de decisiones operativas que se asimila en el MAS propuesto, pero aún se pueden mejorar los índices de consumo energético, la secuencialidad, los tiempos de producción y por ende los costos de producción. Esto se logra modificando la toma de decisiones actuales, que se encuentran en función de actores humanos con un grupo de incertidumbres alrededor. La propuesta de un

sistema asesor que tenga un rol dinámico con capacidad evolutiva, podría posibilitar su asimilación por los operarios y la mejora continua del mismo. Además, en la medida que la infraestructura de la planta se pueda modernizar, el sistema podría tener mayor protagonismo asimilando más tareas, e inclusive, evolucionando de asesor a sistema de automatización totalmente integrado (asesor + supervisión + sistema de control + actuación autónoma).

Gracias a la simulación realizada sobre el Sistema de Control y soporte de decisiones basados en MAS, en el proceso de la acería se pudo demostrar la superioridad frente al existente (basado en tomas de decisiones operativas) de un 99%. Destacamos que, aunque solo se usaron las incertidumbres más comunes este sistema puede ser mejorado agregándole mayor número de incertidumbres y experiencia de los operadores y expertos del proceso y se puede expandir no solo al sistema de control también al primer nivel de abstracción (Gerencia) y al segundo nivel de abstracción (Gestión). De la encuesta realizada a los tecnólogos podemos resumir que entre todos los expertos hubo coincidencia en la necesidad de aplicar esta técnica de modo asesor e ir desarrollando los elementos tecnológicos del proceso de manera que la infraestructura vaya creando el soporte tecnológico necesario para la aplicación del sistema SADIA en todos los niveles.

RECOMENDACIONES

- Recomendamos crear las condiciones para futura aplicación de la propuesta del sistema asesor.
- Desarrollar una simulación formal de toda la dinámica interactiva del MAS y de la planta automatizada simulada para demostrar las facilidades del MAS con autonomía total que permita demostrar a los tecnólogos su efectividad.
- Continuar un proceso de preparación de tecnología y personal para desarrollar etapas hasta la autonomía total del sistema.
- Se recomienda recompilar un número mayor de incertidumbres para incluirlas en las reglas de inferencia difusa y así enriquecer las bases de conocimiento a las IA.
- Realizar el experimento al sistema de automatización de tres niveles (Gerencia + Gestión + Sistema de Control).
- Potenciar el soporte tecnológico para permitir la aplicación integral del SADIA.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Madias, "Sistemas de control de procesos en la acería," (in Spa), *Acero Latinoamericano*, no. 566, pp. 40-53, 2018. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7211228>.
- [2] G. J. Pérez Cancio, "Diseño e implementación de un Sistema de Supervisión, Control y Monitoreo de la producción de palanquillas y barras corrugadas mediante el uso de software SCADA," Master in Industrial Engineering M.S. thesis, Department of Industrial Engineering, Universidad de Las Tunas, LTU, Cuba, 2017. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/123456789/4235>
- [3] R. W. Avila Zambrano, "Procedimiento para la Toma de decisiones operativas programadas en el proceso de producción de acero en la empresa ACINOXLas Tunas," Master in Business Administration M.S. thesis, Department of Economic Sciences, Univ. Las Tunas, LTU, Cuba., 2015. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/123456789/4211>
- [4] M. Santos, "Un Enfoque Aplicado del Control Inteligente," (in Spa), *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial (RIAI)*, vol. 8, no. 4, pp. 283-296, 10/01/ 2011, doi: 10.1016/j.riai.2011.09.016.
- [5] C. E. Bravo, "Inteligencia Artificial Distribuida como estrategia para la Gerencia Integrada de Producción Industrial," Doctorate in Applied Sciences Ph.D. dissertation, Postgraduate Study Council, Univ. de Los Andes, Mérida, Venezuela, 2010. [Online]. Available: <http://www.ing.ula.ve/~aquilar/actividad-docente/tesistas/doctorado/TesisCompleta.pdf>
- [6] I. J. Morales Sánchez, "Automatización de una encajadora de tapas de tres modelos," Electric engineering B.S. thesis, Department of Electrical Engineering, Universitat Politècnica de València, Spain, 2019. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10251/128510>
- [7] J. P. D'Amato, M. Mercado, A. Heiling, and V. Cifuentes, "Un método de optimización proximal al problema de anidamiento de piezas irregulares utilizando arquitecturas en paralelo," (in Spa), *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial (RIAI)*, vol. 13, no. 2, pp. 220-227, 2016, doi: 10.1016/j.riai.2016.01.003.
- [8] A. Napoleone, M. Macchi, and A. Pozzetti, "A review on the characteristics of cyber-physical systems for the future smart factories," (in Eng), *Journal of manufacturing systems*, vol. 54, pp. 305-335, 2020, doi: 10.1016/j.jmsy.2020.01.007.
- [9] J. Roa, J.-F. Jimenez, and G. Zambrano-Rey, "Directive Mode for the Semi-Heterarchical Control Architecture of a Flexible Manufacturing system," (in Eng), *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 10, pp. 19-24, 2019/01/01/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.10.013>.
- [10] V. Marik et al., *Industrial applications of holonic and multi-agent systems : 9th International Conference, HoloMAS 2019, Linz, Austria, August 26-29, 2019, Proceedings*, Cham, Switzerland: Springer, 2019, pp. 1 online resource (x, 219 pages). [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-27878-6>.

- [11] J. A. Peixoto and L. M. Pereira, "Industria 4.0 na auto-organização dos sistemas produtivos," (in Port), *Revista Eletrônica Científica da UERGS*, vol. 4, no. 3, pp. 525-538, 2018, doi: <https://doi.org/10.21674/2448-0479.43.525-538>.
- [12] A. R. Boccella, P. Centobelli, R. Cerchione, T. Murino, and R. Riedel, "Evaluating Centralized and Heterarchical Control of Smart Manufacturing Systems in the Era of Industry 4.0," (in Eng), *Applied Sciences*, vol. 10, no. 3, p. 755, 2020. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/3/755>.
- [13] S. R. Gonzalez, G. M. Zambrano, and I. F. Mondragon, "Semi-heterarchical architecture to AGV adjustable autonomy within FMSs," (in English), *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 10, pp. 7-12, 2019/01/01/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.10.003>.
- [14] T. Borangiu, D. Trentesaux, P. Leitão, A. Giret, and V. Botti, *Service oriented, holonic and multi-agent manufacturing systems for industry of the future : proceedings of SOHOMA 2019*, Cham, Switzerland: Springer, 2020, pp. 1 online resource (xiv, 440 pages). [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-27477-1>.
- [15] M. Wang, Q. Li, and Y. Lin, "An Organizational Structure and Self-adaptive Mechanism for Holonic Multi-Agent Systems," (in Eng), *IEEE Access*, vol. 8, pp. 1-1, 2020, doi: 10.1109/access.2020.3014694.
- [16] M. Herrera, M. Pérez-Hernández, A. Kumar Parlikad, and J. Izquierdo, "Multi-Agent Systems and Complex Networks: Review and Applications in Systems Engineering," *Processes*, vol. 8, no. 3, p. 312, 2020, doi: 10.3390/pr8030312.
- [17] A. R. Ricardo Rodríguez, "Propuesta de Sistema Inmótico para el Hospital Vladimir I. Lenin " Automatic Control Engineer B.S. thesis, Automatic Control Department, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, SC, Cuba, 2011. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/359513130_Propuesta_de_Sistema_Inmótico_para_el_Hospital_Vladimir_I_Lenin
- [18] *ANSI/ISA-95.00. 01-2010 (IEC 62264-1 Mod): Enterprise-Control System Integration Part 1: Models and Terminology*, 1-55617-727-5, ISA, Pittsburgh, Pensilvania, Estados Unidos, 10/06 2010. [Online]. Available: <https://www.isa.org/templates/one-column.aspx?pageid=111294&productId=116636>
- [19] J. Aguilar, A. R. Bolivar, F. Hidrobo, and M. Cerrada, *Sistemas MultiAgentes y sus Aplicaciones en Automatización Industrial*, 2nd ed. Mérida, M, Venezuela: Univ. de Los Andes, 2013, p. 462. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Francisco-Hidrobo/publication/320935195_Sistemas_MultiAgentes_y_sus_Aplicaciones_en_Automatización_Industrial/links/5dde76f0a6fdcc2837e1ead1/Sistemas-MultiAgentes-y-sus-Aplicaciones-en-Automatización-Industrial.pdf.
- [20] A. García Higuera and A. Cenjor Montalvo, "Sistema heterárquico de control basado en agentes para sistemas de fabricación: la nueva metodología proha," (in Spanish), *Revista Iberoamericana de Automática e informática Industrial (RIAI)*, vol. 4, no. 1, pp. 83-94, 01/01/ 2007, doi: 10.1016/S1697-7912(07)70194-2.

- [21] X. Jin and W. M. Haddad, "An adaptive control architecture for leader–follower multiagent systems with stochastic disturbances and sensor and actuator attacks," (in Eng), *International Journal of Control*, vol. 92, no. 11, pp. 2561-2570, 2019, doi: <https://doi.org/10.1080/00207179.2018.1450524>.
- [22] J. Ren, W. Xiang, Y. Xiao, R. Yang, D. Manocha, and X. Jin, "Heter-Sim: Heterogeneous Multi-Agent Systems Simulation by Interactive Data-Driven Optimization," *IEEE Trans Vis Comput Graph*, vol. 27, no. 3, pp. 1953-1966, Mar 2021, doi: 10.1109/TVCG.2019.2946769.
- [23] K. Patel and A. Mehta, *Discrete-time sliding mode protocols for discrete multi-agent system*, Singapore: Springer, 2021, p. 1 online resource. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1007/978-981-15-6311-9>. Accessed on: October 14, 2020.
- [24] J.-W. Lee, M.-K. Kim, and H.-J. Kim, "A Multi-Agent Based Optimization Model for Microgrid Operation with Hybrid Method Using Game Theory Strategy," *Energies*, vol. 14, no. 3, p. 603, 2021, doi: 10.3390/en14030603.
- [25] W. Zou, K. Qian, and Z. Xiang, "Fixed-Time Consensus for a Class of Heterogeneous Nonlinear Multiagent Systems," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 67, no. 7, pp. 1279-1283, 2020, doi: 10.1109/TCSII.2019.2930648.
- [26] G. Zhao, C. Hua, and X. Guan, "Distributed Event-Triggered Consensus of Multiagent Systems With Communication Delays: A Hybrid System Approach," *IEEE Transactions on Cybernetics*, vol. 50, no. 7, pp. 3169-3181, 2020, doi: 10.1109/TCYB.2019.2912403.
- [27] Y. Wang, T. L. Nguyen, Y. Xu, Q. T. Tran, and R. Caire, "Peer-to-Peer Control for Networked Microgrids: Multi-Layer and Multi-Agent Architecture Design," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, no. 6, pp. 4688-4699, 2020, doi: 10.1109/TSG.2020.3006883.
- [28] H. Su, X. Wang, and Z. Zeng, "Consensus of Second-Order Hybrid Multiagent Systems by Event-Triggered Strategy," *IEEE Transactions on Cybernetics*, vol. 50, no. 11, pp. 4648-4657, 2020, doi: 10.1109/TCYB.2019.2948209.
- [29] G. González Yero, M. Ramírez Mendoza, and B. L. Rustán Téllez, "Modelado de Control de Nivel en Molde para Vaciado Continuo de Palanquillas de Acero," (in Español), *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, vol. 11, no. 1, pp. 44-53, 01/01/ 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.riai.2013.11.003>.
- [30] J. Madias, S. Hornby, and F. Torre, "Una Revisión crítica de desarrollos tecnológicos recientes en Hornos Eléctricos de Arco " (in Spanish), *ResearchGate*, pp. 343-353, 05/12/ 2016, doi: <https://doi.org/10.5151/1982-9345-27702>.
- [31] W. S. Association, "STEEL STATISTICAL YEARBOOK 2021," ed. Beijing, China, 2021.
- [32] A. Martínez Castro, "Tecnología para la elaboración del acero de bajo carbono S355JO en la planta de Acería de Acinox-Tunas," Metallurgical Mining engineer B.S. thesis, Department of Metallurgy-Chemistry, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa HLG, Cuba, 2017. [Online]. Available: <http://ninive.ismm.edu.cu/handle/123456789/2579>

- [33] G. G. Yero, M. R. Mendoza, and L. M. Martí, "Un nuevo método de control PI no lineal robusto," (in Spa), *Revista Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones (RIELAC)*, vol. 38, no. 1, pp. 1-16, 01/01 2017. [Online]. Available: <https://rielac.cujae.edu.cu/index.php/riec/article/view/1>.
- [34] D. A. Gavilanes Ruiz, "Diseño de una escoria sintética desulfurante para el proceso de afino en el horno cuchara de una acería," Chemical engineering B.S. thesis, Faculty of Chemical Engineering and Agroindustry, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2016. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/15187>
- [35] A. A. Nikolaev and P.G.Tulupov, "Method of Setting Optimum Asymmetric Mode of Operation of Electric Arc Furnace," in *2016 11th France-Japan & 9th Europe-Asia Congress on Mechatronics (MECATRONICS) /17th International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM)*, France-Japan, 15-17 June 2016 2016, vol. 16: Institute of Electrical and Electronics Engineers, pp. 033-037, doi: 10.1109/MECATRONICS.2016.7547111.
- [36] O. Lozynskyi and Y. Paranchuk, "Reduction of phase interactions in control processes of "Arc steel-making furnace – Power supply system" Complex electrical technological system," (in Eng), *Computational Problems of Electrical Engineering*, vol. 6, no. 1, 2016. [Online]. Available: http://www.irbis-nbu.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbu/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&MAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/CPoee_2016_6_1_5.pdf
- [37] H. A. Bermudez Rosero, "Técnica de Identificación de Parámetros para un modelo de Horno de Arco Eléctrico," Degree thesis to qualify for the title of Electrical Engineer B.S. thesis, Engineering department, Univ. Tecnológica de Pereira, Pereira, 2015. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/11059/5933>
- [38] P. I. Cowling, D. Ouelhadj, and S. Petrovic, "Dynamic scheduling of steel casting and milling using multi-agents," (in English), *Production Planning & Control*, vol. 15, no. 2, pp. 178-188, 2004, doi: 10.1080/09537280410001662466.
- [39] D. Ouelhadj, S. Petrovic, P. I. Cowling, and A. Meisels, "Inter-agent cooperation and communication for agent-based robust dynamic scheduling in steel production," (in English), *Advanced Engineering Informatics*, vol. 18, no. 3, pp. 161-172, 2004, doi: 10.1016/j.aei.2004.10.003.
- [40] R. Roy, B. Adesola, and S. Thornton, "Development of a knowledge model for managing schedule disturbance in steel-making," (in English), *International journal of production research*, vol. 42, no. 18, pp. 3975-3994, 2004, Art no. 1072954, doi: 10.1080/00207540410001716453. Taylor & Francis.
- [41] S. Jacobi, C. Madrigal-Mora, E. León-Soto, and K. Fischer, "AgentSteel: An agent-based online system for the planning and observation of steel production," in *Proceedings of the fourth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems (AAMAS '05)*, New York, NY, USA, 25 July 2005, 2005: Association for Computing Machinery, pp. 114-119, doi: <https://doi.org/10.1145/1082473.1082813>. [Online]. Available: <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/1082473.1082813>

- [42] Y. Ozoe and M. Konishi, "Agent based scheduling of steel making processes," in *2009 International Conference on Networking, Sensing and Control*, Okayama, Japan, 26-29 March 2009, 2009: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (IEEE), 12 May 2009, pp. 278-281, doi: 10.1109/ICNSC.2009.4919286. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4919286>
- [43] M. F. Zarandi and F. K. Azad, "A type 2 fuzzy multi agent based system for scheduling of steel production," in *2013 Joint IFSA World Congress and NAFIPS Annual Meeting (IFSA/NAFIPS)*, Edmonton, AB, Canada, 2013: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc (IEEE). pp. 992-996, doi: 10.1109/IFSA-NAFIPS.2013.6608535. [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84886499395&doi=10.1109%2fIFSA-NAFIPS.2013.6608535>
- [44] M. F. Zarandi and P. Ahmadpour, "Fuzzy agent-based expert system for steel making process," (in English), *Expert systems with applications*, vol. 36, no. 5, pp. 9539-9547, 2009, doi: 10.1016/j.eswa.2008.10.084.
- [45] L. Wang, J. Zhao, W. Wang, and L. Cong, "Dynamic scheduling with production process reconfiguration for cold rolling line," (in English), *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 44, no. 1, pp. 12114-12119, 2011, doi: 10.3182/20110828-6-IT-1002.01296.
- [46] L.-L. Sun, H. Jin, H.-Q. Jia, J.-N. Hu, and Y. Li, "Research on steelmaking—Continuous casting production scheduling system based on virtual real fusion," in *2017 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA)*, Northern America, United States, 2017: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (IEEE), pp. 1054-1059, doi: 978-1-5386-3154-6.
- [47] J. Backman, V. Kyllönen, and H. Helaakoski, "Methods and Tools of Improving Steel Manufacturing Processes: Current State and Future Methods," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 13, pp. 1174-1179, 2019, doi: 10.1016/j.ifacol.2019.11.355.
- [48] M. Iglesias-Escudero, J. Villanueva-Balsera, F. Ortega-Fernandez, and V. Rodriguez-Montequín, "Planning and Scheduling with Uncertainty in the Steel Sector: A Review," (in English), *Applied Sciences*, vol. 9, no. 13, p. 2692, 2019, doi: 10.3390/app9132692.
- [49] Y. González Pérez and I. I. Kholod, "Uso de sistemas multiagentes para el aprendizaje automático," *Revista Ciencia e Ingeniería*, Artículo de Investigación vol. Vol. 41, no. No. 1 pp. pp. 67-74, Diciembre 2019 2020.
- [50] J. Du, P. Dong, V. Sugumaran, and D. Castro-Lacouture, "Dynamic decision support framework for production scheduling using a combined genetic algorithm and multiagent model," (in English), *Expert Systems*, p. e12533, 2020, doi: 10.1111/exsy.12533.
- [51] S. Ullah, L. Khan, I. Sami, and N. Ullah, "Consensus-Based Delay-Tolerant Distributed Secondary Control Strategy for Droop Controlled AC Microgrids," (in English), *IEEE Access*, vol. 9, pp. 6033-6049, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3048723.
- [52] V. Iannino, M. Vannocci, M. Vannucci, V. Colla, and M. Neuer, "A Multi-Agent Approach for the Self-Optimization of Steel Production," (in English), *Int. J. Simul.*

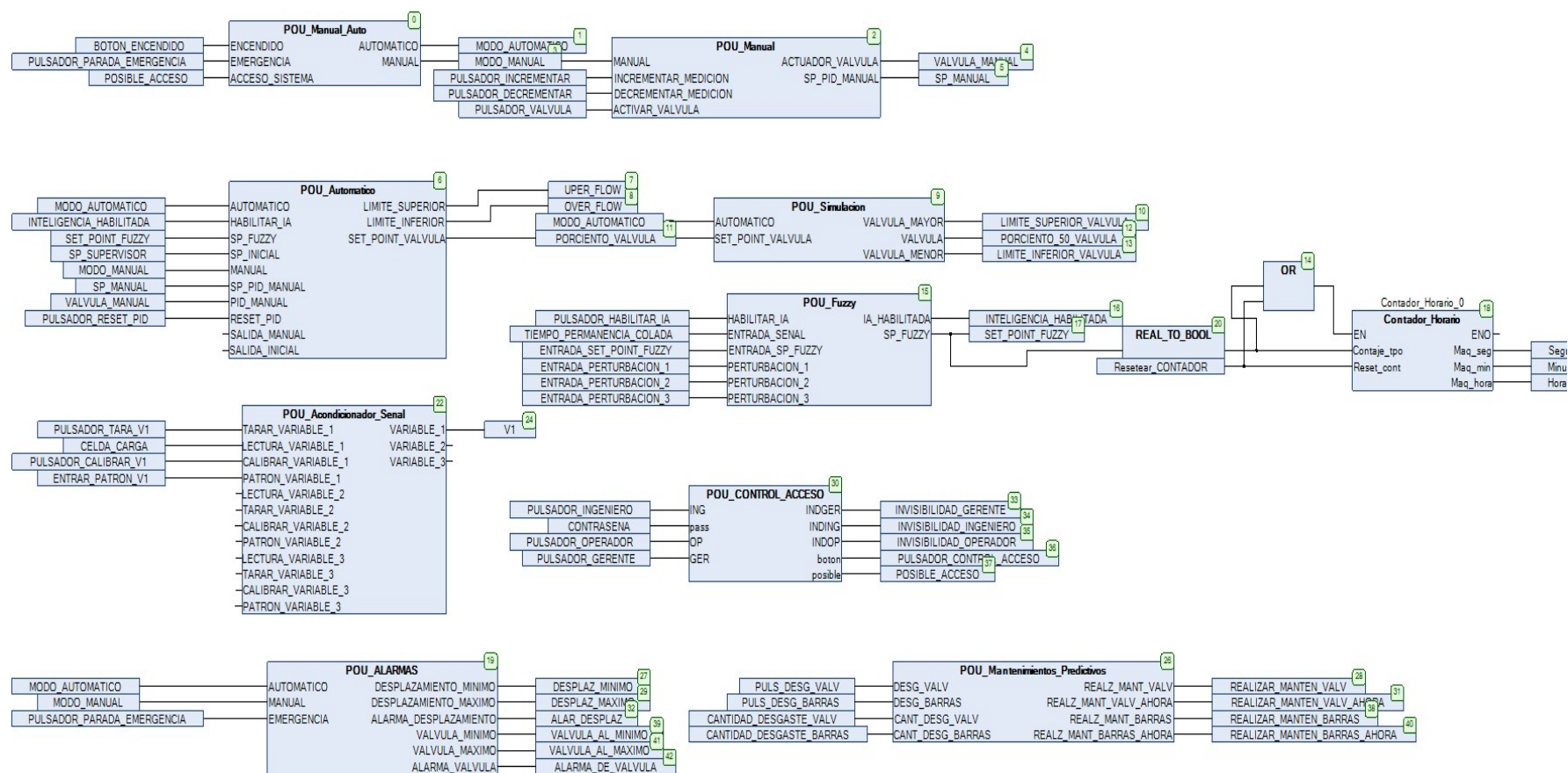
- Syst. Sci. Technol.*, vol. 19, no. 20, pp. 1-20, 2019, doi: 10.5013/IJSSST.a.19.05.20.
- [53] X. Xie, Q. Lu, A. K. Parlikad, and J. M. Schooling, "Digital Twin Enabled Asset Anomaly Detection for Building Facility Management," (in English), *IFAC-PapersOnLine*, vol. 53, no. 3, pp. 380-385, 2020/01/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.11.061>.
- [54] G. Santos, F. Silva, B. Teixeira, Z. Vale, and T. Pinto, "Power Systems Simulation Using Ontologies to Enable the Interoperability of Multi-Agent Systems," in *2018 Power Systems Computation Conference (PSCC)*, Dublin, Ireland, 11-15 June 2018, 2018: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (IEEE), 30 August 2018, pp. 1-7, doi: 10.23919/PSCC.2018.8442888. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8442888>
- [55] D. Ryzko, *Modern big data architectures : a multi-agent systems perspective*, Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2020, p. 1 online resource. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.1002/9781119597926>. Accessed on: May 14, 2020.
- [56] G. Jezic, Y.-H. Chen-Burger, M. Kusek, R. Sperka, R. J. Howlett, and L. C. Jain, *Agents and multi-agent systems : Technologies and Applications 2019 : 13th KES International Conference, KES-AMSTA-2019 St. Julians, Malta, June 2019 Proceedings*, Singapore: Springer, 2020, pp. 1 online resource (xvi, 388 pages). [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1007/978-981-13-8679-4>.
- [57] S. Jin, S. Wang, and F. Fang, "Game theoretical analysis on capacity configuration for microgrid based on multi-agent system," (in English), *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 125, p. 106485, 2021, doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106485.
- [58] A. Winnicka, K. Kęsik, D. Połap, M. Woźniak, and Z. Marszałek, "A Multi-Agent Gamification System for Managing Smart Homes," (in English), *Sensors*, vol. 19, no. 5, p. 1249, 2019, doi: 10.3390/s19051249.
- [59] K. Moummadi, R. Abidar, H. Medromi, and A. Ziani, "Secured Remote Control of Greenhouse Based on Wireless Sensor Network and Multi Agent Systems," in *International Conference on Advanced Intelligent Systems for Sustainable Development (AI2SD'2018). Advances in Intelligent Systems and Computing*, Cham, 2018, vol. 912, Switzerland AG: Springer, 05 February 2019, pp. 427-439, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-12065-8_38. [Online]. Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-12065-8_38#citeas
- [60] R. A. Nesterov, A. A. Mitsyuk, and I. A. Lomazova, "Simulating behavior of multi-agent systems with acyclic interactions of agents," *Труды Института системного программирования РАН*, vol. 30, no. 3, 2018.
- [61] E. M. López, C. M. Godoy, L. G. M. Jimenéz, and E. B. Guerrero, "Sistema Multi-agente de apoyo al análisis de una actividad colaborativa de un videojuego," (in Spa), *Pistas Educativas*, vol. 39, no. 127, 2018. [Online]. Available: <http://www.itcelaya.edu.mx/ojs/index.php/pistas/article/view/1071>.
- [62] Y. Demazeau, T. Holvoet, J. M. Corchado, and S. Costantini, *Advances in practical applications of agents, multi-agent systems, and trustworthiness : the PAAMS Collection ; 18th International Conference, PAAMS 2020, l'Aquila, Italy, October 7-9, 2020, Proceedings*, Cham: Springer, 2020, p. 1 online resource (471) p. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-49778-1>.

- [63] V. Colla, G. Nastasi, A. Maddaloni, N. Holzknrecht, T. Heckenthaler, and G. Hartmann, "Intelligent control station for improved quality management in flat steel production," (in Eng), *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 20, pp. 226-231, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.125>.
- [64] C. Bravo, J. L. Aguilar, and F. I. Rivas, "Diseño de una arquitectura de automatización industrial basada en sistemas multi-agentes," *Ciencia e Ingeniería*, vol. 25, no. 2, pp. 75-88, 2004. [Online]. Available: <http://reventcyt.ula.ve/storage/repo/ArchivoDocumento/cing/v25n2/articulo1.pdf>.
- [65] G. Pico, P. Marques, G. A. Llor Castillo, Y. Llosas Albuerno, and J. C. Guamán Segarra, "Empleo de la teoría multiagentes en la gerencia del trabajo inmótico en la UTM," (in Spa), *Revista de Investigaciones en Energía, Medio Ambiente y Tecnología: RIEMAT*, vol. 2, no. 2, pp. 33-40, 2017, doi: <https://doi.org/10.33936/riemat.v2i2.1142>.
- [66] J. Aguilar, V. Bravo, F. Rivas, and M. Cerrada, "Diseño de un medio de gestión de servicios para sistemas multiagentes," in *XXX Conferencia Latinoamericana de Informática*, Mérida, Venezuela, 2004, pp. 431-439.
- [67] J. Aguilar, M. Cerrada, and F. Hidrobo, "A methodology to specify multiagent systems," in *KES International Symposium on Agent and Multi-Agent Systems: Technologies and Applications. KES-AMSTA 2007. Lecture Notes in Computer Science()*, Wroclaw, Poland, 2007, vol. 4496, Berlin, Heidelberg: Springer, LNAI ed., pp. 92-101, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-540-72830-6_10. [Online]. Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-72830-6_10#citeas
- [68] J. Aguilar, M. Cerrada, F. Hidrobo, and F. Rivas, "Especificación detallada de los agentes del SCDIA," *Informe Técnico del 3er año, Proyecto Agenda Petróleo, ULA-FONACIT*, 2003.
- [69] J. Aguilar, I. Bessembel, M. Cerrada, F. Hidrobo, and F. Narciso, "Una Metodología para el Modelado de Sistemas de Ingeniería Orientado a Agentes," *Inteligencia Artificial: Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, vol. 12, no. 38, pp. 39-60, 01/01 2008. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/pdf/925/92513102003.pdf>.
- [70] E. Mendoza, J. Andramuño, J. Núñez, and I. Benítez, "Deliberative architecture for smart sensors in the filtering operation of a water purification plant," United Kingdom, J. o. P. C. Series, Ed., 2021 2021, vol. 1730: IOP Publishing Ltd., 1 ed., p. 012088, doi: 10.1088/1742-6596/1730/1/012088. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1730/1/012088>
- [71] C. Guarnizo Lemus, "Metodología para la implementación de controlador difuso tipo Takagi-Sugeno en PLC s7-300," *Tecnura*, vol. 15, pp. 44-51, 2011. [Online]. Available: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-921X2011000300005&nrm=iso.
- [72] L. Ballester Brage and A. J. Colom Cañellas, "Lógica difusa: una nueva epistemología para las Ciencias de la Educación," *Revista de educación*, vol. 340, pp. 995-1008, 2006. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/11162/69032>.
- [73] L. Fuentes and A. Vallecillo, "Una introducción a los perfiles UML," *Novática*, vol. 168, pp. 6-11, 2004. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/profile/Antonio-Vallecillo->

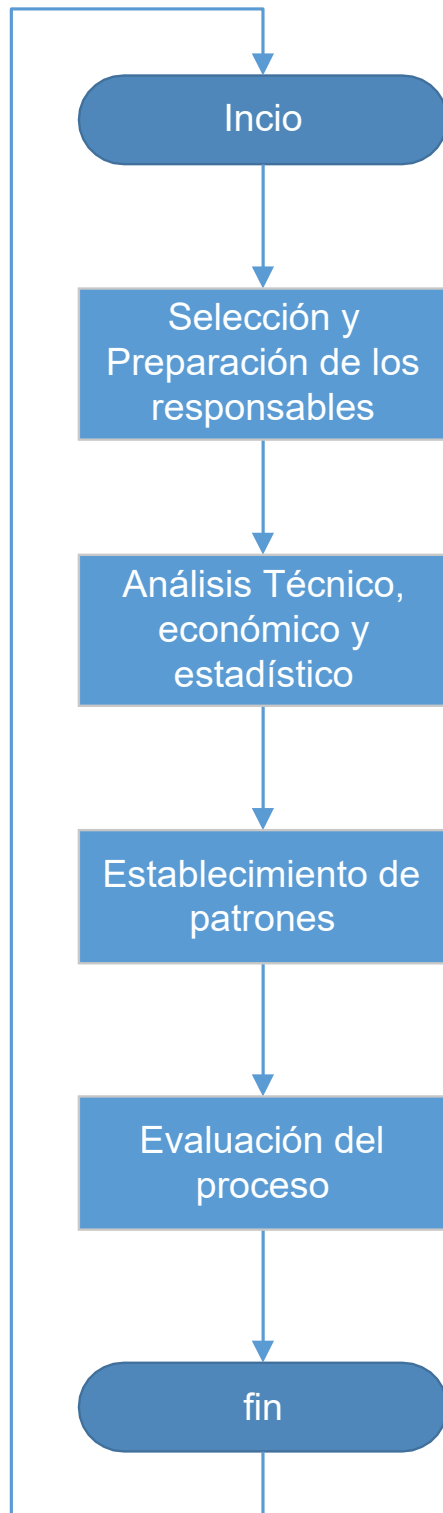
- [2/publication/266276241/Una-Introduccion-a-los-Perfiles-UML/links/54b6e4b50cf2e68eb27fff57/Una-Introduccion-a-los-Perfiles-UML.pdf](https://doi.org/10.1109/ISAP.2015.7325527).
- [74] M. H. Cintuglu, H. Martin, and O. A. Mohammed, "An intelligent multi agent framework for active distribution networks based on IEC 61850 and FIPA standards," in *2015 18th International Conference on Intelligent System Application to Power Systems (ISAP)*, Porto, Portugal, 11-16 Sept 2015: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (IEEE), pp. 1-6, doi: 10.1109/ISAP.2015.7325527. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7325527>
- [75] C. Bravo, J. Aguilar-Castro, A. Ríos, J. Aguilar-Martin, and F. Rivas, "Arquitectura Basada en Inteligencia Artificial Distribuida para la Gerencia Integrada de Producción Industrial," (in Spanish), *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial (RIAI)*, vol. 8, no. 4, pp. 405-417, 10/01/ 2011, doi: 10.1016/j.riai.2011.09.013.
- [76] C. Eduardo and E. L. De Vito, "Introducción al razonamiento aproximado: lógica difusa," *Revista Americana de Medicina Respiratoria*, vol. 6, no. 3, pp. 126-136, diciembre 2006. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/pdf/3821/382138367007.pdf>.
- [77] G. Morales Luna, "Introducción a la lógica difusa," *Centro de Investigación y Estudios Avanzados*, 2002. [Online]. Available: <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/32422813/1Introduccinalalgcadifusa-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1649628564&Signature=Hgh8BcBtyXx~CEK3j04KR~HAAuUGM9ZqF6ygT1ssj7l7pUqeRKyt9-doyGcqNseHW0~jeCqCp2fmozyZSK1vRmG5cddG1Qi3l7Eq2TOWLvnEq7fgleWS0WNDLBSYOBYYJ8qbrCyzUtKPpC8mJ0nyENovnklnIMZiFqVs7cjpgBHEbK5q-S9hr9ByilvtNnF-sSrTxXVYr8fy~sCEX2V2e4wzxAIFs3Qg6O2sIBOwx79C1HOFTThLrOAje71k66KrTIMLXhZCfWEkFpjeu-KfS1eqFVmXT82r6Jl5MX7VjZkd0KNzENTluNmAficnMT3rZXoc931t4CHSrbyl040u00w &Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA>.
- [78] A. R. Ricardo Rodríguez, I. F. Benítez Pina, G. González Yero, and J. R. Nuñez Alvarez, "Multi-agent system for steel manufacturing process," (in Eng), *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 12, no. 3, , pp. 2441-2453, June 2022, doi: 10.11591/ijece.v12i3.pp2441-2453.

ANEXOS

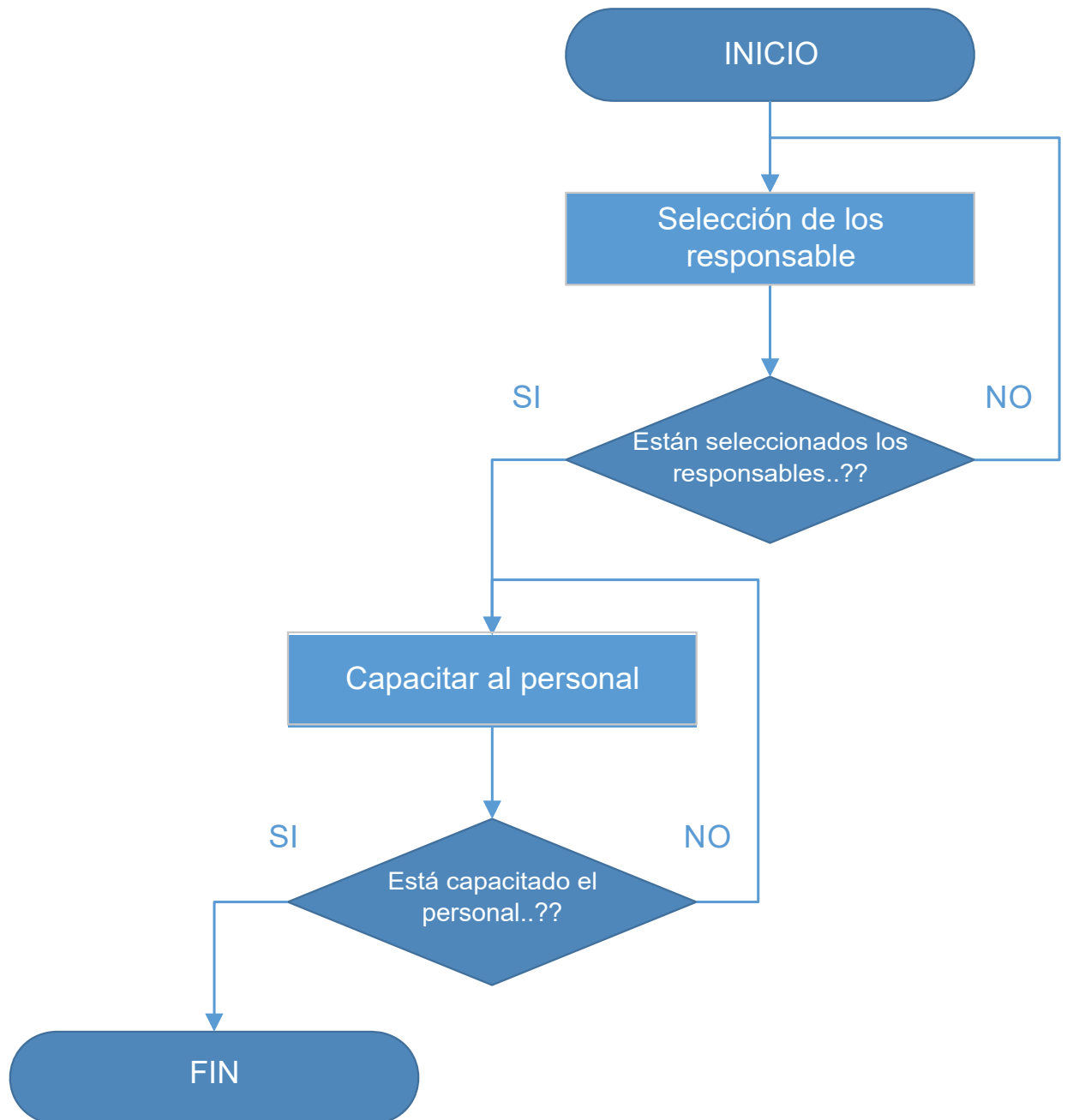
ANEXO 1 PROGRAMA PRINCIPAL DEL AUTÓMATA DEL HAE EN CFC.



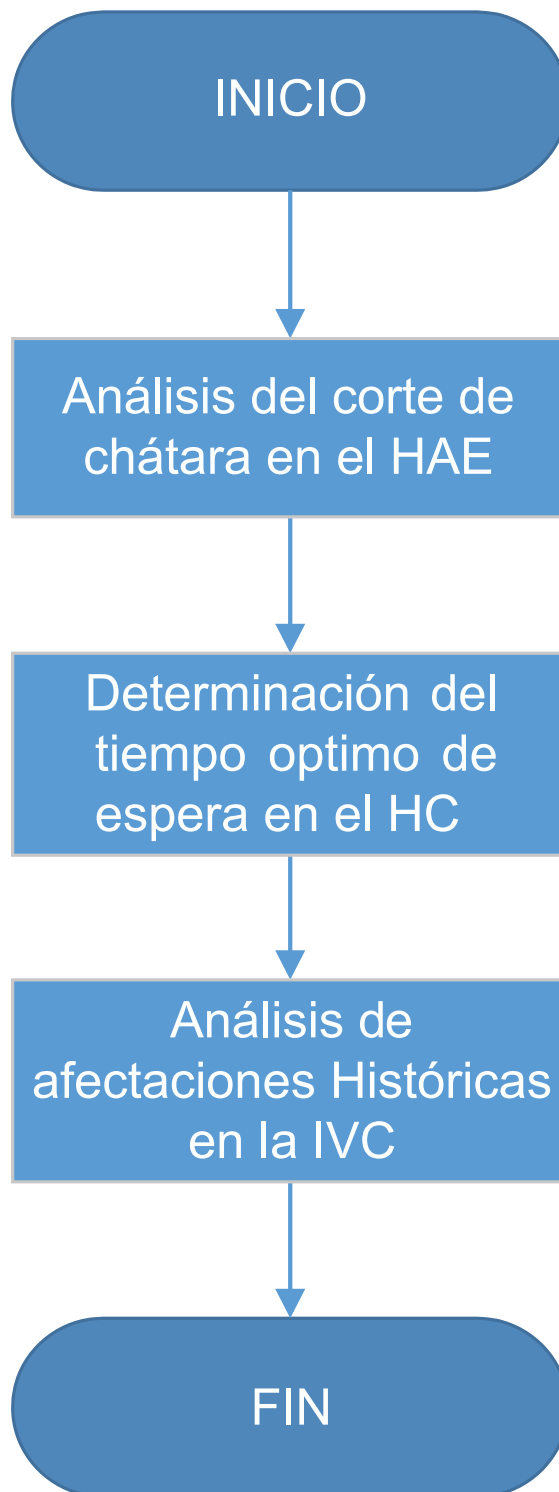
ANEXO 2 PROCEDIMIENTO PARA TOMAS DE DECISIONES OPERATIVAS EN LA INDUSTRIA DEL ACERO ACINOX.



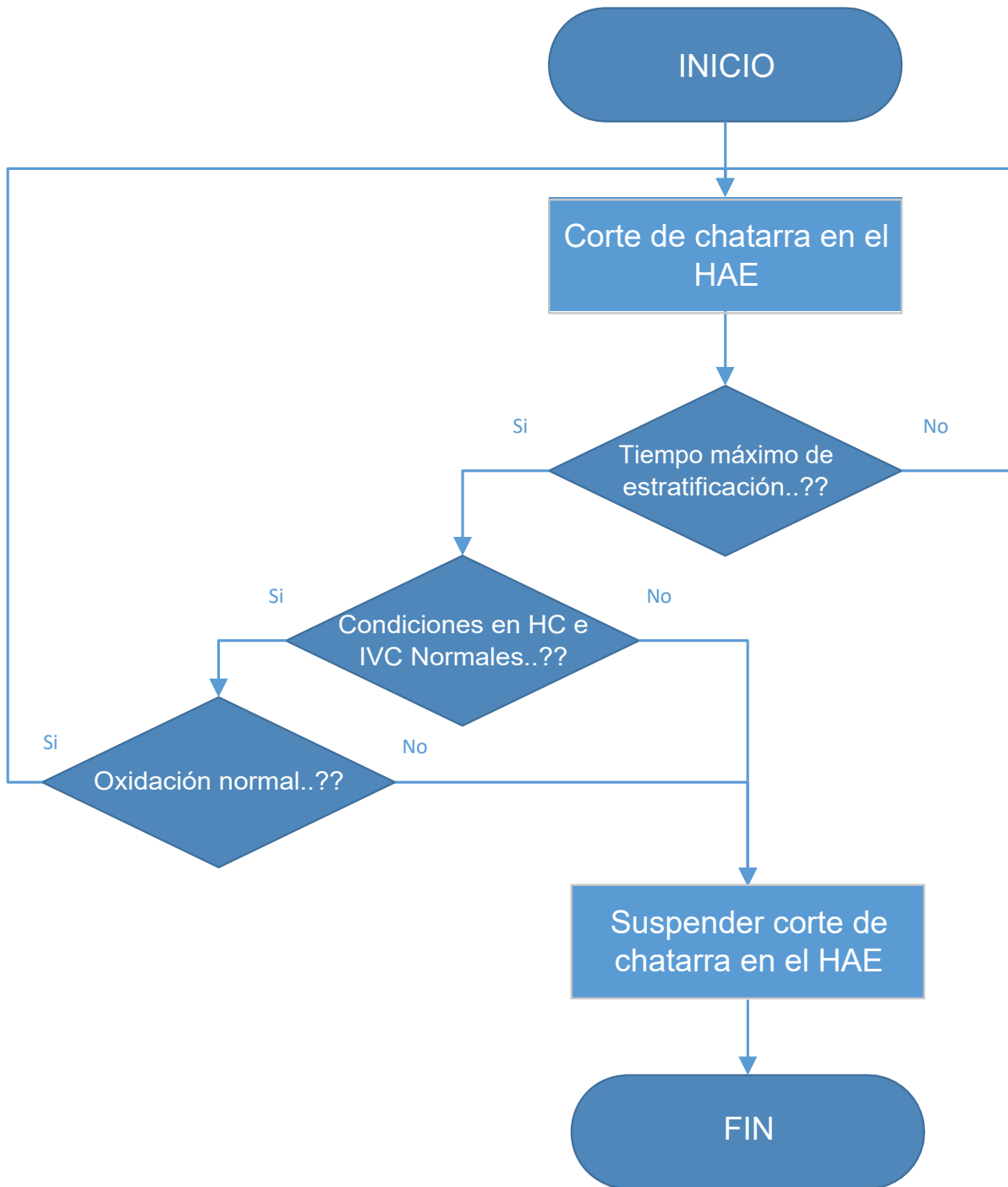
ANEXO 3 ETAPA 1 DEL PROCEDIMIENTO DE TOMAS DE DECISIONES OPERATIVAS.



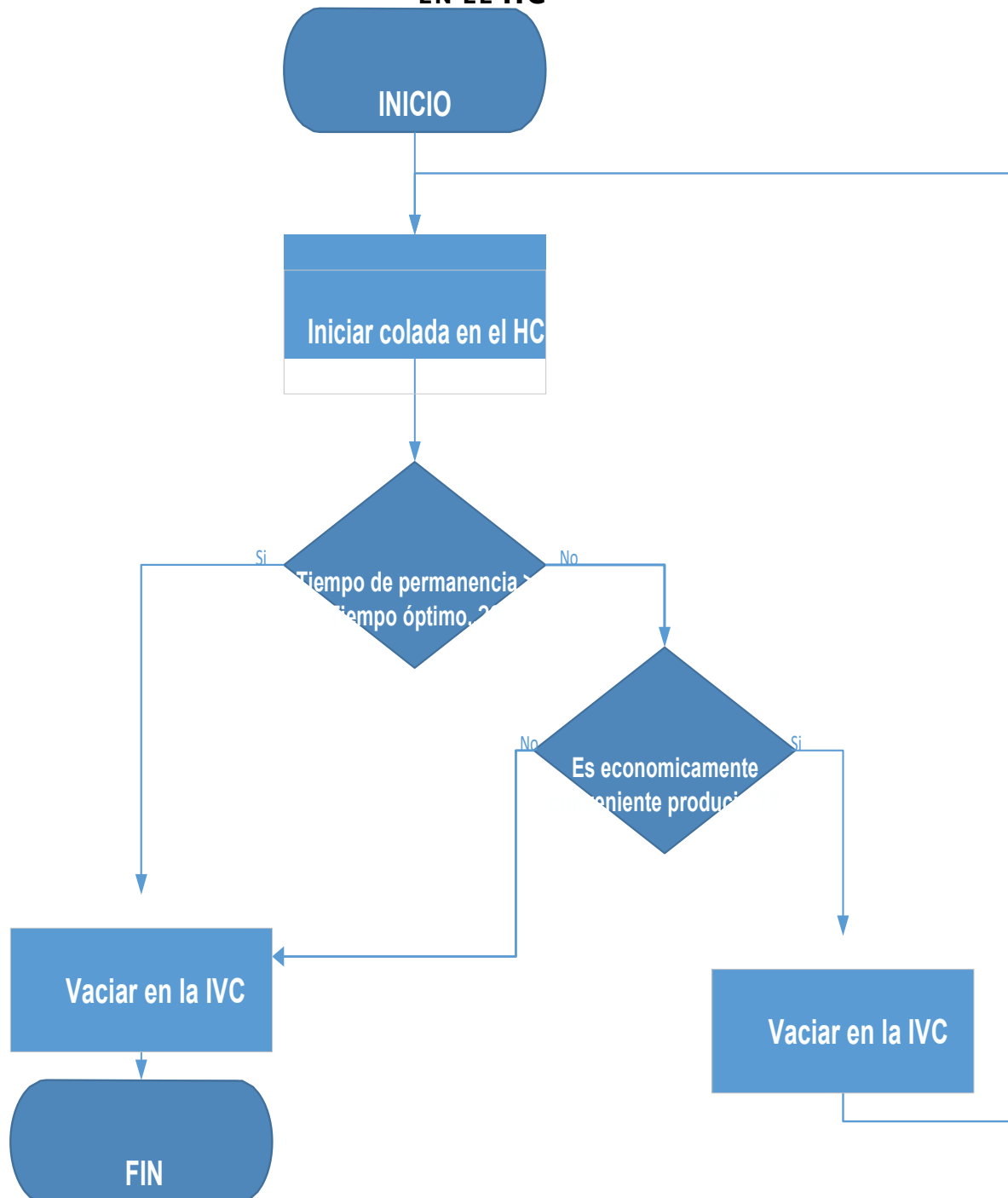
ANEXO 4 ETAPA 2 DEL PROCEDIMIENTO DE TOMAS DE DECISIONES OPERATIVAS.



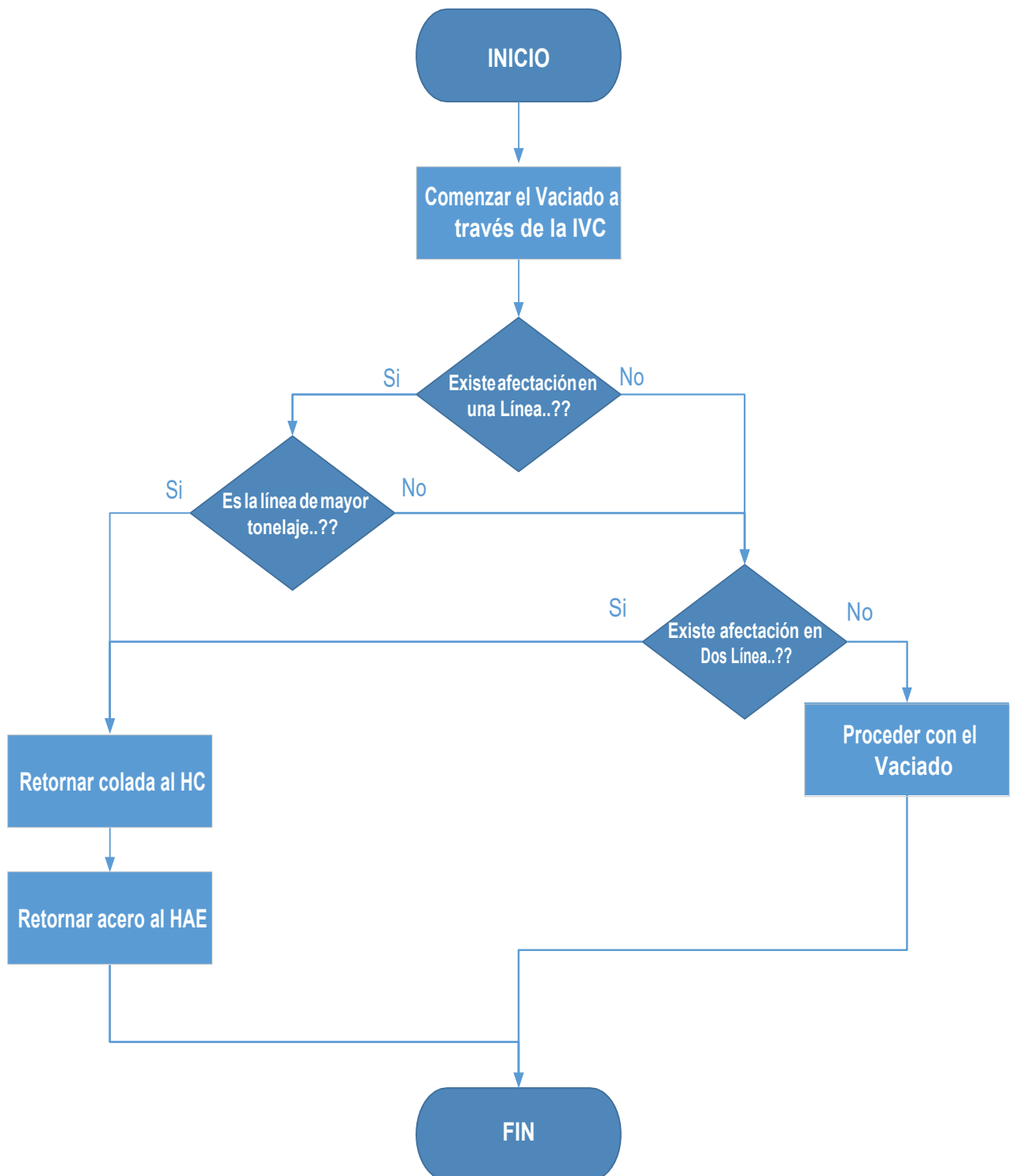
ANEXO 5 ANÁLISIS DE CORTE DE CHATARRA EN EL HAE



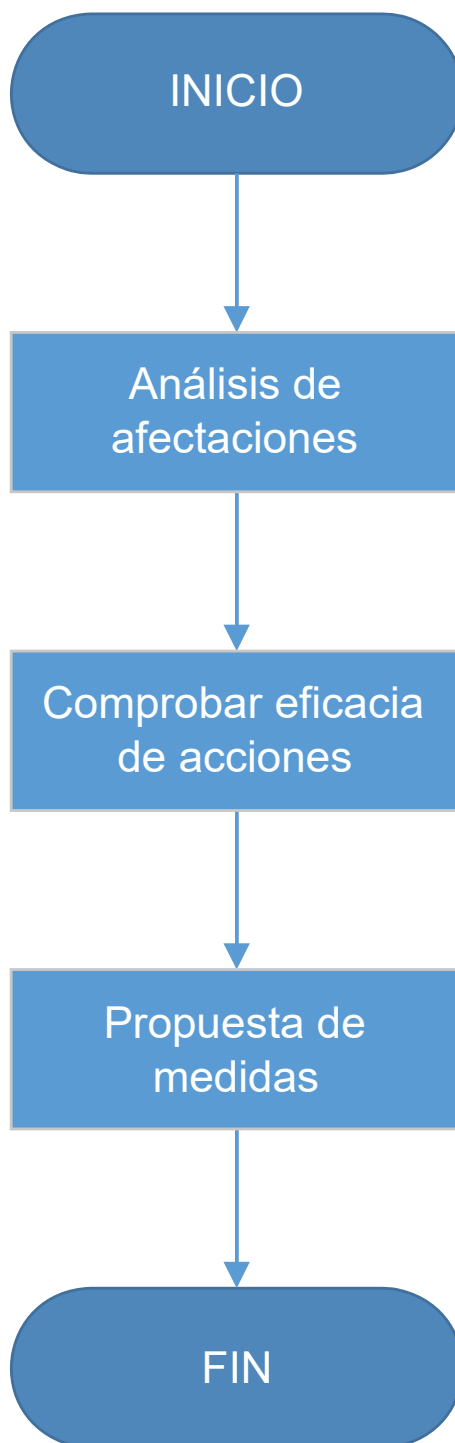
ANEXO 6 ANÁLISIS DEL TIEMPO ÓPTIMO DE PERMANENCIA DE LA COLADA EN EL HC



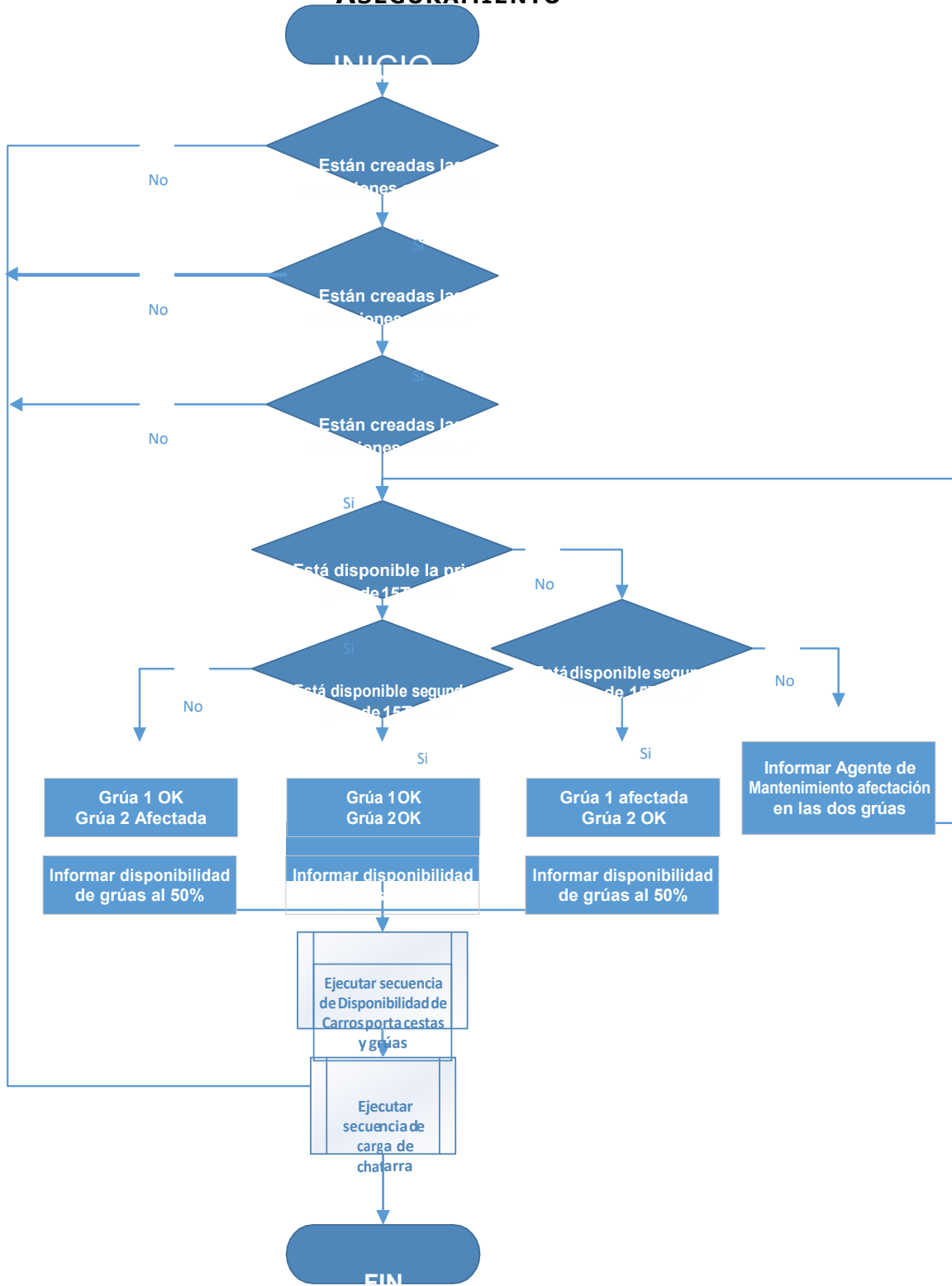
ANEXO 7 ANÁLISIS SEGÚN AFECTACIONES EN LA IVC



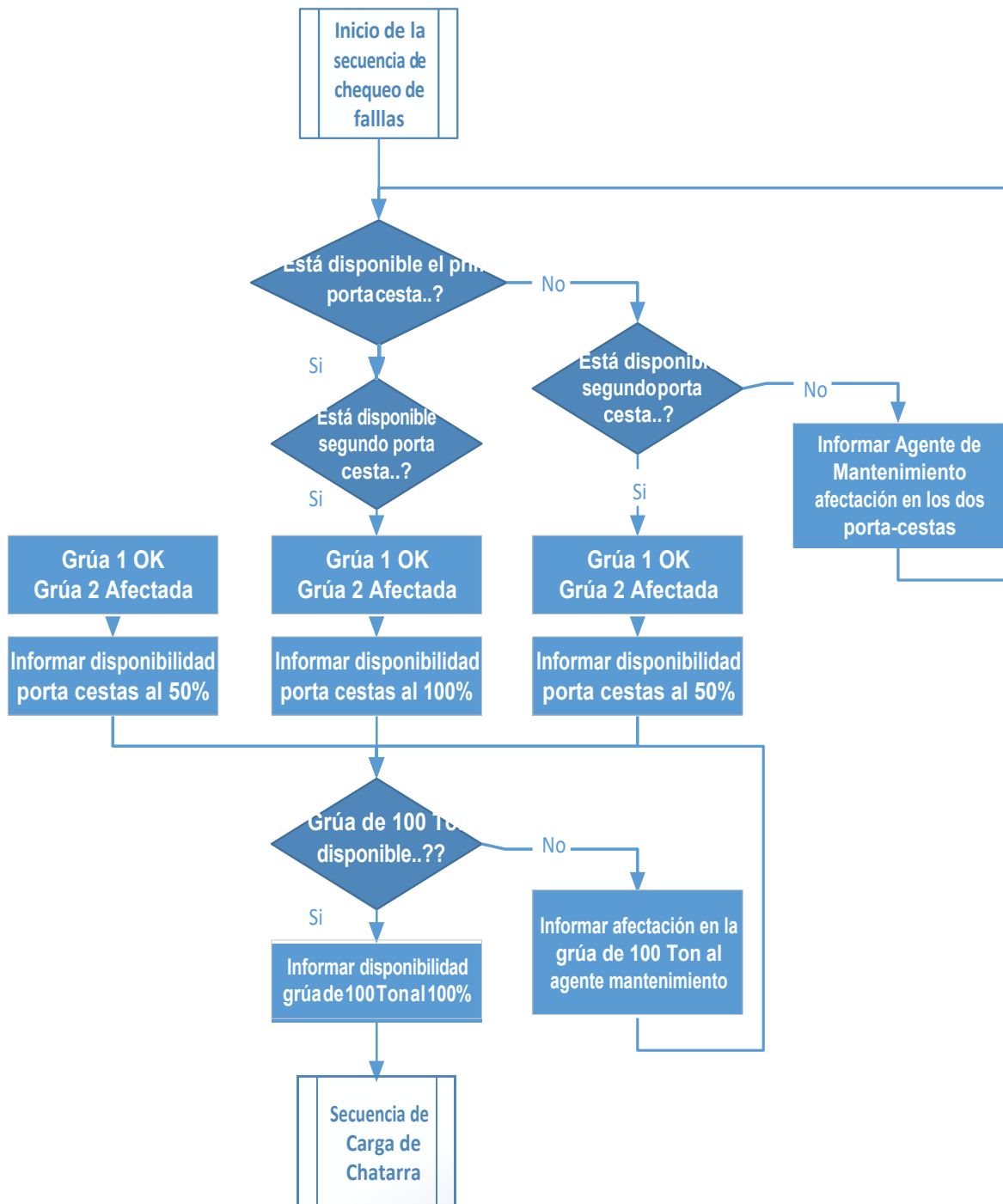
ANEXO 8 ETAPA 4 EVALUACIÓN DEL PROCESO DE TOMAS DE DECISIONES.



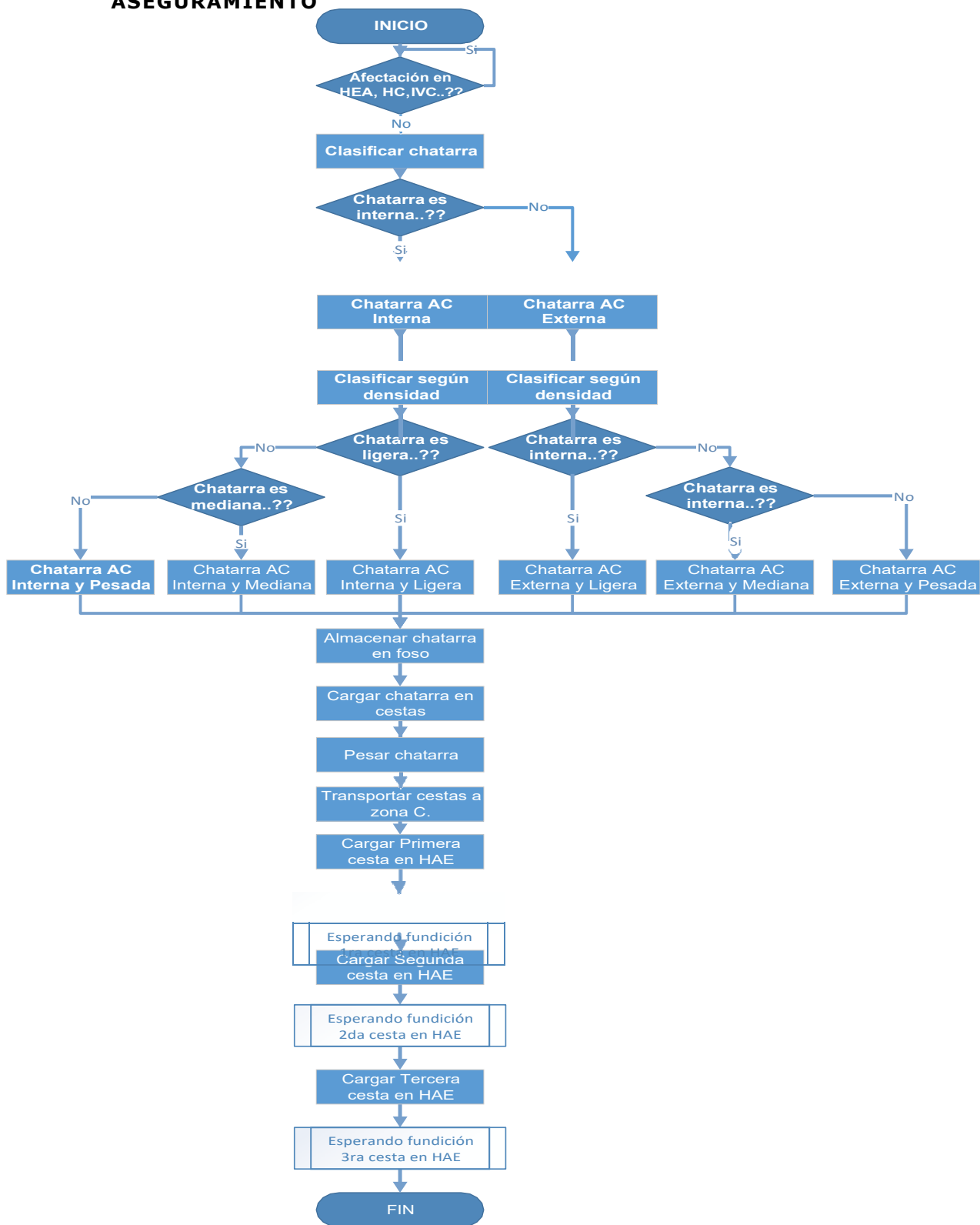
ANEXO 9 ALGORITMO DEL CHEQUEO INICIAL DE FALLAS EN EL AGENTE ASEGURAMIENTO



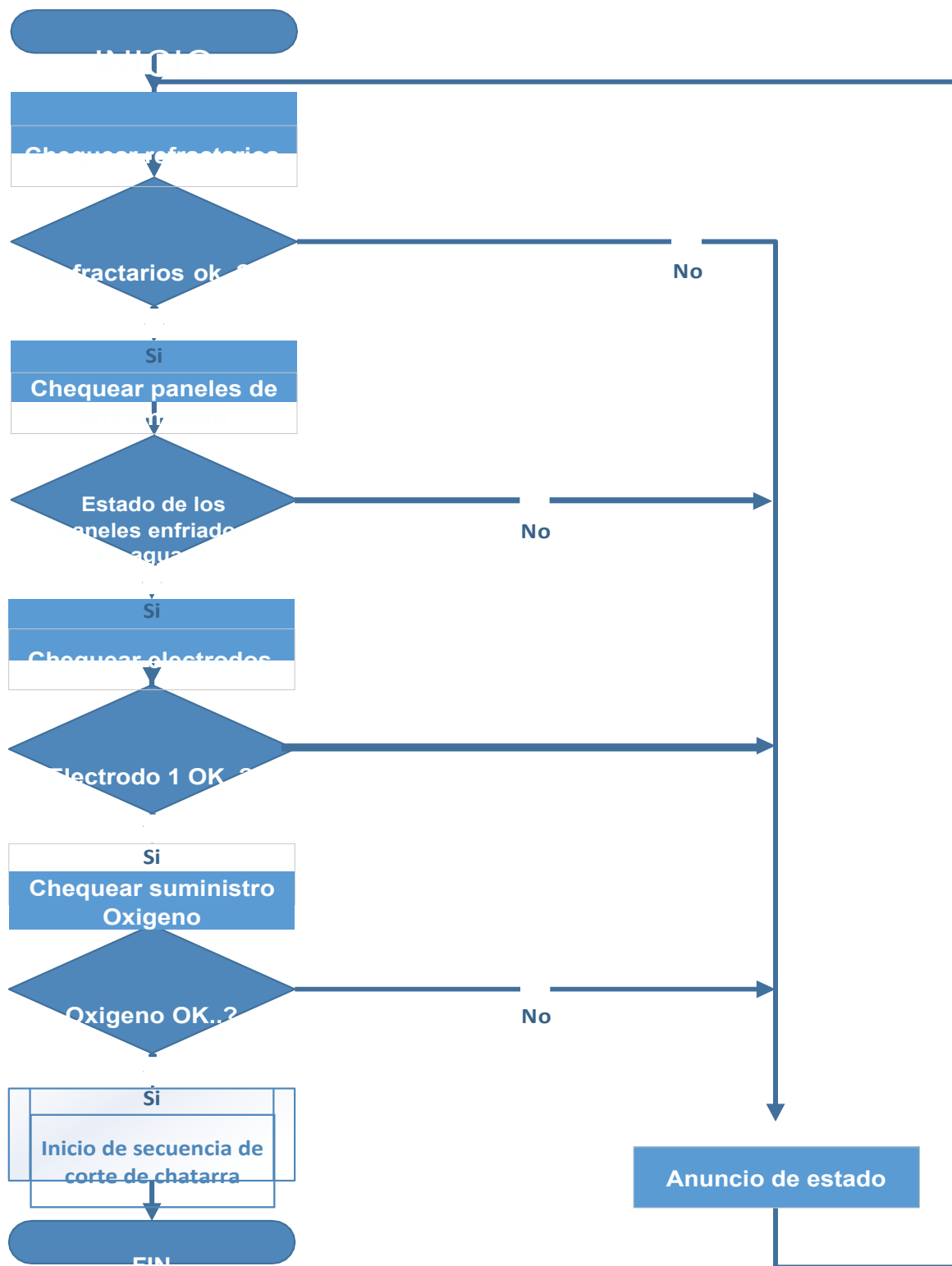
ANEXO 10 ALGORITMO DEL CHEQUEO DE SECUENCIA DE DISPONIBILIDAD DE CARROS PORTA-CESTAS



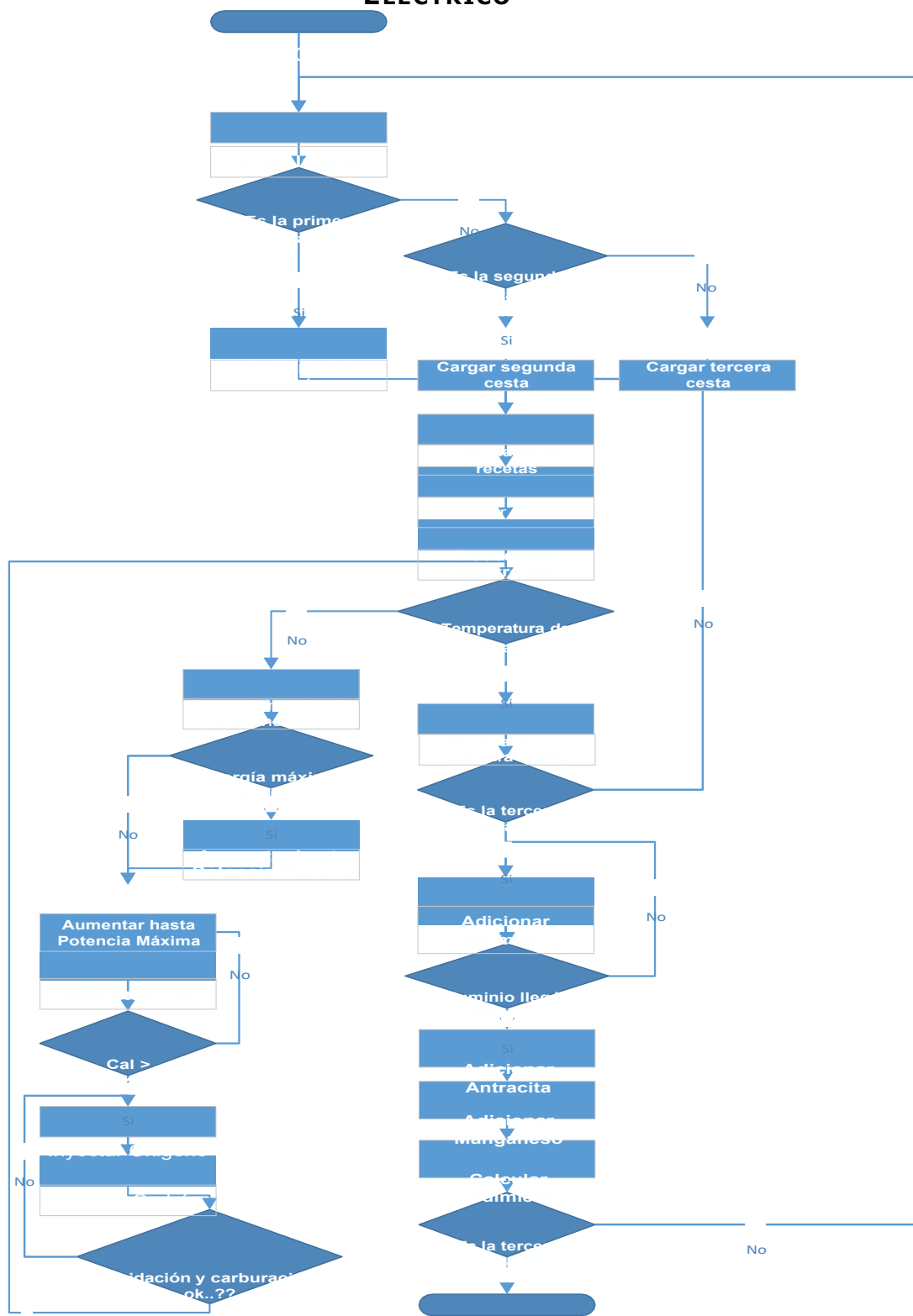
ANEXO 11 ALGORITMO DE CLASIFICACIÓN DE CHATARRA EN EL AGENTE ASEGURAMIENTO



ANEXO 12 ALGORITMO DE CHEQUEO DE FALLAS EN EL AGENTE HORNO ARCO ELÉCTRICO

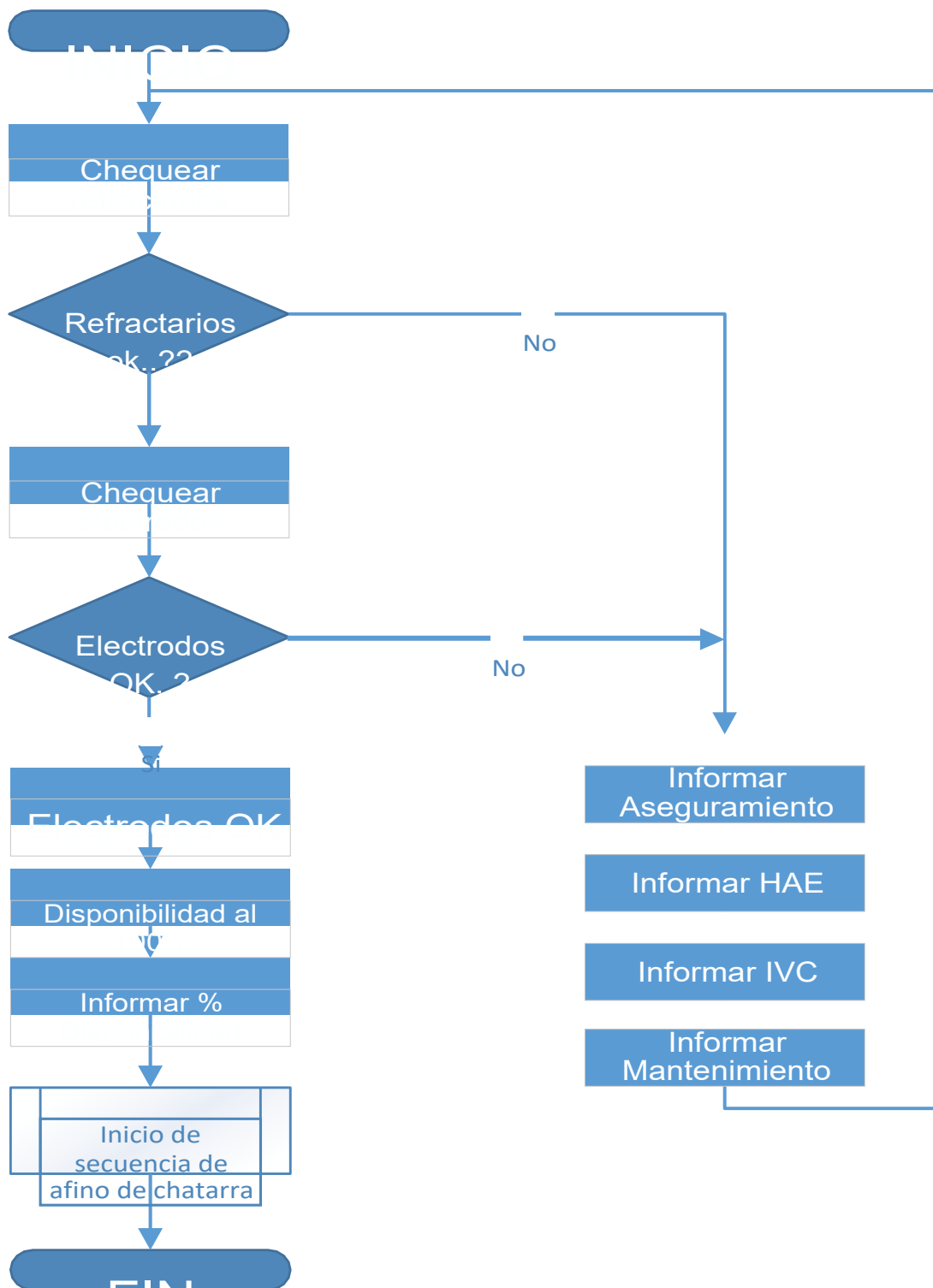


ANEXO 13 ALGORITMO DE CORTE DE CHATARRA EN EL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO

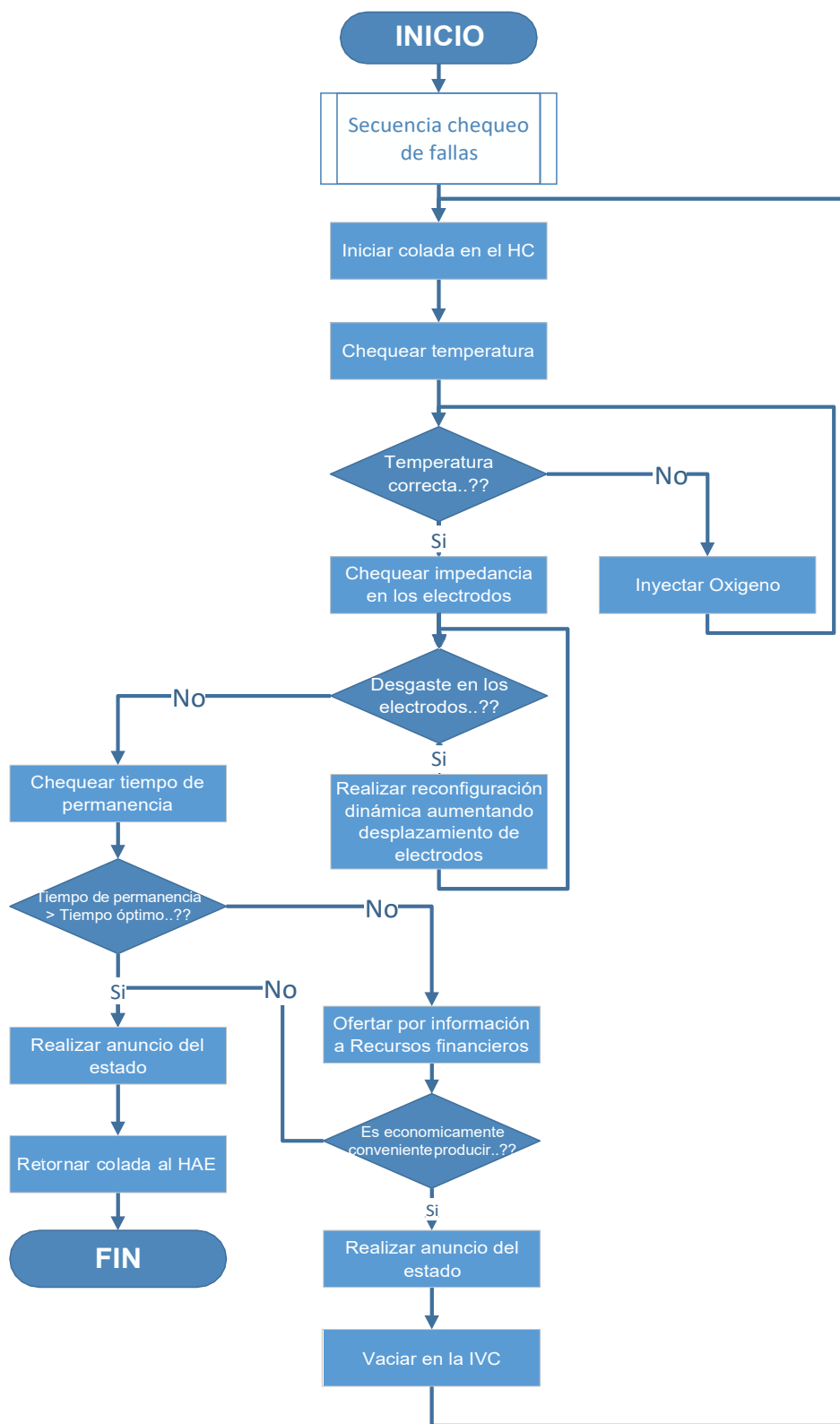


Si

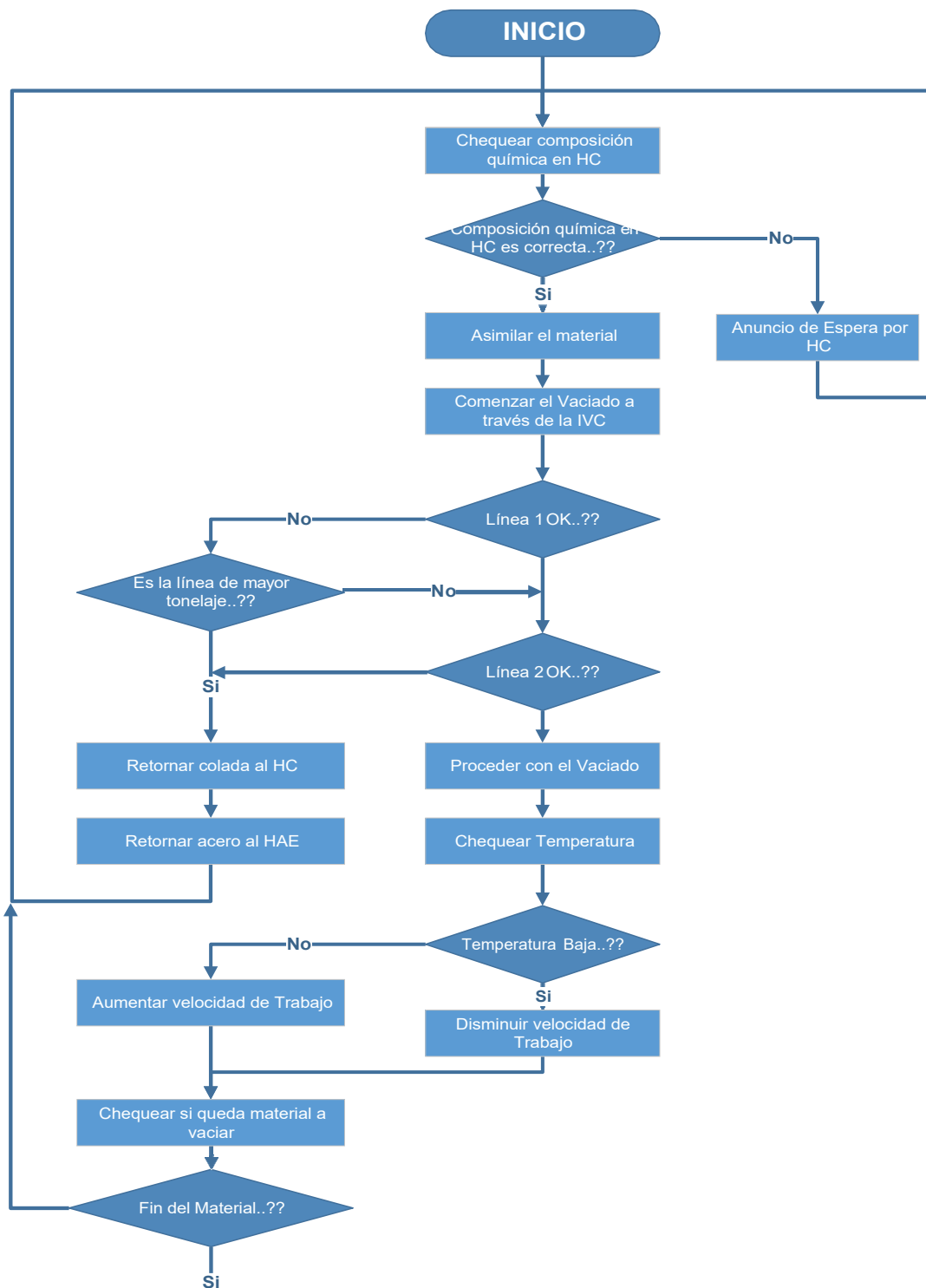
ANEXO 14 ALGORITMO DE TRATAMIENTO A LA COLADA EN EL HORNO CUCHARA



ANEXO 15 ALGORITMO DE CHEQUEO DE FALLAS EN EL HORNO CUCHARA



ANEXO 16 ALGORITMO DE SECUENCIALIDAD EN LAS LÍNEAS EN LA INSTALACIÓN DE VACIADO CONTINUO





ANEXO 17 PROGRAMA DE LÓGICA DIFUSA BASADA EN ALGORITMO DE TAKAGI SUGENO IMPLEMENTADO EN LA IA DEL AGENTE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO

```

FUNCTION_BLOCK POU_IA
VAR_INPUT
    ENT: BOOL; (*Habilita IA*)
    U1,U2: REAL; (* Entradas del Sistema*)
    U1a,U1b, U1c, U1d, U1e: REAL; (* Valores límites de definición de la entrada U1 Parámetros 3 Particiones*)
    U2a,U2b, U2c, U2d, U2e: REAL; (* Valores límites de definición de la entrada U2 Parámetros 3 Particiones*)
    SSa1, SSa2, SSa3: REAL; (* Tres Muestras de la Salida A = perturbaciones *)
END_VAR
(* Matriz De Inferencia Para Dos Entradas Y Una Salida *)
(* U1=Desplazamiento  Bajo    Normal    Alto *)
(* U2=Referencia *)
(* Pequeña    SSa=Máximo    SSa=Medio    SSa=Mínimo *)
(* Normal    SSa=Máximo    SSa=Medio    SSa=Mínimo *)
(* Grande    SSa=Máximo    SSa=Medio    SSa=Mínimo *)
VAR_OUTPUT
    ENO: BOOL; (*Salida de Habilitación*)
    RET_VAL: REAL; (*Salida 1*)
END_VAR
VAR
    EFP: ARRAY[1..2,1..3] OF REAL;    (*EFP[Entrada,Particion]=valores de habilitación de funciones de pertenencia*)
    AFP: ARRAY[1..2,1..3] OF BOOL;    (*AFP[Entrada,Particion]=TRUE=funciones de pertenencia ativas*)
    WS: ARRAY[1..3] OF REAL;    (*peso en las salidas*)
    SS: ARRAY[1..3] OF REAL;    (*posiciones de las constantes de funciones de salida*)
    num,den,temp: REAL;
    n: INT;
END_VAR
(*Inteligencia Artificial Basada en Lógica Difusa*)

(*Habilitar la salida*)
IF (ENT>0) OR (ENT<0)
    THEN
        ENO:=TRUE;
    ELSE
        ENO:=FALSE;
END_IF

(*Definición de las variables de entrada y sus funciones de Pertenencia*)
(*Para primera entrada*)

//AFP [1 1] Bajo
IF (U1>=U1a) AND (U1<U1c) THEN //Entrada 1 Partición Bajo
    AFP[1,1]:=TRUE;

```



```
IF U1<=U1b THEN
    EFP[1,1]:=1;
ELSE
    EFP[1,1]:=1-((U1-U1b)/(U1c-U1b));
END_IF;
ELSE
    AFP[1,1]:=FALSE;
END_IF;

//AFP [1 2] Medio
IF (U1>U1b) AND (U1<U1d) THEN //Entrada 1 Partición Normal
    AFP[1,2]:=TRUE;
    IF U1<=U1c THEN
        EFP[1,2]=(U1-U1b)/(U1c-U1b);
    ELSE
        EFP[1,2]:=1-((U1-U1c)/(U1d-U1c));
    END_IF;
    ELSE
        AFP[1,2]:=FALSE;
    END_IF;

//AFP [1 3] Alto
IF (U1>U1c) AND (U1<=U1e) THEN //Entrada 1 Partición Alto
    AFP[1,3]:=TRUE;
    IF U1<=U1d THEN
        EFP[1,3]=(U1-U1c)/(U1d-U1c);
    ELSE
        EFP[1,3]:=1;
    END_IF;
    ELSE
        AFP[1,3]:=FALSE;
    END_IF;

(*Para segunda entrada*)

//AFP [2 1] Bajo
IF (U2>=U2a) AND (U2<U2c) THEN //Entrada 2 Partición Bajo
    AFP[2,1]:=TRUE;
    IF U2<=U2b THEN
        EFP[2,1]:=1;
    ELSE
        EFP[2,1]:=1-((U2-U2b)/(U2c-U2b));
    END_IF;
    ELSE
        AFP[2,1]:=FALSE;
    END_IF;
```

```

//AFP [2 2] Medio
IF (U2>U2b) AND (U2<U2d) THEN //Entrada 2 Partición Normal
    AFP[2,2]:=TRUE;
    IF U2<=U2c THEN
        EFP[2,2]:=(U2-U2b)/(U2c-U2b);
    ELSE
        EFP[2,2]:=1-((U2-U2c)/(U2d-U2c));
    END_IF;
    ELSE
        AFP[2,2]:=FALSE;
    END_IF;

//AFP [2 3] Alto
IF (U2>U2C) AND (U2<=U2e) THEN //Entrada 2 Partición Alto
    AFP[2,3]:=TRUE;
    IF U2<=U2d THEN
        EFP[2,3]:=(U2-U2c)/(U2d-U2c);
    ELSE
        EFP[2,3]:=1;
    END_IF;
    ELSE
        AFP[2,3]:=FALSE;
    END_IF;

(*Definición de las reglas, inferencia difusa*)
//AFP [1 1] y AFP[2,1]
IF AFP[1,1] AND AFP[2,1] THEN //Entrada 1 Bajo Entrada 2 Bajo
    IF EFP[1,1]>EFP[2,1] THEN
        temp:=EFP[2,1];
    ELSE
        temp:=EFP[1,1];
    END_IF;
    IF WS[1]<temp THEN
        WS[1]:=temp;
    END_IF;
END_IF;

//AFP [1 1] y AFP[2,2]
IF AFP[1,1] AND AFP[2,2] THEN //Entrada 1 Bajo Entrada 2 Normal
    IF EFP[1,1]>EFP[2,2] THEN
        temp:=EFP[2,2];
    ELSE
        temp:=EFP[1,1];
    END_IF;
    IF WS[1]<temp THEN

```

```
        WS[1]:=temp;
    END_IF;
END_IF;

//AFP [1 1] y AFP[2,3]
IF AFP[1,1] AND AFP[2,3] THEN //Entrada 1 Bajo Entrada 2 Alto
    IF EFP[1,1]>EFP[2,3] THEN
        temp:=EFP[2,3];
    ELSE
        temp:=EFP[1,1];
    END_IF;
    IF WS[2]<temp THEN
        WS[2]:=temp;
    END_IF;
END_IF;

//AFP [1 2] y AFP[2,1]
IF AFP[1,2] AND AFP[2,1] THEN //Entrada 1 Normal Entrada 2 Bajo
    IF EFP[1,2]>EFP[2,1] THEN
        temp:=EFP[2,1];
    ELSE
        temp:=EFP[1,2];
    END_IF;
    IF WS[1]<temp THEN
        WS[1]:=temp;
    END_IF;
END_IF;

//AFP [1 2] y AFP[2,2]
IF AFP[1,2] AND AFP[2,2] THEN //Entrada 1 Normal Entrada 2 Normal
    IF EFP[1,2]>EFP[2,2] THEN
        temp:=EFP[2,2];
    ELSE
        temp:=EFP[1,2];
    END_IF;
    IF WS[2]<temp THEN
        WS[2]:=temp;
    END_IF;
END_IF;

//AFP [1 2] y AFP[2,3]
IF AFP[1,2] AND AFP[2,3] THEN //Entrada 1 Normal Entrada 2 Alto
    IF EFP[1,2]>EFP[2,3] THEN
        temp:=EFP[2,3];
    ELSE
        temp:=EFP[1,2];
    END_IF;
END_IF;
```

```
        END_IF;
        IF WS[3]<temp THEN
            WS[3]:=temp;
        END_IF;
    END_IF;

//AFP [1 3] y AFP[2,1]
IF AFP[1,3] AND AFP[2,1] THEN //Entrada 1 Alto Entrada 2 Bajo
    IF EFP[1,3]>EFP[2,1] THEN
        temp:=EFP[2,1];
    ELSE
        temp:=EFP[1,3];
    END_IF;
    IF WS[2]<temp THEN
        WS[2]:=temp;
    END_IF;
END_IF;

//AFP [1 3] y AFP[2,2]
IF AFP[1,3] AND AFP[2,2] THEN //Entrada 1 Alto Entrada 2 Normal
    IF EFP[1,3]>EFP[2,2] THEN
        temp:=EFP[2,2];
    ELSE
        temp:=EFP[1,3];
    END_IF;
    IF WS[3]<temp THEN
        WS[3]:=temp;
    END_IF;
END_IF;

//AFP [1 3] y AFP[2,3]
IF AFP[1,3] AND AFP[2,3] THEN //Entrada 1 Alto Entrada 2 Alto
    IF EFP[1,3]>EFP[2,3] THEN
        temp:=EFP[2,3];
    ELSE
        temp:=EFP[1,3];
    END_IF;
    IF WS[3]<temp THEN
        WS[3]:=temp;
    END_IF;
END_IF;

(*Cálculo de las salidas por CDC*)

num:=0;
den:=0;
```

```
SS[1]:=SSa1;  
SS[2]:=SSa2;  
SS[3]:=SSa3;  
FOR n:=1 TO 3 DO  
    num:=WS[n] * SS[n]+num;  
    den:=WS[n] + den;  
END_FOR
```

```
(*Retorno del valor*)  
RET_VAL:=num/den;
```

ANEXO 18 PROGRAMA DE LÓGICA DIFUSA BASADA EN ALGORITMO DE TAKAGI SUGENO IMPLEMENTADO EN LA IA DEL AGENTE HORNO CUCHARA

```

FUNCTION_BLOCK POU_IA
VAR_INPUT
    ENT: BOOL; (*Habilita IA*)
    U1,U2: REAL; (* Entradas del Sistema*)
    U1a,U1b, U1c, U1d, U1e: REAL; (* Valores límites de definición de la entrada U1 Parámetros 3 Particiones*)
    U2a,U2b, U2c, U2d, U2e: REAL; (* Valores límites de definición de la entrada U2 Parámetros 3 Particiones*)
    SSa1, SSa2, SSa3: REAL; (* Tres Muestras de la Salida A = perturbaciones *)
END_VAR
(* Matriz De Inferencia Para Dos Entradas Y Una Salida *)
(* U1=Desplazamiento Bajo Normal Alto *)
(* U2=Referencia *)
(* Pequeña SSa=Máximo SSa=Medio SSa=Mínimo *)
(* Normal SSa=Máximo SSa=Medio SSa=Mínimo *)
(* Grande SSa=Máximo SSa=Medio SSa=Mínimo *)
VAR_OUTPUT
    ENO: BOOL; (*Salida de Habilitación*)
    RET_VAL: REAL; (*Salida 1*)
END_VAR
VAR
    EFP: ARRAY[1..2,1..3] OF REAL; (*EFP[Entrada,Particion]=valores de habilitación de funciones de pertenencia*)
    AFP: ARRAY[1..2,1..3] OF BOOL; (*AFP[Entrada,Particion]=TRUE=funciones de pertenencia ativas*)
    WS: ARRAY[1..3] OF REAL; (*peso en las salidas*)
    SS: ARRAY[1..3] OF REAL; (*posiciones de las constantes de funciones de salida*)
    num,den,temp: REAL;
    n: INT;
END_VAR
(*Inteligencia Artificial Basada en Lógica Difusa*)

(*Habilitar la salida*)
IF (ENT>0) OR (ENT<0)
    THEN
        ENO:=TRUE;
    ELSE
        ENO:=FALSE;
    END_IF

(*Definición de las variables de entrada y sus funciones de Pertenencia*)
(*Para primera entrada*)

//AFP [1 1] Bajo
IF (U1>=U1a) AND (U1<U1c) THEN //Entrada 1 Partición Bajo

```

```

AFP[1,1]:=TRUE;
IF U1<=U1b THEN
    EFP[1,1]:=1;
ELSE
    EFP[1,1]:=1-((U1-U1b)/(U1c-U1b));
END_IF;
ELSE
AFP[1,1]:=FALSE;
END_IF;

//AFP [1 2] Medio
IF (U1>U1b) AND (U1<U1d) THEN //Entrada 1 Partición Normal
    AFP[1,2]:=TRUE;
    IF U1<=U1c THEN
        EFP[1,2]:=(U1-U1b)/(U1c-U1b);
    ELSE
        EFP[1,2]:=1-((U1-U1c)/(U1d-U1c));
    END_IF;
ELSE
    AFP[1,2]:=FALSE;
END_IF;

//AFP [1 3] Alto
IF (U1>U1c) AND (U1<=U1e) THEN //Entrada 1 Partición Alto
    AFP[1,3]:=TRUE;
    IF U1<=U1d THEN
        EFP[1,3]:=(U1-U1c)/(U1d-U1c);
    ELSE
        EFP[1,3]:=1;
    END_IF;
ELSE
    AFP[1,3]:=FALSE;
END_IF;

(*Para segunda entrada*)

//AFP [2 1] Bajo
IF (U2>=U2a) AND (U2<U2c) THEN //Entrada 2 Partición Bajo
    AFP[2,1]:=TRUE;
    IF U2<=U2b THEN
        EFP[2,1]:=1;
    ELSE
        EFP[2,1]:=1-((U2-U2b)/(U2c-U2b));
    END_IF;
ELSE
    AFP[2,1]:=FALSE;

```

```

END_IF;

//AFP [2 2] Medio
IF (U2>U2b) AND (U2<U2d) THEN //Entrada 2 Partición Normal
    AFP[2,2]:=TRUE;
    IF U2<=U2c THEN
        EFP[2,2]:=(U2-U2b)/(U2c-U2b);
    ELSE
        EFP[2,2]:=1-((U2-U2c)/(U2d-U2c));
    END_IF;
    ELSE
        AFP[2,2]:=FALSE;
    END_IF;

//AFP [2 3] Alto
IF (U2>U2C) AND (U2<=U2e) THEN //Entrada 2 Partición Alto
    AFP[2,3]:=TRUE;
    IF U2<=U2d THEN
        EFP[2,3]:=(U2-U2c)/(U2d-U2c);
    ELSE
        EFP[2,3]:=1;
    END_IF;
    ELSE
        AFP[2,3]:=FALSE;
    END_IF;

(*Definición de las reglas, inferencia difusa*)
//AFP [1 1] y AFP[2,1]
IF AFP[1,1] AND AFP[2,1] THEN //Entrada 1 Bajo Entrada 2 Bajo
    IF EFP[1,1]>EFP[2,1] THEN
        temp:=EFP[2,1];
    ELSE
        temp:=EFP[1,1];
    END_IF;
    IF WS[1]<temp THEN
        WS[1]:=temp;
    END_IF;
END_IF;

//AFP [1 1] y AFP[2,2]
IF AFP[1,1] AND AFP[2,2] THEN //Entrada 1 Bajo Entrada 2 Normal
    IF EFP[1,1]>EFP[2,2] THEN
        temp:=EFP[2,2];
    ELSE
        temp:=EFP[1,1];
    END_IF;

```



```
        IF WS[1]<temp THEN
            WS[1]:=temp;
        END_IF;
    END_IF;

//AFP [1 1] y AFP[2,3]
IF AFP[1,1] AND AFP[2,3] THEN //Entrada 1 Bajo Entrada 2 Alto
    IF EFP[1,1]>EFP[2,3] THEN
        temp:=EFP[2,3];
    ELSE
        temp:=EFP[1,1];
    END_IF;
    IF WS[2]<temp THEN
        WS[2]:=temp;
    END_IF;
END_IF;

//AFP [1 2] y AFP[2,1]
IF AFP[1,2] AND AFP[2,1] THEN //Entrada 1 Normal Entrada 2 Bajo
    IF EFP[1,2]>EFP[2,1] THEN
        temp:=EFP[2,1];
    ELSE
        temp:=EFP[1,2];
    END_IF;
    IF WS[1]<temp THEN
        WS[1]:=temp;
    END_IF;
END_IF;

//AFP [1 2] y AFP[2,2]
IF AFP[1,2] AND AFP[2,2] THEN //Entrada 1 Normal Entrada 2 Normal
    IF EFP[1,2]>EFP[2,2] THEN
        temp:=EFP[2,2];
    ELSE
        temp:=EFP[1,2];
    END_IF;
    IF WS[2]<temp THEN
        WS[2]:=temp;
    END_IF;
END_IF;

//AFP [1 2] y AFP[2,3]
IF AFP[1,2] AND AFP[2,3] THEN //Entrada 1 Normal Entrada 2 Alto
    IF EFP[1,2]>EFP[2,3] THEN
        temp:=EFP[2,3];
    ELSE
```

```
        temp:=EFP[1,2];
    END_IF;
    IF WS[3]<temp THEN
        WS[3]:=temp;
    END_IF;
END_IF;

//AFP [1 3] y AFP[2,1]
IF AFP[1,3] AND AFP[2,1] THEN //Entrada 1 Alto Entrada 2 Bajo
    IF EFP[1,3]>EFP[2,1] THEN
        temp:=EFP[2,1];
    ELSE
        temp:=EFP[1,3];
    END_IF;
    IF WS[2]<temp THEN
        WS[2]:=temp;
    END_IF;
END_IF;

//AFP [1 3] y AFP[2,2]
IF AFP[1,3] AND AFP[2,2] THEN //Entrada 1 Alto Entrada 2 Normal
    IF EFP[1,3]>EFP[2,2] THEN
        temp:=EFP[2,2];
    ELSE
        temp:=EFP[1,3];
    END_IF;
    IF WS[3]<temp THEN
        WS[3]:=temp;
    END_IF;
END_IF;

//AFP [1 3] y AFP[2,3]
IF AFP[1,3] AND AFP[2,3] THEN //Entrada 1 Alto Entrada 2 Alto
    IF EFP[1,3]>EFP[2,3] THEN
        temp:=EFP[2,3];
    ELSE
        temp:=EFP[1,3];
    END_IF;
    IF WS[3]<temp THEN
        WS[3]:=temp;
    END_IF;
END_IF;

(*Cálculo de las salidas por CDC*)

num:=0;
```

```

den:=0;
SS[1]:=SSa1;
SS[2]:=SSa2;
SS[3]:=SSa3;
FOR n:=1 TO 3 DO
    num:=WS[n] * SS[n]+num;
    den:=WS[n] + den;
END_FOR

```

```

(*Retorno del valor*)
RET_VAL:=num/den;

```

IA Aseguramiento

FUNCTION_BLOCK POU_IA

VAR_INPUT

ENT: BOOL; (*Habilita IA*)

U1,U2: REAL; (* Entradas del Sistema*)

U1a,U1b, U1c, U1d, U1e: REAL; (* Valores límites de definición de la entrada U1 Parámetros 3 Particiones*)

U2a,U2b, U2c, U2d, U2e: REAL; (* Valores límites de definición de la entrada U2 Parámetros 3 Particiones*)

SSa1, SSa2, SSa3: REAL; (* Tres Muestras de la Salida A = perturbaciones *)

END_VAR

(* Matriz De Inferencia Para Dos Entradas Y Una Salida *)

(* U1=Desplazamiento Bajo Normal Alto *)

(* U2=Referencia

*)

(* Pequeña SSa=Máximo SSa=Medio SSa=Mínimo *)

(* Normal SSa=Máximo SSa=Medio SSa=Mínimo *)

(* Grande SSa=Máximo SSa=Medio SSa=Mínimo *)

VAR_OUTPUT

ENO: BOOL; (*Salida de Habilitación*)

RET_VAL: REAL; (*Salida 1*)

END_VAR

VAR

EFP: ARRAY[1..2,1..3] OF REAL; (*EFP[Entrada,Particion]=valores de habilitación de funciones de pertenencia*)

AFP: ARRAY[1..2,1..3] OF BOOL; (*AFP[Entrada,Particion]=TRUE=funciones de pertenencia ativas*)

WS: ARRAY[1..3] OF REAL; (*peso en las salidas*)

SS: ARRAY[1..3] OF REAL; (*posiciones de las constantes de funciones de salida*)

num,den,temp: REAL;

n: INT;

END_VAR

(*Inteligencia Artificial Basada en Lógica Difusa*)

```
(*Habilitar la salida*)
IF (ENT>0) OR (ENT<0)
  THEN
    ENO:=TRUE;
  ELSE
    ENO:=FALSE;
END_IF
```

```
(*Definición de las variables de entrada y sus funciones de Pertenencia*)
(*Para primera entrada*)
```

```
//AFP [1 1] Bajo
IF (U1>=U1a) AND (U1<U1c) THEN //Entrada 1 Partición Bajo
  AFP[1,1]:=TRUE;
  IF U1<=U1b THEN
    EFP[1,1]:=1;
  ELSE
    EFP[1,1]:=1-((U1-U1b)/(U1c-U1b));
  END_IF;
  ELSE
    AFP[1,1]:=FALSE;
END_IF;
```

```
//AFP [1 2] Medio
IF (U1>U1b) AND (U1<U1d) THEN //Entrada 1 Partición Normal
  AFP[1,2]:=TRUE;
  IF U1<=U1c THEN
    EFP[1,2]:=(U1-U1b)/(U1c-U1b);
  ELSE
    EFP[1,2]:=1-((U1-U1c)/(U1d-U1c));
  END_IF;
  ELSE
    AFP[1,2]:=FALSE;
END_IF;
```

```
//AFP [1 3] Alto
IF (U1>U1c) AND (U1<=U1e) THEN //Entrada 1 Partición Alto
  AFP[1,3]:=TRUE;
  IF U1<=U1d THEN
    EFP[1,3]:=(U1-U1c)/(U1d-U1c);
  ELSE
    EFP[1,3]:=1;
  END_IF;
  ELSE
```

```

        AFP[1,3]:=FALSE;
    END_IF;

(*Para segunda entrada*)

//AFP [2 1] Bajo
IF (U2>=U2a) AND (U2<U2c) THEN //Entrada 2 Partición Bajo
    AFP[2,1]:=TRUE;
    IF U2<=U2b THEN
        EFP[2,1]:=1;
    ELSE
        EFP[2,1]:=1-((U2-U2b)/(U2c-U2b));
    END_IF;
    ELSE
        AFP[2,1]:=FALSE;
    END_IF;

//AFP [2 2] Medio
IF (U2>U2b) AND (U2<U2d) THEN //Entrada 2 Partición Normal
    AFP[2,2]:=TRUE;
    IF U2<=U2c THEN
        EFP[2,2]=(U2-U2b)/(U2c-U2b);
    ELSE
        EFP[2,2]:=1-((U2-U2c)/(U2d-U2c));
    END_IF;
    ELSE
        AFP[2,2]:=FALSE;
    END_IF;

//AFP [2 3] Alto
IF (U2>U2c) AND (U2<=U2e) THEN //Entrada 2 Partición Alto
    AFP[2,3]:=TRUE;
    IF U2<=U2d THEN
        EFP[2,3]=(U2-U2c)/(U2d-U2c);
    ELSE
        EFP[2,3]:=1;
    END_IF;
    ELSE
        AFP[2,3]:=FALSE;
    END_IF;

(*Definición de las reglas, inferencia difusa*)
//AFP [1 1] y AFP[2,1]
IF AFP[1,1] AND AFP[2,1] THEN //Entrada 1 Bajo Entrada 2 Bajo
    IF EFP[1,1]>EFP[2,1] THEN
        temp:=EFP[2,1];

```

```
        ELSE
            temp:=EFP[1,1];
        END_IF;
    IF WS[1]<temp THEN
        WS[1]:=temp;
    END_IF;
END_IF;

//AFP [1 1] y AFP[2,2]
IF AFP[1,1] AND AFP[2,2] THEN //Entrada 1 Bajo Entrada 2 Normal
    IF EFP[1,1]>EFP[2,2] THEN
        temp:=EFP[2,2];
    ELSE
        temp:=EFP[1,1];
    END_IF;
    IF WS[1]<temp THEN
        WS[1]:=temp;
    END_IF;
END_IF;

//AFP [1 1] y AFP[2,3]
IF AFP[1,1] AND AFP[2,3] THEN //Entrada 1 Bajo Entrada 2 Alto
    IF EFP[1,1]>EFP[2,3] THEN
        temp:=EFP[2,3];
    ELSE
        temp:=EFP[1,1];
    END_IF;
    IF WS[2]<temp THEN
        WS[2]:=temp;
    END_IF;
END_IF;

//AFP [1 2] y AFP[2,1]
IF AFP[1,2] AND AFP[2,1] THEN //Entrada 1 Normal Entrada 2 Bajo
    IF EFP[1,2]>EFP[2,1] THEN
        temp:=EFP[2,1];
    ELSE
        temp:=EFP[1,2];
    END_IF;
    IF WS[1]<temp THEN
        WS[1]:=temp;
    END_IF;
END_IF;

//AFP [1 2] y AFP[2,2]
IF AFP[1,2] AND AFP[2,2] THEN //Entrada 1 Normal Entrada 2 Normal
```

```
IF EFP[1,2]>EFP[2,2] THEN
    temp:=EFP[2,2];
ELSE
    temp:=EFP[1,2];
END_IF;
IF WS[2]<temp THEN
    WS[2]:=temp;
END_IF;
END_IF;

//AFP [1 2] y AFP[2,3]
IF AFP[1,2] AND AFP[2,3] THEN //Entrada 1 Normal Entrada 2 Alto
    IF EFP[1,2]>EFP[2,3] THEN
        temp:=EFP[2,3];
    ELSE
        temp:=EFP[1,2];
    END_IF;
    IF WS[3]<temp THEN
        WS[3]:=temp;
    END_IF;
END_IF;

//AFP [1 3] y AFP[2,1]
IF AFP[1,3] AND AFP[2,1] THEN //Entrada 1 Alto Entrada 2 Bajo
    IF EFP[1,3]>EFP[2,1] THEN
        temp:=EFP[2,1];
    ELSE
        temp:=EFP[1,3];
    END_IF;
    IF WS[2]<temp THEN
        WS[2]:=temp;
    END_IF;
END_IF;

//AFP [1 3] y AFP[2,2]
IF AFP[1,3] AND AFP[2,2] THEN //Entrada 1 Alto Entrada 2 Normal
    IF EFP[1,3]>EFP[2,2] THEN
        temp:=EFP[2,2];
    ELSE
        temp:=EFP[1,3];
    END_IF;
    IF WS[3]<temp THEN
        WS[3]:=temp;
    END_IF;
END_IF;
```

```
//AFP [1 3] y AFP[2,3]
IF AFP[1,3] AND AFP[2,3] THEN //Entrada 1 Alto Entrada 2 Alto
    IF EFP[1,3]>EFP[2,3] THEN
        temp:=EFP[2,3];
    ELSE
        temp:=EFP[1,3];
    END_IF;
    IF WS[3]<temp THEN
        WS[3]:=temp;
    END_IF;
END_IF;
```

(*Cálculo de las salidas por CDC*)

```
num:=0;
den:=0;
SS[1]:=SSa1;
SS[2]:=SSa2;
SS[3]:=SSa3;
FOR n:=1 TO 3 DO
    num:=WS[n] * SS[n]+num;
    den:=WS[n] + den;
END_FOR
```

(*Retorno del valor*)
RET_VAL:=num/den;

ANEXO 19 PROGRAMA DE LÓGICA DIFUSA BASADA EN ALGORITMO DE TAKAGI SUGENO IMPLEMENTADO EN LA IA DEL AGENTE INSTALACIÓN DE VACIADO CONTINUO

```

IA IVC
FUNCTION_BLOCK POU_IA
VAR_INPUT
    ENT: BOOL; (*Habilita IA*)
    U1,U2: REAL; (* Entradas del Sistema*)
    U1a,U1b, U1c, U1d, U1e: REAL; (* Valores límites de definición de la entrada U1 Parámetros 3 Particiones*)
    U2a,U2b, U2c, U2d, U2e: REAL; (* Valores límites de definición de la entrada U2 Parámetros 3 Particiones*)
    SSa1, SSa2, SSa3: REAL; (* Tres Muestras de la Salida A = perturbaciones *)
END_VAR
(* Matriz De Inferencia Para Dos Entradas Y Una Salida *)
(* U1=Desplazamiento Bajo Normal Alto *)
(* U2=Referencia *)
(* Pequeña SSa=Máximo SSa=Medio SSa=Mínimo *)
(* Normal SSa=Máximo SSa=Medio SSa=Mínimo *)
(* Grande SSa=Máximo SSa=Medio SSa=Mínimo *)
VAR_OUTPUT
    ENO: BOOL; (*Salida de Habilitación*)
    RET_VAL: REAL; (*Salida 1*)
END_VAR
VAR
    EFP: ARRAY[1..2,1..3] OF REAL; (*EFP[Entrada,Particion]=valores de habilitación de funciones de pertenencia*)
    AFP: ARRAY[1..2,1..3] OF BOOL; (*AFP[Entrada,Particion]=TRUE=funciones de pertenencia ativas*)
    WS: ARRAY[1..3] OF REAL; (*peso en las salidas*)
    SS: ARRAY[1..3] OF REAL; (*posiciones de las constantes de funciones de salida*)
    num,den,temp: REAL;
    n: INT;
END_VAR
(*Inteligencia Artificial Basada en Lógica Difusa*)

(*Habilitar la salida*)
IF (ENT>0) OR (ENT<0)
    THEN
        ENO:=TRUE;
    ELSE
        ENO:=FALSE;
END_IF

(*Definición de las variables de entrada y sus funciones de Pertenencia*)
(*Para primera entrada*)

//AFP [1 1] Bajo
IF (U1>=U1a) AND (U1<U1c) THEN //Entrada 1 Partición Bajo

```

```

AFP[1,1]:=TRUE;
IF U1<=U1b THEN
    EFP[1,1]:=1;
ELSE
    EFP[1,1]:=1-((U1-U1b)/(U1c-U1b));
END_IF;
ELSE
AFP[1,1]:=FALSE;
END_IF;

//AFP [1 2] Medio
IF (U1>U1b) AND (U1<U1d) THEN //Entrada 1 Partición Normal
    AFP[1,2]:=TRUE;
    IF U1<=U1c THEN
        EFP[1,2]:=(U1-U1b)/(U1c-U1b);
    ELSE
        EFP[1,2]:=1-((U1-U1c)/(U1d-U1c));
    END_IF;
ELSE
    AFP[1,2]:=FALSE;
END_IF;

//AFP [1 3] Alto
IF (U1>U1c) AND (U1<=U1e) THEN //Entrada 1 Partición Alto
    AFP[1,3]:=TRUE;
    IF U1<=U1d THEN
        EFP[1,3]:=(U1-U1c)/(U1d-U1c);
    ELSE
        EFP[1,3]:=1;
    END_IF;
ELSE
    AFP[1,3]:=FALSE;
END_IF;

(*Para segunda entrada*)

//AFP [2 1] Bajo
IF (U2>=U2a) AND (U2<U2c) THEN //Entrada 2 Partición Bajo
    AFP[2,1]:=TRUE;
    IF U2<=U2b THEN
        EFP[2,1]:=1;
    ELSE
        EFP[2,1]:=1-((U2-U2b)/(U2c-U2b));
    END_IF;
ELSE
    AFP[2,1]:=FALSE;

```

```

END_IF;

//AFP [2 2] Medio
IF (U2>U2b) AND (U2<U2d) THEN //Entrada 2 Partición Normal
    AFP[2,2]:=TRUE;
    IF U2<=U2c THEN
        EFP[2,2]:=(U2-U2b)/(U2c-U2b);
    ELSE
        EFP[2,2]:=1-((U2-U2c)/(U2d-U2c));
    END_IF;
ELSE
    AFP[2,2]:=FALSE;
END_IF;

//AFP [2 3] Alto
IF (U2>U2c) AND (U2<=U2e) THEN //Entrada 2 Partición Alto
    AFP[2,3]:=TRUE;
    IF U2<=U2d THEN
        EFP[2,3]:=(U2-U2c)/(U2d-U2c);
    ELSE
        EFP[2,3]:=1;
    END_IF;
ELSE
    AFP[2,3]:=FALSE;
END_IF;

(*Definición de las reglas, inferencia difusa*)
//AFP [1 1] y AFP[2,1]
IF AFP[1,1] AND AFP[2,1] THEN //Entrada 1 Bajo Entrada 2 Bajo
    IF EFP[1,1]>EFP[2,1] THEN
        temp:=EFP[2,1];
    ELSE
        temp:=EFP[1,1];
    END_IF;
    IF WS[1]<temp THEN
        WS[1]:=temp;
    END_IF;
END_IF;

//AFP [1 1] y AFP[2,2]
IF AFP[1,1] AND AFP[2,2] THEN //Entrada 1 Bajo Entrada 2 Normal
    IF EFP[1,1]>EFP[2,2] THEN
        temp:=EFP[2,2];
    ELSE
        temp:=EFP[1,1];
    END_IF;

```

```
        IF WS[1]<temp THEN
            WS[1]:=temp;
        END_IF;
    END_IF;

//AFP [1 1] y AFP[2,3]
IF AFP[1,1] AND AFP[2,3] THEN //Entrada 1 Bajo Entrada 2 Alto
    IF EFP[1,1]>EFP[2,3] THEN
        temp:=EFP[2,3];
    ELSE
        temp:=EFP[1,1];
    END_IF;
    IF WS[2]<temp THEN
        WS[2]:=temp;
    END_IF;
END_IF;

//AFP [1 2] y AFP[2,1]
IF AFP[1,2] AND AFP[2,1] THEN //Entrada 1 Normal Entrada 2 Bajo
    IF EFP[1,2]>EFP[2,1] THEN
        temp:=EFP[2,1];
    ELSE
        temp:=EFP[1,2];
    END_IF;
    IF WS[1]<temp THEN
        WS[1]:=temp;
    END_IF;
END_IF;

//AFP [1 2] y AFP[2,2]
IF AFP[1,2] AND AFP[2,2] THEN //Entrada 1 Normal Entrada 2 Normal
    IF EFP[1,2]>EFP[2,2] THEN
        temp:=EFP[2,2];
    ELSE
        temp:=EFP[1,2];
    END_IF;
    IF WS[2]<temp THEN
        WS[2]:=temp;
    END_IF;
END_IF;

//AFP [1 2] y AFP[2,3]
IF AFP[1,2] AND AFP[2,3] THEN //Entrada 1 Normal Entrada 2 Alto
    IF EFP[1,2]>EFP[2,3] THEN
        temp:=EFP[2,3];
    ELSE
```

```
        temp:=EFP[1,2];
    END_IF;
    IF WS[3]<temp THEN
        WS[3]:=temp;
    END_IF;
END_IF;

//AFP [1 3] y AFP[2,1]
IF AFP[1,3] AND AFP[2,1] THEN //Entrada 1 Alto Entrada 2 Bajo
    IF EFP[1,3]>EFP[2,1] THEN
        temp:=EFP[2,1];
    ELSE
        temp:=EFP[1,3];
    END_IF;
    IF WS[2]<temp THEN
        WS[2]:=temp;
    END_IF;
END_IF;

//AFP [1 3] y AFP[2,2]
IF AFP[1,3] AND AFP[2,2] THEN //Entrada 1 Alto Entrada 2 Normal
    IF EFP[1,3]>EFP[2,2] THEN
        temp:=EFP[2,2];
    ELSE
        temp:=EFP[1,3];
    END_IF;
    IF WS[3]<temp THEN
        WS[3]:=temp;
    END_IF;
END_IF;

//AFP [1 3] y AFP[2,3]
IF AFP[1,3] AND AFP[2,3] THEN //Entrada 1 Alto Entrada 2 Alto
    IF EFP[1,3]>EFP[2,3] THEN
        temp:=EFP[2,3];
    ELSE
        temp:=EFP[1,3];
    END_IF;
    IF WS[3]<temp THEN
        WS[3]:=temp;
    END_IF;
END_IF;

(*Cálculo de las salidas por CDC*)

num:=0;
```

```
den:=0;
SS[1]:=SSa1;
SS[2]:=SSa2;
SS[3]:=SSa3;
FOR n:=1 TO 3 DO
    num:=WS[n] * SS[n]+num;
    den:=WS[n] + den;
END_FOR
```

```
(*Retorno del valor*)
RET_VAL:=num/den;
```

ANEXO 20 PROGRAMA DE LÓGICA DIFUSA BASADA EN ALGORITMO DE TAKAGI SUGENO IMPLEMENTADO EN LA IA DEL AGENTE ASEGURAMIENTO

```

FUNCTION_BLOCK POU_IA
VAR_INPUT
    ENT: BOOL; (*Habilita IA*)
    U1,U2: REAL; (* Entradas del Sistema*)
    U1a,U1b, U1c, U1d, U1e: REAL; (* Valores límites de definición de la entrada U1 Parámetros 3 Particiones*)
    U2a,U2b, U2c, U2d, U2e: REAL; (* Valores límites de definición de la entrada U2 Parámetros 3 Particiones*)
    SSa1, SSa2, SSa3: REAL; (* Tres Muestras de la Salida A = perturbaciones *)
END_VAR
(* Matriz De Inferencia Para Dos Entradas Y Una Salida *)
(* U1=Desplazamiento Bajo Normal Alto *)
(* U2=Referencia *)
(* Pequeña SSa=Máximo SSa=Medio SSa=Mínimo *)
(* Normal SSa=Máximo SSa=Medio SSa=Mínimo *)
(* Grande SSa=Máximo SSa=Medio SSa=Mínimo *)
VAR_OUTPUT
    ENO: BOOL; (*Salida de Habilitación*)
    RET_VAL: REAL; (*Salida 1*)
END_VAR
VAR
    EFP: ARRAY[1..2,1..3] OF REAL; (*EFP[Entrada,Particion]=valores de habilitación de funciones de pertenencia*)
    AFP: ARRAY[1..2,1..3] OF BOOL; (*AFP[Entrada,Particion]=TRUE=funciones de pertenencia ativas*)
    WS: ARRAY[1..3] OF REAL; (*peso en las salidas*)
    SS: ARRAY[1..3] OF REAL; (*posiciones de las constantes de funciones de salida*)
    num,den,temp: REAL;
    n: INT;
END_VAR
(*Inteligencia Artificial Basada en Lógica Difusa*)

(*Habilitar la salida*)
IF (ENT>0) OR (ENT<0)
    THEN
        ENO:=TRUE;
    ELSE
        ENO:=FALSE;
    END_IF

(*Definición de las variables de entrada y sus funciones de Pertenencia*)
(*Para primera entrada*)

//AFP [1 1] Bajo
IF (U1>=U1a) AND (U1<U1c) THEN //Entrada 1 Partición Bajo

```

```

AFP[1,1]:=TRUE;
IF U1<=U1b THEN
    EFP[1,1]:=1;
ELSE
    EFP[1,1]:=1-((U1-U1b)/(U1c-U1b));
END_IF;
ELSE
AFP[1,1]:=FALSE;
END_IF;

//AFP [1 2] Medio
IF (U1>U1b) AND (U1<U1d) THEN //Entrada 1 Partición Normal
    AFP[1,2]:=TRUE;
    IF U1<=U1c THEN
        EFP[1,2]:=(U1-U1b)/(U1c-U1b);
    ELSE
        EFP[1,2]:=1-((U1-U1c)/(U1d-U1c));
    END_IF;
ELSE
    AFP[1,2]:=FALSE;
END_IF;

//AFP [1 3] Alto
IF (U1>U1c) AND (U1<=U1e) THEN //Entrada 1 Partición Alto
    AFP[1,3]:=TRUE;
    IF U1<=U1d THEN
        EFP[1,3]:=(U1-U1c)/(U1d-U1c);
    ELSE
        EFP[1,3]:=1;
    END_IF;
ELSE
    AFP[1,3]:=FALSE;
END_IF;

(*Para segunda entrada*)

//AFP [2 1] Bajo
IF (U2>=U2a) AND (U2<U2c) THEN //Entrada 2 Partición Bajo
    AFP[2,1]:=TRUE;
    IF U2<=U2b THEN
        EFP[2,1]:=1;
    ELSE
        EFP[2,1]:=1-((U2-U2b)/(U2c-U2b));
    END_IF;
ELSE
    AFP[2,1]:=FALSE;

```



```

END_IF;

//AFP [2 2] Medio
IF (U2>U2b) AND (U2<U2d) THEN //Entrada 2 Partición Normal
    AFP[2,2]:=TRUE;
    IF U2<=U2c THEN
        EFP[2,2]:=(U2-U2b)/(U2c-U2b);
    ELSE
        EFP[2,2]:=1-((U2-U2c)/(U2d-U2c));
    END_IF;
ELSE
    AFP[2,2]:=FALSE;
END_IF;

//AFP [2 3] Alto
IF (U2>U2C) AND (U2<=U2e) THEN //Entrada 2 Partición Alto
    AFP[2,3]:=TRUE;
    IF U2<=U2d THEN
        EFP[2,3]:=(U2-U2c)/(U2d-U2c);
    ELSE
        EFP[2,3]:=1;
    END_IF;
ELSE
    AFP[2,3]:=FALSE;
END_IF;

(*Definición de las reglas, inferencia difusa*)
//AFP [1 1] y AFP[2,1]
IF AFP[1,1] AND AFP[2,1] THEN //Entrada 1 Bajo Entrada 2 Bajo
    IF EFP[1,1]>EFP[2,1] THEN
        temp:=EFP[2,1];
    ELSE
        temp:=EFP[1,1];
    END_IF;
    IF WS[1]<temp THEN
        WS[1]:=temp;
    END_IF;
END_IF;

//AFP [1 1] y AFP[2,2]
IF AFP[1,1] AND AFP[2,2] THEN //Entrada 1 Bajo Entrada 2 Normal
    IF EFP[1,1]>EFP[2,2] THEN
        temp:=EFP[2,2];
    ELSE
        temp:=EFP[1,1];
    END_IF;

```

```
        IF WS[1]<temp THEN
            WS[1]:=temp;
        END_IF;
    END_IF;

//AFP [1 1] y AFP[2,3]
IF AFP[1,1] AND AFP[2,3] THEN //Entrada 1 Bajo Entrada 2 Alto
    IF EFP[1,1]>EFP[2,3] THEN
        temp:=EFP[2,3];
    ELSE
        temp:=EFP[1,1];
    END_IF;
    IF WS[2]<temp THEN
        WS[2]:=temp;
    END_IF;
END_IF;

//AFP [1 2] y AFP[2,1]
IF AFP[1,2] AND AFP[2,1] THEN //Entrada 1 Normal Entrada 2 Bajo
    IF EFP[1,2]>EFP[2,1] THEN
        temp:=EFP[2,1];
    ELSE
        temp:=EFP[1,2];
    END_IF;
    IF WS[1]<temp THEN
        WS[1]:=temp;
    END_IF;
END_IF;

//AFP [1 2] y AFP[2,2]
IF AFP[1,2] AND AFP[2,2] THEN //Entrada 1 Normal Entrada 2 Normal
    IF EFP[1,2]>EFP[2,2] THEN
        temp:=EFP[2,2];
    ELSE
        temp:=EFP[1,2];
    END_IF;
    IF WS[2]<temp THEN
        WS[2]:=temp;
    END_IF;
END_IF;

//AFP [1 2] y AFP[2,3]
IF AFP[1,2] AND AFP[2,3] THEN //Entrada 1 Normal Entrada 2 Alto
    IF EFP[1,2]>EFP[2,3] THEN
        temp:=EFP[2,3];
    ELSE
```

```
        temp:=EFP[1,2];
    END_IF;
    IF WS[3]<temp THEN
        WS[3]:=temp;
    END_IF;
END_IF;

//AFP [1 3] y AFP[2,1]
IF AFP[1,3] AND AFP[2,1] THEN //Entrada 1 Alto Entrada 2 Bajo
    IF EFP[1,3]>EFP[2,1] THEN
        temp:=EFP[2,1];
    ELSE
        temp:=EFP[1,3];
    END_IF;
    IF WS[2]<temp THEN
        WS[2]:=temp;
    END_IF;
END_IF;

//AFP [1 3] y AFP[2,2]
IF AFP[1,3] AND AFP[2,2] THEN //Entrada 1 Alto Entrada 2 Normal
    IF EFP[1,3]>EFP[2,2] THEN
        temp:=EFP[2,2];
    ELSE
        temp:=EFP[1,3];
    END_IF;
    IF WS[3]<temp THEN
        WS[3]:=temp;
    END_IF;
END_IF;

//AFP [1 3] y AFP[2,3]
IF AFP[1,3] AND AFP[2,3] THEN //Entrada 1 Alto Entrada 2 Alto
    IF EFP[1,3]>EFP[2,3] THEN
        temp:=EFP[2,3];
    ELSE
        temp:=EFP[1,3];
    END_IF;
    IF WS[3]<temp THEN
        WS[3]:=temp;
    END_IF;
END_IF;

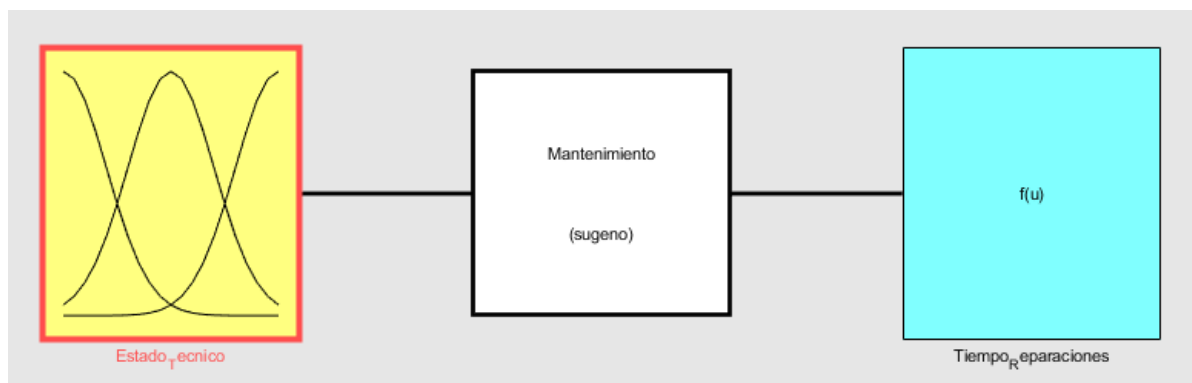
(*Cálculo de las salidas por CDC*)

num:=0;
```

```
den:=0;
SS[1]:=SSa1;
SS[2]:=SSa2;
SS[3]:=SSa3;
FOR n:=1 TO 3 DO
    num:=WS[n] * SS[n]+num;
    den:=WS[n] + den;
END_FOR
```

```
(*Retorno del valor*)
RET_VAL:=num/den;
```

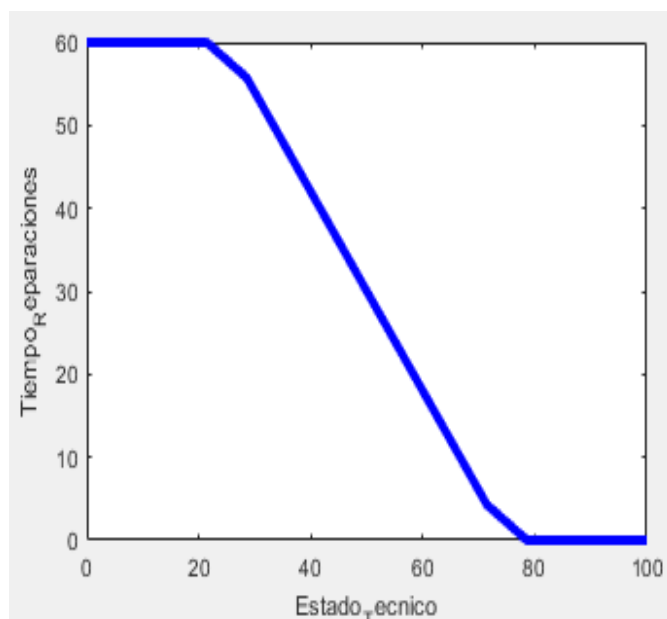
ANEXO 21 DESCRIPCIÓN DE LAS BASES DE CONOCIMIENTO DEL AGENTE MANTENIMIENTO



Bases de Conocimiento del Agente Mantenimiento

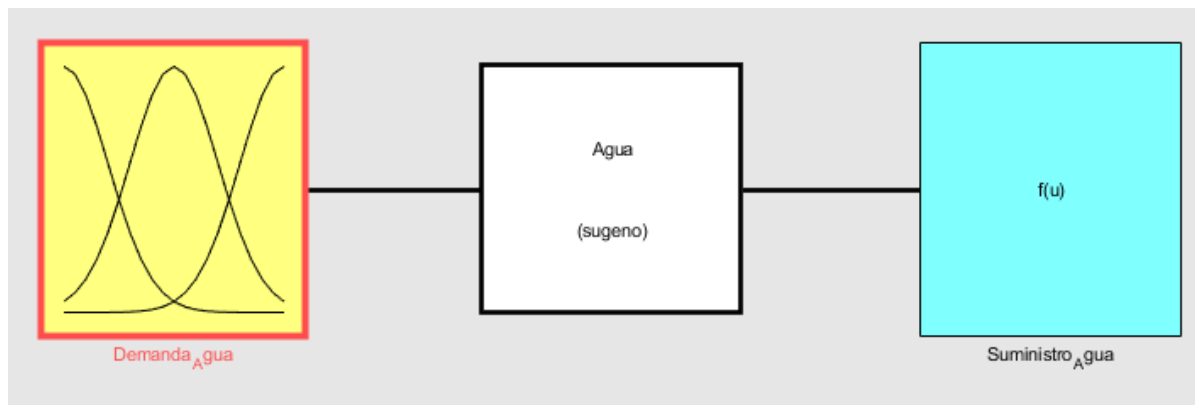
1. If (Estado_Tecnico is Malo) then (Tiempo_Reparaciones is Mucho_Tiempo) (1)
2. If (Estado_Tecnico is Bueno) then (Tiempo_Reparaciones is Poco_Tiempo) (1)
3. If (Estado_Tecnico is Regular) then (Tiempo_Reparaciones is Tiempo_Promedio) (1)

Reglas difusas en el agente Mantenimiento



Comportamiento de la IA en el Agente Mantenimiento

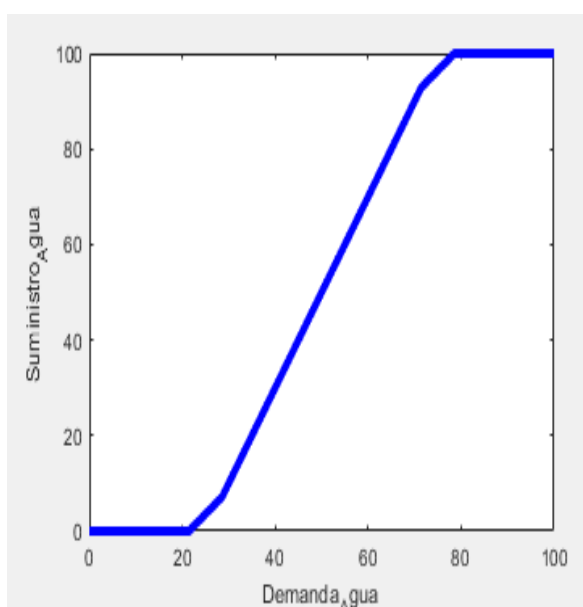
ANEXO 22 DESCRIPCIÓN DE LAS BASES DE CONOCIMIENTO DEL AGENTE PLANTA DE AGUA



Bases de conocimiento del Agente Planta de Agua

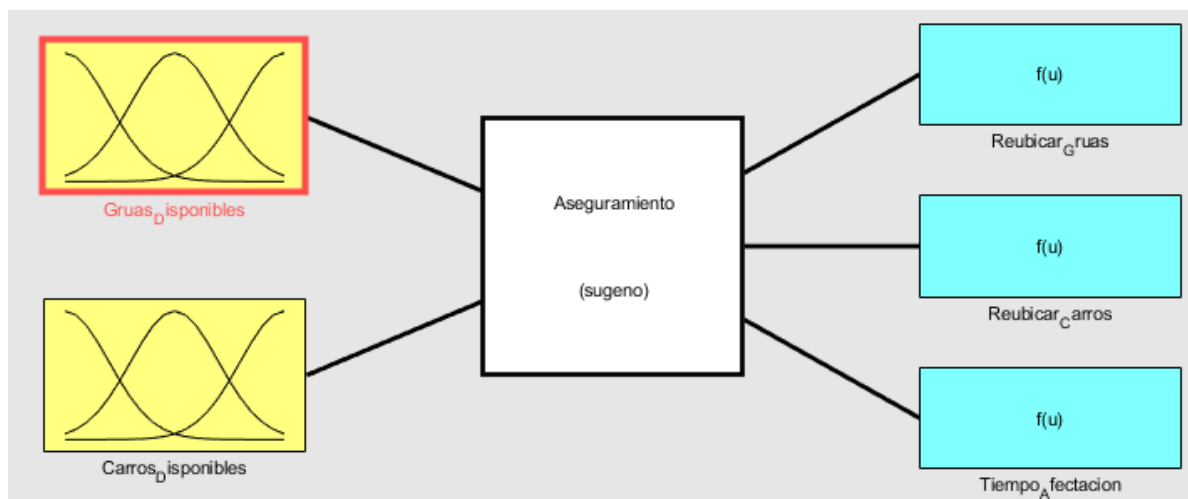
1. If (Demanda_Agua is Sin_Demanda) then (Suministro_Agua is No_Suministro) (1)
2. If (Demanda_Agua is Baja_Demanda) then (Suministro_Agua is Suministro_Bajo) (1)
3. If (Demanda_Agua is Alta_Demanda) then (Suministro_Agua is Suministro_Maximo) (1)

Reglas difusas en el Agente Planta de Agua



Comportamiento de la IA en el Agente Planta de Agua

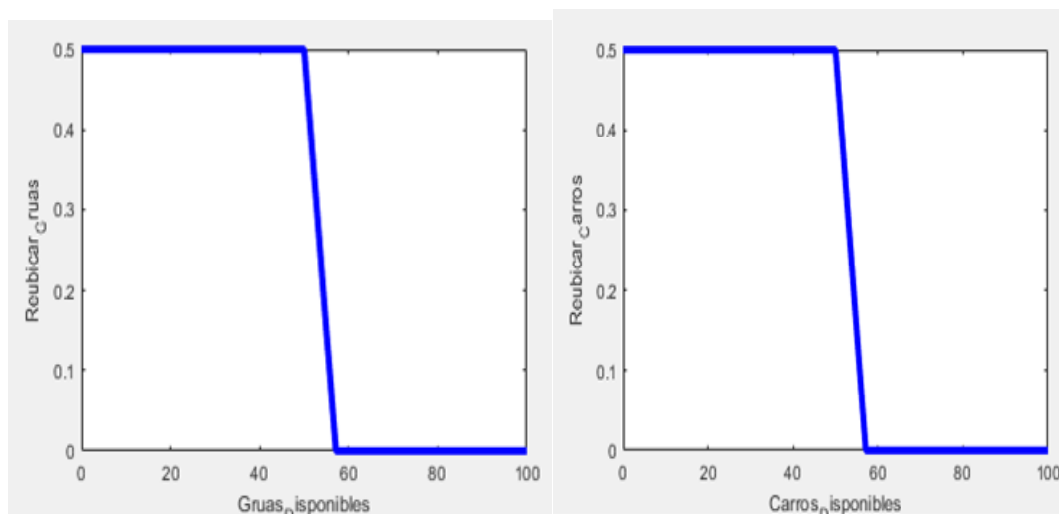
ANEXO 23 DESCRIPCIÓN DE LAS BASES DE CONOCIMIENTO DEL AGENTE ASEGURAMIENTO



Bases de conocimiento del agente Aseguramiento

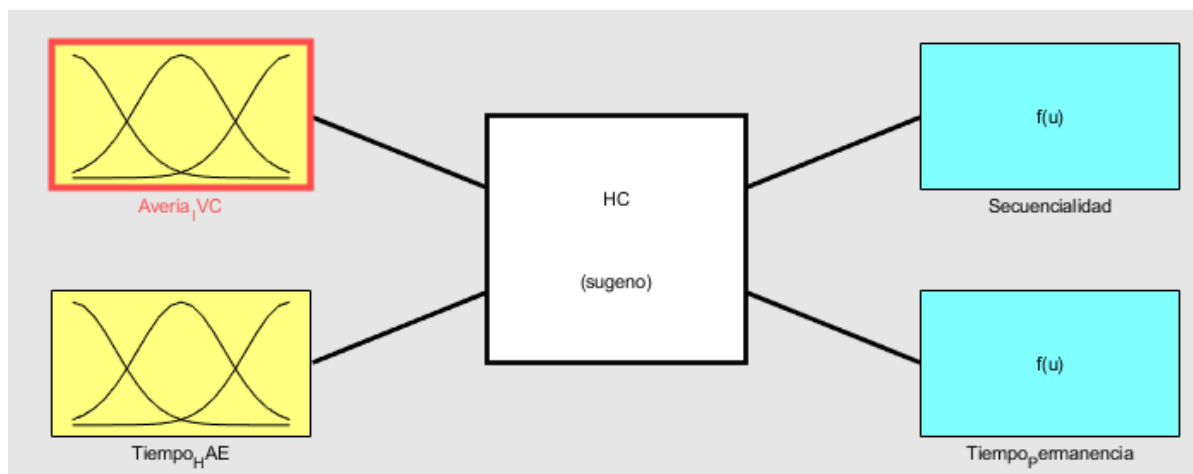
1. If (Gruas_Disponibles is Ninguna) and (Carros_Disponibles is Dos) then (Reubicar_Gruas is No_Mover_Grua)(Reubicar_Carros is No_Mover_Carro)(Tiempo_Afectacion is Alto) (1)
2. If (Gruas_Disponibles is Una) and (Carros_Disponibles is Dos) then (Reubicar_Gruas is Mover_Una_Grua)(Reubicar_Carros is No_Mover_Carro)(Tiempo_Afectacion is Medio) (1)
3. If (Gruas_Disponibles is Dos) and (Carros_Disponibles is Dos) then (Reubicar_Gruas is Mover_Dos_Gruas)(Reubicar_Carros is No_Mover_Carro)(Tiempo_Afectacion is Bajo) (1)
4. If (Gruas_Disponibles is Dos) and (Carros_Disponibles is Ninguno) then (Reubicar_Gruas is No_Mover_Grua)(Reubicar_Carros is No_Mover_Carro)(Tiempo_Afectacion is Alto) (1)
5. If (Gruas_Disponibles is Dos) and (Carros_Disponibles is Uno) then (Reubicar_Gruas is No_Mover_Grua)(Reubicar_Carros is Mover_Un_Carro)(Tiempo_Afectacion is Medio) (1)
6. If (Gruas_Disponibles is Dos) and (Carros_Disponibles is Dos) then (Reubicar_Gruas is No_Mover_Grua)(Reubicar_Carros is Mover_Dos_Carros)(Tiempo_Afectacion is Bajo) (1)

Reglas difusas en el Agente Aseguramiento



Disponibilidad de grúas y carros, comportamiento de la IA en el agente Aseguramiento

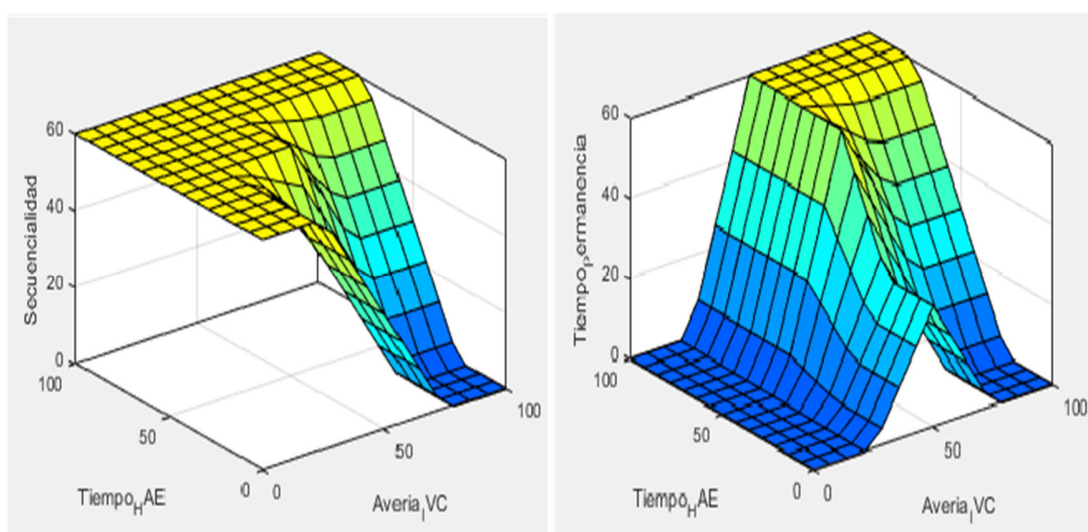
ANEXO 24 DESCRIPCIÓN DE LAS BASES DE CONOCIMIENTO DEL AGENTE HORNO CUCHARA



Bases de conocimiento del agente Horno Cuchara

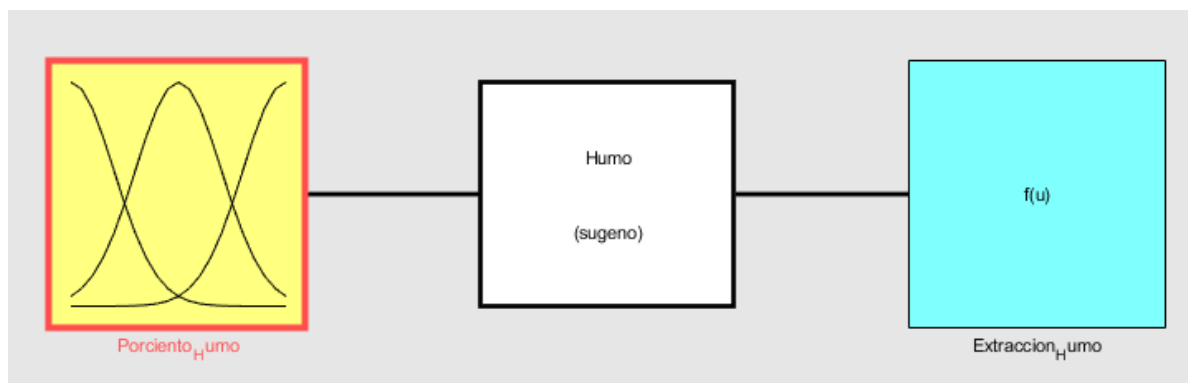
1. If (Averia_IVC is Dos_Vias) then (Secuencialidad is Mucho_Tiempo) (1)
2. If (Averia_IVC is Averia_Una_VIA) and (Tiempo_HAE is Bajo) then (Secuencialidad is Tiempo_Promedio)(Tiempo_Permanencia is Promedio_T_Permanencia) (1)
3. If (Averia_IVC is No_Averia) and (Tiempo_HAE is Bajo) then (Secuencialidad is Poco_Tiempo)(Tiempo_Permanencia is Poco_T_Permanencia) (1)
4. If (Averia_IVC is Averia_Una_VIA) and (Tiempo_HAE is Medio) then (Secuencialidad is Mucho_Tiempo)(Tiempo_Permanencia is Mucho_T_Permanencia) (1)
5. If (Averia_IVC is Averia_Una_VIA) and (Tiempo_HAE is Alto) then (Secuencialidad is Mucho_Tiempo)(Tiempo_Permanencia is Mucho_T_Permanencia) (1)
6. If (Averia_IVC is No_Averia) and (Tiempo_HAE is Medio) then (Secuencialidad is Tiempo_Promedio)(Tiempo_Permanencia is Promedio_T_Permanencia) (1)
7. If (Averia_IVC is No_Averia) and (Tiempo_HAE is Alto) then (Secuencialidad is Mucho_Tiempo)(Tiempo_Permanencia is Mucho_T_Permanencia) (1)

Reglas difusas en el agente Horno Cuchara



Comportamiento de la IA en el Agente Horno Cuchara

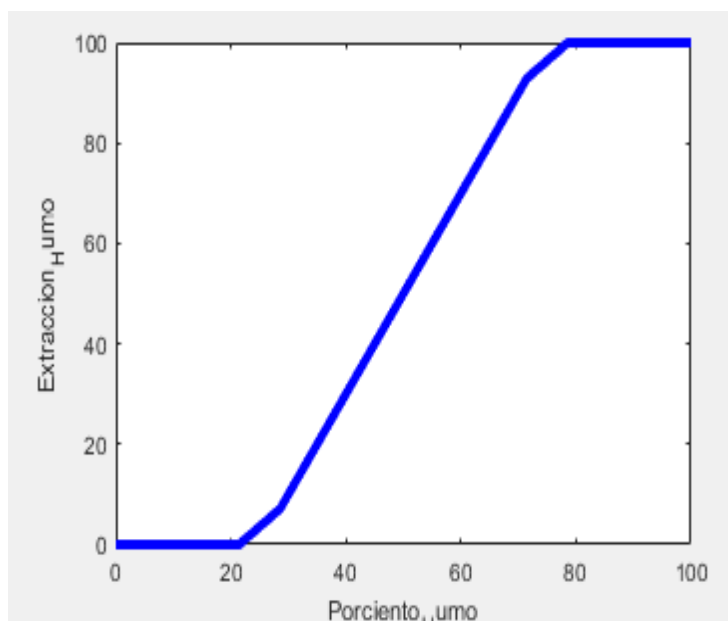
ANEXO 25 DESCRIPCIÓN DE LAS BASES DE CONOCIMIENTO DEL AGENTE PLANTA DE HUMOS



Bases de conocimiento del Agente Humos

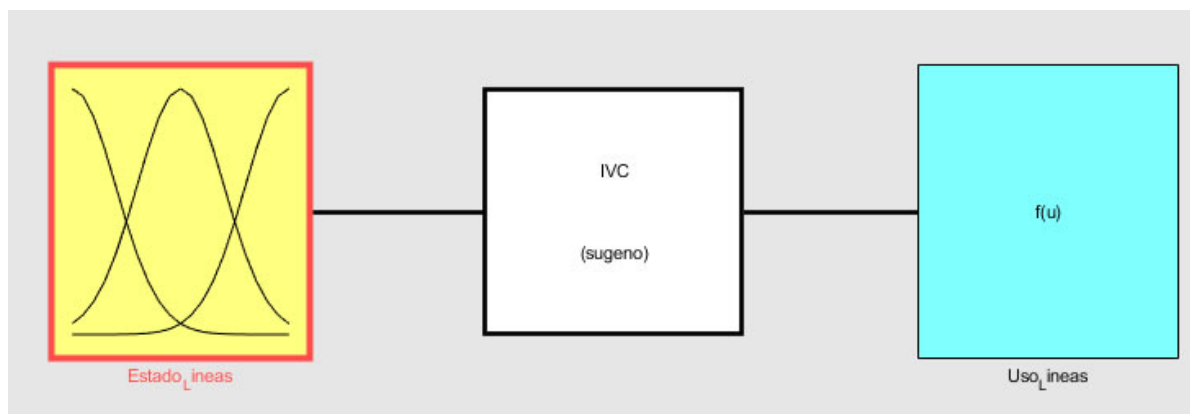
1. If (Porciento_Humo is Sin_Humo) then (Extraccion_Humo is Sin_Extraccion) (1)
2. If (Porciento_Humo is Baja_Humo) then (Extraccion_Humo is Extraccion_Bajo) (1)
3. If (Porciento_Humo is Alta_P_Humo) then (Extraccion_Humo is Extraccion_Maximo) (1)

Reglas difusas en el agente planta de Humo



Comportamiento de la IA en el Agente Humo

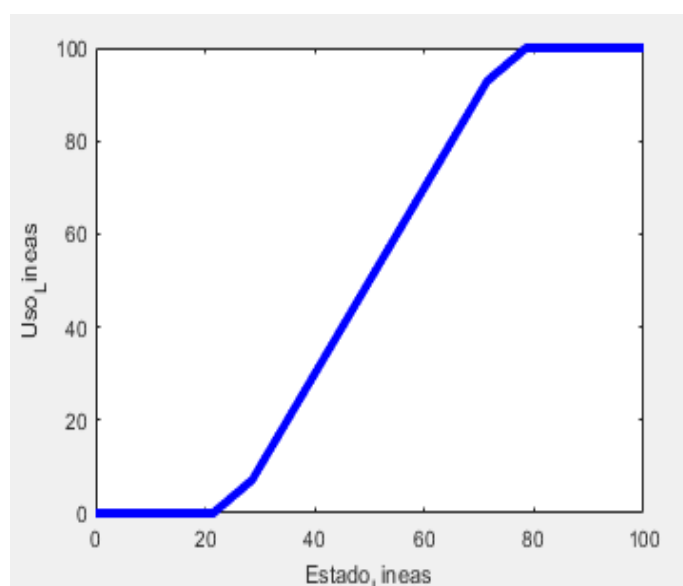
ANEXO 26 DESCRIPCIÓN DE LAS BASES DE CONOCIMIENTO DEL AGENTE INSTALACIÓN DE VACIADO CONTINUO



Bases de conocimiento del agente Instalación de Vaciado Continuo

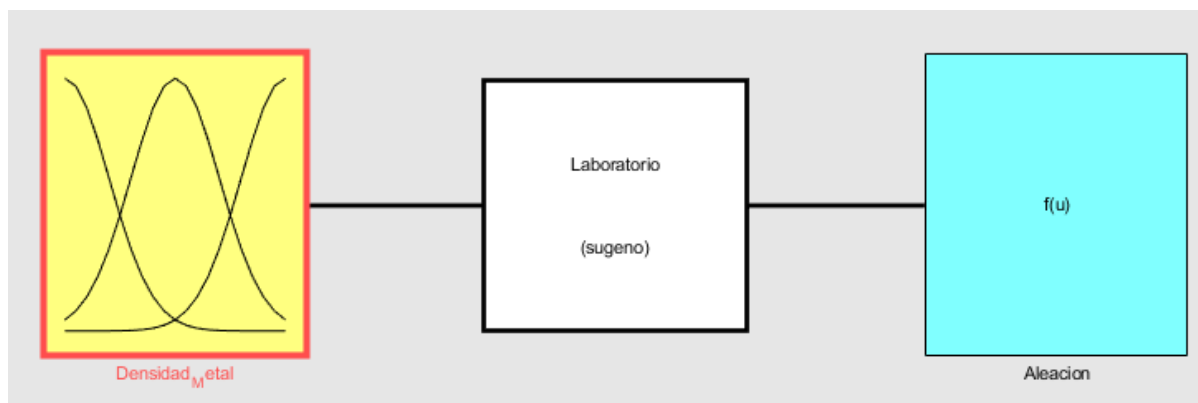
1. If (Estado_Lineas is Averiadadas) then (Uso_Lineas is No_Usar) (1)
2. If (Estado_Lineas is Una_Buena) then (Uso_Lineas is Usar_Una) (1)
3. If (Estado_Lineas is Dos_Buenas) then (Uso_Lineas is Usar_Dos) (1)

Reglas difusas de la IA en el Agente de Instalación de Vaciado Continuo



Comportamiento de la IA en el Agente Instalación de Vaciado Continuo

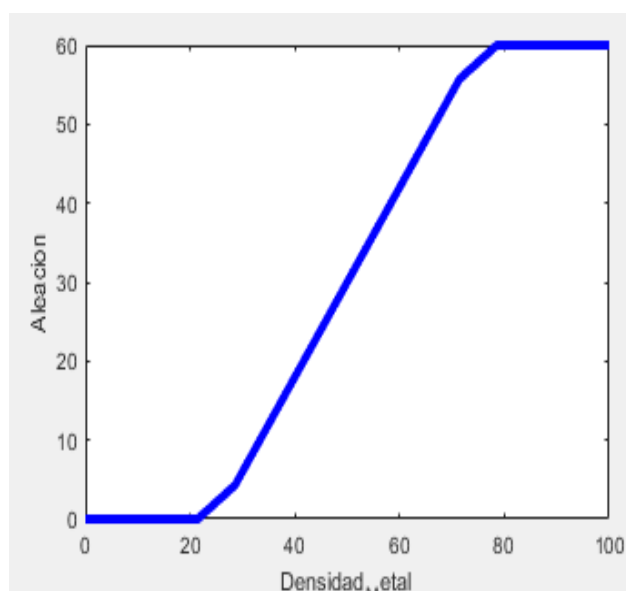
ANEXO 27 DESCRIPCIÓN DE LAS BASES DE CONOCIMIENTO DEL AGENTE LABORATORIO



Bases de conocimiento del agente Laboratorio

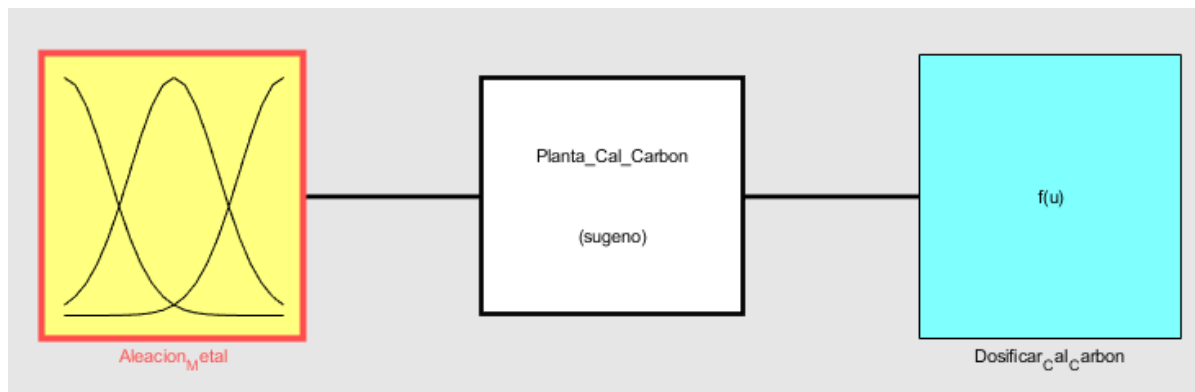
1. If (Densidad_Metal is Baja) then (Aleacion is Baja) (1)
2. If (Densidad_Metal is Media) then (Aleacion is Media) (1)
3. If (Densidad_Metal is Alta) then (Aleacion is Alta) (1)

Reglas difusas del Agente Laboratorio



Comportamiento de la IA en el Agente Laboratorio

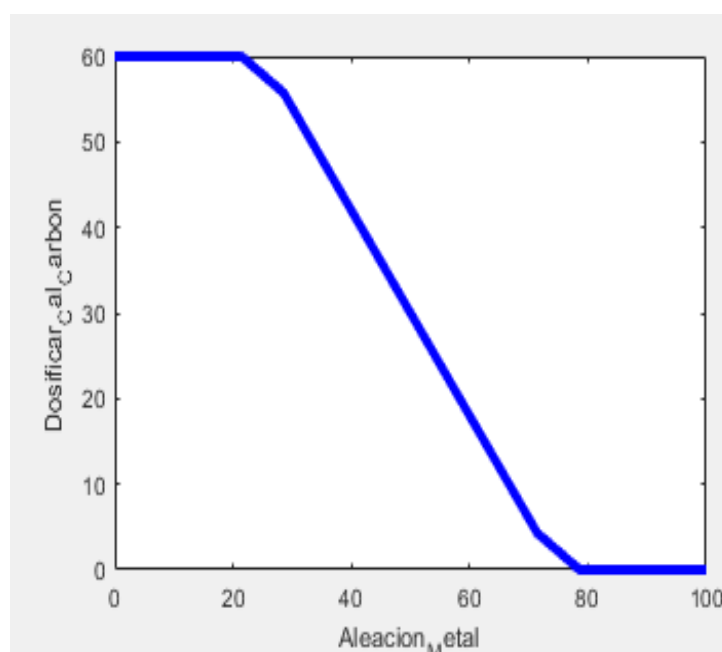
ANEXO 28 DESCRIPCIÓN DE LAS BASES DE CONOCIMIENTO DEL AGENTE PLANTA DE CARBÓN



Bases de conocimiento del agente Planta de Cal

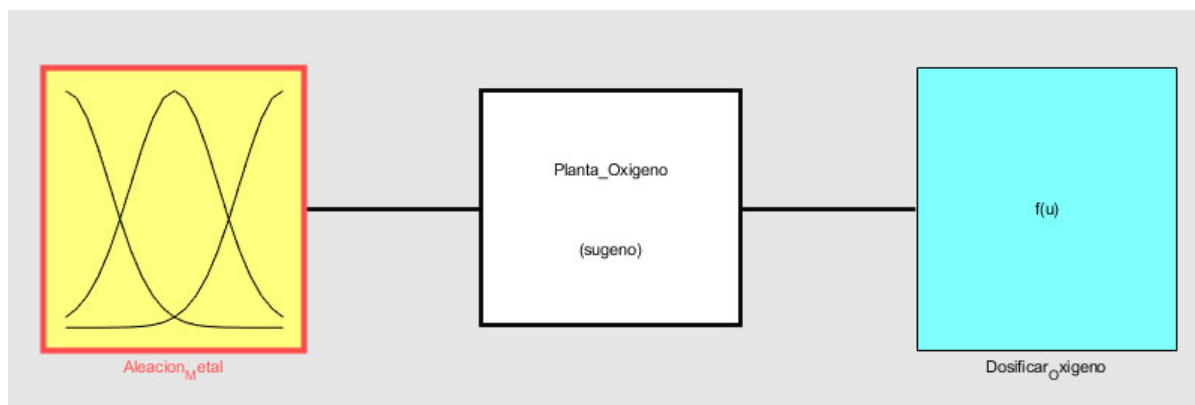
1. If ($Aleacion_{Metal}$ is Baja) then ($Dosificar_{Cal_Carbon}$ is Alta) (1)
2. If ($Aleacion_{Metal}$ is Media) then ($Dosificar_{Cal_Carbon}$ is Media) (1)
3. If ($Aleacion_{Metal}$ is Alta) then ($Dosificar_{Cal_Carbon}$ is Baja) (1)

Reglas difusas del Agente Planta de Cal y Carbón



Comportamiento de la IA en el Agente Planta de Cal y Carbón

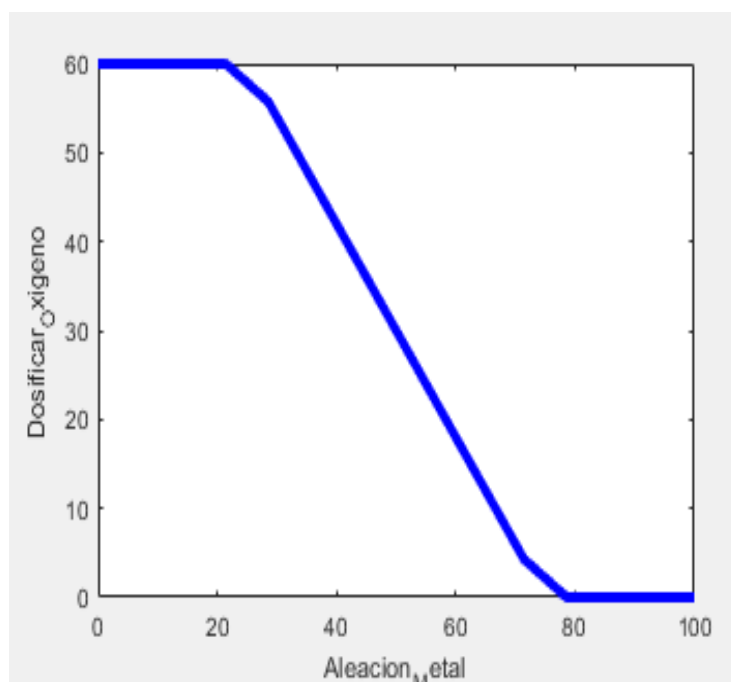
ANEXO 29 DESCRIPCIÓN DE LAS BASES DE CONOCIMIENTO DEL AGENTE PLANTA DE OXÍGENO



Bases de conocimiento del agente planta de Oxígeno

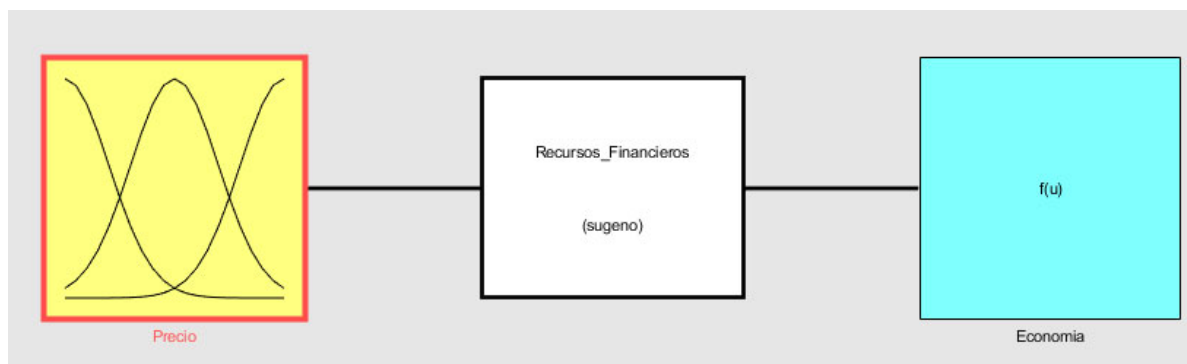
1. If (Aleacion_Metal is Baja) then (Dosificar_Oxigeno is Alta) (1)
2. If (Aleacion_Metal is Media) then (Dosificar_Oxigeno is Media) (1)
3. If (Aleacion_Metal is Alta) then (Dosificar_Oxigeno is Baja) (1)

Reglas difusas del Agente Planta de Oxígeno



Comportamiento de la IA en el Agente Planta Oxígeno

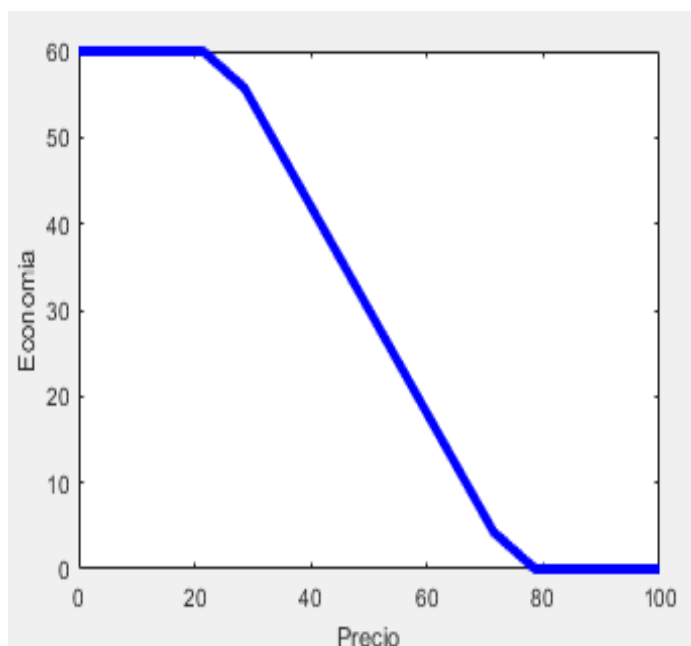
ANEXO 30 DESCRIPCIÓN DE LAS BASES DE CONOCIMIENTO DEL AGENTE RECURSOS FINANCIEROS



Bases de conocimiento del agente Recursos financieros

1. If (Precio is BajosPrecios) then (Economia is Economica) (1)
2. If (Precio is MedioPrecios) then (Economia is Media) (1)
3. If (Precio is AltosPrecios) then (Economia is Noeconomica) (1)

Reglas difusas del Agente Recursos financieros



Comportamiento de la IA en el Agente Recursos Financieros