

II Congreso Internacional de
INVESTIGACIÓN AGROPECUARIA Y TECNOLOGÍA INDUSTRIAL



12 al 14 FEB 2020

PROPIEDADES MECÁNICAS APLICANDO UN SISTEMA DE INFERENCIA NEURO- DIFUSO EN MANUFACTURA ADITIVA

Quevedo - ECUADOR



Predicción de propiedades mecánicas aplicando un sistema de inferencia neuro-difuso en manufactura aditiva

Autores

- Nombres y Apellidos: Magdalena Walczak, Jorge Ramos y Germán Barrionuevo
- Grado Académico: PhD, PhD, PhD(c)
- Institución: Pontificia Universidad Católica de Chile
- E-mail: gobarrionuevo@uc.cl



PREDICCIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS APLICANDO UN SISTEMA DE INFERENCIA NEURO-DIFUSO EN MANUFACTURA ADITIVA

OBJETIVOS

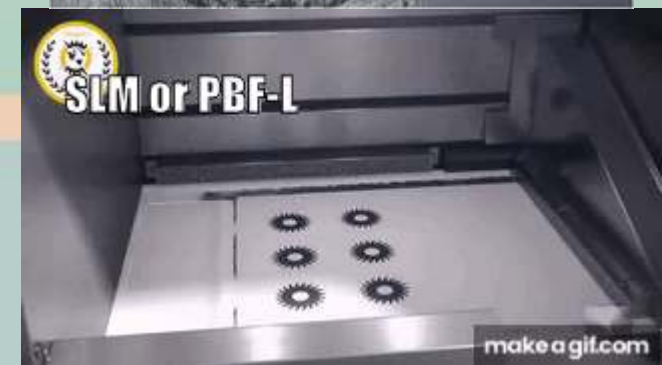
- Optimizar el proceso de fabricación mediante inteligencia artificial, aplicando un sistema de inferencia neuro-difuso para obtener piezas con densidad relativa superior al 99%.
- Analizar el efecto de los parámetros de fabricación sobre el tamaño, morfología y orientación del grano resultante del proceso de fusión selectiva láser.
- Comparar el desempeño frente al desgaste de una pieza fabricada por SLM con una fabricada convencionalmente.



PREDICCIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS APLICANDO UN SISTEMA DE INFERENCIA NEURO-DIFUSO EN MANUFACTURA ADITIVA

• INTRODUCCIÓN

MANUFACTURA ADITIVA: Fusión selectiva láser (SLM)



D. W. Rosen, 2015.



PREDICCIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS APLICANDO UN SISTEMA DE INFERENCIA NEURO-DIFUSO EN MANUFACTURA ADITIVA

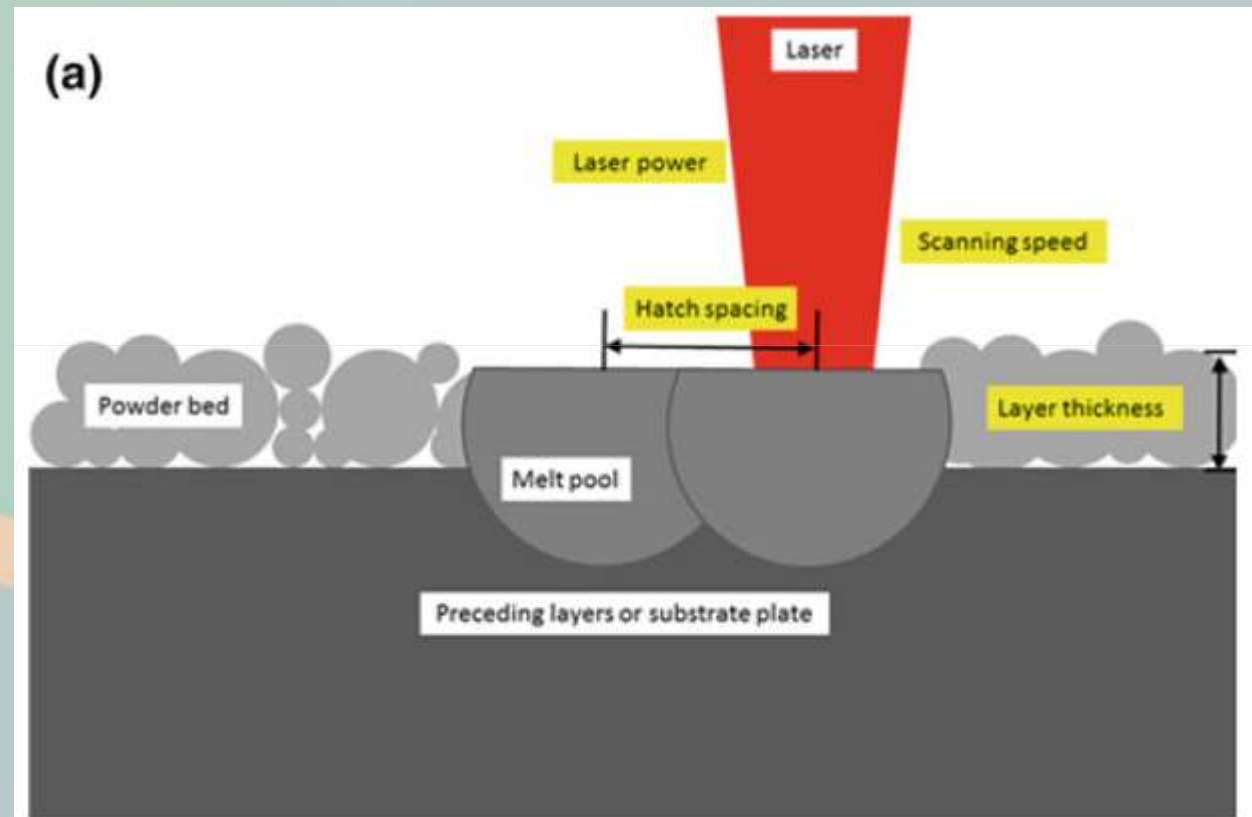
• INTRODUCCIÓN

Key parameters:

- laser power [W]
- scanning speed [mm/s]
- hatch spacing [mm]
- layer thickness [mm]

$$E = \frac{P}{h \times v \times l}$$

E : laser energy density [J/mm^3]



Tian, J., Zhu, W., 2019.



PREDICCIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS APLICANDO UN SISTEMA DE INFERENCIA NEURO-DIFUSO EN MANUFACTURA ADITIVA

• INTRODUCCIÓN

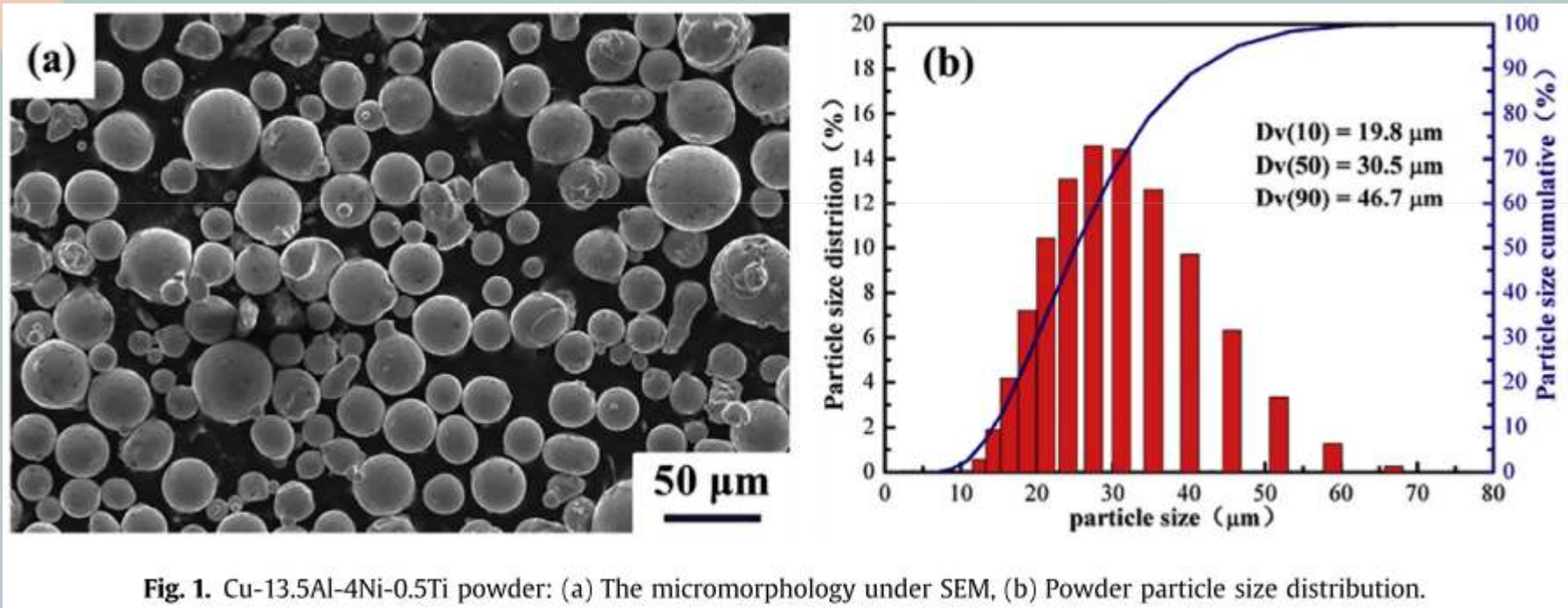


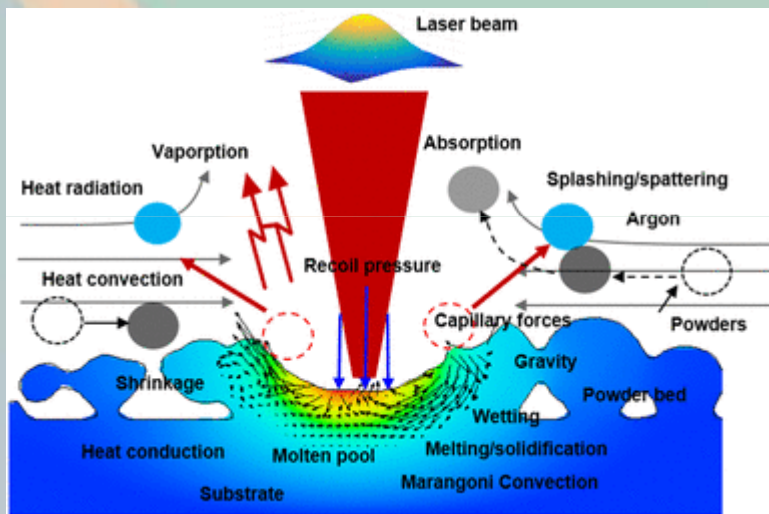
Fig. 1. Cu-13.5Al-4Ni-0.5Ti powder: (a) The micromorphology under SEM, (b) Powder particle size distribution.

<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.01.153>



PREDICCIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS APLICANDO UN SISTEMA DE INFERENCIA NEURO-DIFUSO EN MANUFACTURA ADITIVA

• INTRODUCCIÓN



Z. Chen *et al*, 2018



PREDICCIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS APLICANDO UN SISTEMA DE INFERENCIA NEURO-DIFUSO EN MANUFACTURA ADITIVA

• INTRODUCCIÓN

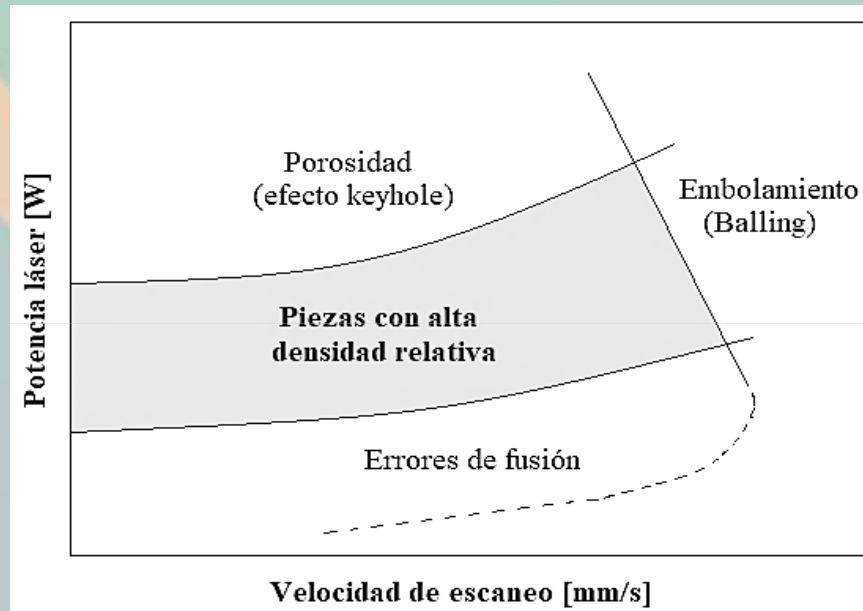
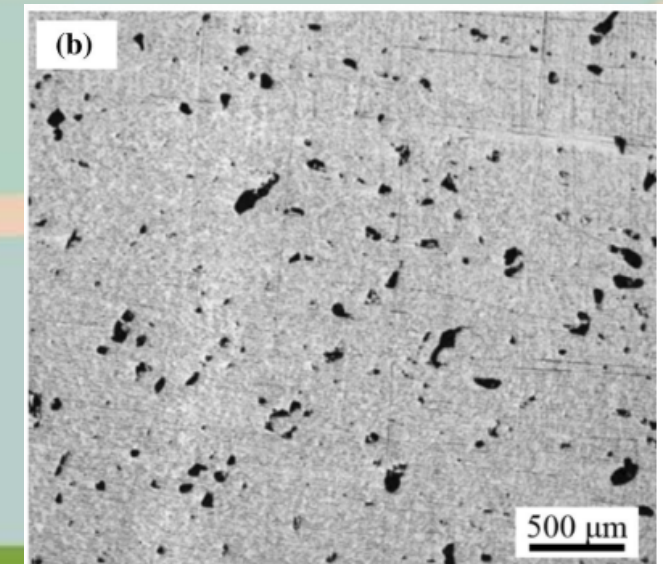
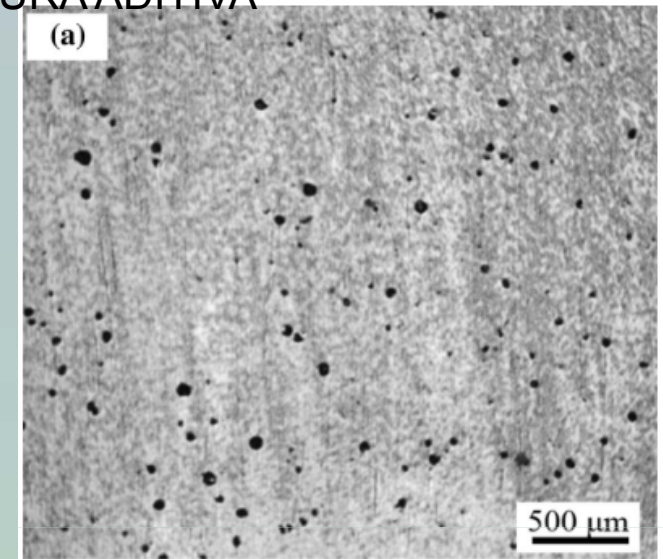


Fig. 8 Optical images of defect morphologies at different energy inputs in the SLM-processed Ti6Al4V parts: (a) spherical porosities ($P = 120$ W, $v = 40$ mm/s); (b) incomplete fusion holes ($P = 120$ W, $v = 1500$ mm/s) [47]

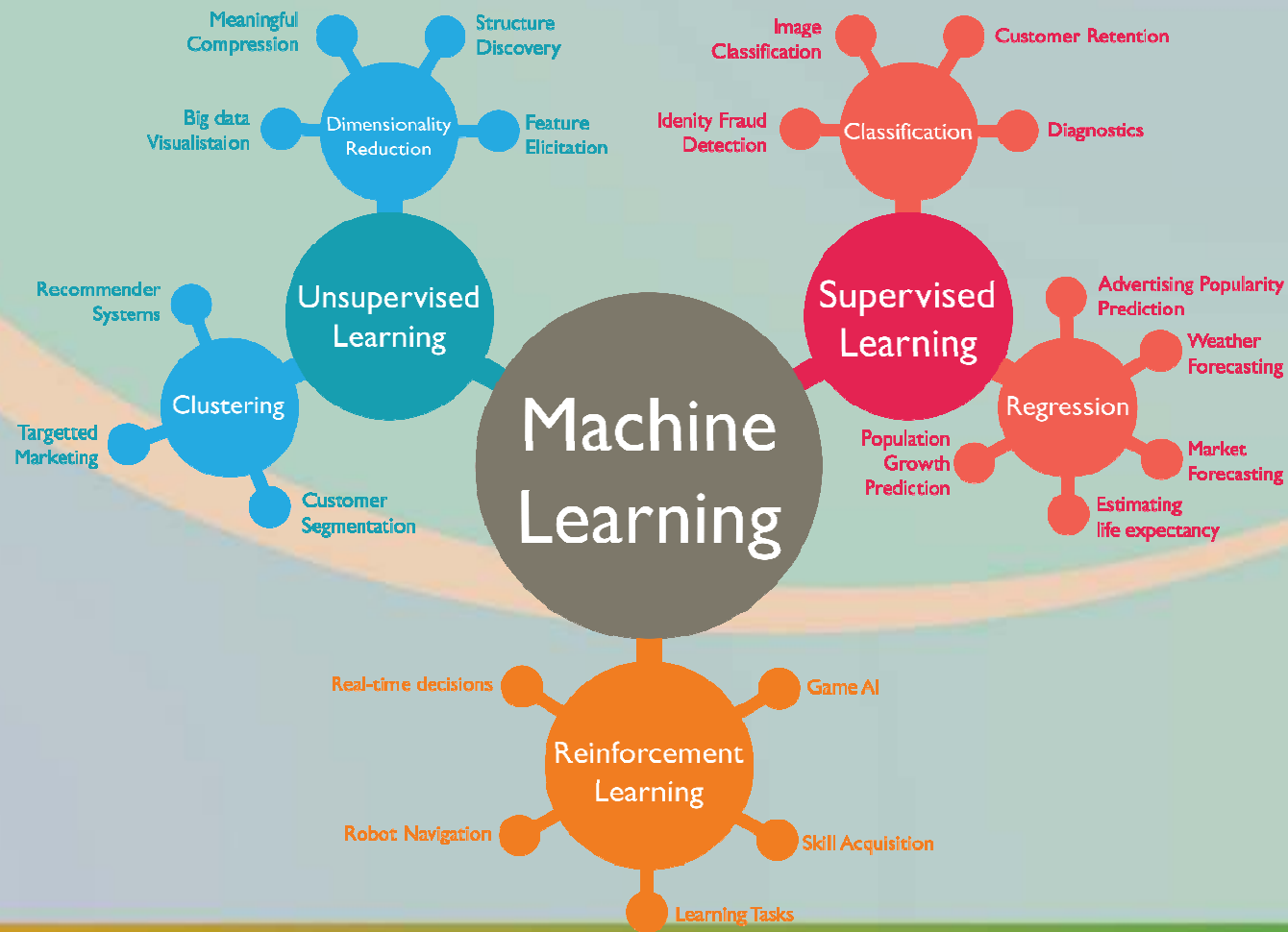


Zhang, B., Li, Y., & Bai, Q. (2017)



PREDICCIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS APLICANDO UN SISTEMA DE INFERENCIA NEURO-DIFUSO EN MANUFACTURA ADITIVA

• INTELIGENCIA ARTIFICIAL: *Machine Learning*



PREDICCIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS APLICANDO UN SISTEMA DE INFERENCIA NEURO-DIFUSO EN MANUFACTURA ADITIVA

- Machine learning: Fuzzy logic

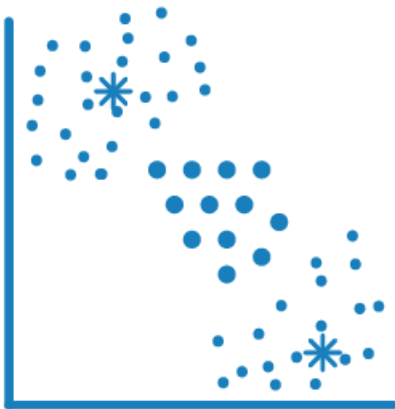
Fuzzy c-Means

How it Works

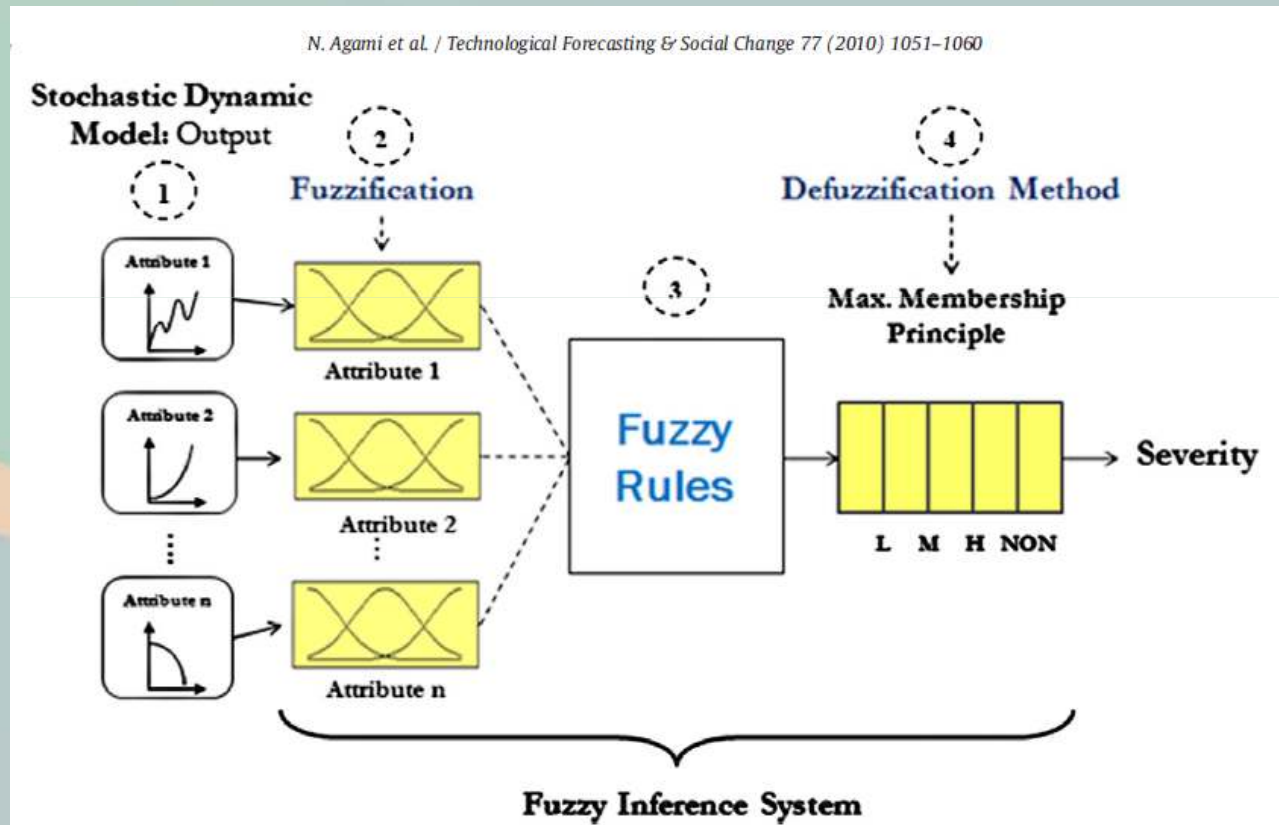
Partition-based clustering when data points may belong to more than one cluster.

Best Used...

- When the number of clusters is known
- For pattern recognition
- When clusters overlap



Result: Cluster centers (similar to k-means) but with fuzziness so that points may belong to more than one cluster



<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2010.04.009>



PREDICCIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS APLICANDO UN SISTEMA DE INFERENCIA NEURO-DIFUSO EN MANUFACTURA ADITIVA

• *Machine learning: Neural networks*

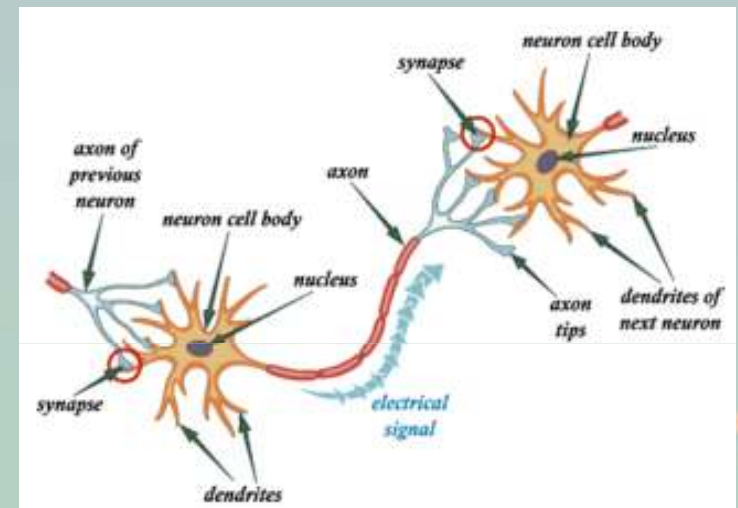
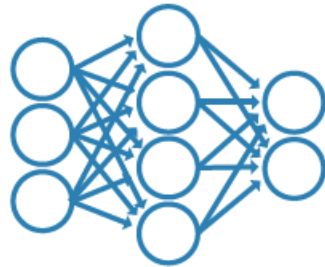
Neural Network

How it Works

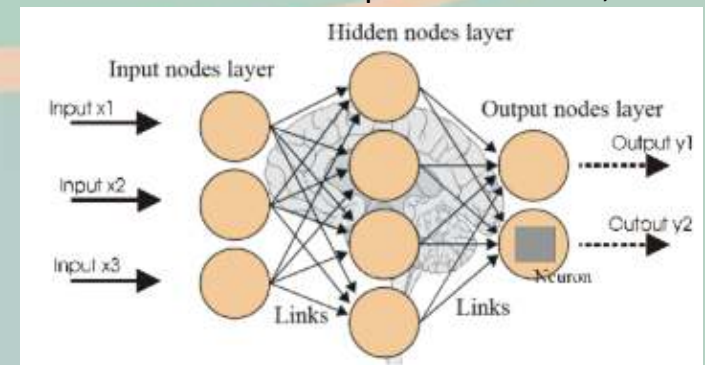
Inspired by the human brain, a neural network consists of highly connected networks of neurons that relate the inputs to the desired outputs. The network is trained by iteratively modifying the strengths of the connections so that given inputs map to the correct response.

Best Used...

- For modeling highly nonlinear systems
- When data is available incrementally and you wish to constantly update the model
- When there could be unexpected changes in your input data
- When model interpretability is not a key concern



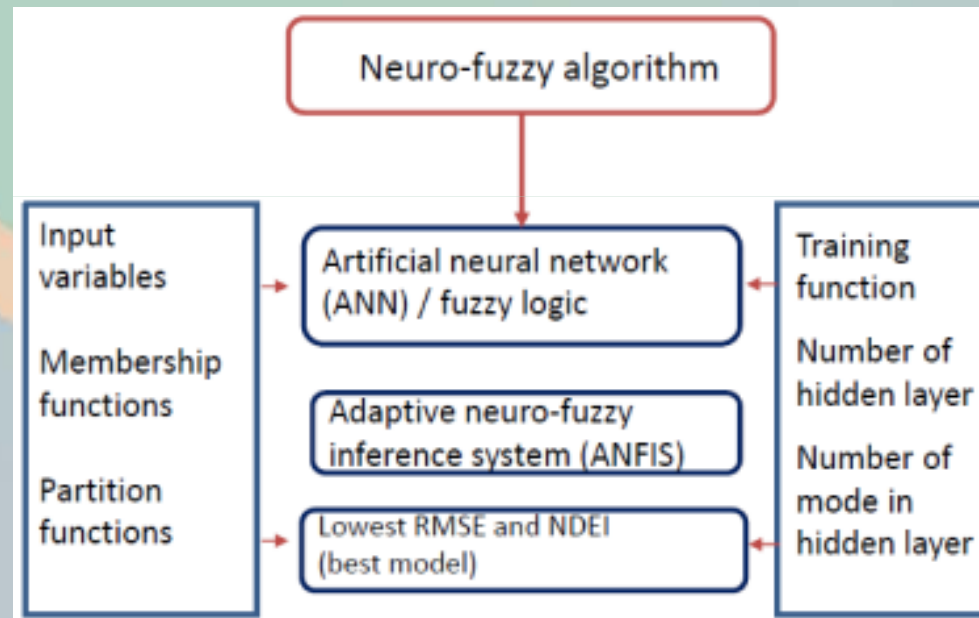
N. Siddique and H. Adeli, 2013



PREDICCIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS APLICANDO UN SISTEMA DE INFERENCIA NEURO-DIFUSO EN MANUFACTURA ADITIVA

- *Hybrid ML: Neuro-Fuzzy Systems*

Hybrid models



N. Siddique and H. Adeli, 2013



PREDICCIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS APLICANDO UN SISTEMA DE INFERENCIA NEURO-DIFUSO EN MANUFACTURA ADITIVA

• METODOLOGÍA

Generación de base de datos

Tabla I. Referencias para la generación de la base de datos

Conjunto de datos	Referencia	Año
7	[8]	2019
4	[9]	2019
5	[10]	2019
16	[27]	2020
4	[28]	2014
23	[29]	2017
5	[30]	2016

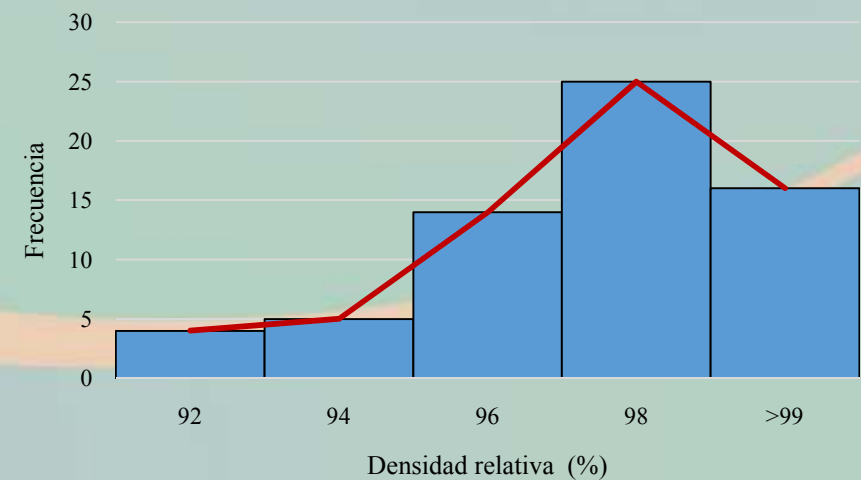


Figura 1. Histograma y polígono de frecuencias de densidad relativa.



PREDICCIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS APLICANDO UN SISTEMA DE INFERENCIA NEURO-DIFUSO EN MANUFACTURA ADITIVA

• METODOLOGÍA

Entrenamiento y validación

Tabla II. Rango de parámetros de entrada

Parámetros	Rango		
	min	media	max
Potencia láser (W)	25	122	220
Velocidad de escaneo (mm/s)	111	590	1700
Altura de capa (mm)	0.02	0.035	0.05
Distancia entre pasadas (mm)	0.03	0.088	0.15

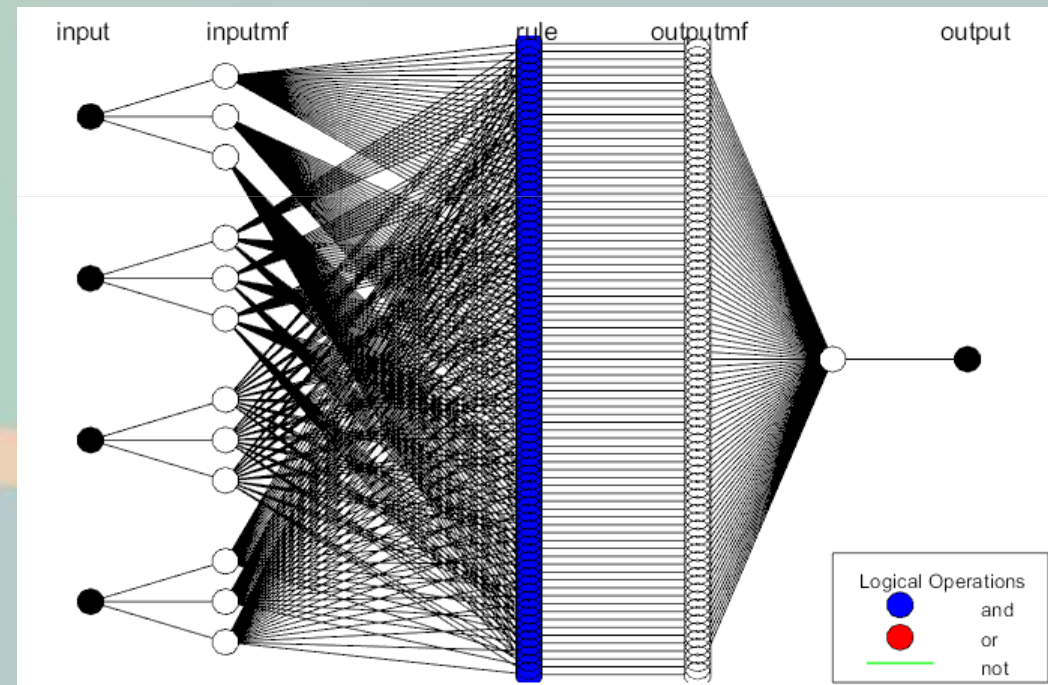


Figura 2. Arquitectura del sistema utilizado para el entrenamiento.



PREDICCIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS APLICANDO UN SISTEMA DE INFERENCIA NEURO-DIFUSO EN MANUFACTURA ADITIVA

- **METODOLOGÍA**

Predicción y evaluación de la precisión del sistema

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (e_i - p_i)^2}$$

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_i \frac{(e_i - p_i)}{p_i} \times 100$$

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_i (e_i - p_i)^2}{\sum_i p_i^2} \right)$$



PREDICCIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS APLICANDO UN SISTEMA DE INFERENCIA NEURO-DIFUSO EN MANUFACTURA ADITIVA

• DISCUSIÓN Y RESULTADOS

Tabla III. Parámetros de evaluación para el entrenamiento y validación del sistema

Funciones de membresía		Parámetros de entrenamiento			Evaluación de la precisión (RMSE)	
Tipo	Número	Método de entrenamiento	Tolerancia del error	Épocas	Entrenamiento	Evaluación
campana	3	Hibrido	0,0001	10	0,47532	129,54
gauss	3	Hibrido	0,000001	5	0,47425	12,2122
gauss2	3	Hibrido	0,00001	10	0,47428	9,6519
trapezoidal	3	Hibrido	0,000001	5	0,59727	7,4123
triangular	3	Hibrido	0,000001	5	0,47489	6,4328

Tabla IV. Evaluación de la precisión del sistema de inferencia neuro-difuso

Valor esperado	Predicción	Parámetros de evaluación	
97	97,20		
95,9	95,52	RMSE	1,3646
97,7	94,60		
98,46	98,90	MAPE	0,1298
94,3	96,42		
99	98,95	R ²	0,9998
98,84	99,21		
98,6	98,08		



PREDICCIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS APLICANDO UN SISTEMA DE INFERENCIA NEURO-DIFUSO EN MANUFACTURA ADITIVA

• DISCUSIÓN Y RESULTADOS

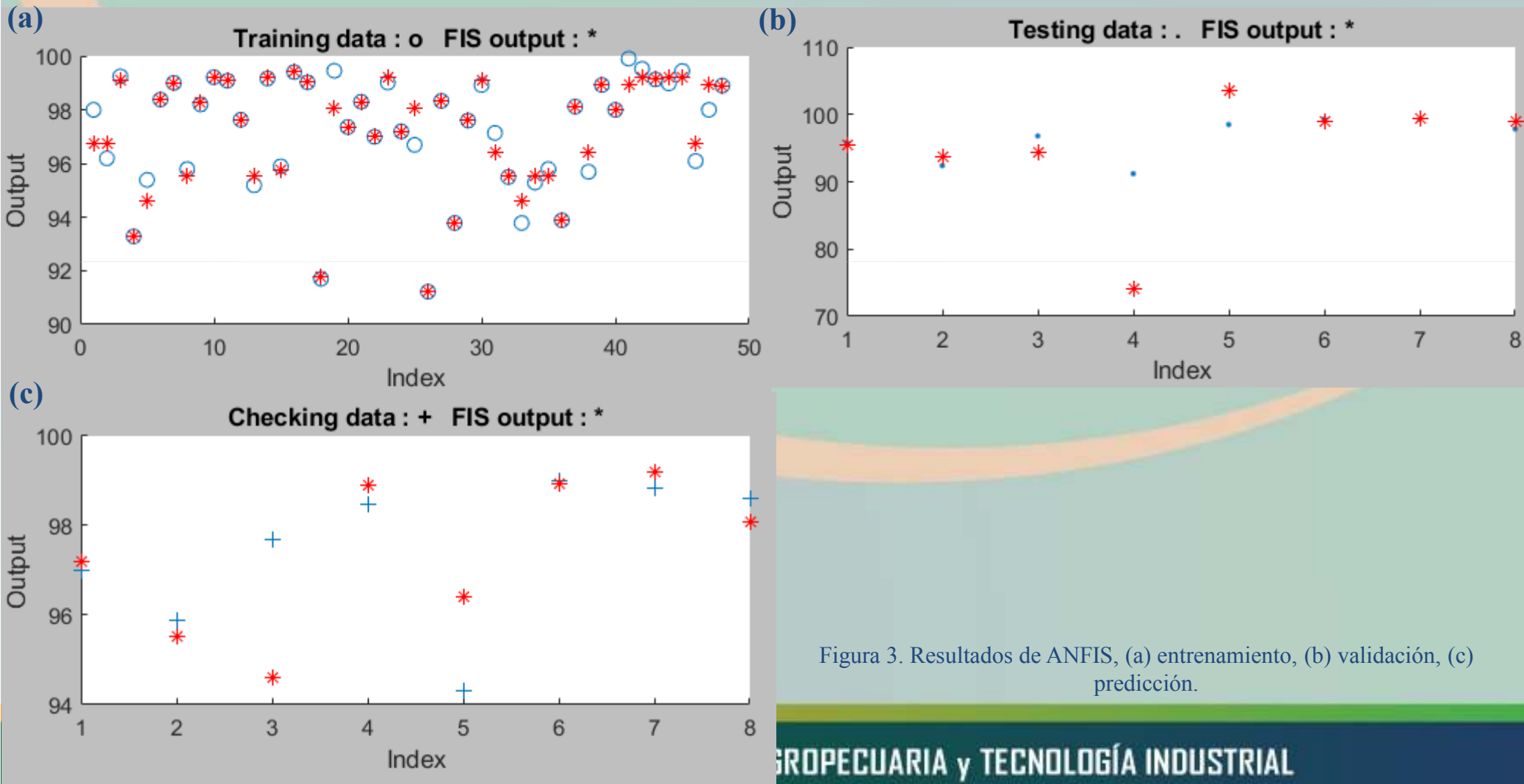


Figura 3. Resultados de ANFIS, (a) entrenamiento, (b) validación, (c) predicción.

PREDICCIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS APLICANDO UN SISTEMA DE INFERENCIA NEURO-DIFUSO EN MANUFACTURA ADITIVA

CONCLUSIONES

- La máxima densidad relativa se obtiene con una potencia láser mayor a 100 W, velocidad de escaneo entre 500 y 700 mm/s, altura de capa entre 0,02 y 0,03 mm y distancia entre pasadas de 0,08 mm.
- La configuración de las funciones de membresía muestra que con el tipo triangular se obtiene el menor error cuadrático medio $RMSE = 0,4789$ para entrenamiento y $RMSE = 6,4328$ para validación. Utilizando funciones de membresía de tipo trapezoidal se obtuvo $RMSE = 0,5973$ para entrenamiento y $RMSE = 7,4123$ para validación.
- La precisión del sistema se evaluó aplicando tres métricas estadísticas, donde se obtuvo $RMSE = 1,3646$, $MAPE = 0,1298$ y $R^2 = 0,9998$ utilizando funciones de membresía triangular, mientras que para el tipo trapezoidal se obtuvo un valor de $RMSE = 2,1779$.



REFERENCIAS

- C. Y. Yap *et al.*, “Review of selective laser melting: Materials and applications,” *Appl. Phys. Rev.*, vol. 2, no. 4, 2015, doi: 10.1063/1.4935926.
- X. Zhang, C. J. Yocom, B. Mao, and Y. Liao, “Microstructure evolution during selective laser melting of metallic materials: A review,” *J. Laser Appl.*, vol. 31, no. 3, p. 031201, 2019, doi: 10.2351/1.5085206.
- J. Zhang, B. Song, Q. Wei, D. Bourell, and Y. Shi, “A review of selective laser melting of aluminum alloys: Processing, microstructure, property and developing trends,” *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 35, no. 2, pp. 270–284, 2019, doi: 10.1016/j.jmst.2018.09.004.
- Z. Zhang, B. Chu, L. Wang, and Z. Lu, “Comprehensive effects of placement orientation and scanning angle on mechanical properties and behavior of 316L stainless steel based on the selective laser melting process,” *J. Alloys Compd.*, vol. 791, pp. 166–175, 2019, doi: 10.1016/j.jallcom.2019.03.082
- O. O. Salman *et al.*, “Impact of the scanning strategy on the mechanical behavior of 316L steel synthesized by selective laser melting,” *J. Manuf. Process.*, vol. 45, no. July, pp. 255–261, 2019, doi: 10.1016/j.jmapro.2019.07.010.
- K. Lin *et al.*, “Selective laser melting processing of 316L stainless steel: effect of microstructural differences along building direction on corrosion behavior,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 104, no. 5–8, pp. 2669–2679, 2019, doi: 10.1007/s00170-019-04136-9.
- J. Mathew, J. Griffin, M. Alamaniotis, S. Kanarachos, and M. E. Fitzpatrick, “Prediction of welding residual stresses using machine learning: Comparison between neural networks and neuro-fuzzy systems,” *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 70, pp. 131–146, 2018, doi: 10.1016/j.asoc.2018.05.017.
- M. F. A. Zaharuddin, D. Kim, and S. Rhee, “An ANFIS based approach for predicting the weld strength of resistance spot welding in artificial intelligence development,” *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 31, no. 11, pp. 5467–5476, 2017, doi: 10.1007/s12206-017-1041-0.
- B. Sen, U. K. Mandal, and S. P. Mondal, “Advancement of an intelligent system based on ANFIS for predicting machining performance parameters of Inconel 690 – A perspective of metaheuristic approach,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 109, pp. 9–17, 2017, doi: 10.1016/j.measurement.2017.05.050.
- L. H. Saw *et al.*, “Sensitivity analysis of drill wear and optimization using Adaptive Neuro fuzzy –genetic algorithm technique toward sustainable machining,” *J. Clean. Prod.*, vol. 172, pp. 3289–3298, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.10.303.



PREDICCIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS APLICANDO UN SISTEMA DE INFERENCIA NEURO-DIFUSO EN MANUFACTURA ADITIVA



Ingeniero en Mecatrónica
Magister en Manufactura y Diseño asistidos por computador
PhD(c) Ciencias de la Ingeniería
gobarrionuevo@uc.cl

