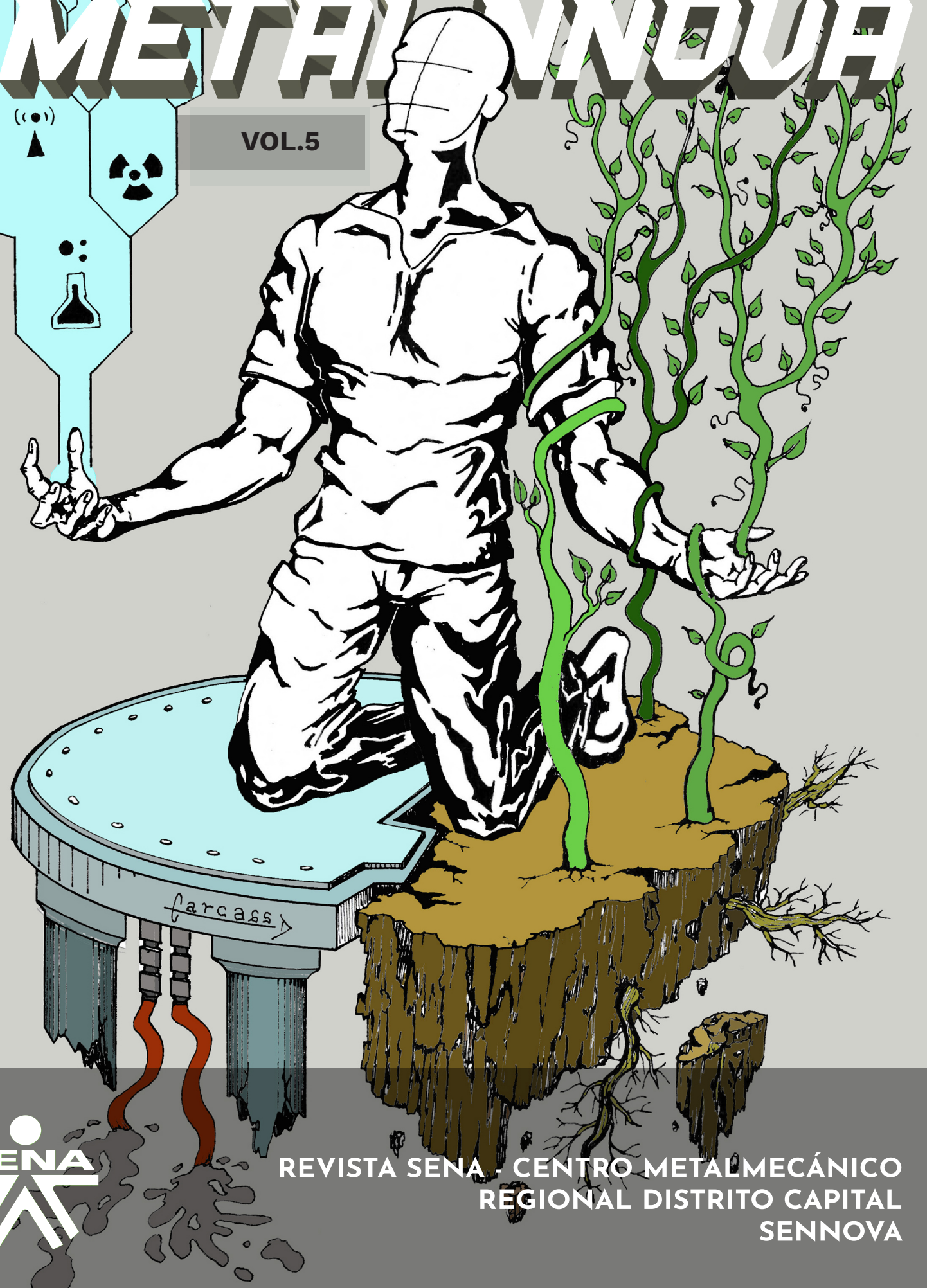


METAL VNOVA

VOL.5



REVISTA SENA - CENTRO METALMECÁNICO
REGIONAL DISTRITO CAPITAL
SENNOVA



Revista METALNNOVA

SENA

Centro Metalmecánico
Regional Distrito Capital

Director General del SENA
Jorge Eduardo Londoño Ulloa

Coordinación Mecanizado y Plásticos
Omar Henoc Parrado Garay

Director de Formación Dirección General
Wilfredo Grajales Rosas

Coordinación Mantenimiento
Joaquín Ruiz Díaz

Coordinador SENNOVA
Dirección General
Nancy Briceño Moreno

Comite Editorial Revista Metalnova

Gestor Editorial
Darwin Dubay Rodríguez Pinto

Subdirector Centro Metalmecánico
Manuel Antonio Montenegro Mier (E)

Diagramación
Luis Carlos Saavedra

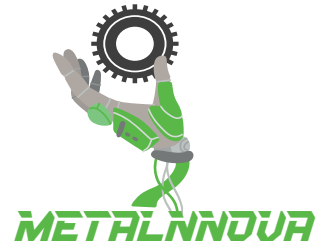
Coordinador Misional
Jose Giovanni Lozano

Revisión de Estilo
Marjorye Villabona Cárdenas

Coordinadora Administración
Educativa
Yenny Adriana Vargas Artunduaga

Portada y Caricatura
Carlos Alfonso Rodríguez Castillo

Coordinación Automatización y
Mecatrónica
Leonel Alberto Gómez Pérez



“De vez en cuando, una nueva tecnología, un antiguo problema y una gran idea se convierten en una innovación”.

Dean Kamen. Creador del Segway y el iBOT.



Contenido

Página

EDITORIAL METALNNOVA	4
ANÁLISIS OPERATIVO DE UN GASIFICADOR DOWNDRAFT DE RESIDUO MADERABLE	5
ROBÓTICA COLABORATIVA: UNA PROSPECTIVA SOBRE LA TRANSFORMACIÓN DE LAS ACTIVIDADES HUMANAS	10
SUPERVISIÓN EN LA NUBE DE VARIABLES ELÉCTRICAS DE SISTEMA FOTOVOLTAICO CON SISTEMA EMBEBIDO Y APLICACIÓN WEB	15
INFLUENCIA DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE TEMPLE Y TEMPLE-REVENIDO EN LA RESPUESTA MECÁNICA Y MICROESTRUCTURAL DE UN ACERO PARA APLICACIONES ESTRUCTURALES	23
REALIDAD AUMENTADA: IMPACTO Y TENDENCIAS EN LA FORMACIÓN PROFESIONAL DE SOLDADURA MULTIPROCESOS	29
OPTIMIZACIÓN DE LA MEZCLA ENTRE LDPE Y PLA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE EMPAQUES PLÁSTICOS DE UN SOLO USO	37
COMIC CONCIENCIA	42

Editorial Metalnova – Escrita por Inteligencia Artificial OpenAi. ChatGPT.

“Con el paso de los años, la inteligencia artificial y los modelos de redes neuronales han ido evolucionando y uno de los resultados es modelo ChatGPT. Este fue creado por OpenAI, OpenAI es una empresa de investigación en inteligencia artificial fundada en 2015 por un grupo de inversores, entre ellos Elon Musk y Sam Altman. El objetivo de OpenAI es promover y desarrollar la inteligencia artificial de manera ética y responsable, y GPT es uno de sus principales proyectos en el campo de la lingüística. A continuación, mostraremos fecha, orden enviada y resultado entregado por la inteligencia artificial con el fin de escribir la editorial de esta revista, para este proceso se realizó una depuración sobre 18 resultados de respuestas emitidas.”

Fecha 19/12/2022

Orden escrita – “Escriba una editorial de una revista científica del SENA acerca de gasificación, robótica colaborativa, sistemas fotovoltaicos, mecánica del acero, realidad aumentada en la soldadura industrial y empaques plásticos.”

Resultado final:

En la actualidad, el mundo de la tecnología y la ciencia avanzan a pasos agigantados, y en el SENA, como institución líder en la formación técnica y tecnológica en Colombia, estamos constantemente explorando y desarrollando soluciones innovadoras para mejorar la productividad y eficiencia en diferentes industrias.

En primer lugar, queremos destacar la gasificación, una tecnología que permite convertir materiales sólidos y líquidos en gas, lo que los hace más fáciles de transportar y procesar. Esta técnica tiene aplicaciones en la generación de energía, la producción de productos químicos y la síntesis de combustibles, entre otros. Además, la gasificación es una opción sostenible y limpia que puede reducir nuestra dependencia de los combustibles fósiles.

Otra tecnología que está revolucionando la industria es la robótica colaborativa, que permite a los robots trabajar de manera segura y eficiente junto a los humanos. Esta tecnología es especialmente útil en tareas que requieren precisión y rapidez, como el ensamblaje de piezas o la manipulación de materiales.

En el campo de la energía, los sistemas fotovoltaicos son cada vez más populares gracias a su capacidad de generar electricidad a partir de la luz solar. Estos sistemas son una opción sostenible y limpia para abastecer nuestras necesidades energéticas, y cada vez son más accesibles gracias a la bajada de precios y a las facilidades de financiación disponibles.

La mecánica del acero es otra disciplina clave en la industria, ya que permite diseñar y construir estructuras y equipos de alta resistencia y durabilidad. La mecánica del acero es esencial en la construcción de puentes, edificios, barcos y muchas otras estructuras.

La realidad aumentada en la soldadura industrial es una tecnología emergente que está transformando la forma en que se llevan a cabo estas tareas. La realidad aumentada permite a los soldadores visualizar información importante en tiempo real, como la ubicación exacta de los puntos de soldadura, lo que facilita el proceso y aumenta la precisión.

Por último, pero no menos importante, queremos destacar la importancia en la actualidad es el uso de empaques plásticos en la industria alimentaria y de productos de consumo masivo. Aunque estos empaques son cómodos y prácticos para el manejo y distribución de los productos, su impacto ambiental es una preocupación creciente.

En resumen, en el SENA estamos comprometidos con la innovación y el desarrollo de tecnologías sostenibles y eficientes que mejoren la productividad y la calidad de vida de las personas. Estamos seguros de que nuestras investigaciones y desarrollos en empaques plásticos, gasificación, robótica colaborativa, sistemas fotovoltaicos, mecánica del acero y realidad aumentada en la soldadura industrial tendrán un impacto positivo en la industria y en el mundo.

ANÁLISIS OPERATIVO DE UN GASIFICADOR DOWNDRAFT DE RESIDUO MADERABLE

Operational analysis of a downdraft gasifier for wood residues

MsC. Nairo J. Rodriguez B ¹

Erika M. Plazas M ²

narodriguezb@sena.edu.co

emplazas@sena.edu.co

¹ ORCID 0000-0001-8471-1579, Centro CIMM, Grupo GICAB -Regional Boyacá, Sogamoso, Colombia

² ORCID 0000-0002-4210-6159, Centro CIMM, Grupo GICAB -Regional Boyacá, Sogamoso, Colombia

Resumen: La gasificación es un proceso de oxidación de la biomasa a través de un proceso termoquímico el cual la descompone en un gas de síntesis (SYNGAS), este tiene unas propiedades térmicas que permiten su utilización como fuente de energía, específicamente su versatilidad da la opción de inyección a un motor de combustión para generación de energía eléctrica. El alcance del estudio está limitado a la operación de un gasificador downdraft de 30 kW con capacidad volumétrica de 0.5 m^3 aprovechando residuos maderables, el objetivo está orientado a identificar el punto óptimo de operación bajo la caracterización y correlación de variables (velocidad de entrada de aire y temperatura combustión en el reactor). En términos generales se busca identificar el punto óptimo de operación para definir protocolos operativos del gasificador pensando en el escalamiento de la tecnología al sector aserradero de la provincia del sugamuxi. De igual manera se analiza indicadores termoeconómicos que soportan la tecnología como alternativa energética para aplicación en procesos productivos.

Palabras Clave: Biomasa, escalamiento tecnológico, gasificación, Syngas, termoeconómico.

Abstract:

Gasification is a biomass oxidation process through a thermochemical process which decomposes it into a synthesis gas (SYNGAS), this has thermal properties that allow its use as an energy source, specifically its versatility gives the option of injection into a combustion engine to generate electrical energy. The scope of the study is limited to the operation of a 30 kW downdraft gasifier with a volumetric capacity of 0.5 m^3 taking advantage of wood residues, the objective is aimed at identifying the optimum point of operation under the characterization and correlation of variables (Speed of air inlet and combustion temperature in the reactor). In general terms, the aim is to identify the optimal point of operation to define operational protocols for the gasifier, considering the scaling of the technology to the sawmill sector of the province of Sugamuxi. In the same way, thermoeconomic indicators that support technology as an energy alternative for application in production processes are analyzed.

Keywords: Biomass, technological scaling, gasification, Syngas, thermoeconomics.

aplica calor, oxígeno y presión para convertirlas en un gas de síntesis a través de un gasificador que esencialmente es un reactor termoquímico donde tienen lugar varios procesos físicos y químicos complejos [1]. Actualmente existen diferentes tipos de gasificadores Lecho fijo, lecho fluidizado, flujo volante, baño férreo. Específicamente el gasificador downdraft esta caracterizado como un gasificador de lecho fijo, son de uso común para la generación de bajas potencias eléctricas ($< 500 \text{ kWe}$) debido a que producen un gas pobre más limpio (menor cantidad de alquitranes), aspecto que facilita el proceso de acondicionamiento y limpieza previa a su uso en motores de combustión interna [2]. Una de las ventajas de la tecnología de gasificación es que optimiza el aprovechamiento energético de la biomasa, permitiendo implementarla en el mismo lugar en el que se genera los residuos maderables, disminuyendo los costos de almacenamiento y transporte [3].

A pesar de que en el mundo se ha desarrollado la tecnología de gasificación de lecho fijo de co-corriente a nivel comercial, en la bibliografía publicada hay información limitada en cuanto al diseño óptimo de los sistemas auxiliares de los gasificadores, que permita desarrollar sistemas de aprovechamiento energético de biomasa más eficientes. En [4] se presenta el diseño de un equipo de gasificación que inició con la caracterización de los residuos de cosecha de caña, teniendo en cuenta las propiedades físicas y modelos cinéticos. Posteriormente definieron parámetros de operación necesarios para el diseño del reactor, diseño del sistema de alimentación de biomasa y de aire, sistema de extracción de cenizas, sistema de extracción de gases y el control operativo.

Actualmente se vienen trabajando en el aprovechamiento de diferentes residuos orgánicos, en [5] se presentan los estudios paramétricos sobre la gasificación de la tusa: relación de equivalencia, producción específica de gas y rendimiento en frío del gasificador. Los resultados muestran que en los gasificadores de lecho fijo la composición del gas producto de la gasificación de la tusa con aire presenta los siguientes valores CO (9.42-27.00% vol.), H_2 (4.50-20.00% vol.), CH_4 (1.54-2.80% vol.), CO_2 (7.40-17.99% vol.), N_2 (50.00-65.85% vol.), O_2 (0.00-1.61% vol.), hidrocarburos leves

I. INTRODUCCIÓN

La gasificación es una tecnología de conversión de residuos en energía. Toma materias primas de desecho y

(1.54-2.80% vol.), CO₂ (7.40-17.99% vol.), N₂ (50.00-65.85% vol.), O₂ (0.00-1.61% vol.), hidrocarburos leves (0.050,39% vol.), el poder calorífico del gas entre 4-6 MJ / Nm³ y el rendimiento en frío de los gasificadores entre 60-70%, [5].

En otros estudios se analizan los efectos de la tasa de flujo de aire y el contenido de humedad en la tasa de consumo de biomasa y la calidad del gas productor generado. El rendimiento del sistema de gasificación de biomasa se evalúa en términos de relación de equivalencia, composición del gas productor, su valor calorífico, tasa de producción y temperaturas de zona y eficiencia del gas frío [6].

El modelado como herramienta de análisis permite simular el proceso de producción de un syngas. Considerando las etapas de pretratamiento y acondicionamiento de la biomasa (secado, torrefacción y molienda), gasificación en lecho arrastrado, limpieza y acondicionamiento del syngas producido, y ajuste de la relación H₂/CO, adicionalmente se modela la Unidad de Separación de Aire (ASU) para la producción de oxígeno como agente gasificante, a la vez concluyeron que el modelo desarrollado, es una herramienta computacional útil para realizar análisis de sensibilidad en procesos de producción de biocombustibles líquidos y/o productos químicos a partir de gasificación de biomasa en lecho arrastrado [7].

El modelamiento matemático también ha permitido definir un estudio detallado de variables basado en parámetros de entrada típicos en la gasificación como el análisis elemental de la biomasa, la humedad, la relación de equivalencia y que adicionalmente incorpora la relación de reacción con aire [8]. Además, se plantearon balances de masa y energía, ecuaciones de equilibrio para predecir la composición de salida de los gases, temperatura y poder calorífico del gas producido. Todo esto para un gasificador de lecho fijo equicorriente "Downdraft", considerado en estado estacionario. Los resultados fueron comparados con datos experimentales de gasificadores reportados en la literatura y arrojaron resultados aceptables.

El aprovechamiento de diferentes residuos maderables ha llevado al desarrollo de gasificadores que funcionen con aserrín. Es el caso de un trabajo que trata de la simulación computacional de un gasificador de residuos de madera de aserrín utilizando un sistema de equilibrio basado en la minimización de la energía libre de Gibbs. El gasificador ha sido probado con aserrín de *Pinus Elliotis*, una especie exótica ampliamente cultivada en el sur de Brasil. La biomasa utilizada en las pruebas presentaba una humedad cercana al 10% (wt% en base húmeda), y los resultados de la composición media del gas producido (sin alquitrán) son comparados con los estados de equilibrio utilizados. Se elaboraron modelos más complejos para reproducir con mayor precisión el gasificador estudiado. Aunque estos no representan muy bien las reacciones que se producen a temperaturas relativamente altas (800 °C), [9]. El modelado puede ser útil para mostrar algunas tendencias en las variaciones de los parámetros de trabajo de un gasificador [9].

La planta de gasificación en estudio consta de un

gasificador de 1,5 m de altura y 0,35 m de diámetro interior, sistema de filtrado y acondicionamiento del gas pobre, más un ventilador con un motor de 280 w. Las características operativas del gasificador, capacidad de carga del reactor y velocidad de entrada de aire definen el análisis de variables que se presenta en el desarrollo experimental.

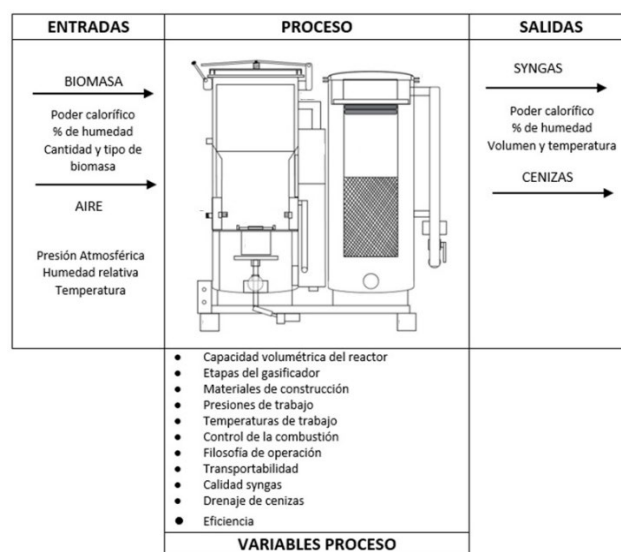
II. DESARROLLO EXPERIMENTAL

La planta de gasificación descrita anteriormente se analizó bajo un diseño experimental de variables unifactorial que permitió correlacionar un factor de control con tres niveles y una variable de respuesta.

A. Identificación de variables

La identificación de las variables se ajustó según la condición de diseño y fabricación del gasificador downdraft fig. 1. Teniendo presente todas las variables de entrada de proceso y salidas que intervienen en el gasificador.

Figura 1. Identificación de variables de un gasificador Downdraft.



Fuente Autores

Para definir las variables de control dentro del análisis experimental unifactorial, se caracterizaron y bloquearon las siguientes variables:

B. Variables de entrada

Se realizó una caracterización de la biomasa, las Condiciones Ambientales, la Entrada de aire y la Temperatura de combustión, en las cuales se introdujeron cambios deliberados en las variables de entrada que forman el proceso, de manera que fuera posible identificar las causas de los cambios en la variable de respuesta.

Tipo de biomasa: El proceso de gasificación se realizó con residuo maderable de pino y eucalipto con porcentajes de humedad entre el 10% y 15%, capacidad de carga del reactor de combustión de 10kg, foto 1.

Foto 1. Delimitación de peso por carga para el reactor



Fuente Autores

Las condiciones dimensionales de la biomasa se realizaron ajustado a recomendaciones bibliográficas promedio de 10 cm, la caracterización dimensional se realizó bajo un muestreo estratificado, foto 2.

Foto 2. Caracterización Dimensional del residuo Maderable



Fuente autores

Condiciones Ambientales: Las pruebas se realizaron en el SENA Centro Industrial de Mantenimiento y Manufactura de Sogamoso, el cual se encuentra ubicado a 2569 msnm, las condiciones de pruebas se realizaron en condiciones ambientales de tiempo seco, pero en temporada de lluvia con humedades relativas del 50 % y temperatura ambiental promedio de 18°C.

Entrada de aire: La entrada del aire es una variable sensible para la operación del gasificador, ya que de esta variable depende la condición de degradación de la biomasa en la zona de pirolisis, el control de la entrada del aire se definió según la capacidad de tiro del soplador y la regulación de apertura de la válvula de bola. En la tabla 1 se muestra la parametrización entre apertura de válvula y velocidad de entrada del aire.

Tabla 1. Correlación entre apertura de válvula y velocidad de entrada

Apertura de válvula %	Velocidad entrada del aire m/s
100	6
80	5
60	4

Fuente autores

Temperatura de combustión: La temperatura en el reactor depende directamente de la cantidad de aire que se inyecte en

el proceso de combustión, se planteó la hipótesis: A menor cantidad de aire suministrado en la zona de pirolisis, la temperatura debe decaer. Por lo tanto, el objetivo del estudio se centró en identificar el punto óptimo de suministro de aire en la zona de pirolisis que permita un proceso de gasificación óptimo. El registro de la temperatura se realizó con una termocupla tipo k con capacidad máxima de registro de 1300 °C y se visualizó en un controlador de temperatura foto 3.

Foto 3. Sistema de registro de temperatura en reactor



Fuente autores

Teniendo en cuenta las variables analizadas y el objetivo del estudio, se determinó que la variable de entrada estaría ajustada por la velocidad de aire suministrado al gasificador y como respuesta la temperatura de registro en la cámara de combustión.

C. Diseño experimental

En la tabla 2 se resumen el diseño experimental, definiendo tres niveles para la variable de entrada (Velocidad de entrada del aire) y 6 observaciones en la variable de respuesta por nivel (Temperatura de combustión °C), lo que define un total de 18 observaciones.

Tabla 2. Diseño experimental Unifactorial

N	V	R	Temperatura de combustión °C					
OBSERVACIONES								
1	6	Y ₁	Y ₁₁	Y ₁₂	Y ₁₃	Y ₁₄	Y ₁₅	Y ₁₆
2	5	Y ₂	Y ₂₁	Y ₂₂	Y ₂₃	Y ₂₄	Y ₂₅	Y ₂₆
3	4	Y ₃	Y ₃₁	Y ₃₂	Y ₃₃	Y ₃₄	Y ₃₅	Y ₃₆

N: Niveles

V: Velocidad entrada aire m/s

R: Respuesta

Fuente autores

El problema mostrado en la tabla 1 está ajustado por un diseño experimental Unifactorial

$$y_{ij} = \mu_i + \varepsilon_{ij}$$

Donde

$$y_{ij} = \text{Variable de respuesta}$$

μ_i = el valor medio de las observacion

ε_{ij} = Error aleatorio en las observaciones

Se plantearon dos hipótesis (Nula o Alterna)

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_a$$

$$H_1 = \mu_i \neq \mu_j \text{ (para al menos un par)}$$

y esto es equivalente a

$$H_0 = \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a$$

$$H_1 = \tau_i \neq 0 \quad \exists_i$$

Para determinar si cualquiera de las diferencias entre las medias es estadísticamente significativa, se comparó el valor p con el nivel de significancia con el fin de evaluar la hipótesis nula. El nivel de significancia se definió en 0.05 indicando un riesgo de 5% de concluir que existe una diferencia cuando no hay una diferencia real.

III. RESULTADOS

Los datos registrados en las pruebas del gasificador se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Resultados pruebas experimentales

Tabla 3: Resultados previos experimentales							
N	V	R	Temperatura de combustión °C				
OBSERVACIONES							
1	6	Y_1	998	1010	1040	1005	1060
2	5	Y_2	950	970	985	990	945
3	4	Y_3	970	950	945	960	930

N : Niveles
 V : Velocidad entrada aire m/s
 R : Respuesta

N: Niveles

V: Velocidad entrada aire m/s

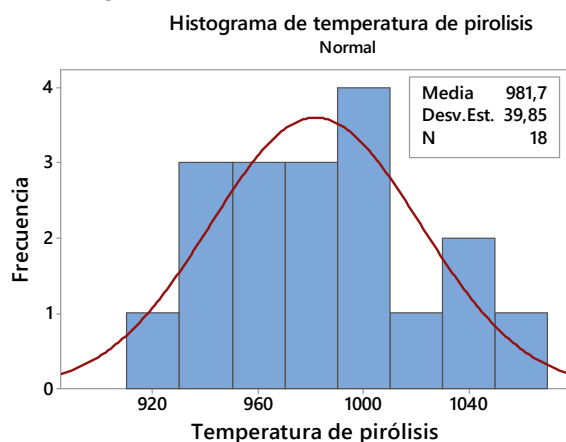
R: Respuesta

Fuente Autores

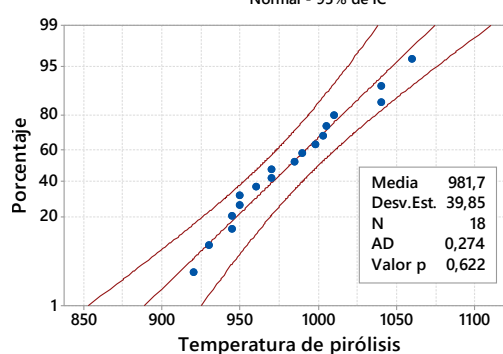
A. Los análisis de normalidad

Los datos de las observaciones (temperatura de combustión °C) registrados en la tabla 3 se analizan bajo pruebas paramétricas de contraste de hipótesis con el fin de identificar que sigan una distribución normal y así poder diferir la distribución de los datos observados respecto a lo esperado si procediesen de una distribución normal con la misma media y desviación típica. En la figura 2 se puede observar que la tendencia de los datos se ajusta a una distribución normal, se toma como referencia el valor del dato AD (Anderson Darling) el cual es mayor al valor de significancia $\alpha=0.05$, en este caso $AD=0.274$, la correlación de los valores anteriores permite confirmar la normalidad de los datos.

Figura 2. Análisis de normalidad de datos



Gráfica de probabilidad de temperatura de pirolisis



Fuente autores

B. Análisis de Varianza (ANOVA) unidireccional: temperatura de pirolisis vs. velocidad de entrada

Con la certeza que los datos recolectados siguen una tendencia de normalidad se procedió a realizar un análisis de varianza Anova bajo los siguientes parámetros

Hipótesis nula: Todas las medias son iguales

Hipótesis alterna: Por lo menos una media es diferente

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Se verificó mediante la prueba de Levene la igualdad de varianzas, condición estadística necesaria para el análisis de varianza ANOVA.

En la tabla 4. Se muestran los resultados del análisis Anova de los datos registrados en la experimentación.

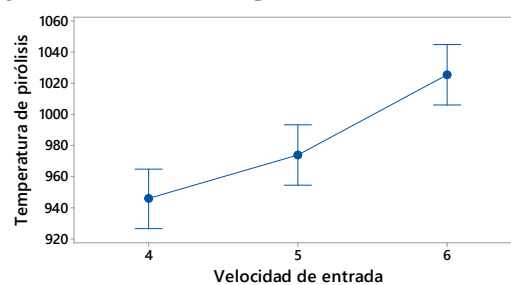
Tabla 4. Análisis de Varianza (Anova)

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor P
Velocidad de entrada	2	19600	9800,2	19,87	0,000
Error	15	7399	493,2		
Total	17	27000			

Fuente Autores

El P-valor es inferior al valor de significancia $\alpha = 0.05$, esto permite rechazar la hipótesis nula, lo cual deja ver que la velocidad de entrada de aire tiene un efecto en el nivel de temperatura de la cámara de combustión, específicamente en el rango de velocidades, analizando el comportamiento de la temperatura es lineal a medida que aumenta la velocidad la temperatura promedio.

Figura 3. Intervalos de temperatura de Combustión



Fuente autores

IV. INDICADORES TERMOECONÓMICOS

En el monitoreo del gasificador y bajo las condiciones mecánicas se caracterizaron los caudales de salida del SYNGAS, el peso de residuo maderables, los caudales de entrada de aire y salida de syngas y tiempo de gasificación, el valor del poder calorífico se ajustó según [5], los precios de los residuos maderables se define según los valores de venta en la provincia del sugamuxi por kilogramo para el año 2022 y el valor de la energía eléctrica se calculó por el histórico promedio de valor del kWh para sector no residencial según datos extraídos de la empresa de energía de Boyacá EBSA, todos los datos anteriores se registran en la tabla 5. Lo anterior sirvió para identificar indicadores económicos y de rendimiento del gasificador.

Tabla 5. Condiciones Operativas

Condiciones	Valor	Unidad
Tiempo de gasificación por carga	4800	Seg
Peso total de la carga gasificador	9	kg
Caudal de Salida	0.009	M3/s
Poder Calorífico syngas	5	MJ/M3
Precio \$ de kg de residuo Maderable a 2022	160	\$/kg
Precio de la energía eléctrica a 2022	620	\$/MWh

Fuente autores

Bajo una correlación de las condiciones anteriores se determinó los siguientes indicadores termoeconómicos tabla 6, teniendo como base el histórico del precio promedio comercial de kWh en Boyacá para el año 2022 para el sector no comercial emitido por la empresa de energía de Boyacá EBSA, se calculó el valor promedio del kWh en \$620.

Tabla 6. Indicadores termoeconomicos

Indicador	Valor	Unidad
Potencia	43,75	kW
Energía	58,33	kWh
Potencial energía eléctrica	10,5	kWh
Producción	6510	\$/h
índice de producción	4,5	--

Fuente autores

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo fue posible realizar un análisis de un gasificador Downdraft. A partir de un análisis estadístico se corroboró que la variable de entrada de aire incrementa la temperatura de la cámara de combustión.

La optimización del proceso de gasificación para las características del gasificador Downdraft donde se realizaron las pruebas y bajo la correlación de variables en estudio, se identificó como parámetros óptimos de trabajo, el ajuste de la velocidad de entrada del aire a 4 m/s, variable que logró una respuesta en la temperatura de combustión promedio de 945°C, estableciendo unas condiciones satisfactorias para la producción de SYNGAS.

Las fluctuaciones de temperatura del gasificador pueden estar sujetas a las condiciones ambientales y a la característica mecánica de inyección de aire, en ciertos momentos se pudo

presentar ingresos de aire superiores, debido a corrientes de viento presentes en el ambiente, las cuales no fueron registradas en el estudio.

El diseño experimental correlacionó dos variables para identificación de punto óptimo de operación, sin embargo, el estudio se puede ampliar incluyendo un análisis elemental de la calidad del SYNGAS con el objetivo de identificar que influencia tiene la temperatura de combustión, en el poder calorífico del SYNGAS.

Bajo los parámetros de consumo de aire por tiempo de operación, se logró determinar la relación de consumo de leña por producción de potencia y energía del gasificador, identificando un índice de ganancia 1 a 4.5, lo anterior se entiende que por cada peso invertido en el proceso de gasificación se producen 4.5 pesos en energía eléctrica.

El potencial energético del syngas se define con mayor optimización en procesos de aprovechamiento de calor, donde se realiza la combustión directa del syngas a la salida del gasificador.

REFERENCIAS

- [1] J. C. Bandara, R. Jaiswal, H. K. Nielsen, B. M. E. Moldestad, Y. M. S. Eikeland, «Air Gasification Of Wood Chips, Wood Pellets And Grass Pellets In A Bubbling Fluidized Bed Reactor», *Energy*, Vol. 233, P. 121149, Oct. 2021, Doi: 10.1016/J.Energy.2021.121149.
- [2] B. Prabiur, «Combustion And Gasification In Fluidized Beds», 2006.
- [3] M. Aristizábal Y L. Valencia, «Diseño Conceptual De Un Gasificador Para La Producción De Gas De Síntesis A Partir De Residuos De Poda Generados En La Universidad Eafit», P. 76, 2015.
- [4] E. F. O. Ceron, «Diseño Y Construcción De Un Microgasificador Para Residuos De Cosecha De La Caña De Azúcar», P. 101, 2015.
- [5] J. Martillo, R. Lesme, A. Martínez, L. Oliva, Y L. Orozco, «Estudios Paramétricos De La Gasificación De La Tusa De Maíz .Pdf». Redalyc, 2019.
- [6] P. N. Sheth Y B. V. Babu, «Experimental Studies On Producer Gas Generation From Wood Waste In A Downdraft Biomass Gasifier», *Bioresour. Technol.*, Vol. 100, N.O 12, Pp. 3127-3133, Jun. 2009, Doi: 10.1016/J.Biortech.2009.01.024.
- [7] Universidad De Antioquia. Medellín, Colombia, L. Suárez-Hernández, J. F. Pérez Bayer, Universidad De Antioquia. Medellín, Colombia, R. Barrera Zapata, Y Universidad De Antioquia. Medellín, Colombia, «Gasificación De Madera Para La Obtención De Un Syngas Útil En La Producción De Biocombustibles Y/O Productos Químicos», *Rev. Ion*, Vol. 30, N.O 1, Pp. 57-71, Jul. 2017, Doi: 10.18273/Revion.V30n1-2017005.
- [8] A. Felipe Y R. Restrepo, «Modelación Matemática Simple (0-D) De Un Gasificador De Biomasa De Tipo Lecho Fijo Co-Corriente, "Downdraft"», P. 78, 2016.
- [9] C. R. Altafini, P. R. Wander, Y R. M. Barreto,

ROBÓTICA COLABORATIVA: UNA PROSPECTIVA SOBRE LA TRANSFORMACIÓN DE LAS ACTIVIDADES HUMANAS

Vargas-Yara, G. , Jorge A. Calderón 

SENA Centro Metalmecánico - Regional Distrito Capital -I Grupo GICEMET
gvargas@sena.edu.co

Resumen—Esta es una exploración bibliométrica que da a conocer la relevancia de la robótica colaborativa en los procesos industriales. Abarca la conexión entre desarrollos afines como la háptica y señala las posibles tendencias tecnológicas que pueden darse al tener en consideración que la interacción humano-máquina presenta un paradigma que evoluciona con el tiempo. Adicionalmente, tiene la intención de servir a otros investigadores como un documento que les permita generar un plan de acción acorde a los cambios planteados por la transformación de las ocupaciones humanas dictada por la cuarta revolución industrial (Industria 4.0), teniendo en cuenta una gran variedad de producción científica comparada y clasificada en este trabajo. Esto con el fin de dar un punto de apoyo a la comprensión de la inmersión en la centralización de las actividades industriales y económicas en el ser humano, junto con su trabajo cooperativo y sinérgico con las máquinas.

Palabras Clave: Robótica, Robótica Colaborativa, Mapas Bibliométricos, Interacción Humano-Robot, Cobots.

I. INTRODUCCIÓN

A escala industrial los desarrollos robóticos han permitido la automatización de procesos que requieren la operación y conversión de materias primas en grandes volúmenes y cantidades de productos y servicios. Sin embargo, las constantes exigencias sobre la transformación de los procesos de manufactura dadas por la revolución industrial de cuarta generación (*Industria 4.0*) han establecido en la concepción de *las fábricas inteligentes* la semilla de la cual surgirán las nuevas formas de concebir las actividades económicas, que desencadenarán los fenómenos sociales que caracterizan una revolución industrial [1].

En este sentido, conformar una cooperación entre las máquinas y el ser humano resulta ser crucial para la mejora de los procesos de manufactura, ya que, representan un nuevo paradigma en el establecimiento de la ejecución y realización de las tareas dentro de las denominadas fábricas inteligentes [1]. En el caso de la robótica tradicional, los robots se encuentran en sitios aislados y controlados con altos estándares tecnológicos que vigilan la actividad independiente de los robots respecto a la inspección y supervisión del operario. En la esencia de las fábricas inteligentes se requiere que tanto humanos como robots sean capaces de cooperar entre sí al llevar a cabo una tarea en común y se tiene como proyección instaurar una interacción novedosa a partir de la reproducción del sentido del tacto, permitiendo una transferencia de conocimiento más detallada que no sature

los canales convencionales de comunicación con los robots como el oído y la vista [1], [2].

No obstante, las transformaciones industriales siempre han sido fuente de cierta resistencia a los cambios por parte de la sociedad, provocando la extinción de algunas ocupaciones y la aparición de nuevas actividades laborales. De igual manera, los efectos de la inteligencia artificial y la robótica en el mercado laboral han representado una preocupación social constante. Los expertos en tecnología y economistas se han estado cuestionando la rapidez y en qué medida los desarrollos tecnológicos podrían comenzar a reemplazar al ser humano en las ocupaciones y qué tipo de acciones se deben tomar para mitigar el desempleo que resultaría. Por tanto, tener presente qué grado de automatización tienen las ocupaciones permite tomar acciones que puedan orientar a los trabajadores sobre lo que se debe hacer para migrar a oficios que tengan un menor riesgo de automatización [3].

Aquí se presenta una exploración de los documentos relativos a la robótica colaborativa, junto con un análisis bibliométrico a partir de la consulta en bases de datos y la elaboración de mapas bibliométricos que presentan las temáticas emergentes y la relevancia sobre tópicos como, inteligencia artificial, háptica y sistemas humano-máquina, entre otros.

II. ANÁLISIS DE MAPAS BIBLIOMÉTRICOS

A partir de la consulta de información de artículos científicos en la base de datos bibliográfica Scopus, se hizo un ejercicio de vigilancia tecnológica para identificar temáticas asociadas, así como, nuevos desarrollos en torno a los temas de robótica colaborativa e interacción humano-robot. En este sentido, se observa que las investigaciones en torno a dichas áreas son prácticamente nulas antes del año 2000 y registra escasas publicaciones en los primeros años del siglo XXI; en los años siguientes se presenta un mayor interés con un moderado incremento en la segunda década y un incremento sustancial a partir de 2018 hasta llegar a 235 publicaciones en 2021, evidenciando el creciente interés por estas tecnologías.

En efecto, en la Fig. 1 se observa que la producción académica en torno a la temática objeto de análisis empieza a registrarse en 1998, con un moderado crecimiento en la primera década del siglo XXI y un significativo incremento

sustancial a partir de 2018 hasta llegar a 235 publicaciones en 2021, evidenciando el creciente interés por estas tecnologías.

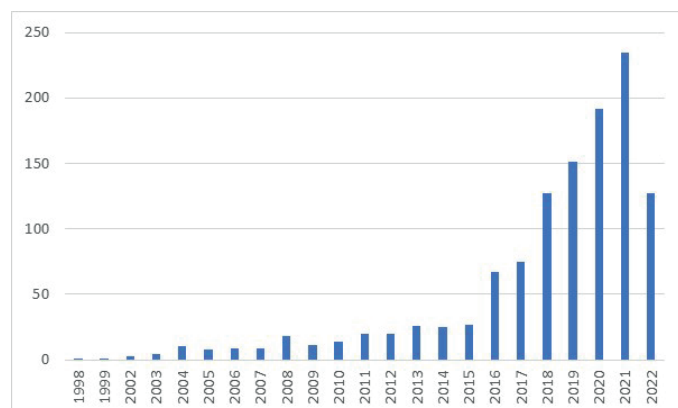


Fig. 1. Publicaciones científicas asociadas a robótica colaborativa e interacción humano – robot 1998-2022. Fuente: Scopus - Cálculos propios.

En efecto, en la Fig. 1 se observa que la producción académica en torno a la temática objeto de análisis empieza a registrarse en 1998, con un moderado crecimiento en la primera década del siglo XXI y un significativo incremento a partir de 2016.

De esta manera, según la afiliación de los autores de las publicaciones, las instituciones más representativas son Politécnico de Milano (Italia) Centro Nacional de investigación (Francia), Consejo Nacional de Investigación (Italia), Instituto Italiano de Tecnología (Italia) e Instituto Real de Tecnología (Suecia) entre otros. Respecto al país o territorio de las publicaciones, el mayor número se realizó en Estado Unidos (288), Italia (190), Alemania (151), China (89), Francia (87), Reino Unido (87) y España (51) como puede observarse en la Fig. 2.

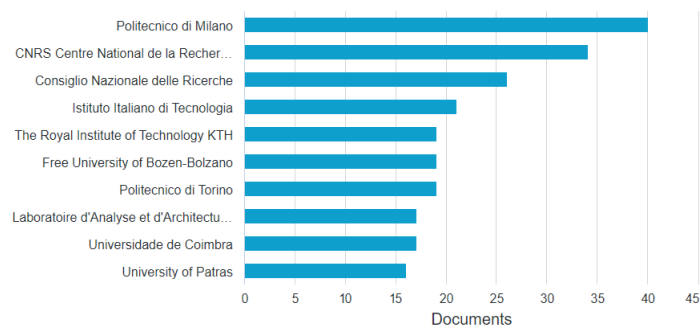


Fig. 2. Publicaciones por afiliación asociadas a robótica colaborativa e interacción humano – robot 1998-2022. Fuente: Scopus

Adicionalmente, es posible destacar las áreas de conocimiento que pueden ser impactadas por los desarrollos presentes en la exploración de la interacción humano-Robot y particularmente, en robótica colaborativa como se ilustra en la Fig. 3

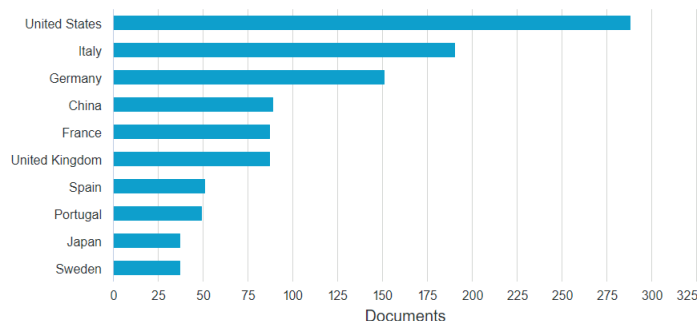


Fig. 3. Publicaciones por país o territorio asociadas a robótica colaborativa e interacción humano – robot 1998-2022. Fuente: Scopus

Respecto a áreas de conocimiento, se encuentra que a pesar de que las publicaciones se concentran en ciencias de la computación e ingeniería, hay otros desarrollos tales como matemáticas, ciencias sociales, física y astronomía, ciencias de materiales, medicina, bioquímica, genética y biología molecular, entre otros.

Se llevó a cabo un análisis a partir de la representación gráfica de mapas bibliométricos, el cual parte de la correlación de palabras clave de las publicaciones objeto de estudio, procesadas en el programa informático VOSviewer [4], el cual cuenta con funciones gráficas de acercamiento, desplazamiento y búsqueda que facilitan el examen detallado de los mapas. A partir de este procesamiento, se observa que hay temáticas que podrían considerarse emergentes, teniendo en cuenta que el mayor número de publicaciones se da en los últimos siete años, como se observa en el mapa construido a partir de redes de datos (Fig. 4).

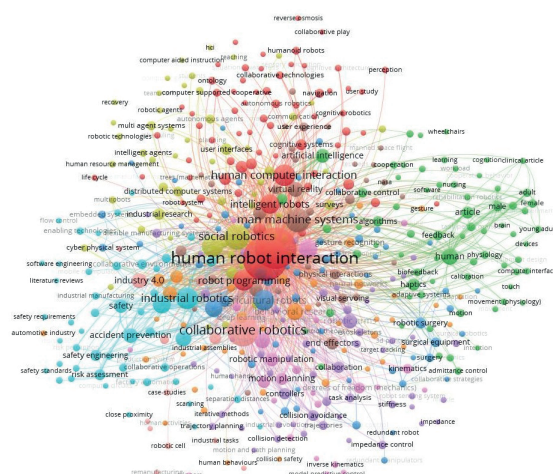


Fig. 4. Análisis de redes en publicaciones asociadas a robótica colaborativa e interacción humano – robot 1998-2022. Fuente: Scopus usando software VOSviewer.

A partir del mapa general se pueden identificar otras redes con correlaciones más cercanas, que en el presente documen-

A partir del mapa general se pueden identificar otras redes con correlaciones más cercanas, que en el presente documento son definidas como clústeres, los más representativos se muestran en el Fig. 5.

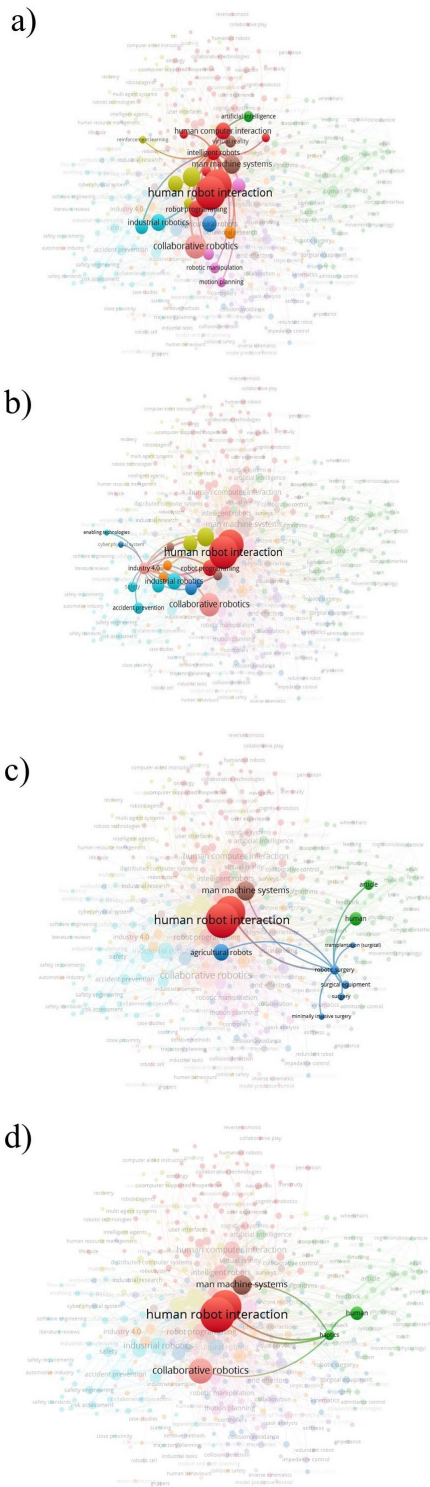


Fig. 5. Análisis de correlación de palabras clave asociadas a robótica colaborativa e interacción humano – robot 1998-2022. Fuente: Scopus usando software VOSviewer.

En la Fig. 5a) se encuentran tópicos asociados tales como inteligencia artificial, realidad virtual, robótica industrial, programación robótica, robótica social y movimiento. En la Fig. 5b) se relacionan temas de industria 4.0, prevención de accidentes y tecnologías habilitantes, entre otros. Además, en la Fig. 5c) se observan términos tales como cirugía robótica, cirugía de trasplante, cirugía mínimamente invasiva y agricultura robótica, particularmente. Por último, en la Fig. 5d) contiene temas tales como háptica, ser humano y sistemas hombre – máquina.

Se observa que, para el caso de los dos primeros clústeres, en su mayoría son temas que se han desarrollado en las últimas décadas, sin embargo, los últimos dos grupos son de desarrollo más reciente por lo que podrían considerarse tecnologías emergentes. Tal es el caso del tema háptica, con perspectiva de mayores desarrollos, toda vez que la mayor concentración de publicaciones asociadas se da en los años 2020, 2021 y 2022.

III. ALGUNAS REFLEXIONES SOBRE DESARROLLOS ASOCIADOS

Generalmente el término háptica hace relación al estudio del tacto, en aspectos tales como su comportamiento y sensaciones, así como la información que transmite y recibe al ser humano y a su entorno; dicha comunicación puede enviar una amplia variedad de intenciones de dirección, velocidad, así como emociones o estados psicológicos. En el contexto de la interacción humano – robot se observa una tendencia a combinar la inteligencia y adaptabilidad de los humanos con la precisión y potencial confiabilidad de los robots [6].

En la Fig. 5a) y Fig. 5b) se observa que los campos de aplicación alrededor de esta temática presentan un importante número de trabajos en torno a aplicaciones robóticas para la industria [7]–[17] así como en medicina, salud y apoyo a actividades humanas [18]–[22].

Por otra parte, en la Fig. 5c) y Fig. 5d), un segundo grupo de publicaciones se concentra en la realización de pruebas, creación de dispositivos físicos o virtuales, diseño de metodologías y procesos que mejoren la interacción humano – robot en cuanto a precisión, efectividad o seguridad, entre otros aspectos. Una de las preocupaciones fundamentales de los estudios está relacionada con la comunicación del operador (humano) hacia el robot, la forma en que éste interpreta las intenciones o instrucciones, así como la forma en que se retroalimentan mutuamente para la efectividad de las acciones [7], [23]–[44].

Finalmente, en consideración del comportamiento reciente en el número de publicaciones en torno al término háptica en la robótica colaborativa, la variedad y potencial de aplicaciones, así como las diversas formas de análisis de las investigaciones, se considera un campo promisorio de estudio.

IV. CONCLUSIONES

A partir del análisis de los mapas bibliométricos y del ejercicio de vigilancia tecnológica fue posible identificar un incremento en el interés científico y tecnológico sobre la exploración de la robótica colaborativa y la interacción humano-robot en los métodos que transforman los procesos de manufactura implementados por las fábricas inteligentes, lo que se puede considerar una contribución a las transformaciones industriales propias de la industria 4.0.

Así mismo, este estudio permitió realizar una proyección en las múltiples áreas del conocimiento donde el avance en temas como la robótica colaborativa y la interacción humano-robot son de especial atención permitiendo establecer temáticas emergentes como la háptica, la inteligencia artificial industrial, realidad virtual, programación en robótica, entre otras. Paralelamente, permitió identificar algunas áreas en las cuales se pueden dar, tanto innovaciones tecnológicas como metodológicas, un tópico que se destaca es la medicina a través de la cirugía robótica, la cirugía de alta precisión y mínimamente invasiva; también, en campos del conocimiento que pueden considerarse como un gran aporte a la lucha contra el calentamiento global, aplicando robótica colaborativa en la transformación del campo y de los procesos de recolección, selección y clasificación de productos agrícolas.

Por último, es posible concluir que la pertinencia de las investigaciones alrededor de temas como la robótica colaborativa y la interacción entre humanos y máquinas, representan una prioridad en la inmersión de los mercados y procesos productivos hacia los nuevos paradigmas sobre la participación del humano en la cadena productiva y de consumo planteados por las transformaciones impulsadas por la cuarta revolución industrial. Además, se considera fundamental que las instituciones tecnológicas hagan los esfuerzos necesarios para que las personas cuenten con una transición informada y llena de oportunidades para desarrollar las competencias y habilidades laborales requeridas en las nuevas ocupaciones y actividades laborales, tendiendo a mitigar al máximo las posibles crisis generadas por la transición a la industria 4.0 y permitiendo la adaptación a las siguientes transformaciones que en las próximas décadas se contemplarán en el marco de la industria 5.0.

REFERENCIAS

- [1] M. Paliga, "Human-cobot interaction fluency and cobot operators' job performance. the mediating role of work engagement: A survey," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 155, p. 104191, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921889022001105>
- [2] R. Raisamo, K. Salminen, J. Rantala, A. Farooq, and M. Ziat, "Interpersonal haptic communication: Review and directions for the future," *International Journal of Human-Computer Studies*, vol. 166, p. 102881, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1071581922001070>
- [3] A. Paolillo, F. Colella, N. Nosengo, F. Schiano, W. Stewart, D. Zambrano, I. Chappuis, R. Lalive, and D. Floreano, "How to compete with robots by assessing job automation risks and resilient alternatives," *Science Robotics*, vol. 7, no. 65, 2022, cited By :1. [Online]. Available: www.scopus.com
- [4] Mario Rizo Rivas. (2 de Octubre de 2017) <https://www.forbes.com.mx/el-mundo-compro-mas-robots-durante-2016/>.
- [5] N. J. van Eck and L. Waltman, "Software survey: Vosviewer, a computer program for bibliometric mapping," *Scientometrics*, vol. 84, no. 2, pp. 523–538, 2010, cited By :4909. [Online]. Available: www.scopus.com
- [6] N. McHenry, J. Spencer, P. Zhong, J. Cox, M. Amisrany, K. C. Wong, and G. Chamitoff, "Predictive xr telepresence for robotic operations in space," in *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, vol. 2021-March, 2021, cited By :6. [Online]. Available: www.scopus.com
- [7] A. Awde, M. Boudaoud, M. Macioce, S. Regnier, and C. Cleve, "A microrobotic approach for the intuitive assembly of industrial electrooptical sensors based on closed-loop light feeling," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, pp. 1–10, 2022. [Online]. Available: www.scopus.com
- [8] C. Brosque, E. G. Herrero, Y. Chen, R. Joshi, O. Khatib, and M. Fischer, "Collaborative welding and joint sealing robots with haptic feedback," in *Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, vol. 2021-November, 2021, pp. 1–8, cited By :2. [Online]. Available: www.scopus.com
- [9] A. Casalino, C. Messeri, M. Pozzi, A. M. Zanchettin, P. Rocco, and D. Prattichizzo, "Operator awareness in human-robot collaboration through wearable vibrotactile feedback," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 3, no. 4, pp. 4289–4296, 2018, cited By :37. [Online]. Available: www.scopus.com
- [10] S. Fani, S. Ciotti, and M. Bianchi, "Multi-cue haptic guidance through wearables for enhancing human ergonomics," *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 15, no. 1, pp. 115–120, 2022. [Online]. Available: www.scopus.com
- [11] V. Girbes-Juan, V. Schettino, Y. Demiris, and J. Tornero, "Haptic and visual feedback assistance for dual-arm robot teleoperation in surface conditioning tasks," *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 14, no. 1, pp. 44–56, 2021, cited By :15. [Online]. Available: www.scopus.com
- [12] I. Iossifidis, "Development of a haptic interface for safe human robot collaboration," in *PECCS 2014 - Proceedings of the 4th International Conference on Pervasive and Embedded Computing and Communication Systems*, 2014, pp. 61–66, cited By :1. [Online]. Available: www.scopus.com
- [13] E. Lamon, F. Fusaro, P. Balatti, W. Kim, and A. Ajoudani, "A visuo-haptic guidance interface for mobile collaborative robotic assistant (moca)," in *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2020, pp. 11253–11260, cited By :5. [Online]. Available: www.scopus.com
- [14] V. Rakhmatulin, M. A. Cabrera, F. Hagos, O. Sautenkov, J. Tirado, I. Uzhinsky, and D. Tsetserukou, "Coboguide: Haptic potential fields for safe human-robot interaction," in *Conference Proceedings - IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2021, pp. 2869–2874. [Online]. Available: www.scopus.com
- [15] M. Ramacciotti, F. Leoni, A. Spezzaneve, and S. Roccella, "A novel haptic interface control system for robotic industrial processes," in *Proceedings of the 1st IASTED International Conference on Intelligent Systems and Robotics, ISAR 2016*, 2016, pp. 168–174. [Online]. Available: www.scopus.com
- [16] J. Schmidler and K. Bengler, "Influence of size-weight illusion on usability in haptic human-robot collaboration," *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 11, no. 1, pp. 85–96, 2018, cited By :3. [Online]. Available: www.scopus.com
- [17] F. Sorgini, G. A. Farulla, N. Lukic, I. Danilov, L. Roveda, M. Milivojevic, T. B. Pulikottil, M. C. Carrozza, P. Prinetto, T. Tollo, C. M. Oddo, P. B. Petrovic, and B. Bojovic, "Tactile sensing with gesture-controlled collaborative robot," in *2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT, MetroInd 4.0 and IoT 2020 - Proceedings*, 2020, pp. 364–368, cited By :1. [Online]. Available: www.scopus.com
- [18] A. Hunternann, E. Demeester, and E. V. Poorten, "User-specific gaussian process model of wheelchair drivers with a haptic joystick interface," in *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2018, pp. 2457–2463, cited By :2. [Online]. Available: www.scopus.com
- [19] A. MajidiRad and Y. S. Yihun, "Upper limb rehabilitation and mobility assistance using robotic devices: A review," in *Proceedings of the*

- ASME Design Engineering Technical Conference*, vol. 5A-2019, 2019, cited By :4. [Online]. Available: www.scopus.com
- [20] Y. Wang, D. Held, and Z. Erickson, "Visual haptic reasoning: Estimating contact forces by observing deformable object interactions," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 7, no. 4, pp. 11 426–11 433, 2022. [Online]. Available: www.scopus.com
- [21] O. Wilz, B. Sainsbury, and C. Rossa, "Constrained haptic-guided shared control for collaborative human–robot percutaneous nephrolithotomy training," *Mechatronics*, vol. 75, 2021, cited By :4. [Online]. Available: www.scopus.com
- [22] X. Wu and Z. Li, "Cooperative manipulation of wearable dual-arm exoskeletons using force communication between partners," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 8, pp. 6629–6638, 2020, cited By :10. [Online]. Available: www.scopus.com
- [23] D. J. Agravante, A. Cherubini, and A. Kheddar, "Using vision and haptic sensing for human-humanoid joint actions," in *IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, RAM - Proceedings*, 2013, pp. 13–18, cited By :4. [Online]. Available: www.scopus.com
- [24] A. Al-Yacoub, Y. C. Zhao, W. Eaton, Y. M. Goh, and N. Lohse, "Improving human robot collaboration through force/torque based learning for object manipulation," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 69, 2021, cited By :19. [Online]. Available: www.scopus.com
- [25] Y. Aydin, N. Arghavani, and C. Basdogan, "A new control architecture for physical human-robot interaction based on haptic communication," in *ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, 2014, pp. 122–123, cited By :6. [Online]. Available: www.scopus.com
- [26] D. Bazzi, A. Tomasi, A. M. Zanchettin, and P. Rocco, "Human intention estimation and goal-driven variable admittance control in manual guidance applications," in *2021 20th International Conference on Advanced Robotics, ICAR 2021*, 2021, pp. 195–200. [Online]. Available: www.scopus.com
- [27] F. Bian, D. Ren, R. Li, P. Liang, K. Wang, and L. Zhao, "Dynamical system based variable admittance control for physical human-robot interaction," *Industrial Robot*, vol. 47, no. 4, pp. 623–635, 2020, cited By :1. [Online]. Available: www.scopus.com
- [28] S. A. Bowyer, B. L. Davies, and F. Rodríguez Y Baena, "Active constraints/virtual fixtures: A survey," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 30, no. 1, pp. 138–157, 2014, cited By :189. [Online]. Available: www.scopus.com
- [29] M. Costanzo, G. De Maria, and C. Natale, "Handover control for human-robot and robot-robot collaboration," *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 8, 2021, cited By :6. [Online]. Available: www.scopus.com
- [30] N. Dehio, J. Smith, D. L. Wigand, P. Mohammadi, M. Mistry, and J. J. Steil, "Enabling impedance-based physical human–multi–robot collaboration: Experiments with four torque-controlled manipulators," *International Journal of Robotics Research*, vol. 41, pp. 68–84, 2022.
- [31] Y. Dmytryiev, F. Inero, M. Carnevale, and H. Giberti, "Brain–computer interface and hand-guiding control in a human–robot collaborative assembly task," *Machines*, vol. 10, no. 8, 2022. [Online]. Available: www.scopus.com
- [32] S. Grushko, A. Vysocký, P. Oščádal, M. Vocetka, P. Novák, and Z. Bobovský, "Improved mutual understanding for human-robot collaboration: Combining human-aware motion planning with haptic feedback devices for communicating planned trajectory," *Sensors*, vol. 21, no. 11, 2021, cited By :9. [Online]. Available: www.scopus.com
- [33] S. Huang, M. Ishikawa, and Y. Yamakawa, "Human-robot interaction and collaborative manipulation with multimodal perception interface for human," in *HAI 2019 - Proceedings of the 7th International Conference on Human-Agent Interaction*, 2019, pp. 289–291, cited By :1. [Online]. Available: www.scopus.com
- [34] A. Huat, A. Yoroza, and M. Takahashi, *Introduction of Damping Control for Obstacle Avoidance in Direct-Contact Cobotics Operations*, ser. Lecture Notes in Networks and Systems, 2022, vol. 412 LNNS. [Online]. Available: www.scopus.com
- [35] S. W. Jensen, J. L. Salmon, and M. D. Killpack, "Trends in haptic communication of human-human dyads: Toward natural human-robot co-manipulation," *Frontiers in Neurobotics*, vol. 15, 2021, cited By :1. [Online]. Available: www.scopus.com
- [36] A. Kucukylmaz and I. Issak, "Online identification of interaction behaviors from haptic data during collaborative object transfer," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 1, pp. 96–102, 2020, cited By :3. [Online]. Available: www.scopus.com
- [37] S. Kundu, B. O'Flynn, J. T. Sanchez, and M. Walsh, "Low latency haptic feedback for battery powered hci for the tactile internet," in *2021 Smart Systems Integration, SSI 2021*, 2021. [Online]. Available: www.scopus.com
- [38] S. Liu, L. Wang, and X. V. Wang, "Function block-based multimodal control for symbiotic human-robot collaborative assembly," *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, vol. 143, 2021, cited By :7. [Online]. Available: www.scopus.com
- [39] A. Ozgür, W. Johal, F. Mondada, and P. Dillenbourg, "Windfield: Learning wind meteorology with handheld haptic robots," in *ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, vol. Part F127194, 2017, pp. 156–165, cited By :12. [Online]. Available: www.scopus.com
- [40] A. Rivera-Pinto and J. Kildal, "Visuo-tactile mixed reality for offline cobot programming," in *ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, 2020, pp. 403–405, cited By :2. [Online]. Available: www.scopus.com
- [41] V. Shanmuganatha, L. P. Pratap, and P. M. Shailendrasingh, "Modeling and control of collaborative robot system using haptic feedback," *Advances in Science, Technology and Engineering Systems*, vol. 2, no. 3, pp. 1549–1555, 2017, cited By :2. [Online]. Available: www.scopus.com
- [42] J. Singh, A. R. Srinivasan, G. Neumann, and A. Kucukylmaz, "Haptic-guided teleoperation of a 7-dof collaborative robot arm with an identical twin master," *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 13, no. 1, pp. 246–252, 2020, cited By :7. [Online]. Available: www.scopus.com
- [43] Y. Tanaka, S. Shiraki, K. Katayama, K. Minamizawa, and D. Prattichizzo, "Bilaterally shared haptic perception for human-robot collaboration in grasping operation," *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 33, no. 5, pp. 1104–1116, 2021, cited By :3. [Online]. Available: www.scopus.com
- [44] D. Wei, H. Zhou, and H. Y. Yang, "Human-robot negotiation of intentions based on virtual fixtures for shared task execution," in *2020 17th International Conference on Ubiquitous Robots, UR 2020*, 2020, pp. 297–302, cited By :1. [Online]. Available: www.scopus.com

SUPERVISIÓN EN LA NUBE DE VARIABLES ELÉCTRICAS DE SISTEMA FOTOVOLTAICO CON SISTEMA EMBEBIDO Y APLICACIÓN WEB

MsC. María C. Duque S*, Esp. Carlos M. Clavijo P*, Ing. Jefferson A Garcés T**

Centro CEDRUM, Grupo CEDRUM NDS*, Regional N.D.S, Tecnoparque Cúcuta, Universidad Francisco de Paula Santander**, Cúcuta, Colombia

macduques@sena.edu.co, cmclavijo@sena.edu.co, jeffersonaronigtgat@ufps.edu.co

Resumen.

El siguiente artículo busca dar a conocer el proyecto sobre la solución a la monitorización remota de sistemas fotovoltaicos aislados, o de difícil acceso, se desarrolló bajo los conceptos de industria 4.0, un módulo de supervisión remota, integrando instrumentación electrónica de bajo costo, sistemas embebidos Open Source, y tecnologías de la información. Con el sistema se pudo monitorizar desde cualquier dispositivo conectado a internet, el acceso al histórico de datos y los valores de generación energética en tiempo real, generando un criterio de evaluación para el comportamiento energético de los sistemas fotovoltaicos, remotamente.

Esta investigación fue de tipo descriptiva y experimental, el desarrollo se realizó por etapas donde inicialmente se realizó la selección de los requerimientos de diseño y electrónicos a utilizar, en la siguiente etapa se propusieron los diseños de la parte electrónica, el diseño del entorno del aplicativo web y la programación del sistema electrónico, seguidamente se construyó el sistema electrónico y el aplicativo web, donde finalmente se realizaron las pruebas de funcionamiento del sistema integrando el software y hardware, obteniendo resultados óptimos de funcionamiento.

Palabras Clave: *Aplicación Web, Arduino, Sistema fotovoltaico, Supervisión en la nube, industria 4.0, Variables eléctricas, supervisión remota.*

Abstract

The following article seeks to publicize the project on the solution to the remote monitoring of isolated photovoltaic systems, or of difficult access, it was developed under the concepts of industry 4.0, a remote supervision module, integrating low-cost electronic instrumentation, embedded systems Open Source, and information technologies. With the system, it was possible to monitor from any device connected to the Internet, access to historical data and energy generation

values in real time, generating an evaluation criterion for the energy behavior of photovoltaic systems, remotely.

This research was descriptive and experimental, the development was carried out in stages where initially the selection of the design and electronic requirements to be used was carried out, in the next stage the designs of the electronic part were proposed, the design of the application environment web and the programming of the electronic system, then the electronic system and the web application were built, where finally the performance tests of the system were carried out, integrating the software and hardware, obtaining optimal performance results.

Keywords: *Web application, Arduino, Photovoltaic system, Supervision in the cloud, industry 4.0, Electrical variables, remote supervision.*

I. INTRODUCCIÓN

En Colombia el Gobierno Nacional, guarda interés en la energía solar fotovoltaica como auxilio en el consumo energético de los estratos 1, 2 y 3 [1], lo que motiva a las empresas comercializadoras de energía, para tener herramientas que definan criterios de producción y funcionamiento de los sistemas fotovoltaicos en lugares de difícil acceso. Esto motivó a diferentes instituciones a investigar tecnologías y técnicas que mejoren la conversión de energía solar, en energía eléctrica aprovechable; naciendo la necesidad de integrar instrumentación electrónica de bajo costo, con una interfaz de acceso remoto desde cualquier dispositivo conectado a internet, y con ello definir qué tan eficiente es el sistema fotovoltaico, para el consumo en el que se diseñó, y evaluando su comportamiento con los aspectos que afectan la eficiencia [2].

Las investigaciones en otros países como Brasil buscan tener herramientas de criterio para realizar

mantenimientos, o ajustes necesarios para mejorar la eficiencia [3]; y otras entidades aprovechan software libre, para el monitoreo de plantas fotovoltaicas generadoras de baja escala en sus instalaciones, con instrumentación de bajo costo y conexiones socket [4]. Algunos proyectos llevan el estudio a mayor profundidad, utilizando ordenadores de placa simple, como centros de supervisión remota, con interfaces en la nube [5]; y muchos proyectos integran diferentes tecnologías para conocer remotamente que producción energética, y que condiciones de trabajo tienen los sistemas fotovoltaicos [6].

En Colombia, algunas universidades como lo es la UNAD (Universidad abierta y a distancia) están aprovechando los conocimientos en telemetría y telecontrol, como recurso para el seguimiento de funcionamiento y carga de las baterías con paneles solares en sus laboratorios de Física y Electrónica, realizando sus investigaciones remotamente [7].

Para brindar una solución a las instituciones que necesitan conectar su instrumentación a la nube, se desarrolló un prototipo de supervisión remota con interfaz en una aplicación Web, para el acceso a los datos en tiempo real y la generación de históricos. El sistema de supervisión aplica los conceptos de Industria 4.0[8], e integra instrumentación electrónica con sensores de bajo costo, un microcontrolador con conversor ADC para la captación y organización de datos, y un microprocesador como ordenador de placa simple para el procesamiento, almacenamiento y envío de la información, a una plataforma Backend.

El presente artículo tiene como propósito explicar la utilidad del uso de nuevas tecnologías de la información y sistemas embebidos de bajo coste, como una solución viable a las instituciones que necesitan conectar su instrumentación a la nube, para realizar supervisión y respaldo de la información en tiempo real, desde cualquier dispositivo conectado a internet, para esto se aplicó al caso de estudio de supervisión remota de un sistema fotovoltaico.

II. ANTECEDENTES, PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

A. Antecedentes.

En el 2021, la investigación “Monitorização de uma rede de painéis fotovoltaicos usando um sistema embarcado de baixo custo.”, aportó una idea del buen funcionamiento del sistema fotovoltaico, con captación de información por medio de un microcontrolador, ayudando en la selección de tecnologías de captación de bajo costo [3].

En el 2021, la investigación “Implantação de estação solarimétrica e de sistema supervisório com SCADABR e plataforma IoT em usina fotovoltaica na UNILAB-CE”, permitió conocer una plataforma de monitorización con software libre, y ayudo a tener una perspectiva, de cómo el mercado necesita estos servicios. [4]

En el 2020, la investigación “Design and integration of middleware for IoT devices towards solar panel monitoring based on Raspberry Pi.”, fomentó una toma de componentes más detallada, pues es necesario un hardware que soporte las tecnologías informáticas que se usaron, y evitar plataformas que no sean integrables entre sí, complicando el desarrollo de cualquier proyecto [5].

B. Problema

La comunidad científica de la UFPS (Universidad Francisco de Paula Santander), tiene un proyecto para determinar el ángulo de mayor eficiencia, en los paneles de los sistemas fotovoltaicos instalados en la ciudad de Cúcuta. La mayor limitante es la supervisión remota, ya que, no hay una instrumentación que integre las diferentes variables de los paneles con una base de datos en la nube; y los dispositivos que hay en el mercado, solo centralizan datos de una instrumentación ya existente (por lo general del mismo fabricante), y los comunica con el servidor de esta, obligando a la institución un pago periódico para el acceso a la información.

La medición de las variables se realiza por el Data Logger HOB0® 4-Channel Analog (UX120-006M)[9], con disponibilidad de 4 canales y una resolución de 16 bits para registrar hasta 1,9 millones de eventos; permite la conexión de sensores de voltaje con un rango de medida de 0 - 20.1mA a una resolución de 0.3μA y una temperatura entre 0°C y 50°C (32°F a 122°F). Un Data Logger muy potente en sitio, pero limitado en una toma de datos remota, e incapaz de conexión WIFI (Wireless Fidelity o Fidelidad inalámbrica) para el envío y respaldo de los datos en la nube, en tiempo real.

Por lo tanto, la adquisición de la data de las variables eléctricas correspondientes de los paneles solares de la UFPS no cuenta con acceso remoto, y obliga a los investigadores a movilizarse al sitio y extraer la información por medio de memorias externas. El problema es que, no se tiene acceso a la información en tiempo real, ni se respaldada inmediatamente en una base de datos; lo que obliga a un investigador a esta labor, consumiendo recurso humano y tecnológico, que puede ser aprovechado para el desarrollo de la investigación en curso, si se tuviera acceso a la información remotamente por parte de todos los investigadores.

Considerando la problemática anteriormente expuesta, se plantea la siguiente pregunta:

¿Es necesario la creación de un sistema de supervisión en la nube de variables eléctricas de sistema fotovoltaico con sistema embebido y aplicación Web?

C. Justificación

Para determinar si un sistema fotovoltaico es eficiente o no, se evalúa la potencia entregada a una carga [2]. Al medir el voltaje junto con el valor resistivo de la carga, se determina

la corriente, y usando la ley de Watts, se determina la potencia. Estos cálculos solo son posibles al tener acceso a los datos que actualmente son centralizados en el HOBO® Datalogger (UX120-006M) que es un dispositivo electrónico registrador de datos en un tiempo programado.

La monitorización y descarga histórica de la información obtenida por los Datalogger instalados en los paneles solares de la UFPS, no cuenta con una transmisión directa de datos a la nube, lo que impide el acceso y respaldo de la información en tiempo real. Por esta razón, se propuso esta investigación para el desarrollo de un prototipo funcional que permita la instrumentación, centralización, respaldo en la nube, y visualización de datos en tiempo real, desde cualquier dispositivo, con conexión a internet para los diferentes actores de la comunidad universitaria, principalmente dirigido a los estudiantes de ingeniería.

Por consiguiente, se hace necesario como requerimiento técnico que la instrumentación electrónica, sea de naturaleza de conversión Análogo/Digital, con la finalidad de obtener la medición en términos de variables analógicas en el microprocesador BCM2837, ARMv8, para realizar de la conexión LAN inalámbrica 802.11 ac bajo tecnología Raspberry Pi 3B [11].

Asimismo, se implementó el microprocesador mencionado anteriormente, el cual ejecutó la tarea como centro de datos y servidor, permitiendo la conexión directa a internet, con un ejecutable desarrollado en Python, con el envío de datos se realizó la plataforma de Backend, con DataBase de naturaleza asíncrona, para lograr ejecutar las actividades de visualización y descarga, desde una aplicación Web en cualquier dispositivo.

III. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

A. Objetivo General

- Desarrollar un prototipo de supervisión en la nube de variables eléctricas de sistema fotovoltaico con sistema embebido y aplicación Web

B. Objetivos Específicos

- Definir los requerimientos técnicos para la supervisión en la nube de variables eléctricas de sistema fotovoltaico con sistema embebido y aplicación Web.
- Diseñar el sistema de instrumentación electrónica no invasivo para la captación, conversión Análogo-Digital y centralización de los datos en Raspberry Pi, de las variables en paneles solares.
- Programar la aplicación Web Responsive en Firebase con conexión a Raspberry Pi como centro de supervisión, procesamiento y envío de datos al Servidor de la DataBase.
- Construir el sistema de supervisión en la nube de variables eléctricas de sistema fotovoltaico con sistema embebido y aplicación Web.

- Demostrar el correcto funcionamiento del sistema de supervisión en la nube de variables eléctricas de sistema fotovoltaico con sistema embebido y aplicación Web.

C. Metodología

La metodología propuesta parte desde la base del tipo de investigación implementada al desarrollo del prototipo que fue la investigación descriptiva y experimental, por esta razón y a la naturaleza modular del desarrollo del sistema de supervisión en la nube de variables eléctricas de sistema fotovoltaico con sistema embebido y aplicación Web, se designaron 5 etapas que llevaron al desarrollo secuencial del mismo. En la etapa inicial se usó referentes de investigaciones internacionales para conocer que tecnologías en la actualidad, son usadas en proyectos IoT (Internet de las cosas) e Industria 4.0, y así evaluar las plataformas de mayor viabilidad para la región de Cúcuta, Norte de Santander; la segunda etapa se destinó para el diseño y simulación de la instrumentación, con la captación, almacenamiento y envío de la información a la base de datos en la nube; la tercera etapa consistió en la creación del Frontend o la interfaz gráfica de la Aplicativo Web Responsive; en la cuarta etapa se implementó el prototipo y se realizaron pruebas de funcionamiento con una semana de históricos para conocer el comportamiento energético del panel, lo expuesto anteriormente se detalla en los índices a continuación del presente artículo.

En el desarrollo del prototipo se consideró los parámetros de diseño con base las funcionalidades definidas a partir del alcance y objetivos propuestos, incluyendo la integración entre las plataformas Web, disponibilidad en el mercado local, y el valor presupuestal mínimo necesario para obtener la mayor cantidad de beneficios, debido a la vigilancia tecnológica realizada se concluyó que para el éxito del prototipo comercialmente sea posible su implementación es utilizando en estas tecnologías disponibles y libres; de lo contrario esto sería una limitancia y solo abarcaría un sector del mercado tecnológico.

D). Selección de componentes de Hardware.

Para la elección de las plataformas usadas, se desarrolló un método de calificación, basado en la matriz Pugh que permite seleccionar a partir de criterios definidos la opción que se clasifica con los requerimientos determinados [10], donde se tomaron las características de mayor aporte a la investigación, y se categorizaron cuantitativamente, los porcentajes de viabilidad en función de la plataforma de mayor beneficio.

La tabla de calificación, Tabla 1, permite conocer el porcentaje de viabilidad de la selección de los requerimientos de propuestos para el desarrollo del proyecto, esto se realiza bajo criterios de selección, de características técnicas, almacenamiento y presupuesto económico.

TABLA 1

Porcentaje	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
------------	------	-------	-------	-------	--------

La ecuación (1), se emplea cuando la característica de mayor cantidad da mayor beneficio. [10]

$$Calificación = \frac{\text{valor obtenido}(100\%)}{\text{valor máximo}} \quad (1)$$

La ecuación (2), se emplea cuando el valor obtenido del componente o elemento es de mayor cantidad da menor beneficio. [10]

$$Calificación = \left(1 - \frac{\text{valor obtenido}}{\text{valor máximo}}\right) 100\% \quad (2)$$

- valor obtenido = Valor del componente.
- valor máximo = Valor límite de la característica.

Lo anterior quiere decir que la Ec. (2) que los requerimientos de características técnicas y costo económico en la mayoría de los casos es de naturaleza inversa, debido a que el elemento de menor valor aporta el mayor beneficio a la investigación, por eso se debe establecer un valor máximo permitido de tiempo y de costo, los cuales se definieron al inicio de la investigación estableciéndose los límites de valor máximo.

Inicialmente se seleccionó la plataforma de conexión de la instrumentación, con el Servidor en la nube; por lo que se evaluaron 5 plataformas con un precio inferior a 1'000.000 de pesos colombianos, y disponibilidad inferior a 182 días, tiempo máximo para iniciar la implementación, lo anterior se realizó debido a la limitancia económica establecida del proyecto.

Asimismo, las características evaluadas para el microprocesador BCM2837 fueron el procesador con soporte para IoT, cantidad de protocolos de comunicación, cantidad de RAM, cantidad de almacenamiento, temperatura máxima de trabajo, disponibilidad, y precio, los cuales como se muestra en la Tabla II.

TABLA II
SELECCIÓN DE VIABILIDAD DE MICROPROCESADOR.

Plataforma	Beagle Green Gateway	Latte Panda Delta 432	Onion Omega 2 Pro	MYS-7Z020 -C	Raspberry Pi 3b+
Procesador	5	5	5	5	5
Comunicación	5	4	4	3	5
RAM	1	3	1	2	5
Almacenamiento	1	3	1	5	5
Temp. Max.	5	4	4	5	4
Disponibilidad	1	5	5	1	5
Precio	4	3	4	1	4
Promedio	3,14	3,86	3,43	3,14	4,71

Nota: los elementos electrónicos expuestos en la tabla son microprocesadores, sus nombres dependen de sus características, referencia y fabricante.

De la evaluación se seleccionó a la Raspberry Pi3+ [10][11], como la plataforma de mayor viabilidad para la conexión de la instrumentación con el servidor en la nube, o servicios de Backend, debido al costo y requerimiento técnico establecido el inicio de la investigación.

Consecuentemente, para los computadores de placa simple no cuentan con un conversor ADC (Analogico – Digital), para la interpretación de las variables analógicas, por lo que se evaluaron 5 plataformas de microcontrolador con conversores ADC, que sean adaptables con la Raspberry Pi 3b+, debido a que se hace necesario convertir la señal de análogo a digital para tener un mejor manejo en los sistemas de programación y control.

En la Tabla III, se exponen los microcontroladores se evaluaron teniendo en cuenta, el soporte y conexión del microcontrolador con el ordenador de placa simple, la cantidad de protocolos de comunicación, la cantidad de canales analógicos, la disponibilidad y precio.

TABLA III
SELECCIÓN DE VIABILIDAD DE MICROCONTROLADOR.

Plataforma	Node MCU ESP8266	Arduin o Wifi Rev2	Arduin o MKR 1000	Arduin o UNO R3	Arduin o Mega 2560
Microcontrolador	5	5	5	5	5
Comunicación	4	5	5	4	4
Canales ADC	1	3	2	2	5
Disponibilidad	5	3	3	5	5
Precio	5	1	1	3	1
Promedio	4	3,4	3,2	3,8	4

Nota: los elementos electrónicos expuestos en la tabla son microprocesadores, sus nombres dependen de sus características, referencia y fabricante.

La evaluación del microcontrolador determinó que se tienen dos plataformas con igual viabilidad para el desarrollo del prototipo, pero se destacó al Arduino Mega 2560 [13] como la mejor opción por su gran cantidad de canales analógicos, debido a que se pueden utilizar una buena cantidad de sensores analógicos en estos puertos.

El microcontrolador NodeMCU ESP 8266, es viable cuando solo es necesario un canal de medición, y el Arduino UNO R3 es la opción más adecuada debido a que se necesita un máximo de 6 canales.

Con la elección del conversor ADC, se usó el sensor de voltaje y el sensor de corriente diseñados para la conexión directa con los canales analógicos del microcontrolador, con características técnicas establecidas como resolución, precisión, rango y sensibilidad como se expone en la Tabla IV.

TABLA IV

DATOS SENSORES

Sensor	Voltaje FZ0430	Corriente KS0185
Resolución	0.00489V	0.185V/A
Precisión	10Bits	$\pm 1\%$
Rango	0,02445V – 25V	-5A – 5A
Sensibilidad	0.0215846	0.185

Nota: los elementos electrónicos expuestos en la tabla son microprocesadores, sus nombres dependen de sus características, referencia y fabricante.

E). Diseño de instrumentación.

Usando el software de simulación Proteus Design Suite 8.10 ©, licenciado por Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) se diseñó el modelo dinámico, que busca emular el comportamiento del panel, basado en el modelo de diodo sencillo con resistencia Shunt que se muestra en la Fig. 1.

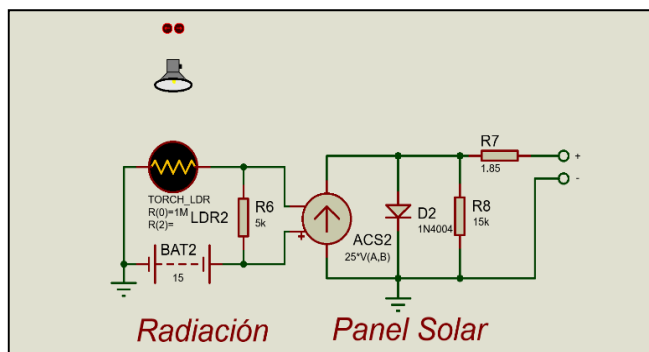


Fig. 1. Modelo de diodo sencillo, con resistencia Shunt.

Basado en la ficha técnica del sensor FZ0430[14], se realizó la simulación y se configuró la lectura, del microcontrolador Arduino Mega 2560, como se ilustra en la Fig. 2 que expone el circuito electrónico de este.

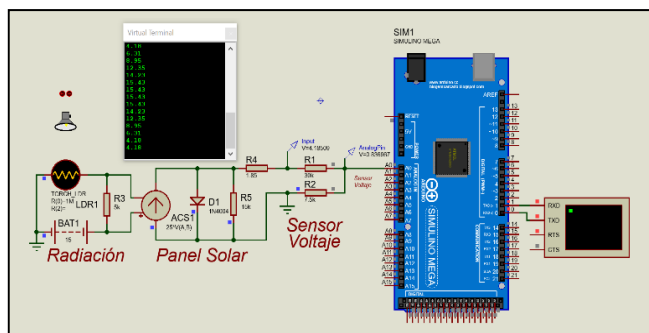


Fig. 2. Configuración y lectura del sensor FZ0340.

Usando el sensor ACS172 que ofrece el software de simulación, se configuró la lectura, del sensor KS0185[15], como se ilustra en la Fig. 3 que establece el sistema electrónico de este.

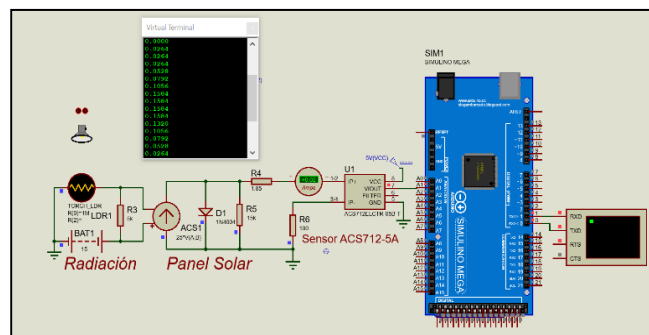


Fig. 3. Configuración y lectura del sensor KS0185.

Con la instrumentación simulada se configuró el Sistema Operativo del Raspbian 5.10 en Oracle VM VirtualBox®, debido a que permitió una la emulación del sistema informático de la Raspberry Pi, lo cual ayudo a la selección de una base de datos asíncrona de conexión con el sistema operativo del microcontrolador.

Para la plataforma de Backend fue seleccionado Firebase® (es un conjunto de servicios de hosting para cualquier tipo de aplicación) [16], plataforma de Google®, que ofrece los servicios Realtime Database (Base de datos en tiempo real) [17], base de datos asíncrona, Autenticación, Storage(Memoria), Hosting(Alojamiento web) [18], y un dominio, que son necesarios para el despliegue de la aplicación. Estos servicios son accesibles con una cuenta de Gmail.

Al crear el proyecto en la consola de Firebase se descarga las claves SDK, que permiten la conexión con la Raspberry Pi por medio de un ejecutable en Python, y el cual realiza el envío de los datos al servicio de Realtime Database de Firebase, de la Fig. 4.

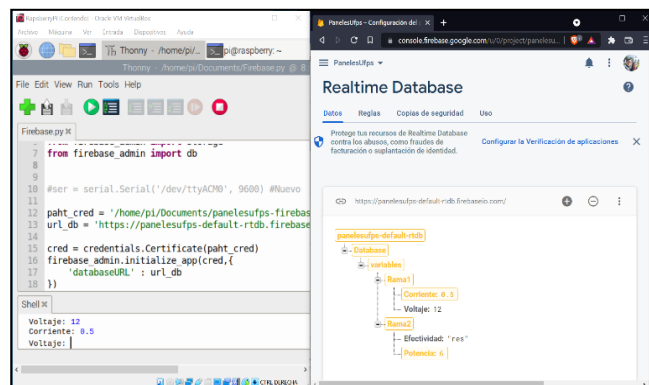


Fig. 4. Configuración y lectura del sensor KS0185.

F). Diseño de aplicación Web

Para acceder a los datos se diseñó la aplicación Web Responsive de la Fig. 5, en los lenguajes HTML5, CSS3 y JavaScript5, que son interpretados por los Browser o navegadores de internet, de la mayoría de los dispositivos. Esto permitió una aplicación multiplataforma, que se adapta

a diferentes formatos de pantalla, y se ejecuta sin importar el sistema operativo ni los recursos de la máquina.



Fig. 5. Aplicación Web Responsive.

Para acceso a los datos se conectó la aplicación con las credenciales de Firebase, y estos datos, solo son visibles cuando se ingresa como usuario autorizado, de la aplicación, como se ve en la Fig. 6.

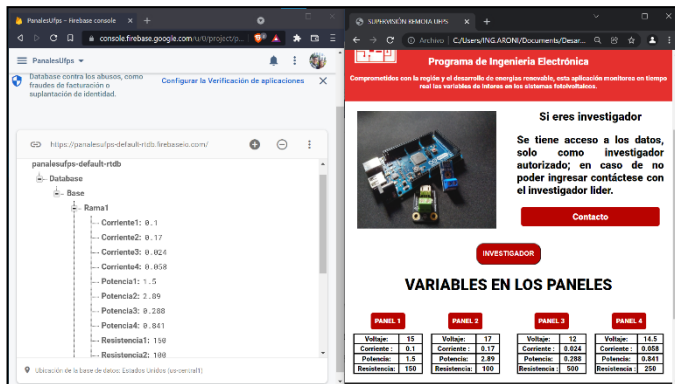


Fig. 6. Conexión de la Aplicación con Firebase.

Para el acceso a los históricos, se desarrolló una ventana que es accesible en los botones de cada panel, y que ofrece la posibilidad de seleccionar el archivo de interés y descargarlo en el dispositivo, en formato .csv la Fig. 7.

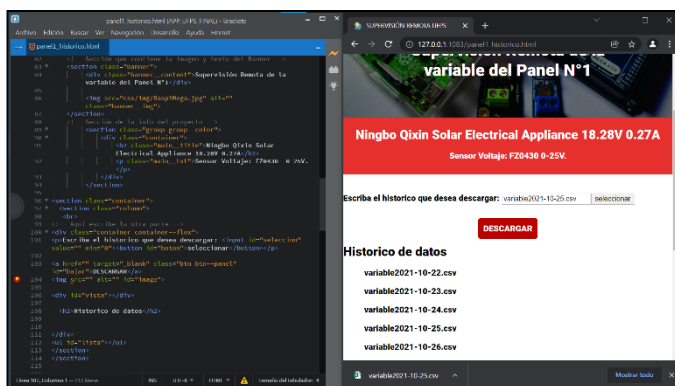


Fig. 7. Interfaz ara la descarga del histórico de datos.

IV. RESULTADOS

Con la comprobación del diseño de la instrumentación, se

procedió a la calibración de los sensores para la conexión con el módulo. El sensor de voltaje FZ0340 se calibró con una resistencia de carga de 100Ω, y el de corriente KS0185 con una 100Ω en paralelo con una de 150Ω, para aumentar la corriente.

En la calibración del FZ0430, se usó el pin digital 5, con un valor de 4.36V, interpretado como 202, que sirvió de referencia para el ajuste de la sensibilidad con la Ec. 3. de la Fig. 8.

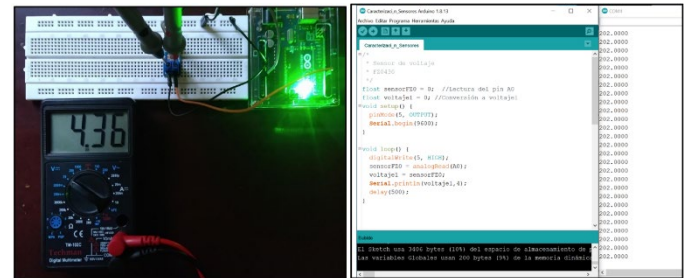


Fig. 8. Medición de calibración del sensor FZ0430.

La ecuación (3), se emplea para la calibración del sensor de voltaje FZ0430.

$$\text{sensibilidad} = \frac{4.36-0}{202-0} = 0.0215846 \quad (3)$$

Fuente: Elaboración propia.

Con el ajuste de sensibildiad se utilizó el pin 3.3V, con salida de 3.23V, interpretada en el Arduino entre 3.216V – 3.2377V, siendo el promedio 3.2268V que al aproximarse a 3 cifras, es la medición de 3.23V del multímetro, de la Fig. 9.

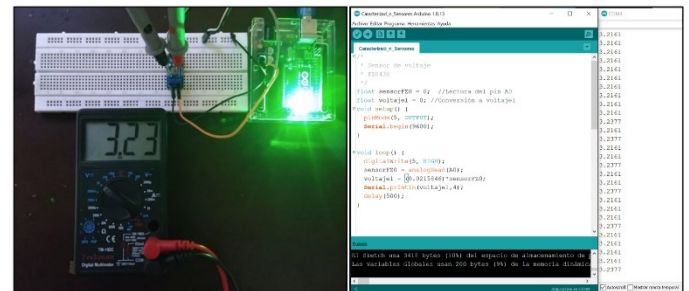


Fig. 9. Comparación de calibración del sensor FZ0430.

En la calibración del KS0185 se usaron los voltajes Vcc de alimentación de 4.32V y Vout de salida en 0A de 2.16V; valores tomados de la Fig. 10.

Fig. 10. Lectura de voltajes de calibración del sensor KS0185.

El ajuste de sensibilidad se realiza en el código de lectura del Arduino usando los valores medidos. Para tener una medición estable, se realiza un promedio de 350 interacciones, con un retardo de 15ms, facilitando una lectura rápida, pero con una precisión ajustada, como en la Fig. 11.

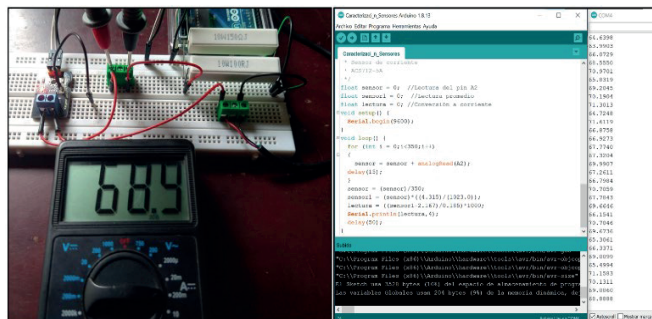


Fig. 11. Lectura de corriente del sensor KS0185.

Con la calibración y conexión de la instrumentación, se organizó la información, para le envió por protocolo serial; este formado se designa en el código de programación del microcontrolador en la Fig. 12.

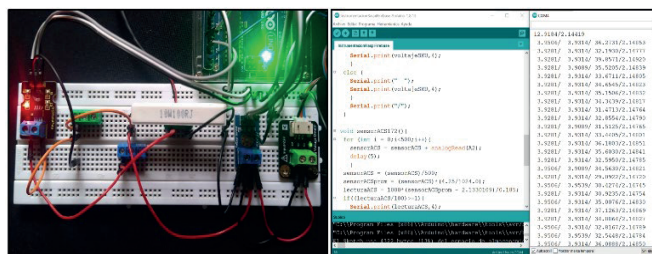


Fig. 12. Instalación de la instrumentación.

Con la información organizada, se procedió a la conexión serial con la Raspberry Pi 3b+, la cual se configuró de la misma forma que la emulación en la maquina Oracle VM VirtualBox®. El prototipo se instaló al panel de intemperie, Ningbo Qixin Solar Electrical de 5W, en un sitio descubierto para realizar las mediciones, como se aprecia en la Fig. 13.



Fig. 13. Pruebas de funcionamiento en las instalaciones de Tecnoparque Nodo Cúcuta.

Con la lectura de los datos se procedió a generar el histórico, almacenado en formato .csv, para el tratamiento de los datos en Excel, usando las herramientas del tratamiento de datos en Excel, debido a que el reporte descargado de la nube, se genera en .xlsx que es compatible con Excel, a partir de esto se pudo realizar las gráficas de la Fig. 14, de la potencia entregada en la carga durante 5 días en un periodo de 10 horas entre las 7:30am y 5:25pm, evidenciando que los días nublados la producción es inferior, como sucedió el día 2 de noviembre del 2021, y donde se puede apreciar algunos picos recurrentes en ciertas horas del día, indicando que alguna sombra puede estar incidiendo en el panel, limitando la producción por ciertos momentos del día, como se grafica en la Fig. 14.

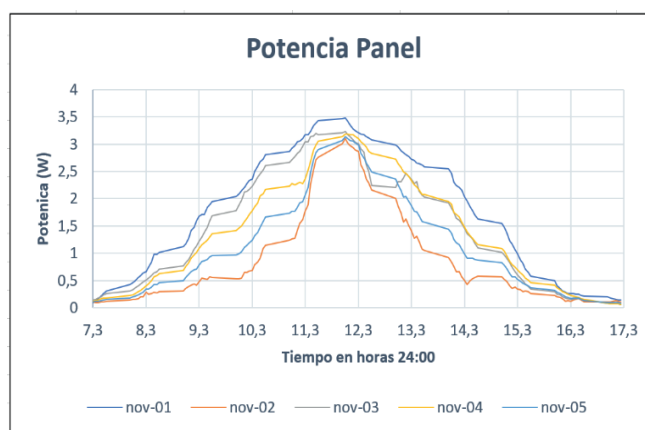


Fig. 14. Potencia entregada durante 5 días.

V. . CONCLUSIONES

El sistema electrónico desarrollado para la supervisión de variables en los paneles solares (voltaje, corriente), cumple satisfactoriamente los requisitos previos establecidos, de igual forma se valida su confiabilidad y robustez referente a los valores sensados, por medio del promedio de mediciones directas con multímetro obteniendo unas diferencias entre lecturas de 0,05V y 0,05A.

Se concluye que la adquisición de datos obtenidos de las mediciones de los sensores, y del sistema de desarrollo planteado entre arduino-raspberry, se logra establecer la supervisión remota a través de una aplicación web que en tiempo real reporta y actualiza los valores obtenidos del sistema electrónico.

El sistema de supervisión en la nube de variables eléctricas de sistema fotovoltaico con sistema embebido y aplicación Web alcanzó a superar las pruebas de nivel de laboratorio obteniendo un correcto funcionamiento, monitoreando en tiempo real, las variables de voltaje y corriente obtenidas de las capturas de irradiancia provenientes de un panel solar, cumpliendo en su totalidad todos los objetivos propuestos de la investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F. Torres, (2016). “Análisis del marco normativo del sector eléctrico colombiano, impactos en la regulación eléctrica de la ley 1715 de 2014,” Universidad Nacional de Colombia.
- [2] J. Cepeda and A. Sierra, (2017) “Aspectos que afectan la eficiencia en los paneles fotovoltaicos y sus potenciales soluciones,” NAFA SCR Doc., vol. 07/80, p. 17.
- [3] R. B. Schmalb, (2021). “Monitorização de uma rede de painéis fotovoltaicos usando um sistema embarcado de baixo custo,” Universidade de Évora ; Escola de Ciências e tecnologia.
- [4] W. M. C. Souza Pontes, (2022) “Implantação de estação solarimétrica e de sistema supervisão com SCADABR e plataforma IoT em usina fotovoltaica na UNILAB-CE,” Universidade Federal do Ceará (UFC).
- [5] Mallegowda M. & Dr Anithakanavlli & Amrutha M. P.,(2020) “Design and integration of middleware for IoT devices towards solar panel monitoring based on Raspberry Pi,” Jounal Seybold Rep., p. 19.
- [6] A. Bernardo, D. E. V. Praxedes, and F. D. E. Tecnologia, (2020) “Desenvolvimento de um sistema de supervisão, controle e manutenção baseado em condição para usinas de geração solar fotovoltaicas usando o conceito IoT,” Universidade de Brasília.
- [7] J. C. Castro, (2020), “Análisis de Eficiencia en Conversión/Almacenamiento de Energía Solar y Adquisición de Datos de Paneles Solares del Laboratorio de Física y Electrónica de la UNAD (Sede Nacional JCM) en el Marco de su Uso como Laboratorio Remoto,” Universidad Nacional Abierta y a Distancia.
- [8] Ministerio de tecnología de la información y las comunicaciones (MinTIC), (2019) “Aspectos básicos de la industria 4.0.” MinTIC, Colombia, p. 43, [Online]. Available: https://colombiatic.mintic.gov.co/679/articles-124767_recurso_1.pdf.
- [9] ONSET, (2018) “HOBO 4-Channel Analog Data Logger,” [Online]. Available: <http://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/ux120-006m>.
- [10] Raúl Sejzer, “Calidad Total: La Matriz de Pugh para la toma de decisiones,” 26 enero 2022, 2022. <http://ctcalidad.blogspot.com/2016/10/la-matriz-de-pugh-para-la-toma-de.html>.
- [11] G. Halcafree, (2016) “R a s p b e r r y i guía del usuario 1,”.
- [12] Raspberry Pi Fountion, (2021) “¿Que es Raspberry Pi?,” Julio, <https://raspberrypi.cl/que-es-raspberry/>.
- [13] Arduino.cl, (2021) “¿Qué es Arduino?,” Julio, <https://arduino.cl/que-es-arduino/>.
- [14] L. Llamas, “Medir voltajes de hasta 25V con Arduino y FZ0430,” Luis Llamas. (2021) Ingeniería, informática y diseño, Julio 26. <https://www.luisllamas.es/medir-voltajes-de-hasta-25v-con-arduino-y-fz0430/>.
- [15] keyestudio, (2021) “Free shipping! keyestudio ACS712-5A Current Sensor for Arduino Compatible,” <https://www.keyestudio.com/free-shipping-keyestudio-ac712-5a-current-sensor-for-arduino-compatible-p0165.html>.
- [16] Firebase, (2021) “Firebase,” Firebase Google, Julio, <https://firebase.google.com/>.
- [17] Firebase, (2021) “Firebase Realtime Database,” Firebase Google, Julio, https://firebase.google.com/docs/database?hl=es-419#how_does_it_work.
- [18] Firebase, (2021) “Firebase Hosting,” Firebase Google, Julio <https://firebase.google.com/docs/hosting/%0Ahttps://firebase.google.com/docs/hosting?hl=es-419>.
- [19] La Opinión, (2021) “Hoy inicia ‘Cúcuta Digital Valley 2021’ _ Noticias de Norte de Santander, Colombia y el mundo,” La Opinión, 2021, [Online]. Available: <https://www.laopinion.com.co/cucuta/hoy-inicia-cucuta-digital-valley-2021>.
- [20] F. Rabanales, Joseba, Martíneza, Ignacio, Jesús López-Torres Hidalgo, Andrés and B. navarro Brava, (2021) “Tecnologías de la Información y las Comunicaciones,” Julio, <https://www.mintic.gov.co/portal/inicio/Glosario/T/5755:Tecnologias-de-la-Informacion-y-las-Comunicaciones-TIC>.
- [21] Caviades, C, (2022) “Diseño e implementación de un sistema embebido de monitoreo térmico y fotográfico con acceso remoto vía web, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

INFLUENCIA DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE TEMPLE Y TEMPLE -REVENIDO EN LA RESPUESTA MECÁNICA Y MICROESTRUCTURAL DE UN ACERO PARA APLICACIONES ESTRUCTURALES

Influence of the heat treatment of quenching and quenching-annealing in the mechanical and microstructural response of a structural steel

Juan C. Sánchez^{1,2*}, Jaime A. Jaramillo^{1,2}, Sebastián Londoño^{1,2}, Santiago Salinas^{1,2}, Alejandro Vásquez^{1,3}

Grupo de Automatización, Comunicaciones Industriales, Pedagogía y Energías Alternativas – GACIPE, Centro de Tecnología de la Manufactura Avanzada, Servicio Nacional de Aprendizaje- SENA, Regional Antioquia, Medellín

² Semillero de Investigación en Manufactura Aditiva y Maquinado no convencional – MAMCO, Centro de Tecnología de la Manufactura Avanzada, Servicio Nacional de Aprendizaje- SENA, Regional Antioquia, Medellín

Laboratorio de Ensayos Mecánicos y Metalografía, CTMA, Centro de Tecnología de la Manufactura Avanzada, Servicio Nacional de Aprendizaje- SENA, Regional Antioquia, Medellín

*Correo de contacto: jcsanchezg@sena.edu.co

Resumen

El presente trabajo muestra la influencia de los tratamientos térmicos en la respuesta mecánica de barras de acero corrugado de 0.30%C evaluadas mediante ensayos mecánicos como tracción y durezas. Se cortaron probetas de 22cm de longitud y diámetro de 1/2" para posteriormente ser llevadas a los hornos y ser sometidas a dos tratamientos térmicos, uno de temple y otro de temple y revenido. Luego se sometió cada una de ellas a ensayos de tracción, dureza y análisis metalográfico y se compararon con el material en estado de entrega como referencia. Los resultados mostraron una influencia evidente en cuanto a los valores de dureza y tracción para el material asociado a cada uno de los tratamientos térmicos realizados en comparación con el material de referencia. En cuanto a la dureza, se identificó un aumento marcado en la probeta templada en comparación con las otras dos, siendo esta, la que reportó valores más altos. Para los ensayos de tracción, de igual manera los valores más altos fueron reportados por la muestra con tratamiento de temple, seguida por la templada-revenida y estado de entrega. En cuanto a la microestructura, para el

material base se identificó ferrita con algunos granos perlíticos diferente a las otras dos probetas tratadas donde se alcanzan a identificar zonas con martensita y martensita revenida.

Palabras claves: *acero – temple - temple y revenido
dureza – tracción*

Abstract

This work shows the influence of the heat treatments on the mechanical response of steel rebars of 0.30%C evaluated through tensile and hardness tests. Section were cut of 22cm and 1/2" of diameter and after put them inside the furnaces for quenching and quenching-annealing. Each sample was compared respect to a reference rebar (delivery status) tensile test, hardness and metallography analysis. The results showed a marked influence of the heat treatment regarding the tensile values and hardness compared with the reference sample. The higher hardness value and maximum tensile stress were showed by the quenched sample with respect to the

ferritic and pearlitic microstructure, the quenched samples evidenced a martensitic structure and the quenched-annealed rebar showed a martensitic microstructure with several grains of annealed martensitic.

Keywords: steel – quenching - quenching and annealing – hardness - traction

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, aunque el desarrollo de nuevos materiales está en un incremento acelerado en diferentes campos de aplicación, no es un secreto que aleaciones como el acero siguen siendo de gran importancia para el área de la construcción por su versatilidad en cuanto a relaciones resistencia, peso y costo. El uso de barras corrugadas para el refuerzo de aplicaciones estructurales fue alrededor de mediados del siglo XIX [1] convirtiéndose en un importante papel con el pasar de los años en el refuerzo y soporte de cargas en la construcción de edificaciones. El proceso de manufactura de este tipo de barras normalmente se da por rolado en frío, lo que ha reportado una baja transferencia de propiedades al concreto favoreciendo la baja ductilidad en el compuesto [2] que se ve mejorada en cuanto a su desempeño con la aplicación de tratamientos térmicos; manteniéndose actualmente como material de refuerzo para el concreto por su aporte en el aumento de la resistencia de estructuras [3], a partir de un incremento en el desempeño en propiedades mecánicas mecánico del material compuesto. Adicional a esto, el acero es material usado en la manufactura de múltiples componentes en ingeniería para diversas aplicaciones [4]–[8] por su buena respuesta a diferentes tipos de cargas como: tracción, compresión, flexión, torsión; además de poder mejorar este comportamiento con el uso de procesos a alta temperatura como tratamientos térmicos como ya fue mencionado, que permiten un aumento en la dureza y en su respuesta mecánica. Uno de los tratamientos más utilizados para conseguir este tipo de características en un acero es el temple [9]–[11], que consiste básicamente en llevar la pieza por encima de la temperatura de austenización e impedir, en el enfriamiento, que se toque la nariz de transformación en el diagrama TTT (Temperatura, Tiempo, Transformación), por lo que el enfriamiento debe ser rápido y comúnmente con medios como aceite [11] debido a que el agua podría traer inconvenientes de fragilidad en ciertas zonas de la pieza y proceso de oxidación. El aumento de dureza con el tratamiento térmico está asociado al porcentaje de carbono [12], [13], factor que en gran parte, define la templabilidad del material e impidiendo que se supere ciertos valores de esta propiedad que directamente está relacionada con la resistencia a la tracción, razón por la cual, con el tratamiento de temple también se tiene un aumento significativo de esta propiedad.

Los ensayos de dureza y tracción son de los más comunes para caracterizar componentes de materiales metálicos en la industria, por lo que muchos de estos ensayos son necesarios implementarlos bajo normas internacionales que avalen los

resultados y den confiabilidad de los valores obtenidos. Aunque existen diferentes instituciones que rigen muchas de las normas para materiales a nivel internacional y nacional como: ASTM, ISO, DIN, JIS, ICONTEC etc., las dos primeras son de gran aplicabilidad y uso en la industria colombiana, sin dejar a un lado y quitarles importancia a las otras ya existentes.

En el presente trabajo se muestran los resultados obtenidos luego de evaluar la respuesta mecánica de un material estructural en barras de acero corrugado sometidas a dos tratamientos térmicos de temple y temple-revenido, comparadas con el material en estado de entrega. Para cada una de las probetas se hicieron pruebas de tracción, dureza y análisis metalográfico con el fin de identificar su influencia en su comportamiento mecánico.

II. METODOLOGÍA

La metodología se dividió en 6 etapas como se ilustra en la Fig. 1.

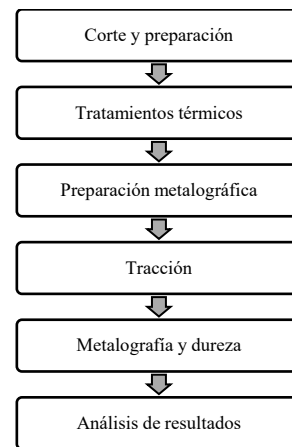


Fig. 1. Esquema de las etapas consideradas para el procedimiento metodológico.

A continuación, se detalla cada una de las etapas enunciadas en el esquema anterior:

Corte y preparación

Se definió un acero estructural como material de ensayos en presentación de barras corrugadas. Para los ensayos de tracción se cortaron muestras de barras de ½” aproximadamente de 25 cm y un tramo de 1” de longitud para la preparación metalográfica y medición de dureza

Tratamientos térmicos

Luego de tener los tramos de barra preparados para cada uno de los ensayos, se hizo el proceso de tratamiento térmico de temple y temple-revenido en cada una de las muestras con un tramo como testigo para metalografía y dureza. Cada una de las secciones fueron introducidas al horno a una temperatura de austenización de 900°C durante una hora y

enfriadas en aceite para el tratamiento de temple, para el revenido, se sometió el material a una temperatura de 450°C durante una hora y enfriado a la inercia del horno. La Fig. 2 muestra el esquema de las rampas de temperatura usadas con los tiempos de sostenimiento.

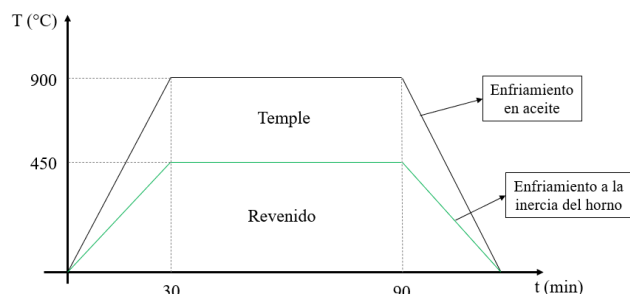


Fig. 2. Esquema representativo de las rampas de temperatura en el proceso de tratamientos térmicos

Preparación metalográfica

La preparación metalográfica se basó en el montaje de pequeños tramos de la sección transversal de cada una de las barras usadas en los ensayos (aproximadamente 5 mm de altura) en baquelita para una posterior preparación de la superficie a caracterizar con base en la norma ASTM-E8. Esta preparación se hizo para el análisis microestructural y de dureza posterior a los tratamientos térmicos.

Tracción

Las muestras previamente cortadas fueron ensayadas en una máquina universal SHIMADZU UH-50A bajo la norma ASTM E8. Para el ensayo se establecieron las medidas de la longitud calibrada y medición de diámetro antes de ser montadas a la máquina, luego de romperse se hicieron medidas nuevamente para las mismas variables y calcular la deformación unitaria y el porcentaje de reducción de área. Las probetas tratadas térmicamente fueron igualmente comparadas con el material en estado de entrega sin ningún tratamiento

Metalografía y dureza

Luego de la preparación metalográfica de cada uno de los “testigos” de las barras sometidas a tratamiento térmico, se hizo un análisis microestructural de cada una de las muestras preparadas con el uso de un microscopio de luz reflejada ZEISS Axioscope 5. Posteriormente se hicieron mediciones de dureza en un durómetro universal INNOVATEST Fenix 300 usando un indentador cónico de diamante para dureza Rockwell. Las muestras tratadas fueron comparadas con una sección del mismo material en estado de entrega sin tratamiento térmico.

Adicionalmente, se preparó la superficie con papel abrasivo n.ASTM 600 para un análisis químico con el uso de espectrómetro de emisión óptica BRUKER Q8 MAGELLAN.

Análisis de resultados

Finalmente, los resultados obtenidos fueron analizados y correlacionados con el fin de ver la influencia de los tratamientos térmicos en la respuesta mecánica y microestructural de cada una de las muestras ensayadas.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Metalografía y dureza

La TABLA I muestra la composición química del acero de las barras corrugadas ensayadas.

TABLA I. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL MATERIAL DE BARRA CORRUGADAS ENSAYADAS

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
%wt	0,308	0,210	1,094	0,015	0,029	0,168	0,016
Ni	Cu	Al	Co	Nb	Sn	Ti	V
0,114	0,249	0,002	0,009	0,002	0,025	<0.00020	0,020

Los resultados obtenidos en composición clasifican el acero como un AISI 1030 [14].

Las Fig. 2, 3 y 4 muestran las micrografías de las probetas en estado de entrega, templada y templada-revenida respectivamente.

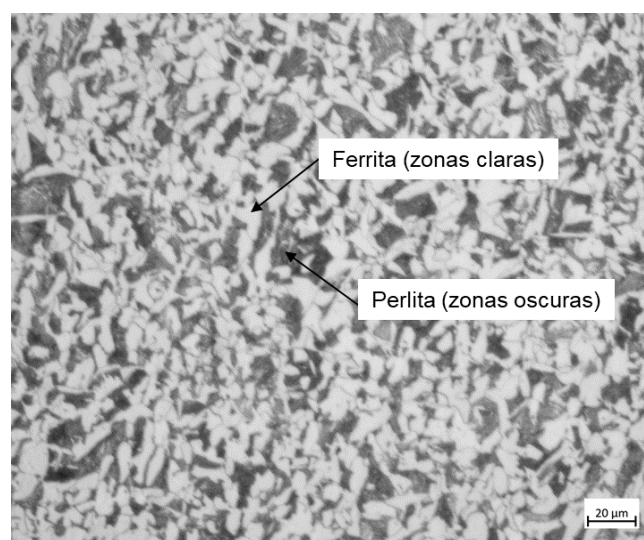


Fig. 2. Micrografía del material en estado de entrega.

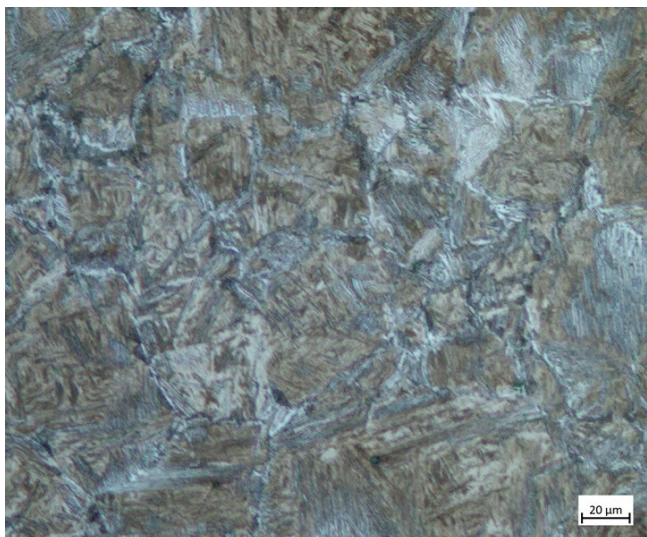


Fig. 3. Micrografía de la microestructura del material luego de tratamiento de temple.

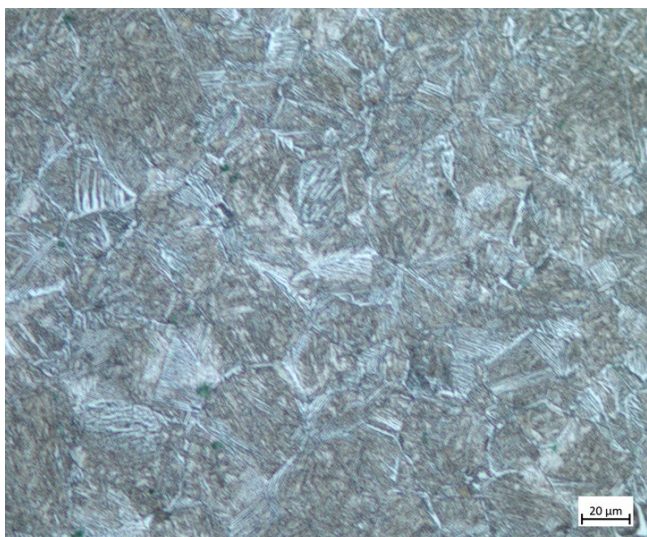


Fig. 4. Micrografía de la microestructura del material luego de tratamiento de temple y revenido.

La Fig.2 muestra claramente una microestructura acorde al contenido de carbono que se reportó en el análisis químico (Tabla I). Se observa una microestructura principalmente ferrítica, como es de esperarse para un acero hipoeutectoide, con granos perlíticos formado en el eutectoide en el proceso de solidificación del material. En la Fig. 3, para la muestra sometida a un tratamiento de temple, se observa una microestructura martensítica con la que se espera un aumento en la respuesta de las muestras a tracción y dureza. Para la Fig.4, se alcanza a observar granos martensíticos asociados al tratamiento de temple, sin embargo, como la muestra fue sometida de igual manera a un tratamiento de revenido, se alcanzan a identificar unas zonas más clara que dan indicios a la presencia de martensita revenida, lo que sugiere valores de tracción y dureza inferiores a la probeta templada pero superior la que fue ensayadas en estado de entrega.

La Fig. 5 muestra una gráfica de los valores de dureza medidos en cada una de las muestras.

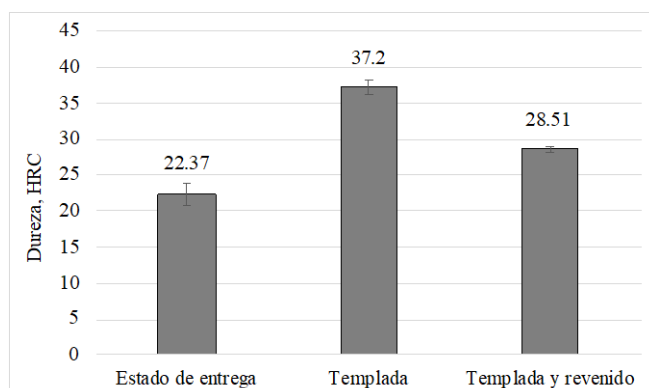


Fig. 5. Valores de dureza medidos en cada una las probetas ensayadas.

En la figura (Fig. 5) se alcanza a apreciar un aumento considerable de esta propiedad en función a los tratamientos térmicos como era de esperarse con lo observado en las micrografías (Fig.2, Fig.3, Fig.4). El valor más alto fue mostrado por la muestra sometidas al tratamiento térmico de temple con una dureza promedio de 37HRC, acorde a lo esperado teóricamente a la templabilidad de este material con base en el contenido de carbono reportado [12]. El dato medido más bajo fue para el material en estado de entrega alrededor de 22HRC. Para la probeta templada y revenida, se obtuvieron valores de dureza intermedios de alrededor de 28HRC, como era de esperarse después de someter una probeta templada a un proceso de alivio de tensiones con el tratamiento de revenido.

Tracción

Los resultados obtenidos para cada una de las probetas ensayadas bajo la prueba de tracción son mostrados en la fig. 6.

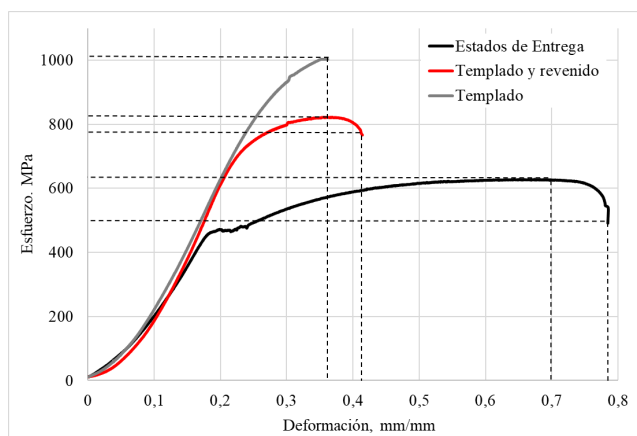


Fig. 6. Gráfica esfuerzo vs deformación para cada una de las muestras ensayadas.

La Fig. 6 evidencia claramente un aumento en la resistencia a la tracción con los tratamientos térmicos. Los valores alcanzados para el material en estado de entrega muestran claramente un menor módulo de Young en comparación con la muestra templada y templada-revenida, además de evidenciar una tenacidad más alta asociada directamente a la ductilidad del material como se alcanza a diferenciar en las Fig. 7, 8 y 9 (área bajo la curva esfuerzo vs deformación), donde se ve claramente la reducción del área con la formación del cuello luego de alcanzar el esfuerzo último. El esfuerzo máximo que se alcanzó en estado de entrega, que fue 628MPa, va acorde a lo especificado por catálogos comerciales de barras de acero corrugado donde se reporta un valor aproximado de 630MPa.



Fig. 7. Imagen de la zona de ruptura de la probeta en estado de entrega.



Fig. 8. Imagen de la zona de ruptura de la probeta templada.



Fig. 9. Imagen de la zona de ruptura de la probeta templada y revenida.

Las Fig. 10 y 11 muestran claramente lo enunciado anteriormente y mostrado en las Fig. 7, 8 y 9. La Fig. 10 muestra el porcentaje de elongación en comparación con la carga máxima de tracción soportada por cada una de las probetas y la Fig. 11 el porcentaje de reducción de área en función de la carga máxima.

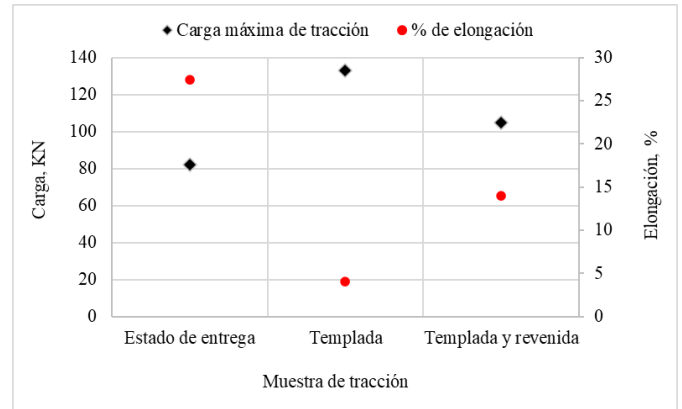


Fig. 10. Relación de carga máxima y porcentaje de elongación.

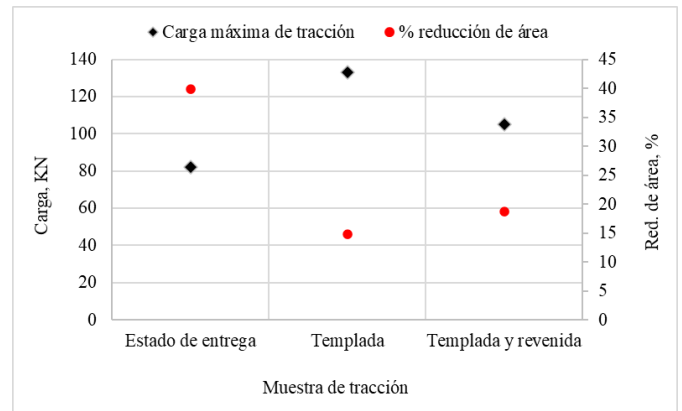


Fig. 11. Relación de carga máxima y porcentaje de reducción de área.

En cada uno de los casos, la propiedad de ductilidad, relacionada con el porcentaje de elongación y reducción de área, se comportan de manera inversa a la carga soportada por cada una de las probetas como se mencionó y mostró mostro en la Fig. 6. Para el material en estado de entrega, que fue el que soportó menos cargas antes de la ruptura, reportó el valor más alto de reducción de área y porcentaje de elongación, contrario a la probeta templada, que reportó el valor más bajo junto con el máximo valor de carga que se midió en los ensayos. Para la muestra templada-revenida se reportaron valores intermedios en cada caso.

IV. CONCLUSIONES

La propiedad de dureza aumenta significativamente con el tratamiento térmico de temple debido a cambios microestructurales en comparación con el material en estado de entrega. Además, el tratamiento de revenido para el alivio de tensiones reduce el valor de dureza en comparación con el conseguido después del temple.

Los esfuerzos de resistencia última del material de las probetas ensayadas cuando es sometido a tratamientos térmicos de aumento de dureza se incrementan significativamente en comparación con el estado de entrega.

Con el aumento de la resistencia a la tracción del material, se ve sacrificado el porcentaje de elongación y reducción de área, además la tenacidad de cada una de las muestras ensayadas se ve reducida igualmente con la reducción del área bajo la curva esfuerzo vs deformación (Fig. 6), relacionada directamente con la pérdida de ductilidad, evidenciado también en las Fig. 7, 8 y 9.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Laboratorio de Ensayos Mecánicos y Metalografía del Centro de Tecnología de la Manufactura Avanzada - SENA por su apoyo en los ensayos mecánicos y en el suministro de material utilizado para los ensayos

REFERENCIAS

- [1] P. Chess and W. Green, *Durability of reinforced concrete structures*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2019.
- [2] F. SUI, Q. CHEN, G. ZHU, and B. LIU, "Deformation Uniformity of Cold-Rolled Q235 Steel Rebar by FEM in Bending and Rolling Processes," *J. Iron Steel Res. Int.*, vol. 19, no. 8, pp. 37–42, 2012.
- [3] T. Achamyeleh, H. Çamur, M. A. Savaş, and A. Evcil, "Mechanical strength variability of deformed reinforcing steel bars for concrete structures in Ethiopia," *Sci. Rep.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–10, 2022.
- [4] D. K. Matlock, G. Krauss, and J. G. Speer, "New Microalloyed Steel Applications for the Automotive Sector," *Mater. Sci. Forum*, vol. 500–501, pp. 87–96, 2005.
- [5] N. R. Baddoo, "Stainless steel in construction: A review of research, applications, challenges and opportunities," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 64, no. 11, pp. 1199–1206, 2008.
- [6] B. H. Smith, S. Szyniszewski, J. F. Hajjar, B. W. Schafer, and S. R. Arwade, "Steel foam for structures: A review of applications, manufacturing and material properties," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 71, pp. 1–10, 2012.
- [7] S. K. Mandal, *Steel Metallurgy: Properties, Specifications and Applications*, First edit. New York: McGraw-Hill Education, 2015.
- [8] B. W. Schafer, "Cold-formed steel structures around the world," *Steel Constr.*, vol. 4, no. 3, pp. 141–149, Aug. 2011.
- [9] J. G. Speer, E. De Moor, K. O. Findley, D. K. Matlock, B. C. De Cooman, and D. V. Edmonds, "Analysis of Microstructure Evolution in Quenching and Partitioning Automotive Sheet Steel," *Metall. Mater. Trans. A*, vol. 42, no. 12, p. 3591, 2011.
- [10] Z. Cai, J. Zhao, and H. Ding, *Metals Handbook - Heat treating Vol. 4*. Detroit: ASM International, 2017.
- [11] G. Krauss, "12.11 - Quench and Tempered Martensitic Steels: Microstructures and Performance," S. Hashmi, G. F. Batalha, C. J. Van Tyne, and B. B. T.-C. M. P. Yilbas, Eds. Oxford: Elsevier, 2014, pp. 363–378.
- [12] L. C. F. Canale, L. Albano, G. E. Totten, and L. Meekisho, "12.03 - Hardenability of Steel," in *Comprehensive Materials Processing*, S. Hashmi, G. F. Batalha, C. J. Van Tyne, and B. B. T.-C. M. P. Yilbas, Eds. Oxford: Elsevier, 2014, pp. 39–97.
- [13] J. R. Davis, Ed., "Hardenability of Carbon and Alloy Steels," *Metals Handbook Desk Edition*. ASM International, p. 0, 01-Dec-1998.
- [14] G. et al Aggen, *ASM Metals Handbook - Properties And Selection Iron*, 10th ed. USA: ASM International, 1993.

BIOGRAFÍAS DE LOS AUTORES

Juan Camilo Sánchez González
 Doctor en Ingeniería – Ciencia y Tecnología de los Materiales
 Magíster en Ingeniería en Materiales y Procesos
 Ingeniero Mecánico
 Líder del Grupo de Investigación en Automatización, Comunicaciones Industriales, Pedagogía y Energías Alternativas – GACIPE

Investigador Junior – Minciencias
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4243-8436>

Jaime Alberto Jaramillo Carvalho
 Aspirante a Doctor en Ingeniería – Ciencia y Tecnología de los Materiales
 Magíster en Ingeniería en Materiales y Procesos
 Ingeniero Mecánico
 Dinamizador SENNOVA – Centro de Tecnología de la Manufactura Avanzada
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2213-6078>

Sebastián Londoño Cardona
 Aprendiz de Tecnología en Mantenimiento Mecánico Industrial
 Técnico en Mantenimiento de Motocicletas
 Integrante del semillero de Manufactura Aditiva y Maquinado no Convencional – MAMNCO

Santiago Salinas Agudelo
 Aprendiz de Tecnología Diseño de Elementos Mecánicos para su fabricación con herramientas de máquinas CNC
 Técnico Metalmecánico
 Técnico Mecanizado en productos Metalmecánicos
 Integrante del semillero de Manufactura Aditiva y Maquinado no Convencional – MAMNCO

Alejandro Vásquez Gallo
 Ingeniero Mecánico
 Estudiante de Maestría en Ingeniería en Materiales y Procesos
 Técnico en el Laboratorio de Ensayos Mecánicos y Metalografía del Centro de Tecnología de la Manufactura Avanzada

REALIDAD AUMENTADA: IMPACTO Y TENDENCIAS EN LA FORMACIÓN PROFESIONAL DE SOLDADURA MULTIPROCESOS.

Augmented reality: impact and trends in multi-process welding education and training.

Darwin Dubay Rodríguez
Grupo de investigación GICEMET
Centro Metalmecánico, CMM
SENA
Bogotá, Colombia
drodriguezp@sena.edu.co

Héctor Iván Tangarife
Grupo de investigación GICEMET
Centro Metalmecánico, CMM
SENA
Bogotá, Colombia
htangarife@sena.edu.co

Armando Salgado Otalora
Instructor SENNOVA
Centro Metalmecánico, CMM
SENA
Bogotá, Colombia
asalgadoo@sena.edu.co

Gustavo Guevara
Instructor de Soldadura
Centro Metalmecánico, CMM
SENA
Bogotá, Colombia
gguevarap@misena.edu.co

Juan Camilo Valencia Mendez
Aprendiz Semillero SIEM
Centro Metalmecánico, CMM
SENA
Bogotá, Colombia
juankamilo2603@gmail.com

Karen Viviana Peñuela López
Aprendiz mecánica de maquinaria industrial.
Centro Metalmecánico, CMM
SENA
Bogotá, Colombia
karenplv3@gmail.com

Resumen—El avance de las nuevas tecnologías en la actualidad ha traído el desarrollo de la realidad aumentada, entendida como una técnica para visualizar en un entorno simulado construcciones del medio físico y generar experiencias interactivas a través de dispositivos que manejan información gráfica. Uno de los campos de implementación que vale la pena resaltar, está relacionado con la educación; en donde se pretende generar habilidades y destrezas en diversas actividades de alto impacto en el hacer laboral que conllevan gran riesgo en la formación de capital humano, situación que se presenta en la soldadura convencional. Los problemas existentes en la actualidad están relacionados con los riesgos del personal, los costos elevados de inversión, impacto económico dado por el consumo de materiales en prácticas de entrenamiento, impacto generado por la cantidad alta de material desecho y los gases perjudiciales, tanto para el ambiente, como para las personas. Por lo tanto, el presente documento pretende realizar un análisis del efecto económico, ambiental, social y las tendencias de la realidad aumentada asociada a la soldadura multiprocesos. A través de una revisión de los avances tecnológicos a nivel mundial, en revistas indexadas, bases de datos, páginas web de empresas que se dedican a la fabricación de equipos e implementación de estas tecnologías, se identifican las tecnologías, los beneficios, el impacto favorable de la implementación y las tendencias en el uso de la soldadura multiprocesos y de la realidad aumentada. **Palabras Clave:** Soldadura convencional, realidad aumentada, educación, soldadura multiprocesos de realidad aumentada, herramientas interactivas.

Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA, Bogotá D.C. Colombia.

I. INTRODUCCIÓN

Según la Sociedad Americana de Soldadura AWS, por sus siglas en inglés, define la soldadura como proceso de coalescencia, con o sin la aplicación de presión [1], la coalescencia es la capacidad que tienen algunos materiales para fundirse.



Fig. 1. Diagrama de relación entre la realidad aumentada y el entrenamiento en procesos de soldadura.

Otros autores afirman que es un procedimiento de conformación metálica, es decir, la unión entre partes de objetos [2], esta actividad es indispensable en la industria de la construcción en estructuras de edificios o puentes, fabricación de barcos, aeronaves, mantenimiento y reparación.

La soldadura convencional es una práctica que se asocia a la necesidad de construir elementos funcionales de tipo metálico, involucra la necesidad de realizar una tarea operativa que implica riesgos para las personas que ejercen la actividad. Con el avance tecnológico actual, se ha venido desarrollando nuevas técnicas de acercamiento a la realidad reduciendo el riesgo al máximo, específicamente en procesos de capacitación y entrenamiento de personal mediante la realidad aumentada, técnica que implica el uso de tecnologías digitales que simulan un proceso de soldadura muy aproximado a la realidad.

Los problemas de la soldadura convencional están relacionados con los altos riesgos a la integridad física de las personas, por ejemplo, quemaduras por proyección de partículas, exposición a calor, efecto sobre la calidad de la visión y efectos negativos ergonómicos relacionados con las posiciones durante la ejecución del trabajo, por otro lado, los costos elevados de inversión en equipos infraestructura y personal capacitado para impartir formación en soldadura, impacto económico dado por el consumo de materiales en prácticas de entrenamiento electrodos, láminas, varillas, entre otros, impacto ambiental generado por la cantidad alta de material de desecho producto de todas las actividades de entrenamiento realizadas y los gases perjudiciales, tanto para el ambiente, como para el personal [3]. Por otro lado, en la figura No. 2, se muestran las ventajas y desventajas identificadas de usar simuladores de soldadura con realidad aumentada; resaltando entre las ventajas, la reducción en tiempo de entrenamiento, cantidad de materiales, costos de energía y reducción de gases contaminantes.

Por tanto, este artículo es un aporte que permita un acercamiento a las problemáticas existentes alrededor de la soldadura convencional, las aplicaciones de la soldadura de realidad aumentada, a través de una revisión bibliográfica que refleje las tendencias y el impacto positivo que se presenta con la implementación de estrategias para reducir los tiempos de entrenamiento, disminución de la curva de aprendizaje, lo que implica, menos horas de entrenamiento en taller para desarrollar habilidades y destrezas en la soldadura, como consecuencia la reducción de consumo de materiales de formación y el impacto ambiental.

En la figura No. 1, se muestra la relación de la realidad aumentada en aplicaciones de la educación, así como su relación con la pedagogía y entrenamientos en técnicas de soldadura. Este trabajo permite identificar las tecnologías existentes a nivel nacional e internacional de la realidad aumentada aplicada a soldadura multiprocesos, las tendencias tecnológicas y finalmente el análisis de su impacto en la formación en esta área.

Desventajas

Alto costo inicial.

Costo en capacitación inicial.

Capacitación en manejo de software.

No se pueden eliminar los procesos de soldadura.

Soldadura de Realidad Aumentada



Ventajas

Facilidad en procesos de enseñanza aprendizaje

Reducción en riesgos de accidente

Reducción de impacto por emisión de gases contaminantes

Reducción a cero de desechos sólidos

Reducción de compra de materiales de formación

Reducción de tiempos de entramiento

Atenuación de la curva de aprendizaje

Evaluación automática del aprendizaje

Bajo consumo energético

Fig. 2. Ventajas y desventajas identificadas en el uso de simuladores de soldadura con realidad aumentada.

II. ESTADO ACTUAL DE LA SOLDADURA CONVENCIONAL

En la actualidad existen varios tipos de soldadura convencional, los cuales se caracterizan principalmente por los electrodos y las técnicas usadas para cada labor.

La primera es la soldadura al arco con electrodos revestidos, este principio se basa en el establecimiento de un circuito eléctrico cerrado al poner en contacto la pinza con porta electrodos, conectada a un generador de corriente con el metal base, también conectado al mismo a través de la masa. La corriente al pasar por el efecto Joule, hace que se caliente la zona de contacto entre ambos, principalmente por el extremo del electrodo. El selector de intensidad del grupo de soldadura controla la corriente que pasa por el circuito cerrado. Al establecerse el arco rascando el electrodo sobre el metal salta la chispa. La temperatura que se genera se encuentra alrededor de los 5000 °C, tanto en el extremo del electrodo como en la zona afectada de la pieza que se funde. A medida que el electrodo se va consumiendo, el soldador hace avanzar el baño de fusión a lo largo de la unión a soldar. A mismo tiempo el calor se va dispersando por el metal base, bajando la temperatura por debajo del punto de fusión, por lo que la parte del baño deja de estar bajo el arco se va solidificando, formando un cordón de soldadura. Así como el proceso físico generado a través de los cambios de temperatura y estado de los materiales que intervienen en el proceso, existen técnicas y materiales que varían según el uso y características del producto final [4], en la figura No. 3 se muestra un resumen de los tipos de soldadura que existen. Adicionalmente, en el Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA); en específico

el centro metalmecánico, se imparte formación en soldadura con enfoque en el desarrollo de habilidades y destrezas para corrección de fallas y averías. Los programas que integran este enfoque son, el tecnólogo en mantenimiento electromecánico industrial y técnico en mecánica de maquinaria industrial. Esta formación incluye los siguientes tipos de soldadura:

- SMAW (Shielded Metal Arc Welding): Soldadura de arco con electrodo manual revestido: El arco necesario para lograr la fusión de los componentes se obtiene de un arco eléctrico formado entre el electrodo revestido en forma de varilla y la pieza de trabajo. La fusión del núcleo metálico del electrodo forma parte del depósito (Cordón de soldadura).
- GMAW (Gas Metal Arc Welding) – MIG (Metal Inert Gas) – MAG (Metal Active Gas): Soldadura de arco con electrodo metálico y protección de gas: Es un proceso de soldadura por arco bajo un gas protector con un electrodo consumible. El arco se produce mediante un electrodo formado por un hilo continuo y las piezas a unir quedando este protegido por una atmósfera circundante de gas inerte o activo. Esto protege la soldadura de los gases del medio ambiente evitando la oxidación del depósito.
- TIG-GTAW: Soldadura de arco con electrodo de tungsteno y gas: Se caracteriza por el uso de un electrodo consumible de tungsteno aleado con torio o circonio y la protección de un gas inerte (Argón). Se puede realizar sin o con aporte de material.

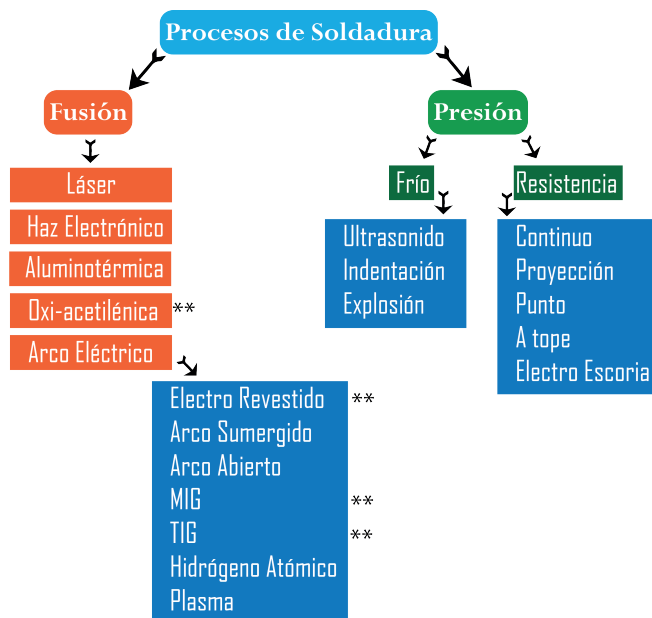


Fig. 3. Tipos de soldadura clasificados según técnica y estilo. [**] Tipos de soldadura que se enseñan en el centro metalmecánico.

III. EFECTOS DEL ENTRENAMIENTO EN SOLDADURA

La soldadura es un proceso que consiste en unir piezas metálicas del mismo material por medio de aplicación de calor,

con el fin de lograr la unión de piezas a través de presión o material fundido de aporte [5]. La fuente de calor puede ser: el arco eléctrico, la llama por combustión de gas y las resistencias eléctrica o mecánica [6]. En la actualidad predomina el uso de cuatro métodos de soldadura: la soldadura oxiacetilénica, la soldadura de tungsteno y gas inerte, la soldadura con electrodo revestido y por arco metálico y gas [7] [8]. La acción de soldar lleva implícito situaciones que conllevan efectos negativos sobre la salud humana, debido al tipo de tareas que se deben ejecutar, está relacionada con muchos riesgos, unos propios de la actividad, es decir, ligados directamente al operario, y otros, relacionados con condiciones externas, como el lugar de trabajo, las herramientas, los equipos entre otros. Existen algunos factores que se pueden resaltar; como los riesgos de accidente y riesgos higiénicos, los primeros relacionan posibles contactos eléctricos, directos e indirectos, proyecciones de partículas y explosión o incendio, para el caso del segundo se relacionan con exposición a radiación UV - Ultravioleta, la exposición a humos y gases [9]. Fuera del entorno de soldadura también se puede ver afectado el medio ambiente, dada la contaminación que se puede generar por gases o elementos sólidos producto de desecho, adicionalmente se pueden generar efectos sobre la condiciones sociales a los alrededores de los entornos de trabajo. Adicionalmente, estas situaciones demandan medidas de control y mitigación para todos los riesgos ocupacionales, tanto, durante la formación en el área de trabajo como en el ejercicio de la actividad por parte de personal especializado durante la ejecución de algún tipo de proyecto aplicado, para atenuar los múltiples impactos que se pueden generar.

III-A. Efectos ambientales

Los contaminantes más frecuentes están relacionados con humos de soldadura [10], procedentes de la constitución de las piezas, recubrimientos y los materiales de aporte [11]. Algunos contaminantes procedentes del metal base de las piezas son: hierro, manganeso, cromo, entre otros. Para el caso de los recubrimientos se pueden destacar, metálicos, barnices, resinas, cabe resaltar algunos contaminantes procedentes del recubrimiento de las piezas como: óxido de zinc, plomo, cromo, níquel, entre otros. En el caso de los materiales de aporte, se resalta la composición de la varilla o alambre desnudo, electrodo revestido, gas de protección, gas de combustión y fundentes, entre otros, se pueden citar algunos gases contaminantes como: óxidos de metales del hilo, óxido de cobre, zinc, berilio, plomo, plata [11] [6], níquel, arsénico, asbesto, manganeso, sílice [12]. Del tipo de soldadura depende la cantidad de gas emitido, por ejemplo, la soldadura de estaño, no emite tanto como la soldadura de electrodo, adicionalmente, hay influencia de la ubicación del soldador y la distancia respecto al punto de soldadura, la ventilación es otro aspecto de impacto directo, la ausencia de esta, favorece la acumulación, que es directamente proporcional a la cantidad de personas realizando la actividad en un mismo espacio, ahora, la forma de atenuar, esta relacionada con la protección de vías respiratorias, lo que depende del tipo de contaminante,

concentración y tipo de equipo de protección. El proceso de soldadura actual genera humos de soldadura, la generación puede ser causada por el tipo de material de soldado, tipo de soldadura, calidad de la ventilación y condiciones de trabajo, como consecuencia, se generan trastornos de la salud, intoxicaciones agudas, enfermedades a corto y largo plazo [11]. Por otro lado, la exposición a humos de soldadura, genera otros riesgos de enfermedades respiratoria como: irritación del tracto respiratorio [6], asfixia química, fiebre de los metales, efectos cancerígenos y sensibilizantes [11].

En el proceso de soldadura se generan además otros agentes contaminantes como gases, radiación ultravioleta y ruido. Los equipos de soldadura, ventilación y extracción de aire aumentan considerablemente el consumo de energía eléctrica. Afectación de la eficiencia energética y las metas del Sistema de Gestión de Energía, deterioro de las condiciones ambientales. El proceso de entrenamiento en técnicas de soldadura implica efectos significativos sobre las condiciones ambientales dados por la generación de residuos sólidos y de desecho como de la generación de gases. En general, la formación en soldadura es una actividad que se asocia a todos los riesgos durante el desarrollo de la curva de aprendizaje en el ejercicio de competencia.

III-B. Efectos en la salud humana

Para la evaluación del riesgo se debe poner a consideración varios factores como: el tipo de soldadura, el metal de base (tipo de revestimiento), el metal de aporte y protección (gases, escorias, fundentes, desoxidantes), tiempo e intensidad de la exposición y la eficacia y suficiencia de la ventilación [13]. El proceso de soldadura puede generar enfermedades laborales, esto sucede cuando se genera un desequilibrio físico, mental o social, la salud humana se puede ver afectada durante la ejecución de actividades inherentes al quehacer laboral. Son múltiples factores los que generan efectos negativos, por ejemplo: las radiaciones, el ruido, la temperatura, las chispas y el calor intenso al momento de soldar pueden causar quemaduras [12] otros de índoles ergonómico [14] [15], asociado a la ubicación del individuo respecto a la actividad que se realiza, dimensiones de elementos, alturas, posición de trabajo. La inhalación de humos de soldadura puede causar daños sobre la salud, los cuales se pueden clasificar en efectos agudos y efectos crónicos, los primeros se relacionan con la exposición a altas concentraciones en un intervalos de tiempo corto, puede ser una jornada de trabajo, puede causar irritación del tracto respiratorio, asfixia química, fiebre de los metales. Los segundos se relacionan con consecuencia de largos periodos a concentraciones moderadas de contaminantes. Se pueden evidenciar efectos crónicos sobre el sistema respiratorio y sobre otros órganos [11]. Los efectos pueden ser generados por proyección de fragmentos o partículas, contacto eléctrico, incendio, contacto químicos, ruidos, vibraciones, radiaciones no ionizantes, explosión, entre otros [7] [6]. Según la guía de prevención de riesgos en trabajos de soldadura, se presentan riesgos de electrocución, quemaduras, incendio, explosión, en todos los casos de afectación a la salud

humana [10]. Los soldadores tienen una alta incidencia de quejas musculoesqueléticas, incluyendo lesiones de la espalda, dolor de hombros, tendinitis, reducción de fuerza muscular, síndrome de túnel carpiano, síndrome de Raynaud (también conocido como síndrome de dedo blanco) y enfermedades de las coyunturas en las rodillas. Las posturas al trabajar (especialmente el soldar arriba de la cabeza, las vibraciones, y levantar cosas pesadas) pueden todas contribuir a estas afecciones [12]. Adicionalmente, otros riesgos a la salud están relacionados con daño ocular y afectación ergonómica [6].

III-C. Efectos económicos

El proceso de soldadura genera una alta demanda de materiales entre los que cabe resaltar, material base, metal de aporte como electrodos, platinas, alambres y gases. En general acceder a estos elementos implican costos elevados, sin embargo, en procesos de entrenamiento se le suma la necesidad de personal capacitado para ejecutar horas de entrenamiento y las cantidades de material que posteriormente se vuelven desecho. También se genera una alta demanda de materiales de formación, por otro lado, el uso permanente de los equipos de soldadura afecta su vida útil e incrementa los requerimientos de mantenimiento. Los equipos de soldadura, los de ventilación y extracción de aire son requeridos en el ambiente de aprendizaje de manera permanente mientras se ejecuta la actividad, en general, presentan un alto consumo de energía eléctrica, incrementando, tanto los costos del servicio como la huella de carbono.

III-D. Efectos sociales

El humo de soldadura está compuesto por partículas y gases que causan afectaciones a la salud; la exposición prolongada a los mismos, por parte de personas en entrenamiento o inclusive fuera de este entorno, aumenta la probabilidad de enfermedades respiratorias y del sistema nervioso. El humo que se genera en espacios en los que se realiza la soldadura afecta a otros entornos. Si este no es captado a través de extractores y no se realiza el almacenamiento de las partículas, las personas alrededor pueden llegar a inhalar cantidades significativas que a corto plazo puede no mostrar consecuencias, sin embargo, a largo plazo sí puede ser significativo. Adicionalmente se puede generar inconformidad lo que puede traer como consecuencia posibles quejas de la comunidad en los alrededores.

III-E. Efectos tecnológico

Las prácticas de soldadura están limitadas por la disponibilidad de equipos que, debido al uso permanente, tienen una menor vida útil y mayores requerimientos de mantenimiento. La curva de aprendizaje con estos equipos es muy larga respecto a la que se logra cuando los aprendices reciben entrenamiento con simuladores multiproceso de realidad aumentada. Siendo así, la disponibilidad de recursos tecnológicos reduce la curva de aprendizaje, esto implica que se requiere mayor tiempo de práctica con equipos convencionales, impactando directamente el uso de recursos. Se generan dificultades para alcanzar desempeño dentro de marcos de referencia internacionales

para soldadores, es decir, se limita a la soldadura convencional, sin lograr actualizar en nuevas tecnologías para desarrollar la destreza, es decir, se presenta un desconocimiento de otras técnicas relevantes.

IV. NUEVAS TECNOLOGÍAS PARA ENTRENAMIENTO EN SOLDADURA

IV-A. Nuevas tecnologías

Los avances en las tecnologías de la información y la sistematización han permitido en los actuales contextos de la formación profesional, modificar metodologías tradicionales en el desarrollo de habilidades mediante herramientas basadas en objetos virtuales ya sea total o parcialmente, o denominadas realidad virtual y realidad aumentada o también mixta. Como primera medida en la realidad virtual más reconocida como (RV) se cuenta con un entorno visual inmersivo, es decir, se observan elementos y escenarios en 3 dimensiones tan reales como el usuario lo requiera debido a que puede interactuar gracias al uso de mandos específicos ya sea de guantes o el propio seguimiento de nuestra cabeza. En tanto que la realidad aumentada (AR) no solo posee objetos digitales, sino que en tiempo real se complementa con el entorno del mundo físico real. Es decir, se visualiza todo alrededor, se hace uso de gafas especialmente diseñadas, cascos o lentes de celulares, se usa una CPU que gestione la realidad virtual que se imprime sobre la real. Funciona con tecnología multimedia, modelado 3D, seguimiento y registro de objetos, interacción inteligente, detección de imágenes y más. En tanto que la realidad mixta (MR) es un entorno que mezcla los mejores aspectos de RV y la AR, unificando la experiencia para que solo se requiera un único casco o gafas para poder utilizar una u otra. Permite interactuar en entornos virtuales con objetos reales o viceversa [16].

Tanto la AR, la RV y la mixta han revolucionado el panorama de la formación profesional, dado que se encuentran aplicaciones en la formación de los futuros técnicos soldadores donde la inmersión incluye sonidos, iluminación, generación de luz y tacto real. Como se puede apreciar en la figura No. 4, el uso de la AR requiere de accesorios y equipos especializados como es el caso de plataformas, software, careta adaptada con cámaras y audífonos, las piezas de trabajo o denominadas probetas las cuales cuentan con una serie de marcadores o signos para identificar la posición y el avance, electrodos y antorchas, guantes y todos elementos de seguridad. Adicionalmente a los elementos físicos algunas de las soluciones de AR incluyen la técnica de aprendizaje de gamificación con lo cual se mejora la motivación de los aprendices, la metodología *augmented training* (AT), la teoría y la evaluación de los ejercicios realizados indicando las posibles fallas como se puede apreciar en la figura No. 4 y figura No. 5A, proporcionando a los instructores todas las herramientas necesarias para supervisar al aprendiz individualmente.

Otras soluciones en el ámbito de la formación profesional anteriores a la AR, es la RV en la cual también se requiere de un equipo físico y accesorios especializados como se puede ver en la figura No. 5B. Además, hace uso de los entornos virtuales

inmersivos (EVI) que se pueden seleccionar de acuerdo al gusto como el presentado en la figura No. 5C. Donde al igual que el AR permite generar sonidos, simula chispa, escoria, esmerilado y enfriamiento de soldaduras, realiza un seguimiento y califica los parámetros de soldadura clave, incluidos el ángulo de trabajo, el ángulo de desplazamiento, la velocidad de desplazamiento, la distancia y la posición.



Fig. 4. Accesorios requeridos en la implementación de la realidad aumentada en la especialidad de soldadura [17]

IV-B. Realidad aumentada en soldadura

Como parte de los avances de la tecnología y su integración en los procesos de enseñanza y aprendizaje, los procesos de soldadura han sido impactados por este fenómeno. Unos de los primeros avances es la generación y posterior integración con ambientes virtuales de soldadura integrando entornos donde se simulan elementos gráficos, audiovisuales y en algunos a casos hápticos; sin embargo, muchos soldadores indican que no es lo mismo entrenarse en un ambiente virtual que en uno real. Por tal motivo, se introduce un nuevo concepto como lo es la realidad aumentada, la cual integra elementos reales con elementos virtuales, mejorando la interacción e integración con las herramientas y métodos que permiten establecer parámetros de entrenamientos más realistas [18].

En el ambiente de formación de la Figura No. 6, se muestra el taller de soldadura que contiene los simuladores de realidad aumentada que permiten realizar un entrenamiento previo usando herramientas que interactúan con un entorno usando herramientas de interacciones reales. Una de las ventajas es la calificación de los movimientos y ejecución de la técnica del soldador, lo cual permite un mejor comportamiento en los procesos de enseñanza - aprendizaje que permite que los aprendices se entrenen y perfeccionen las técnicas antes de pasar a una práctica de soldadura real. Generalmente el equipo simulador de soldadura contiene niveles de dificultad, así como diferentes entornos que definen el grado de complejidad y habilidades necesarias que requieren los aprendices durante el ejercicio de la soldadura.

V. TENDENCIAS EN PROCESOS DE ENTRENAMIENTO EN SOLDADURA MULTIPROCESOS

Las tendencias actuales de la soldadura están basadas en los cambios tecnológicos dentro diversas disciplinas y campos de investigación con la consecuente aplicación para mejorar un proceso o un procedimiento, caso particular de las labores de



Fig. 5. A) Practica de soldadura mediante realidad aumentada. B) Equipo de realidad virtual en la formación de profesionales. C) Entorno realidad aumentada en la formación como soldador [17].



Fig. 6. Ambiente de formación en soldadura del Centro Metalmecánico, entrenador con realidad aumentada.

soldadura en el sector industrial y del entrenamiento en las etapas iniciales de la generación de la habilidad en entornos académicos.

La incursión en el campo de la soldadura de la robótica es un desafío, permite realizar la tarea con precisión y de manera autónoma y se puede ejecutar durante largos periodos de tiempo. Adicionalmente, de apoyo a la robótica, se está integrando el machine learning para conocer el estado operativo de un robot de soldadura, esto integrado con la configuración de parámetros para evaluar la calidad de la soldadura en tiempo real, según Chen [19], se clasifican los datos y propone una estrategia paralela para predecir la calidad de las uniones para diferentes patrones de distribución los cuales funcionan bien con grandes cantidades de datos distribuidos de formas complejas [20]. Una de las tendencias principales a usar aprendizaje máquina para clasificación de características deseadas de la soldadura, y el aprendizaje mediante redes neuronales para realizar mejorar rendimiento del proceso a través de vision artificial, siendo así, otro trabajo alineado con Chen es el de Wei et al, en donde se afirma que la detección de puntos de soldadura requiere visión artificial basada en aprendizaje profundo, sin embargo, implica que el proceso sea muy lento y costoso, por tanto, propone redes antagónicas generativas GAN, para generar muestras de datos y mejorar el rendimiento de clasificación de defectos de soldadura por puntos, el enfoque propuesto, puede generar imágenes de defectos de soldaduras de manera eficiente y a bajo costo [21].

Por otro lado, se han implantado simuladores termo mecánicos para anticipar características de la soldadura como dureza, adquieren importancia, dado que permite probar los materiales y aleaciones previo a la implementación en sistemas reales, es el caso estudiado por Jun et al de la universidad de Wollongog en Australia y el instituto de investigación tecnológica de China, en donde realizan un estudio enfocado a la soldadura a tope por chispa de acero de baja aleación y alta resistencia para identificar la influencia microestructural y mecánica dada por aumento de cantidad de ferrita en la zona de unión [22], el estudio buscaba reproducir con precisión los procesos térmicos, mecánicos y optimizar los parámetros del proceso a través de diferentes tolerancias de recalque en el simulador termomecánico Gleeble.

Los simuladores no solamente aplican para el componente mecánico y de respuesta de los materiales, sino también, se ha integrado a las nuevas tecnologías a través de la realidad virtual para entrenamiento, la cual está relacionada con la creación de entornos inexistentes o artificiales, es básicamente un mundo virtual desde cero, que puede estar relacionado con gafas para sumergir en un ambiente o con una pantalla que cumple la función de permitir visualizar, universidades de Taiwán y la Escuela secundaria industrial, realizaron una herramienta de aprendizaje virtual para un curso de soldadura. El principal reto es reducir el desperdicio de material de prueba y de inmersión, y aportar en el desarrollo de habilidades de quien se entrena, una restricción es la cantidad de equipos para entrenar en soldadura, el proyecto relaciona el desarrollo de una aplicación móvil y la construcción de un curso de bajo

costo [23].

Paralelo a la realidad virtual, una tendencia en el campo de la soldadura es la realidad aumentada que hace uso del entorno en el que está el individuo y agrega elementos virtuales, básicamente es un entorno real con elementos virtuales, en el campo de la soldadura, se enfoca en el desarrollo de la habilidad, es el caso de los equipos de realidad aumentada. La soldadura siempre ha demandado tiempos prolongados para desarrollar las destrezas y habilidades, riegos físicos, contaminación ambiental, repetición de tareas, costos elevados por consumo de material, con los equipos actuales de inmersión, permite tener una estación de soldadura idéntica a una real, cascos, electrodos, probetas, antorcha, y los equipos entregan resultados respecto a distancias de soldadura, desplazamiento, longitudes, velocidad, entre otros aspectos [24], adicionalmente los sonidos, la chispa, las discontinuidades, permiten que el soldador aprenda a responder a los diferentes estímulos externos, entender cómo se configura la máquina es otro aspecto relevante que puedan simular mediante el ingreso de parámetro al equipo soldador [25]. Una de las tendencias futuras, es la integración de la realidad virtual con la realidad aumentada para generar lo que se denomina actualmente como realidad mixta.

VI. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Como parte de la integración de las tecnologías de la información en los procesos de formación en soldadura, se encontraron enormes ventajas a la hora de usar la realidad aumentada como parte de las prácticas de los aprendices. Se evidencia un ahorro significativo en los materiales de formación, desgaste de los equipos de soldadura y equipo de protección, reducción en el consumo de energía eléctrica, reducción en la contaminación por gases, disminución de riesgo en la salud y finalmente se observa una ganancia significativa en la destreza previa generando confianza del aprendiz antes de enfrentarse a prácticas físicas. Como trabajo posterior, se propone la estimación y diseño de métricas que permitan la medición del impacto desde las ventajas y desventajas identificadas en este trabajo, así como también el impacto desde el punto de vista pedagógico.

RECONOCIMIENTO

Grupo de investigación GICEMET del Centro Metalmecánico - CMM. Programa SENNOVA. Área de mantenimiento, programas de formación asociados y semillero de investigación SIIEM.

REFERENCIAS

- [1] AWS, *Structural Welding Code - Steel*, 20. 1981, vol. 552, ISBN: 0871716100.
- [2] P. M. Solá, *Soldadura industrial: clases y aplicaciones*, Primera, Editores Boixereu, ed. Barcelona, España: Marcombo, 1992, ISBN: 84-267-0875-7.
- [3] G. Atencio y A. Yuriela, "Peligros y riesgos asociados a las labores de soldadura piscina olímpicas David", Tesis doct., Universidad especializada de las Américas, 2019, pág. 119.
- [4] A. M. Carlos, *Manual de prácticas de soldadura*, Primera, Ediciones de la U, ed. Bogotá, Colombia: Ediciones de la U, 2015, ISBN: 978-958-762-269-0.
- [5] R. Rodrigo, "Efectos de la Soldadura en los Metales", Universidad Nacional Experimental Politécnica de la FANB, Carúpano, Venezuela, 2020, pág. 9.
- [6] B. A. Manuel, "Los riesgos de la soldadura y su prevención", *Centro Nacional de Nuevas Tecnologías (CNNT). INSHT*, pág. 13, mayo de 2012.
- [7] R. R. Sue Lizeth, "Identificación, Evaluación Y Medidas Preventivas De Riesgos Laborales En El Área De Soldadura En Los Procesos De Corte Y Suelda En La Construcción De Estructura De Campers En Una Empresa De Servicios Petroleros Del Oriente", Universidad Internacional SEK Facultad De Ciencias Del Trabajo Y Comportamiento Humano, Quito, Ecuador, 2018, pág. 199.
- [8] Oygasa, *Manual del soldador*, Primera, Infrasal, ed. Salvador: OG, Oygasa, 2020, pág. 88.
- [9] J. T. del Pino, *NTP 494: Soldadura eléctrica al arco: normas de seguridad*, Ministerio de trabajo y asuntos sociales España, ed. Madrid, España: Instituto Nacional de seguridad e higiene en el trabajo, 1998, pág. 10.
- [10] c. d. e. y. e. Junta de extremadura, *Guía de prevención de riesgos en trabajos de soldadura*, Servicio de salud y riesgos laborales de centros educativos, Junta de extremadura, ed. Junta de extremadura, España: Junta de extremadura, dirección general de personal docente, 2020, pág. 24.
- [11] R. Jesús María, *El soldador y los humos de soldadura*, Primera, OSALAN, ed. País Vasco, España: OSALAN, Instituto Vasco de seguridad y salud laborales, 2009, ISBN: 978-84-95859-56-3.
- [12] D. of workers compensation, *Los Peligros Relacionados con la Soldadura*, producido por la División de Compensación para Trabajadores (Division of Workers' Compensation – DWC, ed. Texas, EEUU: Instituto Nacional de seguridad e higiene en el trabajo, 2020, pág. 10.
- [13] M. B. Alonso, *Los riesgos de la soldadura y su prevención*, Centro Nacional de Nuevas Tecnologías (CNNT). INSHT, ed. Madrid, España: Centro Nacional de Nuevas Tecnologías (CNNT). INSHT, 2012, pág. 13.
- [14] G. F. Casado, "Riesgos laborales en los procesos de soldadura por fusión", Universidad de León Facultad de Ciencias del Trabajo, León, España, 2019, pág. 129.
- [15] P. D. Casado, "Análisis, evaluación y control de riesgos de un soldador de la industria del metal", Universidad República de navarra, Navarra, España, 2013, pág. 131.
- [16] Y. FERNÁNDEZ, "Diferencias entre realidad aumentada, realidad virtual y realidad mixta", 2022. dirección: <https://www.xataka.com/basics/diferencias-entre-realidad-aumentada-realidad-virtual-y-realidad-mixta>.
- [17] Soldamatic, "Augmented training for welding", 2022. dirección: [https://seaberyat.com/en/soldamatic/?gclid=CjwKCAiA7IGcBhA8E%](https://seaberyat.com/en/soldamatic/?gclid=CjwKCAiA7IGcBhA8E%253D)

20iwAFfUDsSSZGdDnpLTCH6NwCxbpYV8XCE_
FV9t8ZfviS_W%2008IYOEDM84sDC4xoCIxQQAxD_
BwE.

- [18] LincolIn, “Primer equipo en Colombia de entrenamiento de soldadores por realidad virtual”, *Revista Acosend*, pág. 14, abr. de 2014, ISSN: 2357-3066.
- [19] G. Chen, B. Sheng, R. Luo y P. Jia, “A parallel strategy for predicting the quality of welded joints in automotive bodies based on machine learning”, *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 62, págs. 636-649, ene. de 2022, ISSN: 02786125. DOI: 10.1016/j.jmsy.2022.01.011.
- [20] —, “A parallel strategy for predicting the quality of welded joints in automotive bodies based on machine learning”, *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 62, págs. 636-649, ene. de 2022, ISSN: 02786125. DOI: 10.1016/j.jmsy.2022.01.011.
- [21] W. Dai, D. Li, D. Tang, H. Wang e Y. Peng, “Deep learning approach for defective spot welds classification using small and class-imbalanced datasets”, *Neurocomputing*, vol. 477, págs. 46-60, mar. de 2022, ISSN: 18728286. DOI: 10.1016/j.neucom.2022.01.004.
- [22] J. Wang, C. Ma, J. Han, Z. Jiang y V. Linton, “Acquisition of HSLA steel weld joints with excellent mechanical performance through flash butt welding physical simulation”, *Materials Letters*, vol. 303, nov. de 2021, ISSN: 18734979. DOI: 10.1016/j.matlet.2021.130511.
- [23] C. H. Lai, T. E. Wu, S. H. Huang e Y. M. Huang, “Developing a virtual learning tool for industrial high schools’ welding course”, en *Procedia Computer Science*, vol. 172, Elsevier B.V., 2020, págs. 696-700. DOI: 10.1016/j.procs.2020.05.091.
- [24] Techsoft, “Augmented Reality Welding Simulation System”, 2022. dirección: <https://www.techsoft.co.uk/products/welding>.
- [25] Lincoln, “VRTEX® 360® Single User Virtual Reality Welding Training Simulator in Crate”, 2022. dirección: <https://www.lincolnelectric.com/en/products/k4601-3>.

OPTIMIZACIÓN DE LA MEZCLA ENTRE LDPE Y PLA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE EMPAQUES PLÁSTICOS DE UN SOLO USO.

Optimization of the mixture between LDPE and PLA for the characterization of single-use plastic packaging.

Ing. Diego Andres Diaz Cuervo, MSc. Lina Marcela Crespo Delgado, MSc

Centro Metalmecánico, SENA. e-mail: ddiaze@sena.edu.co

Centro Nacional de Asistencia Técnica a la Industria ASTIN, SENA. Grupo de investigación GIDEMP. e-mail: lmcrespo@sena.edu.co

Resumen – La mezcla entre un plástico sintético LDPE (Polietileno de Baja Densidad) derivado del petróleo y un polímero natural PLA (Ácido Poliláctico) derivado del ácido láctico fue desarrollada en este trabajo. Con la unión de estos dos materiales se pretende crear una mezcla, donde ambos materiales se comporten como uno solo, agregando agentes de acoplamiento y estabilizador térmico para poder transformarlo en un empaque plástico de un solo uso. Este producto se desarrollará con muestras de película plástica, utilizando diferentes proporciones entre LDPE y PLA con el fin de determinar la mezcla ideal que permita la verificación de dispersión, distribución y homogenización.

Palabras clave: homogenización, dispersión, distribución, mezcla, LDPE, PLA.

Abstract - The mixture between a synthetic plastic LDPE (Low Density Polyethylene) derived from petroleum and a natural polymer PLA (Polylactic Acid) derived from lactic acid was developed in this work. With the union of these two materials, it is intended to create a mixture, where both materials behave as one, adding coupling agents and thermal stabilizer to be able to transform it into single-use plastic packaging. This product will be developed with plastic film samples, using different proportions between LDPE and PLA to determine the ideal mixture that allows the verification of dispersion, distribution, and homogenization.

Keywords: homogenization, dispersion, distribution, mixing, LDPE, PLA.

I. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la mayoría de los productos que consumimos vienen contenidos en materiales plásticos, debido a los beneficios que son innegables: es económico, liviano y fácil de producir. Muchas empresas que fabrican estos productos con materiales plásticos tienen un objetivo de responsabilidad social y corporativa en su plan estratégico de reducir el impacto ambiental de los empaques con un menor consumo energético, desde la producción de la materia prima hasta la disposición final del empaque, teniendo en cuenta los costos y funcionalidad. Los empaques tienen como función contener y proteger el envase durante la cadena de distribución, adicionalmente deberá cumplir con los requisitos de marketing y ventas. También es importante mencionar que los envases, empaques y embalajes deben asegurar la salud del consumidor, propiciando elementos de seguridad que garanticen la integridad del producto final [1].

En la actualidad, algunos investigadores se han interesado en el desarrollo de mezclas que unen diferentes tipos de polímeros (natural y sintético) para el desarrollo de empaques plásticos de un solo uso, mezclando diferentes proporciones de materia prima y aditivos para demostrar su efectividad. Sin embargo, en estas investigaciones no se han considerado técnicas de caracterización que permitan validar los aspectos de la mezcla como la dispersión, distribución y homogenización. Por eso, este trabajo propone desarrollar una mezcla de Polietileno de Baja Densidad (LDPE) y Ácido Poliláctico (PLA) para estudiar la caracterización de empaques de plásticos de un solo uso. Este trabajo desarrolló mezclas de LDPE/PLA en diferentes proporciones utilizando un diseño

experimental mixto de factores aleatorios y fijos para su optimización.

II. ANTECEDENTES

En Colombia actualmente existe un proyecto de ley que entrará en vigor a partir del año 2023, donde se regula el uso de plásticos de un solo uso: bolsas, rollos de película extensible para empaque de alimentos a granel, rollos de película extensible y de burbuja utilizados como envoltura, entre otros [2]. Además, el país con el fin de articular con la metodología de Economía Circular que se plantea en el mundo propone una producción sostenible en la generación de nuevos materiales, reutilización y recuperación de materias primas, minimizando la generación de residuos. Por este motivo, diferentes investigadores se han visto interesados en estudiar materiales alternativos que permitan que este proceso sea amigable para el medio ambiente y para los fabricantes de los diferentes productos.

En la actualidad, la necesidad de migrar a materiales más amigables con el medio ambiente ha impulsado a la creación constante de nuevos materiales con características biobasados. En este camino, se han presentado desafíos en el procesamiento de las materias primas utilizadas para la fabricación de estos componentes, por ende, para mejorar la trabajabilidad de estos en el proceso se han propuesto diversas mezclas de los polímeros biobasados con polímeros sintéticos.

El Ácido Poliláctico (PLA) es el plástico biodegradable más estudiado y utilizado [3]. El PLA se sintetiza directamente de ácidos orgánicos naturales o moléculas de ácido láctico monomérico, haciendo que también tenga la clasificación de material biobasado [4].

Clizia Averza (2022) estudió las mezclas de PLA con Succinato de Polibutileno (PSBA) que es otro polímero natural y la mezcla PLA/PSBA con adición de PoliCaprolactona (PCL). Las mezclas de PLA/PCL/PSBA evidenciaron mayor flexibilidad que las mezclas PLA/PSBA por efecto de la PoliCaprolactona, en general, ambas mezclas mostraron valores de índice de fluidez de 29,5 g/10min. En la evaluación de las propiedades de tracción se evidenció que las mezclas que tiene PCL presentan mayor ductilidad [5].

Por otro lado, Gang Li (2011) estudió diferentes mezclas de almidón termoplástico (TPS) con Polietileno de Baja Densidad (LDPE) donde encontró una mejor distribución y dispersión en la mezcla 50/50, aportando un aumento significativo del área superficial para el TPS, haciendo que aumente la tasa de biodegradación de la mezcla [6].

El Polietileno de Baja Densidad (LDPE) tiene un papel importante cuando se habla de la fabricación de empaques plásticos de un solo uso, por sus propiedades de bajo peso molecular que tiene como ventaja facilitar la dispersión de los materiales que participan en la mezcla. Los polímeros de Polietileno son generalmente insolubles en disolventes y de

naturaleza hidrófoba. Estas propiedades permiten su uso en aplicaciones industriales y de consumo y brindan la ventaja de ahorrar costos en la industria de procesamiento. Son solubles en hidrocarburos y disolventes clorados a altas temperaturas. Su solubilidad aumenta con el parámetro del índice de fluidez (gr/10min) y disminuye con el aumento de densidad y cristalinidad [7]. Por eso, este trabajo desarrolló mezclas de LDPE/PLA en diferentes proporciones utilizando un diseño experimental mixto de factores aleatorios para el análisis de los resultados de las técnicas de caracterización para la optimización de la mezcla.

III. METODOLOGÍA

DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Los diseños de experimentos estadísticos son la conjugación de las hipótesis y supuestos, con los datos reales que se puedan obtener en un experimento. Por lo cual es necesario determinar cuáles son las pruebas que se deben realizar y de qué manera, para obtener datos reales que, al ser analizados, se den evidencias objetivas que respondan el interrogante planteado.

Para el desarrollo del experimento, se planteó un *diseño factorial* que tiene como objetivo estudiar el efecto de varios factores sobre una o varias respuestas, cuando se tiene el mismo interés sobre todos los factores. El modelo que se aplicará al diseño de experimento es un *modelo mixto de factores aleatorios y fijos*. Por ejemplo, si el factor *A* es aleatorio y *B* es fijo, el modelo de componentes de varianza de la Ecuación 1 [8].

$$Var(Y_{ijk}) = a_a^2 + a_{a\beta}^2 + \sigma^2$$

Ecuación 1.

DETERMINACIÓN DE LAS VARIABLES DE ENTRADA

Para determinar el diseño de experimento a usar en la mezcla entre LDPE y PLA, se deben tener en cuenta las variables de la *Tabla 1* y *Tabla 2*, de la misma manera se debe realizar un arreglo factorial para considerar todas las posibilidades de combinación de los niveles de los factores.

Tabla 1. Variables de entrada del diseño de experimentos factorial.

Independientes	Velocidad RPM %, Mezclas LDPE-PLA, Tiempo de permanencia S, Temperatura del material °C
Dependientes	Película extruida LDPE-PLA (Se analizará por resistencia a la tracción y FTIR)
Observación (Fijas)	Temperatura ambiente, Agente de acople al 3%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Variables independientes de proceso para la fabricación de las películas de LDPE-PLA.

Materia prima	Temp. [°C]		Cantidad [Kg]
	Mín.	Máx.	
LDPE	155	215	20.00
PLA	160	190	20.00

a. Variables respecto a LDPE y PLA.

Máquina	Vel. [%]	Tiem. [S]
Extrusora mono husillo KHUNE	80	45
	70	35

b. Variables respecto a la máquina.

Mezcla	Mezcla LDPE-PLA [%]
1	50-50
2	40-60
3	60-40

c. Porcentajes de mezclas propuestas.

Fuente: Elaboración propia.

IV. RESULTADOS

Por tener recursos presupuestales limitados, se contó con la posibilidad de ejecutar 10 experimentos, los cuales se seleccionaron teniendo en cuenta las mezclas más utilizadas en la industria. En la *Tabla 3* se muestran los 10 experimentos más representativos.

Tabla 3. Número de experimentos a realizar en el diseño de experimento.

Experimento	Mezcla LDPE-PLA [%]	Agente Acoplante [%]	Temp. Mezcla LDPE min. - máx. [°C]	Temp. Mezcla PLA min. - máx. [°C]	RPM Husillo [%]	Tiempo de permanencia [s]
1	50-50	3	155	160	70%	35
2	40-60	3	155	160	70%	35
3	60-40	3	155	160	70%	35
4	50-50	3	215	190	70%	45
5	40-60	3	215	190	70%	45
6	60-40	3	215	190	70%	45
7	50-50	3	155	160	80%	35
8	40-60	3	155	160	80%	35
9	60-40	3	155	160	80%	35
10	50-50	3	215	190	70%	35

Fuente: Elaboración propia.

Determinar la dispersión, distribución y homogenización de la mezcla entre el LDPE y PLA.

NORMAS ASTM

a. *FTIR (Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier).*

Este ensayo se realizó bajo la norma ASTM E1252-2, que utiliza la interferometría para codificar información sobre un material colocado en el haz de infrarrojos. La Transformación de Fourier decodifica la señal, lo que da lugar a espectros que los analistas pueden utilizar para identificar el material. Los patrones en los espectros ayudan a identificar la muestra, ya que las estructuras específicas en las moléculas muestran huellas IR específicas [9].

b. *Resistencia a la tracción de películas plásticas.*

Este ensayo se realizó bajo la norma NTC 942 ASTM D 882-18, para determinar la capacidad del material de soportar cargas de estiramiento, por lo que debe evaluarse en ambos sentidos puesto que no siempre es posible saber en qué dirección soportará la carga [10].

PRUEBAS REALIZADAS

a. *FTIR (Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier).*

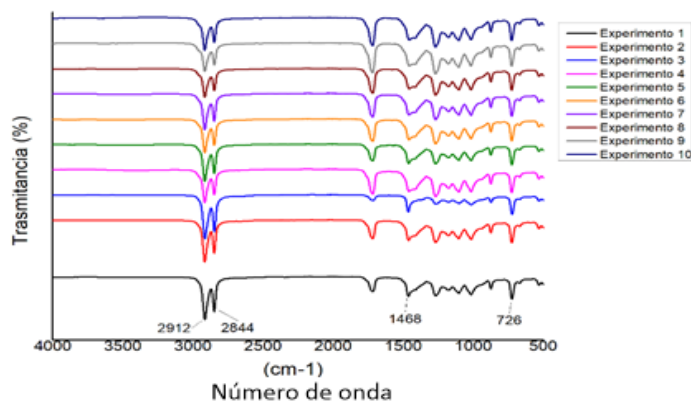


Fig. 1. Identificación de los picos asociados al LDPE en los espectros FTIR de las mezclas de LDPE-PLA. Fuente: Elaboración propia software ORIGIN.

En la *Fig. 2* se identificaron las bandas (picos) asociadas al PLA en las mezclas de LDPE-PLA. En el *Experimento 1* se puede observar el número de onda (cm⁻¹) se encuentra en el rango de: 2800 a 3000 cm⁻¹, 1300 a 1500 cm⁻¹ y 650 a 800 cm⁻¹ respectivamente.

Se identifican que las bandas (picos) asociados al PLA fueron: 1457 y 1468 cm⁻¹ se originó a partir de la vibración de estiramiento del grupo carbonilo (C=O), que se encuentra presente en las moléculas de PLA.

Lo mismo sucede con las bandas (picos) 1180 y 1726 cm⁻¹ ya que se caracteriza la vibración de la flexión asimétrica del grupo funcional -CH₃-.

La banda (pico) 1180 cm^{-1} representó el estiramiento del grupo funcional carbonilo (C-O-C) por la vibración, ya que (C-O) formó enlaces con diferentes átomos o funcionales grupos para desarrollar absorciones vibracionales más complejas.

Las bandas (picos) 876 cm^{-1} y 726 cm^{-1} se atribuyeron a la fase amorfa y fase cristalina que tiene originalmente el PLA por ser un polímero natural y que pasó a ser un polímero sintetizado es decir peletizado.

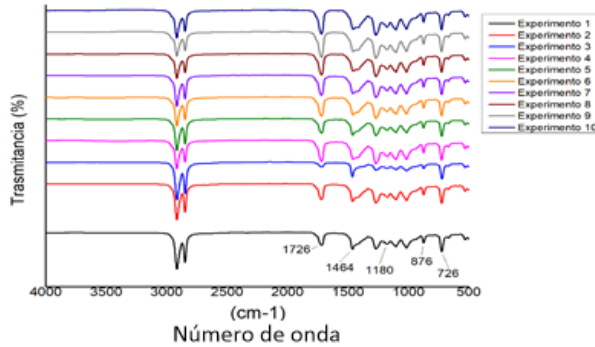


Fig. 2. Identificación de los picos asociados al PLA en los espectros FTIR de las mezclas de LDPE-PLA. Fuente: Elaboración propia software ORIGIN.

b. RESISTENCIA A LA TRACCIÓN de película plástica.

En esta prueba se evaluaron las propiedades mecánicas de las películas plásticas en los 10 experimentos de las mezclas de LDPE-PLA mencionados en la *Tabla 4*. Los resultados se muestran a continuación en la *Tabla 4* y en la *Fig. 3*.

Tabla 4. Resultados de las propiedades mecánicas por medio del ensayo de tracción.

Exp.	Mezcla LDPE-PLA [%]	Esfuerzo máximo longitudinal $[\sigma_{\max}]$ (MPa) $\bar{x}$	Esfuerzo máximo transversal $[\sigma_{\max}]$ (MPa) $\bar{x}$	Temperatura. Mezcla LDPE min. - máx. (°C)	Temperatura. Mezcla PLA min. - máx. (°C)	RPM Husillo (%)	Tiempo de permanencia. (s)
1	50-50	20,66	10,97	155	160	70%	35
2	40-60	18,03	10,29	155	160	70%	35
3	60-40	18,03	13,93	155	160	70%	35
4	50-50	16,17	14,76	215	190	70%	45
5	40-60	14,79	10,52	215	190	70%	45
6	60-40	14,79	8,06	215	190	70%	45
7	50-50	14,35	10,07	155	160	80%	35
8	40-60	13,36	8,40	155	160	80%	35
9	60-40	13,36	9,02	155	160	80%	35
10	50-50	14,83	10,34	215	190	70%	35

Fuente: Elaboración propia.

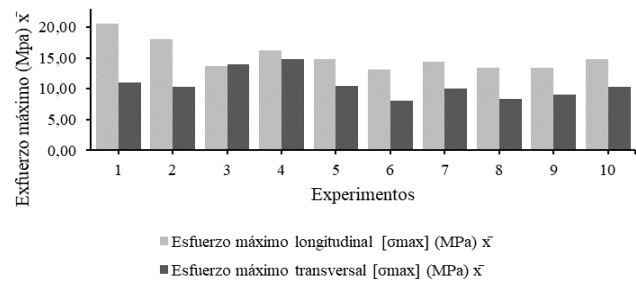


Fig. 3. Esfuerzo máximo entre medias ($\bar{x}$) longitudinal y transversal de las películas de LDPE-PLA. Fuente: Elaboración propia.

En la sección *longitudinal* de la *Fig. 3*, se evidencia que los experimentos 1 (20,66 MPa), 2 (18,03 MPa) y 3 (18,03 MPa) arrojaron las mejores resistencias a la tracción en este sentido, vale decir que los experimentos se realizaron con las temperaturas mínimas según la *Ficha técnica* del LDPE 155°C y *Ficha técnica* del PLA 160°C , las RPM fueron iguales (70%) y el tiempo de permanencia de 35 s.

Por otro lado, al analizar los resultados de la sección transversal de la *Fig. 3*, se evidencia que los experimentos 4. (14,76 MPa), 3. (13,93 MPa) y 2. (10,97 MPa) arrojaron las mejores resistencias a la tracción en este sentido.

IX. CONCLUSIONES

1. Al implementar un diseño de experimento, para determinar los diferentes porcentajes en la mezcla entre LDPE y PLA, se concluyó que fue necesario conocer inicialmente: a. perfiles de temperatura, b. velocidad del husillo, c. tiempo de permanencia y d. cantidad de materia prima. Así mismo, se planteó realizar el diseño experimental usando un *modelo mixto de factores aleatorios y fijos* que arrojó 48 experimentos a realizar, teniendo en cuenta: tres tipos de mezcla (50-50%, 40-60% y 60-40%), dos RPM (70% y 80%), dos tiempos de residencia (35 y 45 s); pero por disponer de un presupuesto limitado, se escogieron los 10 primeros experimentos ya que también favoreció que arrojó una combinación directa con las variables independientes tal como se ve en la *Tabla 4*.
2. En el desarrollo de la película plástica se corroboró que la dispersión, distribución y homogenización no sólo dependen del proceso de transformación, sino que también, estos parámetros se ven afectados por las proporciones de cada uno de los materiales (LDPE y PLA). Esto se reflejó directamente en las propiedades de servicio de la película plástica, específicamente en la *Resistencia a la Tracción*, donde se demostró el mejor desempeño en experimento de la mezcla 1.
3. Para realizar la prueba **FTIR** con la obtención de las diez películas plásticas, fue necesario realizar una preparación de muestras (especímenes) y usar un equipo infrarrojo Spectrum 3 FT-IR/NIR/FIR Triple – Rango de onda $11.000 - 30\text{ cm}^{-1}$, aplicando la norma ASTM E1252-21.

Dando como resultado los mejores experimentos de los diez ejecutados fueron el experimento 10. (2916.25 cm⁻¹) con un porcentaje de transmitancia (T%) de 49.39 y el experimento 3. (2914.50cm⁻¹) con un porcentaje de transmitancia (T%) de 32.34 ya que tuvieron los picos más altos en número de onda cm⁻¹. De la misma manera los segundos picos más altos en número de onda cm⁻¹ fueron los experimentos 7. (2848.69 cm⁻¹) con un porcentaje de transmitancia (T%) de 56.92 y experimento 3. (2847.61 cm⁻¹) con un porcentaje de transmitancia (T%) de 41.69.

4. Adicionalmente se puede concluir que en los experimentos de la *Tabla 4*, se logró cuantificar y cualificar la presencia de los materiales de LDPE y PLA en los tres (3) diferentes tipos de mezcla (50-50%, 40-60% y 60-40%), dos (2) RPM (70% y 80%), dos (2) tiempos de residencia (35 y 45 s), propuestos por el diseño de experimento.
5. Para realizar la prueba de **Resistencia a la Tracción** con la obtención de las diez películas plásticas, fue necesario realizar una preparación de muestras (especímenes) en dos sentidos *Longitudinal* y *Transversal* para las diez películas plásticas y usar un equipo: máquina universal de ensayos CP-E00MU02, aplicando la norma ASTM D882-18.
 - 5.1. Como resultado en la sección *longitudinal*, las mejores propiedades mecánicas se obtuvieron en los experimentos 1. (20,66 MPa), 2. (18,03 MPa) y 3. (18,03 MPa) arrojando las mejores resistencias a la tracción en este sentido.
 - 5.2. Como resultado en la sección *transversal* las mejores propiedades mecánicas se obtuvieron en los experimentos 4. (14.76 MPa), 3. (13.93 MPa) y 2. (10.97 MPa) arrojando las mejores resistencias a la tracción en este sentido.

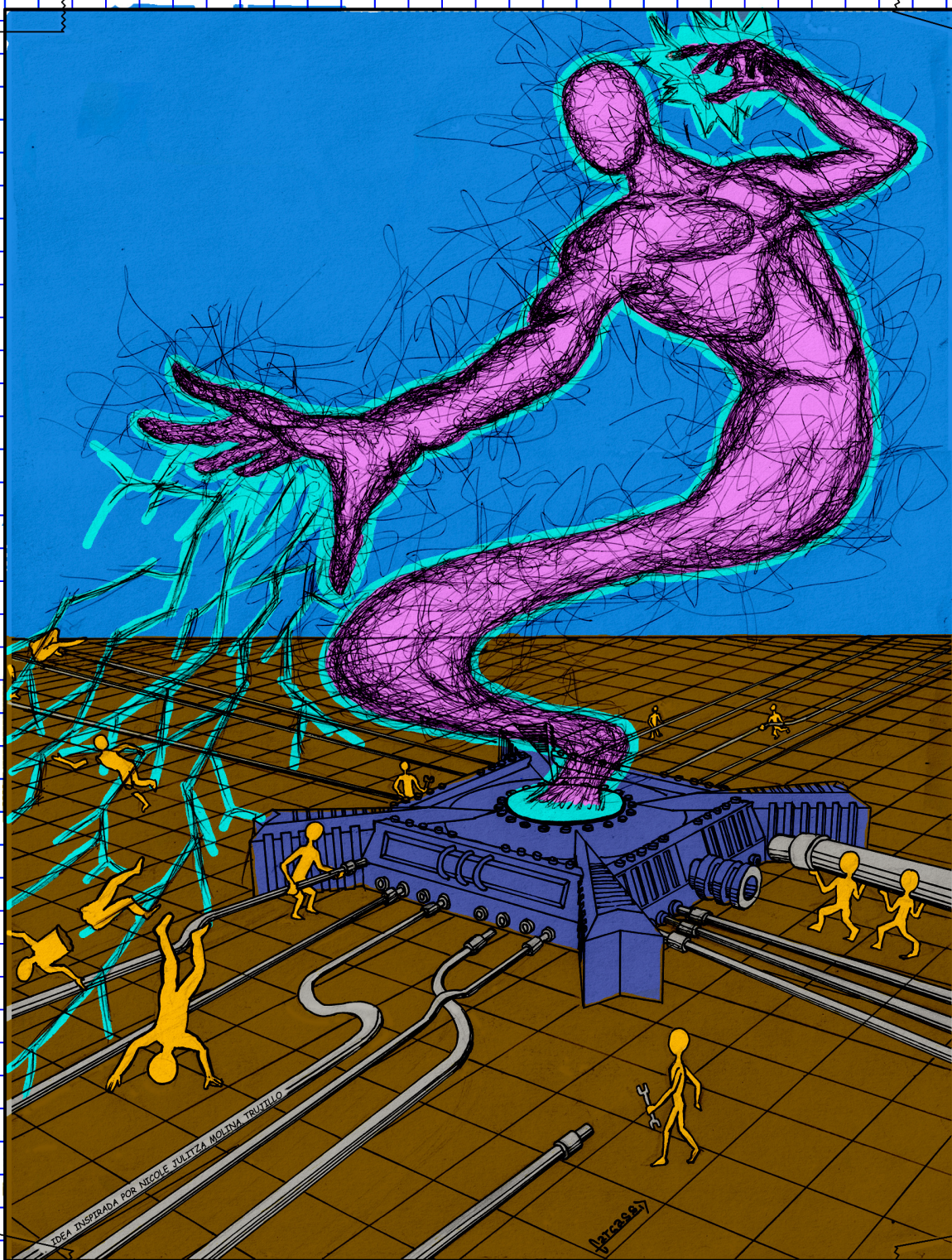
REFERENCIAS

- [1] ¿Qué es un envase, un empaque y un embalaje? - página 1 <https://n9.cl/tt4kf>
- [2] IALIMENTOS.COM (2019). Regulación para plásticos de un solo uso: un nuevo reto para la industria.
- [3] Farah, S., Anderson, D. G., & Langer, R. (2016). Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications—A comprehensive review. *Advanced drug delivery reviews*, 107, 367-392.
- [4] Qin, Q., Yang, Y., Yang, C., Zhang, L., Yin, H., Yu, F., & Ma, J. (2022). Degradation and adsorption behavior of biodegradable plastic PLA under conventional weathering conditions. *Science of The Total Environment*, 842, 156775.
- [5] Aversa, C., Cappiello, G., & Barletta, M. (2022). Study of binary PLA/PBSA and ternary blends PLA/PCL/PBSA for the manufacturing of single dose strips. *Procedia CIRP*, 110, 335-341.
- [6] Aversa, C., Cappiello, G., & Barletta, M. (2022). Study of binary PLA/PBSA and ternary blends PLA/PCL/PBSA for the manufacturing of single dose strips. *Procedia CIRP*, 110, 335-341.
- [7] Flaris, V., & Stachurski, Z. H. (1992). The mechanical behavior of blends of polyethylene, polypropylene, and an ethylene-propylene block copolymer at- 20° C. *Journal of applied polymer science*, 45(10), 1789-1798.
- [8] Gutierrez y De La Vara. Garcia y Víctor H. Valdivieso. - Análisis y Diseño de Experimentos – página 154, 155, 156.
- [9] Standard Practice for General Techniques for Obtaining Infrared Spectra for Qualitative Analysis – Section 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9.
- [10] Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting. Section 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10.

**Lixiviados
Clan**

Presentan:

conCiencia



Por: Carlos Alfonso Rodríguez Castillo



Revista Metalnova - Producto SENNOVA

Centro Metalmecánico
Cra. 30 #17-91 Sur, Bogotá