



Revista en Ciencias de la Ingeniería

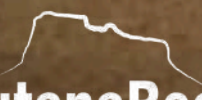
ISSN: 2737-6439

DOI: 10.47460/athenea/v6i19

January-March 2025

Volume 6, Issue 19

Published by:


AutanaBooks
Engineering & Services

Revista Athenea

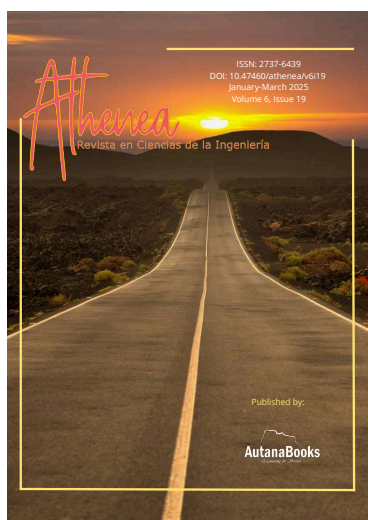
Revista electrónica editada por AutanaBooks

Publicación continua

Volumen 6 | enero-marzo, 2025

DOI: 10.47460/athenea **ISSN-e:** 2737-6419

Nuestra Portada



Font: canva.com

licence: 03422-17578080

Vol. 6 // Núm. 19

enero-marzo

DOI: 10.47460/athenea

ISSN: 2737-6419

En nuestra portada se pueden identificar varios elementos simbólicos de la ingeniería, especialmente vinculados con la ingeniería civil y la planificación territorial. La carretera central, extensa y perfectamente delimitada, representa la infraestructura vial, uno de los pilares más visibles del desarrollo humano: conecta ciudades, integra economías, permite el acceso a servicios y reduce distancias físicas y sociales. Esa línea recta que se pierde en el horizonte es, en esencia, la metáfora de la ingeniería como camino hacia el progreso.

Portal de la revista:

<https://athenea.autanabooks.com/index.php/revista>

Producción y visibilidad

Editor de Estilo

Dra. Franyelit Suárez-Carreño.

Editor de Producción, indexación y métricas

Ing. Ángel Lezama.

Editor de Idioma

Fausto Bartolotta

Adrián Hauser

Nota editorial

Los artículos y las opiniones manifestadas por nuestros colaboradores no necesariamente reflejan la línea editorial o institucional de AutanaBooks y pueden ser reproducidos con autorización previa del Editor. En este caso, favor citar la fuente y enviar copias del medio utilizado a AutanaBooks, Sector Mitad del Mundo, Quito, Ecuador.

Comité Editorial

Entidad Editora

Editorial: AutanaBooks.

Venezuela: Municipio Libertador, Parroquia Santa Teresa, Av. Lecuna. Cipreses a Hoyo. Edif. Berret, Piso 8, Oficina 8-B, Caracas, Código postal: 1012, Venezuela.

Correo de contacto: editorial@autanabooks.com

Directorio de Athenea Revista en Ciencias de la Ingeniería

Consejo Editorial

Ph.D. Franyelit Suárez. AutanaBooks, Quito, Ecuador.

editorial@autanabooks.com

0000-0002-8763-5513

Comité Académico

Dr. José García-Arroyo. Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), España.

jagarcia@uees.edu.ec

0000-0001-9905-1374

Dr. Oscar Dam. Universidad Experimental Politécnica UNEXPO, Puerto Ordaz, Venezuela.

oscar.curmetals1@gmail.com

0000-0002-0594-6757

Dr. Valentina Millano. Centro de Estudios de Corrosión (CEC), Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela.

millanov@fing.luz.edu.ve, millanov@gmail.com

0000-0001-6138-4747

Dr. Edwin Flórez Gómez. Universidad de Puerto Rico en Mayagüez, Mayagüez, Puerto Rico.

edwin.florez@upr.edu

0000-0003-4142-3985

Dr. Ana Hilda Márquez. Universidad Metropolitana de Quito, Quito, Ecuador.

amarquez@umet.edu.ec

0000-0002-7958-420X

Dr. Diana Cristina Morales Urrutia. Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador.

dc.moralesu@uta.edu.ec

0000-0002-9693-3192

Dr. Yelka Martina López Cuadra. Universidad Nacional Intercultural Fabiola Salazar Leguía de Bagua, Bagua, Perú.

ylopez@unibagua.edu.pe

0000-0002-3522-0658

Dra. Irela Perez Magin. Universidad Politécnica de Puerto Rico, San Juan, Puerto Rico.

iperezmagin@pupr.edu

PhD. Alejandro Suarez-Alvites. Consultor, Lima, Perú.

alejandrosualvites@hotmail.com

0000-0002-9397-057X

Dr. Neris Ortega. Universidad Metropolitana de Quito, Quito, Ecuador.

nortega@umet.edu.ec

0000-0001-5643-5925

Dr. Juan Carlos Alvarado Ibáñez. Universidad Nacional Intercultural Fabiola Salazar Leguía de Bagua, Bagua, Perú.

jalvarado@unibagua.edu.pe

0000-0002-6413-3457

Mgt. Juan Segura. Universidad Tecnológica Indoamérica, Quito, Ecuador.

juansegura@uti.edu.ec

0000-0002-0625-0719

Dr. Jairo José Rondón Contreras. Instituto Tecnológico de Santo Domingo, República Dominicana.

rondonjjx@gmail.com / jairo.rondon@intec.edu.do

0000-0002-9738-966X

Dr. Hernán Mauricio Quisimalin Santamaria. Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador.

hernanmquisimalin@uta.edu.ec

0000-8491-8326

Dr. Ángel González Lizardo. Polytechnic University of Puerto Rico, San Juan, Puerto Rico.

agonzalez@pupr.edu

0000-0002-0722-1426

Dr. Wilfredo Fariñas Coronado. Polytechnic University of Puerto Rico, San Juan, Puerto Rico.

wfarinascoronado@pupr.edu

0000-0003-2095-5755

Dr. Carlos Alberto Gómez Cano. Corporación Unificada Nacional de Educación Superior – CUN, Florencia, Caquetá, Colombia.

carlos_gomezca@cun.edu.co, carlosgomez325@gmail.com

0000-0003-0425-7201

Dr. Luis Concepción Atoche Alcas. I.E. N° 14100, Paita, Perú.

luisatochealcas16@gmail.com

0000-0003-1454-2129

Dr. Orlando Rafael Gil Rubio. Universidad Católica Andrés Bello, sede Ciudad Guayana, Estado Bolívar, Venezuela.

orgil@unexpo.edu.ve; orgil@ucab.edu.ve; ogil07@gmail.com.ve

0009-0005-0964-7112

Dr. Jesús Ramón López Hercules. Universidad Experimental Politécnica UNEXPO, Puerto Ordaz, Venezuela.

Jlopezz@unexpo.edu.ve

0009-0006-4577-6728

Dra. Lourdes Margarita Meza Ruiz. Universidad Internacional Mesoamericana, Buenos Aires, Argentina.

0000-0002-3333-7051

Dr. José Calizaya-López. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú.

0000-0001-6221-0909

Dr. Ferdinand Eddington Ceballos Bejarano. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú.

0000-0003-2867-2397

Mgt. Alfredo Ruitval Velazco Gonzales. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú.

0000-0001-9358-3425

Mgt. Luz Gabriela Cuba Pacheco. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú.

0000-0003-3984-3737

Contenido (Volumen 6, Número 19 // enero-marzo, 2025)

- 7** Suarez Franyelit, Salazar Jose, Rosales-Romero Luis. *Mathematical model to evaluate the stresses and strains of oil strings in transient state.*
- 20** Velez-Cruz Alex J., Dam Oscar Gilberto. *A study of the mechanical and electrical properties of the cortical bone based on age, biochemical factors and Nernst equation.*
- 32** Calizaya Lopez Jose, Carita-Choquecahua Ariosto, Concha-Diaz Lady, Rivero Fernandez Renzo Rimaneth, Cardenas-Ticono Claudia Patricia, Miaury-Vilca Ana Rosario. *Development of intelligent systems for labor conflict management: An approach from industrial engineering and organizational sociology.*
- 52** Topon Visarrea Blanca Liliana, Cajo Diaz Ricardo. *Development of a smart vest with vibrotactile feedback for postural correction.*

Mathematical model to evaluate the stresses and strains of oil strings in transient state

Franyelit Suárez
<https://orcid.org/000-0002-8763-5513>
franyelit.suarez@udla.edu.ec
Universidad de las Américas
Departamento de Matemáticas y Ciencias Aplicadas
Quito, Ecuador

José Salazar
<https://orcid.org/0000-0003-0855-270X>
jrsalazar@unexpo.edu.ve
UNEXPO, Vice Rectorado Puerto Ordaz
Puerto Ordaz, Venezuela

Luis Rosales-Romero
<https://orcid.org/0000-0002-9975-1335>
lrosales@unexpo.edu.ve
Área de Criminalística,
UNEXPO, Vice Rectorado Puerto Ordaz
Puerto Ordaz, Venezuela

*Correspondence author: franyelit.suarez@udla.edu.ec

Received (03/09/2024), Accepted (16/12/2024)

Abstract. - This study presents the development of a mathematical model to assess the performance of oil strings during the drilling process of a reservoir, considering the dynamic conditions and operational characteristics of the equipment during its functions, and taking into account the mechanical properties of API K55 steel. The research resulted in a set of equations that model the behavior of stresses and deformations experienced by the oil tools when transmitting torque, facilitating the opening of the reservoir. A finite element analysis was conducted to evaluate the structural behavior of the strings and to estimate the time required to reach permanent deformations, as well as the time before failure occurs.

Keywords: oil string, deformation, stresses, lifespan.

Modelo matemático para evaluar las tensiones y deformaciones de las sartas petroleras en estado transitorio

Resumen: Este estudio presenta el desarrollo de un modelo matemático para evaluar el desempeño de las sartas petroleras durante el proceso de perforación de un reservorio, considerando las condiciones dinámicas y características operacionales del equipo durante sus funciones, y teniendo en cuenta las propiedades mecánicas del acero API K55. La investigación dio como resultado un conjunto de ecuaciones que modelan el comportamiento de las tensiones y deformaciones experimentadas por las herramientas petrolíferas al transmitir el par de torsión, facilitando la apertura del yacimiento. Se realizó un análisis de elementos finitos para evaluar el comportamiento estructural de las sartas y estimar el tiempo necesario para alcanzar deformaciones permanentes, así como el tiempo antes de que se produzca el fallo.

Palabras clave: sarta petrolera, deformación, tensiones, vida útil.

I. INTRODUCTION

A. Formulation of the Problem

The global development of petroleum exploration necessitates the utilization of drilling equipment capable of accessing oil reserves in the Earth's deepest strata. This process requires high-technology apparatus that delivers performance commensurate with the operational demands of the work environment, where equipment is exposed to diverse climatic conditions [1].

Contemporary drilling tools are engineered to function in adverse weather conditions and varied geological formations. A notable advancement in this field is deep-water drilling technology, which has progressed significantly, enabling exploration at depths exceeding 300 meters. This progress is attributable to innovations in tools such as pressure nozzles and rotary steerable systems (RSS). These technological advancements facilitate more efficient and secure operations, thereby reducing operational time and associated costs [2], [3].

To address the issue of deformation failures in oil strings, it is crucial to comprehend the mechanical and operational challenges these tools encounter during reservoir opening operations. Oil strings are subjected to extreme load conditions due to continuous interaction with rock formations and drilling fluids. Recent studies have emphasized the importance of optimizing string design to enhance resilience and mitigate the likelihood of premature failure [4].

Research in drilling engineering has revealed that the dynamic behavior of strings is critical to their longevity [4]. Mathematical models and simulations have demonstrated that torsional and axial vibrations can accelerate wear on the walls of petroleum tools and material fatigue. Furthermore, the implementation of advanced real-time monitoring techniques enables the detection of anomalies in the machine element's behavior, facilitating preventive interventions that can extend its service life and improve drilling operation efficiency.

Moreover, it has been observed that strings begin to experience wear and deformation over time once they have completed their useful life cycle in drilling processes [5]. This creates a latent problem during operational activities, with potential failures compromising the progress of reservoir opening. In response to this issue, a transient state mathematical model is being developed to analyze the behavior of stresses and deformations produced by the drive system that provides axial advancement of the oil string during its functional performance.

B. Literature Review

Aquí está la traducción en tono académico de los párrafos proporcionados:

Certain authors [5] analyze pressure gradients during string advancement operations, presenting models to predict sequences and magnitudes of these pressure peaks. They note that the greatest uncertainties in the models are related to viscous friction losses, which lead to estimated parameters associated with the calculation of friction forces. It is emphasized that, due to limitations in real-time pressure measurement during reservoir opening operations, the model utilizes bottom-hole pressures. This approach allows for model calibration in consecutive operations if pumps are activated prior to opening procedures.

Other investigations highlight that vibrations can be categorized into three distinct behaviors: whirl (lateral), stick-slip (torsional), and bit bounce (axial) [6]. These phenomena can cause tool failures, increasing operational costs due to drilling time delays. They also emphasize that optimization is not solely about obtaining parameters that provide the highest rate of penetration (ROP), but rather seeking parameters that allow for faster and more efficient drilling. The drilling speed test curve is utilized to obtain parameters that aid in process optimization, not only maximizing ROP but seeking the optimal combination of highest penetration rate and shortest operational time under safe conditions for both equipment and operating personnel.

Some mathematical models allow for the prediction of stress sequences and magnitudes, both positive and negative, due to hydrocarbon movement in strings [7]. These models are essential for understanding how these phenomena occur and mitigating their effects on oil transfer operations. Furthermore, these studies [7] consider the seismic response of fractured reservoirs, which is crucial for identifying and characterizing fractures in deep carbonate formations. This information is valuable for optimizing hydrocarbon extraction and minimizing operational risks.

Moreover, reference [8] mentions an analysis of the seismic characteristics of hydrocarbon reservoirs in the Tarim Basin, particularly the anomalous response known as "string of bead-like response" (SBLR). It is shown that precise identification of these reservoirs is crucial for efficient drilling, considering its impact on string design and opening operation parameters. Understanding the location and geological formation, along with reservoir quality, aids in efficient drilling planning and appropriate string selection. Additionally, the physical models developed in [8] provide valuable information for the design and optimization of oil strings, especially in complex and fractured environments where drilling risks are higher.

Other research [9] focuses on analyzing the mechanical behavior of strings due to the complexity generated by the combination of temperature and pressure in reservoirs, as well as loads induced by steam injection and production operations. Furthermore, an analytical model based on energy conservation and heat transfer principles is established. The study calculates temperature and pressure fields during these operations. Force distribution analysis and strength verification of the integrated injection and production string were performed. Additionally, fatigue damage was evaluated considering dynamic loads during the injection process, and corrosion life was predicted, showing these as the main causes of string failures. The significant reduction in residual strength due to corrosion was identified as the fundamental factor in failures.

II. THE PHYSICAL MODEL OF OIL DRILL STRINGS

Oil strings are cylindrical hollow drilling tools, as shown in Figure 1, whose main role is to enable the axial advancement of the drill bit during the opening of a reservoir. These elements, while performing their functions, experience the application of a high driving torque originating from the rotary table located in the drilling rig.



Figure 1. General model of the oil well string [10].

For the development of the mathematical model, the finite element differential analysis was applied [11], [12], based on the following considerations to be taken into account in the field of applications of the equations to be deduced:

- The oil string is made of ductile material.
- The steel of the drill string has a homogeneous composition.
- The general normal stresses are within the elastic range.
- A uniform cross-section along its length.
- The stresses generated during torque application do not exceed the yield strength of the material.
- A linear distribution of shear stresses is assumed due to the transverse symmetry of the string.
- It is considered that the fixed end experiences no angular or shear deformation.
- A uniform torque distribution along the string is assumed.

A hollow circular shaft is connected to a fixed support represented by the brown circle at one of its ends, as seen in Figure 2, and a torsional moment T is applied to the other end. The shaft will deform as its free end rotates, generating a rotation angle called θ , due to the angular displacement experienced by point O located at the free end as a result of the torque action. Similarly, the shaft experiences longitudinal shear deformations denoted as γ . This example, presented in Figure 2, occurs when the drill string becomes stuck during its functions in the opening of a reservoir, and the transmission remains engaged, transmitting a torsional moment to the string.

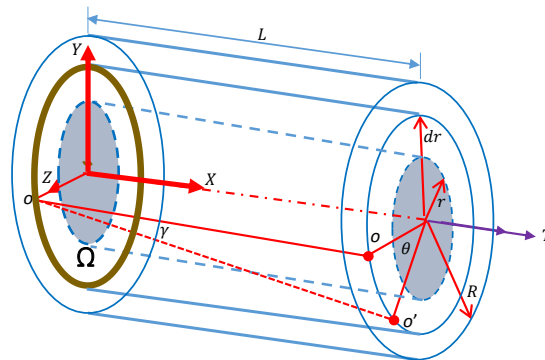


Figure 2. Differential element of the oil string.

III. METHODOLOGY

A. Initial and boundary conditions:

The Dirichlet condition states that all infinitesimal elements located at the left end of the bar shown in Figure 2, will remain with all their degrees of freedom constrained and equalized zero during the analysis time, i.e. for $t=0$. It means, the translation and rotation displacements will be zero in any direction for all points located in the domain Ω belonging to the YZ plane defined by the circumferences of the outer and inner edge of the string.

$$\checkmark \text{ Translation offset in x-direction } u = 0 \text{ and } \theta_x = 0 \quad (1)$$

$$\checkmark \text{ Translation offset in y-direction: } v = 0 \text{ and } \theta_y = 0 \quad (2)$$

$$\checkmark \text{ Translation offset in z-direction: } w = 0 \text{ and } \theta_z = 0 \quad (3)$$

The Newman condition considers that the derivatives of the displacements in the domain Ω of the end of the string that remains embedded, will be zero because those points have all their degrees of freedom are constrained therefore it is expressed as follows:

$$\text{In x- axis direction: } \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad y \quad \frac{\partial u}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

$$\text{In y- axis direction: } \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad y \quad \frac{\partial v}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

$$\text{In z-axis direction: } \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \quad y \quad \frac{\partial w}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

The analysis of the displacement experienced by the point o towards o' analytically is obtained from the following equation, starting from figure 2:

$$\gamma \cdot L = oo' = \theta_x \cdot r \quad (7)$$

Where γ is the shear deformation, L is the axial length of the bar, r is the inner radius of the cylinder. Therefore, the shear deformation (γ) is given by:

$$\gamma = \frac{\theta_x \cdot r}{L} \quad (8)$$

The evaluation of the shear deformation at the outer radius yields the following results

$$\gamma_{max} = \frac{\theta_x \cdot R}{L} \quad (9)$$

Equating the angular deformation θ present in equations (8) and (9)

$$\gamma = \frac{\gamma_{max} \cdot r}{R} \quad (10)$$

Where γ_{max} is the maximum shear deformation.

Under the considerations present in the development of the model, we proceed to apply Hooke's law following equation (11)

$$G \cdot \gamma = G \frac{\gamma_{max} \cdot r}{R} \quad (11)$$

Where G is the modulus of rigidity of the material, which allows defining the distribution of shear forces present in the tubular section.

$$\tau = \tau_{max} \cdot \frac{r}{R} \quad (12)$$

Where τ : Shear stress, τ_{max} : Maximum shear stress, r : Cylinder inner radius, R : Cylinder outer radius. We will consider the infinitesimal element in the shaft cross section when a uniform torque is applied to it as shown in fig. 3.

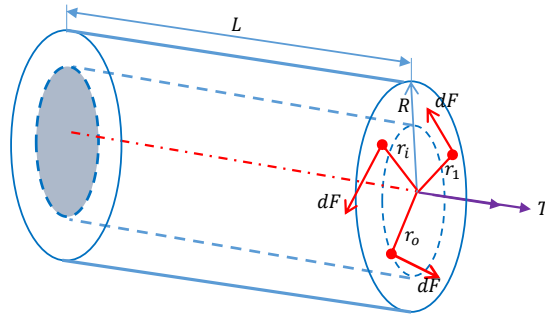


Figure. 3. Infinitesimal analysis of a driving shaft.

Therefore, the torsional moment T is defined:

$$T = \int_0^R r \cdot dF \quad (13)$$

Donde T : torsional moment, dF : Differential force, r : Cylinder inner radius, R : Cylinder outer radius. Bearing in mind that the shear stress [13] is defined by (14):

$$\tau = \frac{dF}{dA} \quad (14)$$

Where: τ : Shear stress, dA : Area differential, dF : Force differential.

Replacing (14) in (13) we obtain:

$$T = \int_0^R r \cdot \tau \cdot dA \quad (15)$$

Substituting (12) in (15) results in:

$$T = \int_0^R r \cdot \tau_{max} \cdot \frac{r}{R} \cdot dA \quad (16)$$

Bearing in mind that the outer radius is constant and the maximum shear stress remains constant at the outer edge of the string, it is obtained:

$$T = \frac{\tau_{max}}{R} \int_0^R r^2 \cdot dA \quad (17)$$

Considering that the area of a cylinder is defined by $A = \pi \cdot r^2$, therefore $dA = 2\pi \cdot r \cdot dr$ substituting (17)

$$T = \frac{\tau_{max}}{R} \int_0^R 2\pi \cdot r^3 \cdot dr \quad (18)$$

Solving the integral yields $J = \frac{\pi}{2} R^4$, being this the polar moment of inertia, in this sense the maximum shear stress is defined by:

$$\tau_{max} = \frac{T \cdot R}{J} \quad (19)$$

Where τ_{max} : Maximum shear stress, R : Cylinder outer radius, J : Polar moment of inertia.

IV. RESULTS

By considering that the drive of the oil string, during the opening of a reservoir requires the application of a power coming from the driving element, called rotary table, and that the string represents a tubular shaft of circular section, used to transmit the power to the oil drill bit, as shown in Figure 4. When used for this purpose, it is subjected to a torsional moment that depends on the power generated by the machine and the angular velocity of the shaft.



Figure 4. Oil drillstring assembly with drill bit.

Power Pot : is defined as the work done per unit of time. In turn, the work transmitted by a rotating shaft is equal to the torque applied times the angle of rotation, Therefore, if during an instant of time dt a torque T is applied causing the string to rotate an angle $d\theta_x$, then the instantaneous power is:

$$Pot = T \cdot \frac{d\theta_x}{dt} \quad (20)$$

Since the angular velocity of the axis $w = \frac{d\theta_x}{dt}$ the power can be expressed as follows:

$$Pot = T \cdot w \quad (21)$$

Where

T : Torsional moment (torque); w : Angular velocity of the bar; Substituting the torque of eq. 21 in eq. 10, we obtain:

$$\theta_x = \frac{Pot \cdot L \cdot dt}{J \cdot G \cdot d\theta_x} \quad (22)$$

Integrating with respect to θ_x we obtain:

$$\theta_x = \left(\frac{2 \cdot Pot \cdot L}{J \cdot G} \cdot t \right)^{1/2} \quad (23)$$

which represents angular deformation of the oil string in transient state.

In a similar way, the shear deformation in transient state is determined by substituting eq.24 in eq.9 and rearranging to obtain:

$$\gamma_{max} = \left(\frac{2 \cdot Pot \cdot R^2}{J \cdot G \cdot l} \cdot t \right)^{1/2} \quad (24)$$

To determine the equation of shear forces in transient state, Hooke's law is applied, multiplying on both sides of eq.25 by the stiffness modulus and simplifying the equation to the following form:

$$\tau_{max} = \left(\frac{2 \cdot Pot \cdot G \cdot R^2}{J \cdot L} \cdot t \right)^{1/2} \quad (25)$$

Considering that polar moment of inertia for hollow cylinders is defined by:

$$J = \frac{\pi}{2} (R^4 - r^4) \quad (26)$$

Substituting the equation of the polar moment of inertia defined by eq.27 in eq.26 and simplifying it remains:

$$\tau_{max} = \left(\frac{4 \cdot Pot \cdot G \cdot R^2}{\pi \cdot (R^4 - r^4) \cdot L} \cdot t \right)^{1/2} \quad (27)$$

Graphical representation of the stress state, generated at the outer edge of the oil string as can be visualized in Figure 5, being α the principal plane to be determined, once Mohr's circle is applied.

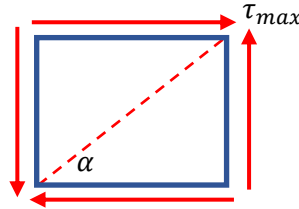


Figure 5. Stress state of an infinitesimal element located at the outer edge of the string.

Bearing in mind that Mohr's circle allows to obtain the normal and maximum shear forces, as well as the principal plane, where the normal stress is maximized, we proceed to define the coordinates of the circle in a generic way, considering that the coordinates of point 1 is given by: $P_{to1} = (\sigma_x, -\tau_{xy})$, whereas point 2 is expressed by the relation $P_{to2} = (\sigma_y, \tau_{xy})$ these two points form a diagonal that passes through the center of the circle, therefore the center is given by $C = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}$, therefore the radius of is defined by:

$$R = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + (\tau_{xy})^2} \quad (28)$$

Applying the theory related to Mohr's circle to the state of stress shown in Figure 5, the following is obtained:

- Coordinate of point 1 = $(0, -\tau_{xy})$, since there are no normal forces in x direction.
- Coordinate of point 2 = $(0, \tau_{xy})$, since there are no normal stresses in the y direction.
- Center coordinate C = $(0,0)$ since there are no normal forces in x or y direction.
- Radius magnitude: $R = \sqrt{\left(\frac{0-0}{2} \right)^2 + (\tau_{xy})^2} = |\tau_{xy}|$

The graphical representation of Mohr's circle (Figure 6) is made, in order to know the maximum values of normal and shear forces as shown in Figure 6, I feel $\tau_{xy} = \tau_{max}$ defined by (28).

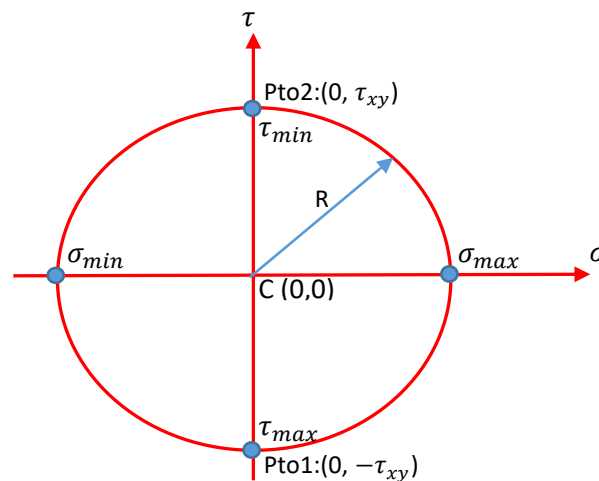


Figure 6. Mohr's circle.

Based on the results obtained through Mohr's circle, we conclude the following:

The maximum normal and shear stress generated in the oil string in a transient state, when a torque is supplied, is defined by the following equation:

$$\sigma_{max} = \tau_{max} = \left(\frac{4 \cdot Pot \cdot G \cdot R^2}{\pi \cdot (R^4 - r^4) \cdot L} \cdot t \right)^{1/2} \quad (29)$$

The proposed mathematical model allows to determine the useful life time of an oil string known the operating power during the opening of a reservoir, considering the yield stress of the tool steel, also allows continuous monitoring of how the maximum stress defined by equation (29) increases over time, once this exceeds the yield stress of the steel it experiences permanent deformations that can lead to premature failure of the string in the process of operation.

A. Analysis of an oil string with an API K55 steel

Table 1 shows the mechanical properties of API K55 steel, including stiffness, yield stress and ultimate stress.

Table 1. Mechanical properties of API K55 steel.

Steel type	API K55	Unids
Stiffness modulus	205	Gpa
Yield stress	552	Mpa
Ultimate stress	655	Mpa

For the purpose of this work, we have an oil string with the following technical operating information (Table 2).

Tabla 2. Dimensions of the string.

Parameter	Dimension	Unid
Outer radius	0.12	m
Inner radius	0.10	m
Drilling depth	2000	m
Drive power	20000	watt

Considering the dimensional parameters and operations of the oil string, we proceeded to evaluate the mathematical model of the stresses in transient state defined by equation (30), for a time interval from 0 to 2500 seconds, being this time enough for the element to fail due to shear stresses, the results obtained are shown in Table 3 below.

Table 3. Transient state stress analysis.

Time (Seg)	Normal stress. [Pascal.]	Factor of safety.	Time (Sec)	Normal stress [Pascal.]	Factor of safety-
0	0.00E+00	0	1300	6.75E+08	9.71E-01
100	1.87E+08	3.50E+00	1400	7.00E+08	9.36E-01
200	2.65E+08	2.48E+00	1500	7.25E+08	9.04E-01
300	3.24E+08	2.02E+00	1600	7.48E+08	8.75E-01
400	3.74E+08	1.75E+00	1700	7.71E+08	8.49E-01
500	4.18E+08	1.57E+00	1800	7.94E+08	8.25E-01
600	4.58E+08	1.43E+00	1900	8.16E+08	8.03E-01
700	4.95E+08	1.32E+00	2000	8.37E+08	7.83E-01
800	5.29E+08	1.24E+00	2100	8.57E+08	7.64E-01
900	5.61E+08	1.17E+00	2200	8.78E+08	7.46E-01
1000	5.92E+08	1.11E+00	2300	8.97E+08	7.30E-01
1100	6.21E+08	1.06E+00	2400	9.17E+08	7.15E-01
1200	6.48E+08	1.01E+00	2500	9.36E+08	7.00E-01

Figure 7 shows the distribution of shear stress as a function of time, highlighting an increase in the magnitude of stresses over time. This type of analysis allows for the estimation of the service life of the element under dynamic operating conditions during the opening of an oil reservoir, where the variation of normal stresses occurs as the operation type progresses with the drill bit stuck in the formation. In other words, the structural element of the drill string experiences normal stresses in short time intervals that may lead to the fracture of the tool under dynamic conditions.

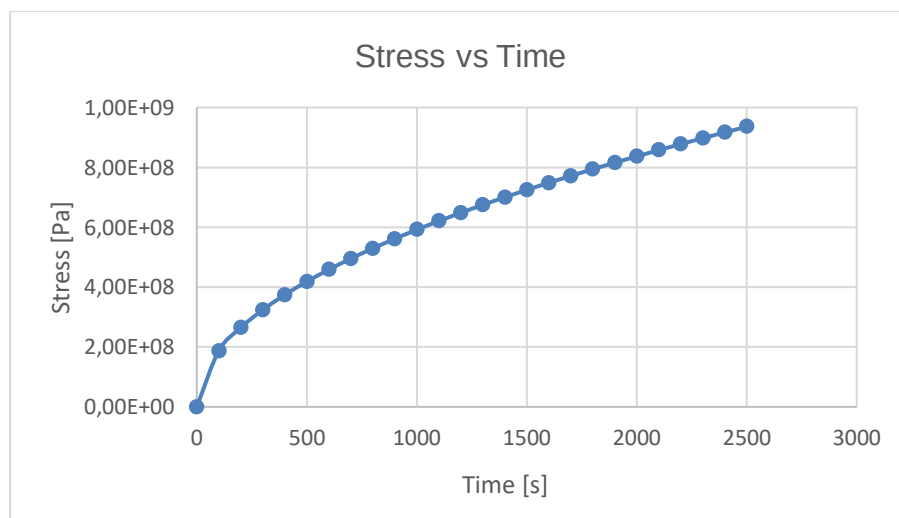


Figure 7. Shear stress distribution as a function of time.

B. Estimation of time of deformation and failure of the oil string

Considering that the steel of the API K55 type oil strings, with mechanical properties that have a yield stress of 552 Mpa and an ultimate stress of 655 Mpa as shown in Table 1, where these do not vary over time, a graphical relationship can be obtained that allows estimating the time it would take for the string to overcome the elastic deformation, as well as the time required to generate a shear failure as shown in Figure 8.

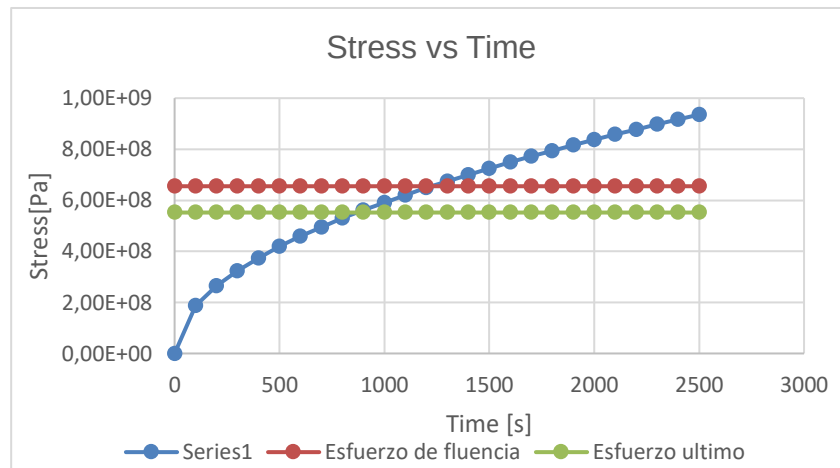


Figure 8. Estimated useful life.

It is evident that the permanent deformations begin to appear after a time lapse of 900 seconds, similarly it is visualized in Figure 8 that the time required for the string to break due to excess of shear stresses generated in the structure is 1200 seconds, that is to say that in case the bit becomes stuck during drilling, the operator has a time of less than 20 minutes to release the bit from the grip and keeping the rig transmission on, exceeding this time the oil string will tend to break due to the maximum capacity of the normal stresses offered by the API K55 steel.

C. Safety Factor Analysis

In any drilling process, the safety of the equipment used during the opening of oil reservoirs must prevail. For this reason, Figure 9 presents the safety factor as a function of the operational time of the drill string under dynamic conditions. The safety factor is considered an indicator of the ultimate stress ratio to the stress generated by dynamic conditions. It is important to highlight that this indicator should be greater than one to ensure the operability of the string. If it is less than one, it indicates failure due to exceeding the maximum capacity that the steel can provide, which has been surpassed by the stresses produced by the effects of the operational parameters.

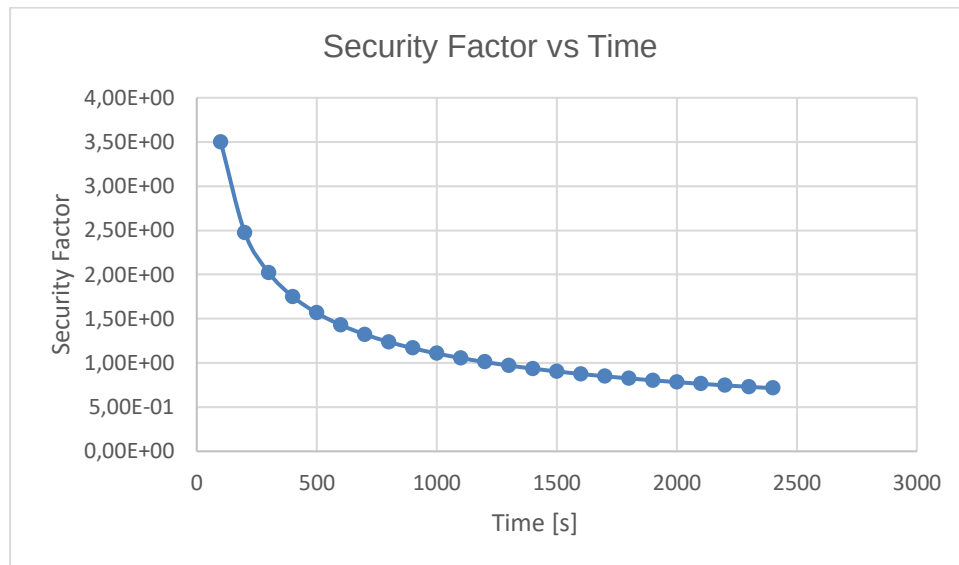


Figure 9. Factor of safety vs. time.

Figure 9 shows that the material of the drill string reaches its maximum resistance capacity after 1200 seconds. After this time, the stresses exceed the capacity of API K55 steel, and the element will experience failure due to rupture. This operational graph provides the operator with information on the safe maneuvering time for the drill in the event of the drill string becoming stuck during the opening of a reservoir, thereby saving time by preventing a failure that could prolong the work of opening a hydrocarbon reserve.

CONCLUSIONS

The principal plane where maximum normal stress occurs is located at 45° with respect to the horizontal plane. This indicates that if the drill string were to fail due to excessive normal stresses, the crack would tend to form at an angle corresponding to the principal plane. This phenomenon is critical for the structural integrity of the string, especially under conditions of high pressure and cyclic loading.

A mathematical model has been established to predict the deformations and stresses generated in a transient state in drill strings when a driving torque is applied during the opening of an oil reservoir. This model integrates differential equations that describe the dynamic behavior of the string under the influence of external forces and specific boundary conditions.

This mathematical model represents a significant advancement in the ability to predict and manage deformations and stresses in drill strings during the transient state of reservoir opening, contributing to structural and operational integrity in the oil industry.

The time required for drill strings to reach a permanent angular deformation for API K55 steel was determined to be 900 seconds. This value was obtained through experimental analysis involving the application of constant torsion to steel samples under controlled conditions.

The results obtained are critical for the planning and operation of drill strings, as permanent deformation can affect the structural integrity and operational efficiency of the string. The time of 900 seconds serves as a reference parameter for drilling engineers, allowing them to design procedures and select materials that minimize the risk of permanent deformation during drilling and production operations.

The service life of the drill string under the previously defined dynamic conditions in our analysis was established at 1200 seconds for steel that meets the API K55 standard in the event of a stuck drill bit with the transmission engaged. This value was determined using a combined approach of experimentation and numerical modeling, evaluating the behavior of the string under conditions of cyclic loading and extreme torsional stresses. The study also suggests that optimizing the design of the string, such as selecting materials with greater fatigue resistance and implementing protective coatings against corrosion, can extend the service life beyond 1200 seconds under adverse operating conditions.

REFERENCES

- [1] F. G. Clapp, «Review of Present Knowledge Regarding the Petroleum Resources of South America», Transactions of the AIME, vol. 57, n.o 01, pp. 914-967, dic. 1917, doi: 10.2118/917914-G
- [2] G. Herrera-Franco, F. J. Montalván, A. Velastegui-Montoya, y J. Caicedo-Potosí, «Vulnerability in a Populated Coastal Zone and Its Influence by Oil Wells in Santa Elena, Ecuador», Resources, vol. 11, n.o 8, p. 70, jul. 2022, doi: 10.3390/resources11080070.
- [3] N. R. Maddela, L. Scalvenzi, y K. Venkateswarlu, «Microbial degradation of total petroleum hydrocarbons in crude oil: a field-scale study at the low-land rainforest of Ecuador», Environmental Technology, vol. 38, n.o 20, pp. 2543-2550, oct. 2017, doi: 10.1080/09593330.2016.1270356.
- [4] M. Z. Lukawski et al., «Cost analysis of oil, gas, and geothermal well drilling», Journal of Petroleum Science and Engineering, vol. 118, pp. 1-14, jun. 2014, doi: 10.1016/j.petrol.2014.03.012.
- [5] F. A. Assaad, «Surface Geophysical Petroleum Exploration Methods», en Field Methods for Petroleum Geologists, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009, pp. 21-23. doi: 10.1007/978-3-540-78837-9_3.
- [6] N. Dai, A. Vafidis, y E. R. Kanasewich, «Wave propagation in heterogeneous, porous media: A velocity-stress, finite-difference method», GEOPHYSICS, vol. 60, n.o 2, pp. 327-340, mar. 1995, doi: 10.1190/1.1443769.
- [7] J. L. Ramirez y G. Larrazabal, «Imagenología sísmica 3D post-apilamiento en exploración petrolera». Conference CIMENICS 2010.
- [8] M. Borregales, O. Jiménez, y S. Buitrago, «Generación de mallas de cuadriláteros para yacimientos bidimensionales con fronteras internas complejas», 2009, doi: 10.13140/RG.2.1.4791.9520.
- [9] N. Quintero y F. Calvete, «Desarrollo de un modelo computacional para flujo bifásico en tres dimensiones usando el método de volúmenes finitos,» 2017. [En línea]. Available: earthdoc.org. [Último acceso: 2023].
- [10] J. Perira, «Simulación computacional en la industria del gas y petróleo. Casos de aplicación,» Atenea , vol. 9, p. 8-10, 2022.
- [11] V. Dávila, «Análisis y simulación numérica por MEF de los esfuerzos y deformaciones sometidas a cargas y temperaturas en ductos terrestres para transporte de petróleo,» Instituto Politécnico Nacional, Colombia, 2015
- [12] M. Martínez, Daniel Insausti y A. Corales, «Análisis y Modelado de los Esfuerzos en una Sección de Cemento de un Pozo Petrolero Utilizando el Método de Elementos de Contorno (MEC),» Mecánica Computacional, vol. XXXI, pp. 1065-1083, 2012.
- [13] F. García y E. Alarcón, «Simulación numérica por el Método de los Elementos de Contorno. Utilización de elementos isoparamétricos parabólicos,» de 1er. Simposium Nacional sobre Modelado y Simulación en la Industria y Servicios Públicos, Sevilla, 1980.
- [14] Y. Del Toro, J. Ortiz y Y. Pimienta, «Biblioteca Digital Personalizada sobre Simulación Numérica en la Industria petrolera,» Universidad de las Ciencias Informáticas, Cuba, 2010.
- [15] K. Gao, S. Fu, R. L. Gibson, E. T. Chung, y Y. Efendiev, «Generalized Multiscale Finite-Element Method (GMsFEM) for elastic wave propagation in heterogeneous, anisotropic media», Journal of Computational Physics, vol. 295, pp. 161-188, ago. 2015, doi: 10.1016/j.jcp.2015.03.068.
- [16] F. Marcondes y K. Sepehrnoori, «An element-based finite-volume method approach for heterogeneous and anisotropic compositional reservoir simulation», Journal of Petroleum Science and Engineering, vol. 73, n.o 1-2, pp. 99-106, ago. 2010, doi: 10.1016/j.petrol.2010.05.011
- [17] P. Blondel, «Computer-assisted interpretation», en The Handbook of Sidescan Sonar, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009, pp. 249-276. doi: 10.1007/978-3-540-49886-5_11.
- [18] M. M. Noack y S. Clark, «Acoustic wave and eikonal equations in a transformed metric space for various types of anisotropy», Heliyon, vol. 3, n.o 3, p. e00260, mar. 2017, doi: 10.1016/j.heliyon.2017.e00260.
- [19] J. Mellor, «The Dirac Delta Function», Medium, 25 de abril de 2022. <https://www.cantorsparadise.com/the-road-to-quantum-mechanics-part-7-the-dirac-delta-function-374540fae66e> (accedido 16 de junio de 2023).
- [20] T. F. Russell, «Stability Analysis and Switching Criteria for Adaptive Implicit Methods Based on the CFL Condition», en SPE Symposium on Reservoir Simulation, Houston, Texas: Society of Petroleum Engineers, 1989. doi: 10.2118/18416-MS.

A study of the mechanical and electrical properties of the cortical bone based on age, biochemical factors and Nernst equation

Alex J. Velez-Cruz
<https://orcid.org/0000-0002-9289-5256>
alvelez@pupr.edu
Polytechnic University of Puerto Rico
San Juan, PR-USA

Oscar Gilberto Dam
<https://orcid.org/0000-0002-0594-6757>
oscar.curmetals@gmail.com
Universidad Nacional Experimental Politecnica
"Antonio Jose de Sucre"
Vice-Rectorado Puerto Ordaz
Ciudad Guayana, Venezuela

*Correspondence author: alvelez@pupr.edu

Received (11/09/2024), Accepted (13/12/2024)

Abstract. - This study presents the development of a mathematical model to assess the performance of oil strings during the drilling process of a reservoir, considering the dynamic conditions and operational characteristics of the equipment during its functions, and taking into account the mechanical properties of API K55 steel. The research resulted in a set of equations that model the behavior of stresses and deformations experienced by the oil tools when transmitting torque, facilitating the opening of the reservoir. A finite element analysis was conducted to evaluate the structural behavior of the strings and to estimate the time required to reach permanent deformations, as well as the time before failure occurs.

Keywords: aging, calcium, PTH, pH, cortical bone, Young modulus, electrical conductivity, Nernst equation and electro-stimulation.

Un estudio de propiedades mecánicas y eléctricas del hueso cortical a partir de la edad, factores bioquímicos y la ecuación de Nernst

Resumen: Este artículo presenta una exploración en profundidad de la intrincada interacción entre las propiedades mecánicas y eléctricas en sistemas biológicos, centrándose en las relaciones experimentales entre el envejecimiento, la concentración de calcio, el pH y la PTH. La ecuación de Nernst es un principio electroquímico fundamental, el cual se examinará por su relevancia en la comprensión de estos fenómenos y su futura aplicación de electroestimulación para procesos de sanación del hueso cortical. El artículo profundiza en el impacto del envejecimiento en el cuerpo humano, el papel del calcio y el pH en los procesos fisiológicos, la importancia de la PTH y la aplicación de la ecuación de Nernst en sistemas biológicos.

Palabras clave: envejecimiento, calcio, PTH, pH, hueso cortical, módulo de elasticidad, conductividad eléctrica, ecuación de Nernst y electroestimulación.



I. INTRODUCTION

Bioengineering is a multidisciplinary field that integrates biology, chemistry, physics, and engineering principles to develop innovative solutions in healthcare and biomedical applications [1], [2]. Understanding the mechanical and electrical properties of biological tissues, such as bone, is crucial for various bioengineering applications, including the design of medical devices, drug delivery systems, and assessments of bone health [3]. The Nernst equation, derived from electrochemistry, is a fundamental tool that allows researchers to quantify the behavior of ions and electrical potential differences across biological membranes [4]. In the field of bioengineering, especially in the characterization of cortical bone, the Nernst equation is applied to determine the electrical properties of bone and the amount of electricity needed to pass through bone membranes [5]. This article provides a comprehensive overview of the Nernst equation, its theory, applications in bioengineering, and its specific relevance to cortical bone characterization. Bone healing is a complex biological process influenced by various factors, including mechanical stress, growth factors, cellular activities, and signaling pathways. However, electrical stimulation has been explored as a potential modality to promote bone healing and suggests that specific electrical parameters can have a positive impact on bone regeneration [6]. When electrical stimulation is used for bone healing, several factors should be considered, including the type of electrical stimulation (e.g., direct current, pulsed electromagnetic fields), the frequency, duration, and intensity of the stimulation, and how these parameters affect cellular and tissue responses [7]. Vitamin D plays an indirect role in stimulating the mineralization of the unmineralized bone matrix. After the absorption or skin production of vitamin D, the liver synthesizes 25-hydroxyvitamin D, and subsequently, the kidneys produce biologically active 1,25-dihydroxyvitamin D [$1,25-(OH)_2D$]. Serum $1,25-(OH)_2D$ is responsible for maintaining serum calcium and phosphorus concentrations adequate to allow passive mineralization of the unmineralized bone matrix. Serum $1,25-(OH)_2D$ primarily accomplishes this by stimulating the intestinal absorption of calcium and phosphorus. Serum $1,25-(OH)_2D$ also promotes the differentiation of osteoblasts and stimulates osteoblastic expression [8]. Vitamin D, specifically vitamin D3 (cholecalciferol), plays a crucial role in various physiological processes in the body, such as the regulation of calcium and phosphate metabolism. The primary active form of vitamin D is calcitriol, which is formed in the skin from vitamin D3 (cholecalciferol) in the presence of ultraviolet B radiation. Calcitriol acts in the intestines to increase the absorption of calcium and phosphate, additionally, calcitriol promotes the reabsorption of calcium in the kidneys, thereby preventing its loss through urine [9].

Calcium is an essential mineral that plays a vital role in many physiological processes, including muscle contraction, nerve function, and blood clotting. Calcium is the most abundant divalent cation in the body, representing about 2% of body weight, approximately 1,000 grams. It is distributed across various compartments, with constant exchange flows subject to complex regulatory mechanisms. More than 98% of the body's calcium is found in the bone compartment, of which approximately 1% is freely exchangeable with extracellular fluid [10], [11]. Serum calcium exists in three (3) different forms: ionic or free form, which accounts for approximately 50%; protein-bound, approximately 40%; and finally, about 10% forms complexes with anions such as bicarbonate, citrate, phosphate, and lactate [12]. Ionic calcium and calcium bound to anions constitute the ultra-filtrable fraction, with the ionic fraction being the only one with biological activity and, therefore, subject to hormonal control. The circulating extracellular calcium pool exists in three (3) different states, protein-bound, anion-bound, and free or ionized. Protein-bound, anion-bound, and free or ionized calcium account for approximately 40-45 %, 5-10 %, and 45-50 % of the total calcium in circulation respectively [13]. When calcium measurements are needed, there are two (2) options to obtain the concentration, total calcium, and ionized calcium (iCa^{2+}). The total calcium measurement is the sum of the subfractions (protein-bound, anion-bound, and free or ionized). Total, calcium measurement

is widely used because it is an accurate representation of calcium homeostasis in most cases and can be included as part of a routine blood collection. While total calcium measurement is valuable in many patients, it can yield misleading results in situations where circulating protein concentrations are abnormal either by excessive protein loss or impaired protein synthesis [14].

For these reasons, there exists a pressing clinical and analytical demand for the direct measurement of iCa^{2+} . The difficulty in measuring iCa^{2+} arises primarily from the rigorous preanalytical conditions that must be met. The equilibrium is influenced by pH levels, as the binding of calcium to proteins is notably sensitive to changes in pH. Thus, pH change is inversely proportional to the concentration of iCa^{2+} . Typically, changes by 5 % for every 0.1-unit change in pH as hydrogen ions effectively compete with iCa^{2+} for available negative charges on proteins [15]. The application of pH-adjusted calcium was clinically useful, but a change in pH that occurred after collection would affect the accuracy of the results by an error of 10% approximately [16]. Therefore, ion practice to correct the pH-adjusted free calcium measurements are recommended to multiply the iCa^{2+} by 10 % approximately.

$$\text{True Calcium} = \text{Reported Total Calcium} + 0.8 (4.0 - \text{Serum Albumin}) \quad (1)$$

where "True Calcium"; "Reported Total Calcium"; and "Serum Albumin" have units of mg/dL, m/dL, and g/dL respectively. The concentration of calcium in the blood is tightly regulated by the PTH and other factors [17]. Approximately, 90% of protein-bound calcium binds to albumin in a pH-dependent manner. Alterations that decrease serum albumin values will decrease total serum calcium but will have a smaller effect on ionized calcium concentration. In general, each g/dL of albumin binds approximately 0.2 mmol/L (0.8 mg/dL) of calcium, so to correct hypoalbuminemia, it is necessary to add 0.2 mmol/L to the total calcium concentration for every g/dL decrease in albumin concentration from the normal values of 4.0 g/dL [12], [18]. The binding of calcium to albumin is also affected by the pH of the extracellular fluid. Acidemia will decrease protein binding and increase ionized calcium. For every 0.1 decrease in ionized pH, calcium increases approximately by 0.05 mmol/L. The exact regulation of serum calcium is controlled by calcium itself through a calcium receptor and various hormones, the most important of which are PTH and 1,25-dihydroxyvitamin $D_3(1,25(OH)_2D_3)$. Maintaining appropriate calcium equilibrium, and therefore serum calcium levels, is a complex and dynamic process involving calcium absorption and excretion in the intestines, filtration, and reabsorption in the kidneys, and its storage and mobilization in the skeleton. Calcium homeostasis refers to the regulation of the calcium ions concentration in the extracellular fluid [19]. Normal serum calcium concentration varies between laboratories but is usually 8.5 to 10.5 mg/dL (2.1 to 2.6 mmol/L) and it represents the sum of the three circulating fractions mentioned above [20].

Table 1. Calcium intakes by life stage.

LSG (Yr.)	AI (mg)	EAR (mg)	RDA (mg)	TUIL (mg)
MALES				
19-30	—	800	1,000	2,500
31-50	—	800	1,000	2,500
51-70	—	800	1,000	2,000
> 70	—	1,000	1,200	2,000
FEMALES				
19-30	—	800	1,000	2,500
31-50	—	800	1,000	2,500
51-70	—	1,000	1,200	2,000
> 70	—	1,000	1,200	2,000

LSG = Life Stage Group; AI = Adequate Intake; EAR = Estimated Average Requirement; RDA = Recommended Dietary Allowance; TUIL = Tolerable Upper Intake Level, The LSG unit is years (Yr.). The symbol (>) means greater than [21].

On the other hand, the body's pH is regulated by various systems, including calcium regulation systems. Acid-based balance is important for maintaining the normal functioning of enzymes and metabolic processes. When blood calcium levels decrease, the release of PTH can be activated, which in turn can influence acid-base balance. Acidosis, characterized by a lower-than-normal blood pH, can affect the binding of calcium to proteins and, as a result, influence ionized calcium levels in the blood. This can have an impact on hormonal response and calcium homeostasis. The PTH is secreted by the parathyroid glands in response to low levels of calcium in the blood. PTH increases the reabsorption of calcium in the kidneys, thereby releasing more calcium into the bloodstream. PTH stimulates the release of calcium and phosphate from the bones, which raises the concentration of calcium in the blood. Additionally, PTH plays a crucial role in regulating calcium levels in the body, with one of its primary targets being bone tissue. Below, it is describing the mechanism of action of PTH in bone and its principal functions:

- **Stimulation of Osteoclast Activity:** PTH activates osteoclasts, which are cells that resorb bone.
- **Inhibition of Osteoblast Activity:** Although PTH primarily stimulates bone resorption, it can also indirectly inhibit the activity of osteoblasts, reducing bone formation under certain conditions [23].
- **Calcium Homeostasis:** PTH plays a central role in maintaining serum calcium levels within a narrow range. This calcium is then available for vital physiological functions such as muscle contraction and nerve signaling.
- **Response to Hypocalcemia:** When blood calcium levels decrease, the secretion of PTH increases. This hormone acts rapidly to mobilize calcium from bone tissue, ensuring that the body maintains the necessary levels for normal physiological processes.
- **Bone Remodeling:** PTH is a key regulator of bone remodeling, which involves both bone resorption and formation. By promoting bone resorption, PTH contributes to the removal of old or damaged bone tissue and the release of stored calcium. This, in turn, allows for the deposition of new bone matrix when conditions are appropriate.

In this study, the investigation was carried out to explore the relationship between calcium concentration, age, PTH, and pH using an electrochemistry equation and experimental data from mechanical and electrical properties of the cortical bone. We have explored the significance of the Nernst equation in elucidating ion transport across biological membranes and its role in maintaining cellular electrical potentials, let's delve into the complexities of determining the precise electrical requirements for bone healing.

II. FIELDS OF INTEREST TO THE SUBJECT

The Nernst equation describes the relationship between the concentration of ions and the electric potential difference (voltage) across a membrane or at an electrode interface. This equation is crucial for understanding ion transport phenomena across biological membranes, including cell membranes, and provides insights into how cells maintain their electrical potential as well as the electrical potentials at a cellular level. However, determining the exact amount of electricity needed for bone healing would require a more comprehensive approach that considers all relevant biomechanical factors and mechanisms. For that reason, experiments were conducted to determine the mechanical and electrical properties of the cortical bone, emphasizing the experimental correlation between both properties through a statistical analysis. Additionally, biochemical factors and components such as pH, PTH, and calcium concentration were analyzed to understand their interaction and the biological response when electrical stimulation is applied.

The Nernst equation is typically expressed as follows:

$$E = E_0 - \frac{R \cdot T}{(2) \cdot F} \cdot \ln \left(\frac{[Ca^{2+}]_{in}}{[Ca^{2+}]_{out}} \right) \quad (2)$$

Where:

- E represents the electric potential difference (in volts) across a membrane or at an electrode.
- E_0 is the standard electrode potential, a reference value.
- R is the universal gas constant.
- T is the absolute temperature (in Kelvin).
- n is the number of electrons transferred in the reaction.
- F is the Faraday constant.
- $[A^-]$ y $[A]$ are concentrations of the ion Ca^{2+} on either side of the membrane or at the electrode interface.

According to (2) above, the potential difference across a membrane is proportional to the concentration gradient of the ions involved, where $[Ca^{2+}]_{in}$ is the concentration of calcium ions inside the cell, and $[Ca^{2+}]_{out}$ is the concentration of calcium ions outside the cell and n is 2 due to the number of electrons transferred from Ca^{2+} . The Nernst equation illustrates how changes in ion concentrations can affect the electric potential across a membrane. The electrical characterization of biological tissues is a great interest in the bioengineering field, especially, obtaining electrical properties of biological tissues such as bone structures. The most common electrical properties associated with bone studies include electrical conductivity, permittivity, and impedance, which provide information about the composition, health, and functionality of the tissue. The Nernst equation can be applied to assess the electrical behavior of biological tissues and explore how different ions influence their electrical properties.

For example, the electrical conductivity of cortical bone depends on various factors, including ion concentrations and the porosity of the bone matrix. Ions such as calcium (Ca^{2+}) and phosphate (PO_4^{3-}) play a crucial role in bone tissue. The Nernst equation can be used to calculate the equilibrium potential for these ions and understand how they influence the electrical conductivity of cortical bone. Studies have shown that changes in bone health, such as osteoporosis or the presence of fractures, can alter the electrical properties of cortical bone. By measuring the electrical conductivity of bone tissue, bioengineers can assess bone quality and monitor bone health, providing valuable information for clinical diagnoses and treatment planning. Electrostimulation has proven to be promising in promoting bone healing and regeneration. Techniques such as Pulsed Electromagnetic Field Therapy (PEMF) involve the application of electric fields to bone tissue to stimulate cellular responses that enhance bone growth. Bioengineers can utilize the Nernst equation to calculate the electric potential required to influence specific ion concentrations within bone tissue. This information helps optimize the design of electric stimulation devices for bone healing, potentially speeding up the recovery process for individuals with bone fractures or orthopedic surgeries [34].

III. METHODOLOGY

A. Methodology for literature review

The methodology described herein outlines a systematic and rigorous approach to the selection of research papers in the fields of bioengineering and science. The process, consisting of thirteen distinct steps, is designed to curate a collection of papers that meet stringent criteria for scientific excellence, relevance, ethical standards, and potential impact on the advancement of knowledge within the realm of engineering applications to biological systems. By employing a comprehensive and meticulous screening process, we aim to ensure that only the most valuable and deserving research contributions are included in our final selection. This methodology serves as a robust framework for the critical evaluation of scientific literature,

facilitating the identification of papers that make significant contributions to the fields of science and bioengineering while upholding the highest standards of quality and ethics.

1. Initial Screening - Collecting a pool of research papers related to bioengineering and science topics.
2. Peer Review Evaluation - Exclude papers that have not undergone a thorough peer review process.
3. Relevance Assessment - Evaluate papers for their relevance to science and bioengineering fields. Exclude papers that are not directly related to engineering applications to biological systems, or related topics.
4. Scientific Rigor Evaluation - Assess the scientific rigor of the selected papers. Exclude papers that lack well-designed experiments, appropriate statistical analysis, or robust methodology.
5. Clear Objectives and Hypotheses - Examine the papers for clear and well-stated objectives and hypotheses. Exclude papers that do not effectively address these objectives.
6. Originality Check - Verify whether the research presents novel findings, methods, or applications that contribute to the advancement of bioengineering knowledge. Exclude papers that do not meet this criterion.
7. Significance Assessment - Determine whether the paper makes a substantial contribution to the science and bioengineering fields. Exclude papers that do not tackle important problems, or advance understanding in a meaningful way.
8. Clarity and Coherence Evaluation - Evaluate the organization and clarity of the papers. Exclude papers poorly organized or with unclear writing that hinders effective communication of results, and conclusions.
9. Ethical Review - Ensure that the research follows ethical standards, including the protection of human and animal subjects and proper citation practices. Exclude papers that violate ethical guidelines.
10. Interdisciplinary Assessment - Consider whether the research demonstrates a strong interdisciplinary approach, combining principles from engineering, biology, and other relevant sciences. Favor papers that exhibit interdisciplinary characteristics.
11. Impact Factor Consideration - Consider the potential impact of research on healthcare, technology, or engineering and science applications. Consider this as a positive factor when evaluating the papers.
12. Exclusion Criteria Application - Apply the exclusion criteria to the selected papers to exclude any that meet any of the criteria mentioned in the exclusion list.
13. Final Selection - After applying all the criteria, select the papers that meet the inclusion criteria while excluding those that meet any of the exclusion criteria. See Table 2 for Inclusion and Exclusion criteria.

Table 2. Inclusion and exclusion criteria.

Criteria	
Inclusion	Exclusion
Peer Review Journals: Papers should undergo a thorough peer review process to assess their quality and validity.	Unsubstantiated Claims: Research with unsupported or exaggerated claims should be rejected.
Relevance to Science and Bioengineering Fields: Relate to applications of engineering principles to biological systems, biomedical devices, or related topics.	Poor Methodology: Research with inadequate experimental design, data collection, or statistical analysis may be rejected.
Scientific Rigor: Demonstrate a high level of scientific rigor, including well-designed experiments, appropriate statistical analysis, and robust methodology.	Plagiarism and Ethical Violations: Papers found to contain plagiarism or ethical violations, such as fabrication or falsification of data, should be rejected.
Clear Objectives: The objectives and hypotheses should be clearly stated, and the paper should effectively address these objectives.	Insufficient Originality: Papers that do not present significant new contributions or merely replicate existing work may be rejected.
Originality: The research should present novel findings, methods, or applications that contribute to the advancement of bioengineering knowledge.	Inadequate Presentation: Papers with poor organization, unclear writing, or insufficient data presentation may be rejected.
Significance: The paper should make a substantial contribution to science and bioengineering fields, either by tackling important problems, providing innovation, or advancing understanding in a meaningful way.	Inadequate Ethical Considerations: Papers that do not adhere to ethical standards regarding the use of human or animal subjects or fail to disclose conflicts of interest may be rejected.
Clarity and Coherence: The paper should be well-organized, with clear writing to communicate results, discussion, and conclusions effectively.	Lack of Relevance: Papers that are not related to science and bioengineering or do not have a clear connection to the fields should be rejected.
Ethical Practice: Research must follow ethical standards, including human and animal subject protection, as well as appropriate citation and avoidance of plagiarism.	Conflict of Interest: Papers with undisclosed conflicts of interest that could bias the investigation, or its interpretation should be rejected.
Interdisciplinary Nature: The research may be favored if it demonstrates a strong interdisciplinary approach, combining principles from engineering, biology, and other relevant sciences or fields.	Poor Presentation: Papers with disorganized writing, ineffective communication of results, unclear data presentation, or inadequate explanations may be excluded.
Impact Factor: Consideration of the potential impact of research on healthcare, technology, or any other applications within the bioengineering and science fields.	Outdated or Irrelevant References: Papers that heavily rely on outdated or irrelevant references may be rejected.

The keywords used to obtain the articles were as follows:

- "Calcium concentration" and "pH"
- "Calcium concentration" and "PTH"
- "Mechanical properties" and "Electrical properties"
- "Nernst equation" and "Electrochemical potentials"
- "aging" and "calcium"
- "Aging" and "Young modulus"
- "Vitamin D" and "Calcium absorption"
- "Calcium homeostasis" and "PTH mechanism"
- "Hormonal regulation" and "Bone health"
- "Bone healing" and "electrostimulation"

B. Methodology for experimental analysis

This methodology outlines the experimental procedures and analytical steps performed to correlate mechanical and electrical properties of cortical bones obtained in the first phase of this investigation with factors such as gender, age, calcium concentration, pH, and PTH levels, linking this data to the Nernst equation for clinical application. The process consists of twelve distinct steps to perform the experimental analysis of this research. The study aims to establish a relationship between these properties and use them to predict the electric potential difference across cortical bone membranes for safe electrostimulation in bone fracture healing.

1. Gather data related to demographic and biochemical factors such as gender, age, calcium concentration, pH, and PTH levels. The data obtained shall not be more than 10 years back from 2023.
2. Prepare an organized table for the factors mentioned in Step 1 and provide it in the Results section.
3. Correlate demographic data with biochemical factors.
4. Correlate the mechanical and electrical properties with demographic data and biochemical factors using statistical analysis.
5. Apply the Nernst equation to relate the electrical properties to ion concentration and membrane potential.
6. Use the correlation obtained in Step 4 and the Nernst equation to predict the electric potential difference (voltage) across cortical bone membranes.
7. Based on the predicted voltage, determine safe levels for electrostimulation in bone fracture healing.
8. Provide clinical recommendations for electrostimulation therapy.
9. Provide recommendations for healthcare practitioners regarding the application of electrostimulation for bone fracture patients, considering gender, age, calcium concentration, pH, and PTH levels.
10. Summarize the findings regarding the correlation between mechanical and electrical properties of cortical bones with biochemical factors.
11. Highlight the clinical implications and potential benefits of using the predicted voltage relationship for electrostimulation applications in bone fracture healing.
12. Include all relevant references to prior studies, methodologies, and scientific literature related to bone mechanics and fracture healing, bioimpedance, and electrostimulation.

IV. RESULTS

The basic analyzed data and corresponding results are described below.

A. Demographic and biochemical data

The gathered data used jointly with the mathematical model so developed is presented in Table 3 below.

Table 3. Demographic data based on biochemical factors.

AG (Yr.)	CCB (mg/dL)	PTH-L (pg/mL)	pH Sc. (0-14)
MALES			
19-30	8.6 - 10.0	10 - 55	7.35 - 7.45
31-50	8.6 - 10.2	10 - 50	7.35 - 7.45
51-70	8.6 - 10.4	10 - 55	7.35 - 7.45
> 70	8.6 - 10.5	10 - 65	7.35 - 7.45
FEMALES			
19-30	8.6 - 10.0	10 - 50	7.35 - 7.45
31-50	8.6 - 10.2	10 - 50	7.35 - 7.45
51-70	8.6 - 10.4	10 - 55	7.35 - 7.45
> 70	8.6 - 10.5	10 - 65	7.35 - 7.45

AG = Age Group; CCB = Calcium Concentration in Blood; PTH-L = Parathyroid Hormone Levels; pH Sc. = Acidity/Alkalinity Scale. AG unit is years (Yr.). The symbol (>) means greater than., CCB, PTH-L, and pH Sc. Values were obtained from [35], [36], [37].

The obtained results show that calcium concentration decreases with age due to changes in bone metabolism and hormonal regulation. It was also found that PTH levels increase with age as a compensatory mechanism to maintain calcium homeostasis. Furthermore, we observed that pH has a significant effect on calcium concentration due to its impact on ionization states.

B. Mechanical and electrical properties correlation with demographic data, and biochemical factors

To correlate the obtained experimental data, conductivity and permittivity variables were plotted as show in Fig. 1.

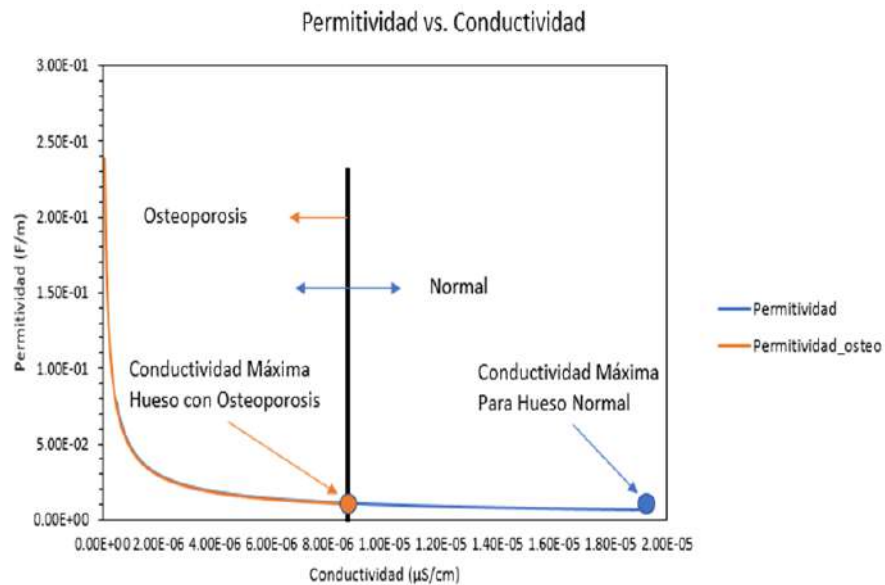


Fig. 1. Conductivity and Permittivity Relationship. Source: The authors.

For a better understanding of Fig. 1, it is assumed that the studied bone falls within either the osteoporosis or normal condition, but as the osteoporosis bone can resist a tension stress of about 18.28 MPa, when compared this value with the obtained value of 28.6 MPa thus it is 'possible to conclude as a normal bone. Nevertheless, by using (3) and (4), it is also possible to get $\sigma_{\text{Elec. Max}}$ y ϵ_a values for the two bones conditions respectively.

$$\sigma_{\text{Elec. Max(normal)}} = \frac{E - 10,845}{8.82 \times 10^8} \quad (3)$$

$$\sigma_{\text{Elec. Max(normal)}} = \frac{28.6 \times 10^6 - 10,845}{8.82 \times 10^8} = \boxed{0.0323(\mu\text{S/cm})}$$

$$Y = 3 \times 10^{-6} X^{-0.7} \quad \text{o} \quad \text{Permitividad} (\epsilon_a) = 3 \times 10^{-6} (\sigma_{\text{Elec. Max(normal)}})^{-0.7} \quad (4)$$

$$\epsilon_a = 3 \times 10^{-6} (\sigma_{\text{Elec. Max(normal)}})^{-0.7} \rightarrow 3 \times 10^{-6} (0.0323(\mu\text{S/cm}))^{-0.7} = \boxed{3.316 \times 10^{-5} (\text{F/m})}$$

C. Mechanical and electric properties relationship

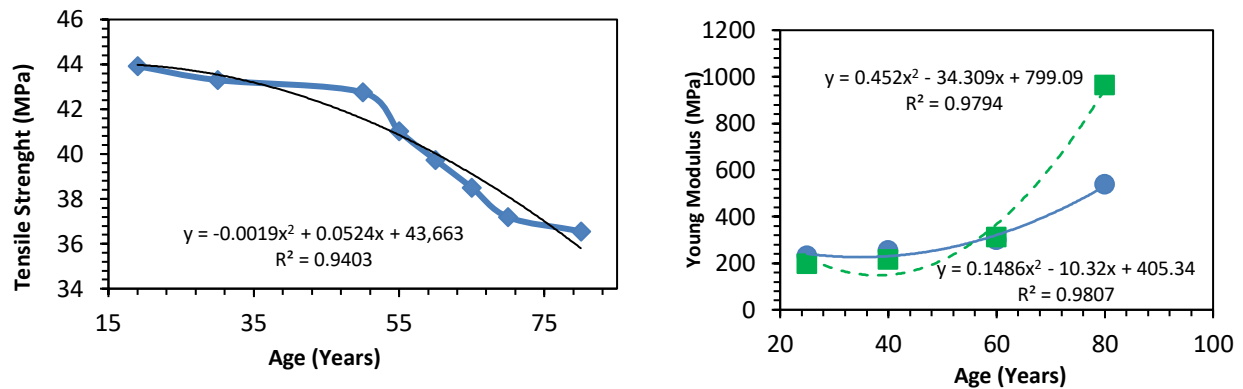


Fig. 2. (a) Left: Age effect on tensile stress; (b) Right: Young modulus (green male, blue women) vs. age. Source: The authors.

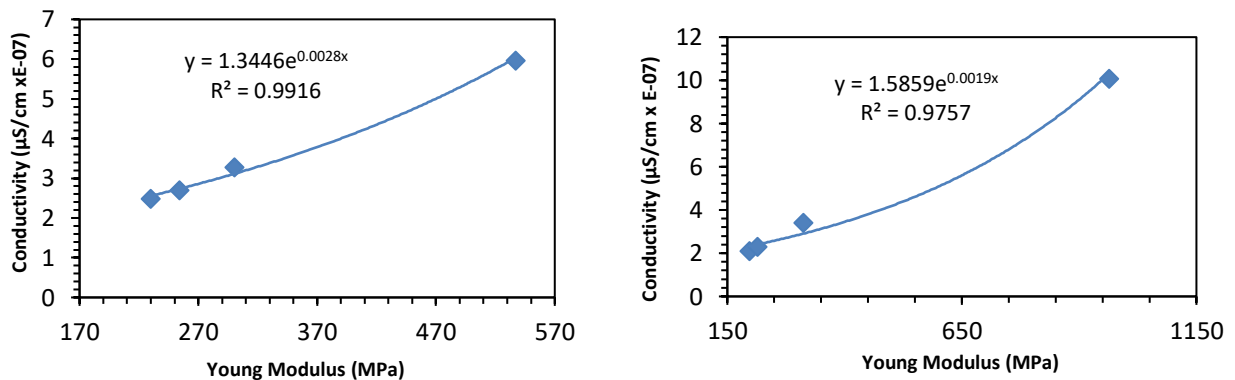


Fig. 3. Conductivity vs. Young modulus, (a) left women, (b) right men. Source: The authors.

To investigate the relationships between mechanical and electrical properties, it was imperative to determine the slope of the mechanical graphs for each of the samples, which signifies the modulus of elasticity.

$$\text{Young Modulus (E)} = 8.82 \times 10^8 \times \text{Conductivity}_{\text{max}}(\sigma_{\text{Elec. Max}}) + 10.845 \quad (5)$$

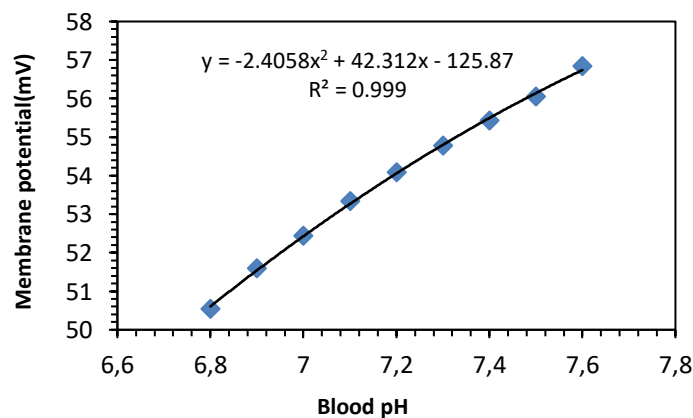


Fig. 4. Effect of pH in blood on the membrane's electric potential. Source: The authors.

CONCLUSIONS

In conclusion, the present research provides new insights into the complex relationship between calcium concentration, age, PTH, and pH. The Nernst equation has been identified as a valuable application in the field of bioengineering, particularly in the characterization of cortical bone. By understanding the electrical properties of cortical bone and applying the Nernst equation, researchers can assess bone health, and optimize electrical stimulation therapies for bone healing. This interdisciplinary approach demonstrates how the principles of science and engineering can be harnessed to advance healthcare solutions and improve the quality of life for individuals with bone-related conditions. The findings suggest that changes in these factors can have significant implications for human health and disease. Further research is needed to fully understand these relationships and develop effective interventions to prevent or treat related conditions by means of define stimulation parameters through iterative experiments to achieve the desired biological responses while minimizing potential side effects. Finally, further experimental tests will be useful to validate the effectiveness of the designed electrical stimulation involving in vitro studies using samples of bone tissue or in vivo studies with animal models.

ACKNOWLEDGMENT

I would like to express my sincere gratitude to UNEXPO, Puerto Ordaz, for their continuous support and guidance throughout the process of this research, the preparation of this paper and transformative years. Their insights and assistance have been instrumental in shaping the outcome of this work.

REFERENCES

- [1] M. F. Bear, B. W. Connors y M. A. Paradiso, *Neuroscience: Exploring the Brain* (4th ed.), Wolters Kluwer, 2016.
- [2] B. Alberts, A. Johnson, J. Lewis, M. Raff, K. Roberts y P. Walter, *Molecular Biology of the Cell* (4th ed.), Garland Science, 2002.
- [3] D. Purves, G. J. Augustine, D. Fitzpatrick, L. C. Katz, A. S. La Mantia y J. O. McNamara, *Neuroscience* (6th ed.), Oxford University Press, 2017.
- [4] A. J. Bard y L. R. Faulkner, *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*, John Wiley & Sons, 2000.
- [5] C. T. Rubin, K. J. McLeod y L. E. Lanyon, «Prevention of osteoporosis by pulsed electromagnetic fields, » *J Bone Joint Surg Am*, vol. 71, n° 3, pp. 411-417, 1989.
- [6] M. Griffin y A. Bayat, «Electrical stimulation in bone healing: critical analysis by evaluating levels of evidence, » *Eplasty*, vol. 11, n° e34, pp. 303-353, 2011.
- [7] L. Leppik, K. M. C. Oliveira, M. B. Bhavsar y J. H. Barker, «Electrical stimulation in bone tissue engineering treatments, » *Eur J Trauma Emerg Surg*, vol. 46, n° 2, pp. 231-244, 2020.
- [8] C. Chen, R. Adhikari, D. L. White y W. K. Kim, «Role of 1,25- Dihydroxyvitamin D3 on Osteogenic Differentiation and Mineralization of Chicken Mesenchymal Stem Cells, » *Frontiers in Physiology*, vol. 12, p. 1-13, 2021.
- [9] M. F. Holick, «Vitamin D Deficiency, » *New England Journal of Medicine*, vol. 357, n° 3, pp. 266-281, 2007.
- [10] R. Goswami, «Primer on the metabolic bone diseases and disorders of mineral metabolism, » *Indian J Med Res*, vol. 144, n° 33, p. 489-90, 2016.
- [11] L. J. Deftos, «Calcium Metabolism, » de *Clinical Essentials of Calcium and Skeletal Disorders*, Caddo, OK, Professional Communications, Inc., 1998, pp. 44-71.
- [12] F. Carral San Laureanoa, G. Oliveira Fusterb y M. Aguilar Diosdado, «Homeostasis del calcio, fósforo y magnesio, » *Medicina Integral*, vol. 36, n° 7, pp. 261-266, 2000.
- [13] A. Hamroun, J.-D. Pekar, A. Lionet, A. Ghulam, P. Maboudou, A. Mercier, T. Brousseau, G. Grzych y F. Glowacki, «Ionized calcium: analytical challenges and clinical relevance, » *Journal of Laboratory and Precision Medicine*, vol. 5, pp. 1-16, 2020.
- [14] Z. D. Hu, Y. L. Huang, M. Y. Wang, G. J. Hu y Y. Q. Han, «Predictive accuracy of serum total calcium for both critically high and critically low ionized calcium in critical illness, » *J Clin Lab Anal.*, vol. 32, n° 9, pp. 1-5, 2018.
- [15] J. O. Joswig, J. Anders, H. Zhang, C. Rademacher y B. G. Keller, «The molecular basis for the pH-dependent calcium affinity of the pattern recognition receptor langerin, » *J Biol Chem*, pp. 1-16, 2021.
- [16] N. Fogh-Andersen, «Ionized calcium analyzer with a built-in pH correction, » *Clin Chem*, vol. 27, n° 7, pp. 1264-1267, 1981.
- [17] E. Yu y S. Sharma, «Physiology, Calcium, » *StatPearls Publishing*, Treasure Island, FL, 2023.

- [18] D. A. Bushinsky y R. D. Monk, «Electrolyte quintet: Calcium, » The Lancet, vol. 352, n° 9124, pp. 306-311, 1998.
[19] L. A. Negrea, «Hypocalcemia and hypercalcemia, » de Nephrology Secrets (4 ed.), Elsevier, 2019, pp. 526-531.
[20] J. Feher, «9.7 - Calcium and Phosphorus Homeostasis I: The Calcitropic Hormones, » de Quantitative Human Physiology (2nd ed.), Richmond, VA, Elsevier, 2017, pp. 924-932.

AUTHORS



Alex J. Velez-Cruz, is an engineering doctoral student and mechanical engineer who was born and raised in Puerto Rico (PR). He is a faculty member of the BME Department at the Polytechnic University of PR and is a young passionate researcher and an inventor that works constantly in the product development area with the intent to serve and help people in need.



Oscar Gilberto Dam, is a PhD in Engineering, specialized in metallurgical and industrial applications. He is the Co-Founder of the Metallurgical and Materials Research Institute at the UNEXPO. He is a well respectable and prestigious professor and metallurgical engineer within the Latin American scientist community.

Desarrollo de sistemas inteligentes para la gestión de conflictos laborales: Un enfoque desde la ingeniería industrial y la sociología organizacional

DOI: <https://doi.org/10.47460/athenea.v6i19.89>

Edición: Primera

Editorial: AutanaBooks

Fecha de publicación: 27/03/2025

ISBN: 978-9942-51-176-8



José Calizaya López
<https://orcid.org/0000-0001-6221-0909>
jcalizayal@unsa.edu.pe
Universidad Nacional
de San Agustín de
Arequipa
Arequipa, Perú



Ariosto Carita-
Choquecahua
<https://orcid.org/0000-0001-6878-6925>
acarita@unsa.edu.pe
Universidad Nacional
de San Agustín de
Arequipa
Arequipa, Perú



Lady Concha-Díaz
<https://orcid.org/0000-0003-3733-8665>
lconcha@unsa.edu.pe
Universidad Nacional
de San Agustín de
Arequipa
Arequipa, Perú



Renzo Rimaneth
Rivero Fernández
<https://orcid.org/0000-0002-9295-9790>
rriverof@ucsm.edu.pe
Universidad Católica de
Santa María
Arequipa, Perú



Claudia Patricia
Cardenas-Ticona
<https://orcid.org/0000-0002-2739-1668>
ccardenast@unsa.edu.pe
Universidad Nacional
de San Agustín de
Arequipa
Arequipa, Perú



Ana Rosario Miaury-Vilca
<https://orcid.org/0000-0002-2992-1239>
amiaury@unsa.edu.pe
Universidad Nacional de
San Agustín de Arequipa
Arequipa, Perú

Resumen: El desarrollo del sistema inteligente para la gestión de conflictos laborales se llevó a cabo con el objetivo de mejorar la identificación, prevención y resolución de conflictos en el entorno organizacional mediante el uso de herramientas avanzadas de inteligencia artificial y análisis de redes sociales. El sistema fue diseñado para detectar patrones de conflicto, generar soluciones automatizadas y ajustar dinámicamente sus respuestas mediante técnicas de machine learning, procesamiento de lenguaje natural y análisis de teoría de grafos. La metodología incluyó un análisis detallado de la estructura organizacional, la aplicación de una encuesta para evaluar la percepción y las dinámicas laborales, y la implementación de un sistema de retroalimentación continua para mejorar el rendimiento del sistema. El análisis de redes permitió identificar empleados clave con alta influencia social y detectar puntos críticos en la estructura organizacional, mientras que el análisis de sentimiento y las respuestas automatizadas fortalecieron la capacidad del sistema para resolver conflictos de manera eficiente. Los resultados mostraron una mejora significativa en la precisión en la detección de conflictos (del 60% al 90%), una reducción del 30% en el número de conflictos reportados, y un aumento en la satisfacción de los empleados (del 60% al 88%). La mejora en el clima laboral y la capacidad del sistema para adaptarse a diferentes entornos organizacionales confirmaron la efectividad y escalabilidad de la solución implementada.

Palabras clave: sociología, sistemas inteligentes, gestión de conflictos, ingeniería.

I. INTRODUCCIÓN

En un entorno empresarial cada vez más dinámico y complejo, la gestión de conflictos laborales [1] se ha convertido en un desafío estratégico para las organizaciones. Los conflictos en el ámbito laboral pueden surgir debido a diversas causas, como discrepancias en las condiciones laborales, diferencias en la comunicación, problemas de liderazgo, malentendidos culturales y tensiones generadas por la adopción de nuevas tecnologías o procesos organizacionales. Si no se manejan adecuadamente, estos conflictos pueden derivar en una disminución de la productividad, un aumento de la rotación de personal, daños en la reputación corporativa y un ambiente de trabajo negativo. En este contexto, la implementación de sistemas inteligentes para la gestión de conflictos laborales [2] surge como una solución innovadora y eficaz que combina herramientas tecnológicas avanzadas con un enfoque sociológico para comprender las dinámicas organizacionales y las relaciones interpersonales en el trabajo.

El desarrollo de sistemas inteligentes para la gestión de conflictos laborales se sitúa en la intersección de dos disciplinas clave: la ingeniería industrial y la sociología organizacional. Desde la ingeniería industrial, el enfoque se centra en la optimización de procesos, la automatización de decisiones y la mejora de la eficiencia operativa mediante el uso de algoritmos, inteligencia artificial (IA) y análisis de datos. Este enfoque permite diseñar soluciones personalizadas para identificar, analizar y mitigar conflictos laborales en tiempo real, basándose en datos históricos, patrones de comportamiento y predicciones generadas por modelos matemáticos y sistemas de aprendizaje automático [3], [4].

Por otro lado, la sociología organizacional aporta una perspectiva fundamental para comprender las causas profundas de los conflictos laborales [5], las dinámicas de poder, las relaciones interpersonales y los factores culturales que influyen en el comportamiento de los empleados. A través del análisis de estas dimensiones sociales, es posible diseñar sistemas inteligentes que no solo respondan a los conflictos desde una perspectiva técnica, sino que también consideren los factores humanos y organizacionales

involucrados [6]. Este enfoque holístico permite desarrollar herramientas capaces de identificar señales tempranas de conflicto, sugerir intervenciones específicas y promover una cultura organizacional basada en la colaboración y el entendimiento mutuo.

La combinación de la ingeniería industrial y la sociología organizacional en el desarrollo de sistemas inteligentes representa una oportunidad para mejorar significativamente la gestión de conflictos laborales en las organizaciones modernas [7]. La implementación de estos sistemas puede incluir plataformas de resolución automatizada de conflictos, herramientas de análisis predictivo de clima laboral, chatbots de apoyo para la mediación de conflictos, y sistemas de retroalimentación continua para evaluar el impacto de las intervenciones. Estos sistemas no solo mejoran la eficiencia en la gestión de conflictos, sino que también promueven una cultura empresarial más resiliente, adaptable y centrada en el bienestar de los empleados.

En un mundo empresarial caracterizado por la globalización, la diversidad cultural y la digitalización acelerada, la gestión efectiva de los conflictos laborales mediante sistemas inteligentes se convierte en una ventaja competitiva clave [8]. Las organizaciones que logren implementar estas soluciones de manera estratégica podrán no solo mejorar la productividad y la satisfacción de los empleados, sino también fortalecer su capacidad de adaptación y respuesta ante los desafíos del entorno empresarial actual.

Este trabajo explora el potencial de los sistemas inteligentes para la gestión de conflictos laborales desde una perspectiva interdisciplinaria, destacando los beneficios, desafíos y mejores prácticas en la implementación de estas soluciones innovadoras. Con estas premisas, en este trabajo se ha desarrollado una propuesta basada en inteligencia artificial para atenuar las posibles situaciones de conflicto que se presentan en ambientes laborales.

II. DESARROLLO

La incorporación de herramientas inteligentes en la gestión empresarial y las situaciones laborales ha transformado radicalmente la forma en que las organizaciones operan y toman decisiones [9]. El auge de la inteligencia artificial (IA), el aprendizaje automático (machine learning), el procesamiento del lenguaje natural (NLP) y la analítica avanzada ha permitido diseñar soluciones capaces de automatizar procesos, mejorar la eficiencia operativa, personalizar la toma de decisiones y anticipar problemas antes de que ocurran. Estas herramientas no solo están optimizando el funcionamiento interno de las empresas, sino que también están influyendo en la dinámica laboral, en la relación entre los empleados y en la forma en que se gestionan los conflictos y las interacciones en el entorno de trabajo [10].

Una de las principales aplicaciones de las herramientas inteligentes en las gestiones empresariales es la automatización de procesos repetitivos y operativos mediante sistemas de RPA (*Robotic Process Automation*) y algoritmos de IA. Estos sistemas pueden encargarse de tareas como la gestión de inventarios, la facturación, el procesamiento de datos y la atención al cliente [4], [9], lo que permite reducir errores humanos, mejorar la velocidad de ejecución y liberar tiempo para que los empleados se concentren en tareas de mayor valor estratégico.

Se ha podido observar que, sistemas basados en machine learning pueden analizar patrones históricos de ventas y demanda para optimizar la gestión de la cadena de suministro y prever posibles interrupciones [11]. De manera similar, los sistemas de IA pueden monitorear indicadores clave de rendimiento (KPI) y ajustar automáticamente las operaciones en función de las condiciones del mercado o las demandas de los clientes.

Además, las herramientas inteligentes permiten mejorar la toma de decisiones empresariales al proporcionar análisis predictivo y prescriptivo basados en grandes volúmenes de datos (big data). Los sistemas de IA pueden identificar patrones y correlaciones complejas que serían difíciles de detectar mediante métodos tradicionales, ofreciendo recomendaciones basadas en datos para optimizar la estrategia empresarial.

Un ejemplo de esto es el uso de algoritmos de análisis de sentimientos para evaluar la percepción del mercado sobre una marca o producto [12], lo que permite a las empresas adaptar sus estrategias de marketing y posicionamiento en tiempo real. También se están utilizando herramientas inteligentes para realizar análisis de riesgos y detectar amenazas potenciales en las finanzas o la cadena de suministro, mejorando así la resiliencia organizacional.

Por otra parte, las herramientas inteligentes están permitiendo una personalización sin precedentes en la experiencia del cliente y del empleado. Los sistemas de recomendación basados en IA pueden ofrecer productos o servicios personalizados a los clientes, mejorando la satisfacción y la fidelidad. En el entorno laboral, los sistemas de IA pueden adaptar los programas de formación y desarrollo profesional según las competencias y necesidades individuales de cada empleado. Las plataformas de gestión del talento utilizan IA para analizar el rendimiento y recomendar planes de carrera personalizados, identificando oportunidades de capacitación y desarrollo de habilidades.

En el ámbito de la gestión de conflictos laborales [13], las herramientas inteligentes están permitiendo una detección temprana y una respuesta más efectiva. Los sistemas de análisis de datos pueden monitorear patrones de comportamiento y comunicación en la organización para identificar señales de tensiones o conflictos emergentes.

Trabajos previos han mostrado que, plataformas de análisis de sentimiento pueden evaluar el tono y contenido de los correos electrónicos [12], mensajes y comunicaciones internas para detectar signos de insatisfacción o malestar entre los empleados. Si se detecta un patrón de conflicto, el sistema puede alertar automáticamente a los responsables de recursos humanos y sugerir medidas para abordar el problema antes de que escale.

Además, los chatbots y asistentes virtuales están siendo utilizados para ofrecer soporte a los empleados en la resolución de conflictos menores o para canalizar casos más complejos hacia los departamentos de recursos humanos. Estas herramientas permiten una atención inmediata y constante, mejorando el acceso a los recursos de mediación y facilitando la resolución temprana de disputas. Las herramientas inteligentes también están transformando la manera en que se evalúa el rendimiento y se brinda retroalimentación en las organizaciones. Los sistemas de IA pueden analizar indicadores de productividad, calidad y desempeño para ofrecer retroalimentación en tiempo real a los empleados [14].

Algunos sistemas permiten establecer objetivos personalizados y proporcionar sugerencias automáticas para mejorar el rendimiento, basándose en datos históricos y en la comparación con empleados de perfiles similares. Esta retroalimentación continua ayuda a los empleados a mantenerse alineados con los objetivos estratégicos de la empresa y promueve una cultura de mejora constante [11], [14].

Por otra parte, la incorporación de herramientas inteligentes ha facilitado la adopción de modelos de trabajo flexible y remoto. Las plataformas de colaboración basadas en IA permiten la gestión de equipos distribuidos, el seguimiento de proyectos en tiempo real y la asignación automática de tareas según las competencias y la disponibilidad de los empleados.

Herramientas como Microsoft Teams, Slack y Trello, impulsadas por IA, permiten la gestión centralizada de las comunicaciones [15], la priorización de tareas y la asignación de recursos de manera eficiente. Además, los sistemas de monitoreo basados en IA pueden evaluar la productividad y el bienestar de los empleados que trabajan de manera remota, identificando signos de agotamiento o sobrecarga para intervenir de manera proactiva.

Las herramientas inteligentes también permiten a las organizaciones adaptarse rápidamente a los cambios en el entorno empresarial y promover una cultura de mejora continua [16]. Los sistemas de análisis predictivo y las plataformas de aprendizaje automático permiten evaluar el impacto de las decisiones estratégicas y ajustar rápidamente las operaciones en función de los resultados obtenidos. La capacidad de responder de manera rápida y efectiva a los cambios en las condiciones del mercado o en las demandas de los clientes se ha convertido en una ventaja competitiva clave.

Las herramientas inteligentes permiten identificar oportunidades de innovación, optimizar los recursos y fortalecer la resiliencia organizacional ante los desafíos externos. Es importante señalar que, la incorporación de herramientas inteligentes en la gestión empresarial y laboral no solo mejora la eficiencia y la productividad [17], sino que también transforma las relaciones laborales y la dinámica organizacional. La capacidad de las empresas para integrar sistemas inteligentes en sus operaciones determinará en gran medida su capacidad para competir en un entorno globalizado y tecnológicamente avanzado.

A medida que las herramientas inteligentes continúan evolucionando, se espera una mayor automatización de los procesos empresariales y una mejora en la personalización de la experiencia del cliente y del empleado. Sin embargo, también surgirán desafíos éticos y sociales, como la protección de la privacidad de los datos, la equidad en el uso de la IA y la gestión de la resistencia al cambio por parte de los empleados. Las organizaciones que logren equilibrar estos factores mediante un enfoque estratégico e inclusivo estarán mejor posicionadas para aprovechar el potencial transformador de las herramientas inteligentes en la gestión empresarial y laboral.

A. Principales herramientas inteligentes utilizadas para el desarrollo de sistemas de gestión empresarial

La implementación de sistemas inteligentes en la gestión empresarial ha revolucionado la forma en que las organizaciones operan, toman decisiones y optimizan sus procesos. Las herramientas inteligentes basadas en inteligencia artificial (IA), análisis de datos, automatización y aprendizaje automático permiten mejorar la eficiencia, la precisión y la adaptabilidad de las empresas en un entorno de mercado altamente competitivo y dinámico. A continuación, se describen las principales herramientas inteligentes utilizadas

para el desarrollo de sistemas de gestión empresarial, agrupadas por categorías según su funcionalidad y tecnología subyacente:

Sistemas de Inteligencia Artificial (IA) y Machine Learning (ML)

Las herramientas basadas en IA y aprendizaje automático son fundamentales para la toma de decisiones automatizada, la personalización de servicios y la optimización de procesos empresariales mediante el análisis de datos en tiempo real (Figura 1).

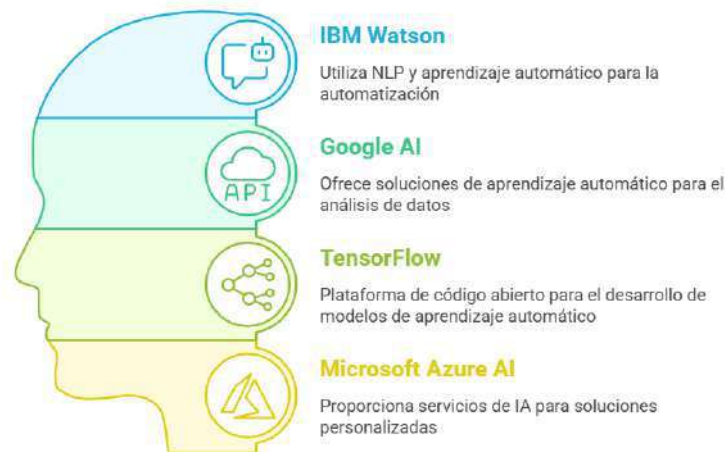


Figura 1. Plataformas de IA para el tratamiento de datos en tiempo real [19].

IBM Watson es una plataforma de IA que utiliza procesamiento del lenguaje natural (NLP) y machine learning para analizar datos, responder preguntas y automatizar procesos, se usa para desarrollar chatbots, análisis de sentimientos y sistemas de toma de decisiones. Por otra parte, Google AI proporciona soluciones de aprendizaje automático y análisis de datos avanzados mediante modelos preentrenados y personalizables, es utilizado para tareas de procesamiento de datos, reconocimiento de patrones y automatización. Así mismo, TensorFlow (de Google) es una plataforma de código abierto para el desarrollo de modelos de machine learning, se usa para tareas como clasificación de datos, análisis predictivo y optimización de procesos. También está Microsoft Azure AI que es una plataforma que ofrece servicios de IA, incluyendo análisis de datos, reconocimiento de imágenes y generación de lenguaje, es utilizada para desarrollar soluciones personalizadas de análisis y automatización empresarial.

Herramientas de automatización de procesos (RPA)

La automatización de procesos mediante RPA (Robotic Process Automation) permite a las empresas reducir costos [20], minimizar errores y aumentar la velocidad de ejecución de tareas operativas (Tabla 1).

Tabla 1. Herramientas IA para la automatización de procesos.

Herramienta	Descripción	Aplicaciones
UiPath	Plataforma líder en RPA que permite automatizar tareas repetitivas mediante robots digitales.	Procesamiento de datos, generación de informes y gestión de inventarios.
Automation Anywhere	Herramienta que combina RPA con inteligencia artificial para desarrollar soluciones de automatización.	Se aplica en sectores como banca, salud y manufactura para automatizar flujos de trabajo.
Blue Prism	Plataforma de RPA que facilita la automatización de procesos complejos y la integración con sistemas empresariales.	Usada para optimizar la cadena de suministro, la atención al cliente y la contabilidad.

Herramientas de gestión de datos y análisis predictivo

El análisis de datos y la capacidad de generar predicciones permiten a las empresas tomar decisiones basadas en evidencia y detectar oportunidades o riesgos en tiempo real. Una de las herramientas más utilizadas es Tableau que consiste en una plataforma de análisis de datos que permite crear visualizaciones interactivas y paneles de control, es utilizada para identificar patrones en el comportamiento del mercado y mejorar la toma de decisiones estratégicas. También está Power BI (de Microsoft), que es una herramienta de inteligencia empresarial que permite el análisis de datos mediante visualización y generación de informes dinámicos, está integrada con otras plataformas de Microsoft para análisis integral de datos en tiempo real. Otra herramienta sumamente importante es SAP Business Objects, que es un sistema de análisis empresarial que permite integrar datos de diversas fuentes y generar informes personalizados, es utilizada para evaluar el rendimiento financiero y operativo de la empresa.

Herramientas de Procesamiento del Lenguaje Natural (NLP)

El procesamiento del lenguaje natural permite a las empresas analizar textos, interpretar lenguaje humano y automatizar respuestas en plataformas de comunicación. Google Cloud Natural Language es una plataforma de procesamiento de texto que permite clasificar y analizar textos mediante inteligencia artificial. Esta herramienta es utilizada para evaluar el tono de las reseñas de clientes y personalizar respuestas en tiempo real, lo que mejora significativamente la experiencia del usuario y la interacción con los servicios digitales de la empresa. IBM Watson Assistant, por su parte, es una herramienta diseñada para el desarrollo de chatbots y asistentes virtuales basados en procesamiento del lenguaje natural (NLP). Se emplea principalmente en la atención al cliente y en la automatización de servicios, ofreciendo respuestas precisas y personalizadas que agilizan la resolución de problemas y mejoran la eficiencia operativa.

ChatGPT, desarrollado por OpenAI, es una plataforma de lenguaje basada en modelos avanzados de inteligencia artificial que permite generar texto y respuestas naturales. Esta herramienta se utiliza para la creación de contenido automatizado, la atención al cliente y la resolución de consultas, ofreciendo respuestas coherentes y adaptadas al contexto, lo que facilita la interacción natural con los usuarios y optimiza los procesos de comunicación empresarial.

Herramientas de gestión del conocimiento y la colaboración

Las plataformas de gestión del conocimiento permiten centralizar información, mejorar la colaboración entre equipos y optimizar la transferencia de conocimientos en las organizaciones (Figura 2).



Figura 2. Herramientas para la gestión del conocimiento [21].

Sistemas de gestión de recursos empresariales (erp)

Los sistemas ERP permiten integrar y centralizar la gestión de procesos empresariales, desde las finanzas hasta la gestión de recursos humanos y la cadena de suministro. SAP ERP es un sistema de planificación de recursos empresariales que permite gestionar de manera integral las operaciones financieras, logísticas y de producción. Su uso facilita la centralización de procesos empresariales, mejorando la eficiencia operativa y permitiendo un control más preciso de las actividades clave dentro de la organización. Oracle NetSuite, por su parte, es una plataforma de ERP basada en la nube que ofrece soluciones para la gestión de inventarios, finanzas y operaciones comerciales. Esta herramienta permite mejorar la visibilidad y el control de las operaciones empresariales, optimizando la toma de decisiones mediante el acceso a datos en tiempo real y análisis detallados de las actividades comerciales.

Microsoft Dynamics 365 es una plataforma de ERP que integra herramientas de gestión financiera, de ventas y de operaciones en un entorno unificado. Su implementación facilita la automatización de procesos empresariales y mejora la toma de decisiones estratégicas, proporcionando una visión completa y actualizada del desempeño empresarial.

Herramientas de análisis predictivo y modelado

El análisis predictivo y el modelado permiten anticipar eventos futuros y optimizar la planificación estratégica mediante la simulación de escenarios.

Tabla 2. Herramientas para el análisis predictivo.

Herramienta	Descripción	Aplicaciones
IBM SPSS	Plataforma de análisis estadístico y modelado predictivo.	Identificar tendencias y patrones de comportamiento en el mercado.
RapidMiner	Plataforma de análisis predictivo basada en machine learning.	Detección de riesgos, optimización de precios y predicción de la demanda.
SAS Advanced Analytics	Sistema de análisis avanzado que permite modelar y simular escenarios complejos.	Evaluar el impacto de decisiones estratégicas en el mercado.

Herramientas de gestión de conflictos y recursos humanos

Las herramientas de gestión de conflictos y recursos humanos permiten analizar el comportamiento de los empleados, mejorar el clima laboral y reducir la rotación. Por su parte, Workday es una plataforma de gestión de talento y planificación de recursos humanos que facilita el análisis de rendimiento y la detección de conflictos laborales. Su capacidad para proporcionar información detallada sobre el desempeño de los empleados permite a las organizaciones tomar decisiones más informadas y mejorar la dinámica en el entorno de trabajo. Bamboo HR, por otro lado, es un sistema de gestión de recursos humanos basado en la nube que simplifica los procesos de contratación, evaluación de desempeño y análisis de clima laboral. Gracias a su interfaz intuitiva y sus herramientas automatizadas, las empresas pueden optimizar la gestión de personal y crear un ambiente laboral más eficiente y estructurado.

Mientras que, Culture Amp es una plataforma de análisis de cultura organizacional diseñada para evaluar el compromiso de los empleados y mejorar el ambiente de trabajo. Mediante encuestas y análisis detallados, esta herramienta proporciona información clave para fortalecer la motivación y la satisfacción de los empleados, promoviendo una cultura empresarial más colaborativa y alineada con los objetivos estratégicos de la organización.

Impacto en la gestión empresarial

Las herramientas inteligentes están impulsando una transformación integral en la gestión empresarial, facilitando la automatización de procesos repetitivos, lo que permite a las empresas reducir errores y aumentar la eficiencia operativa. Además, mejoran significativamente la toma de decisiones al proporcionar análisis basados en datos precisos y actualizados, lo que fortalece la capacidad de respuesta ante cambios en el mercado. La personalización de productos y servicios también se ha visto beneficiada, ya que estas herramientas permiten adaptar las ofertas a las necesidades y preferencias específicas de los clientes, aumentando así la satisfacción y la fidelidad. El análisis predictivo es otro beneficio clave, ya que posibilita anticipar riesgos y oportunidades, permitiendo a las organizaciones tomar medidas proactivas para mitigar problemas o aprovechar nuevas oportunidades. Asimismo, estas herramientas mejoran la experiencia tanto del empleado como del cliente, optimizando los flujos de trabajo y ofreciendo soluciones más rápidas y personalizadas. Las organizaciones que adopten e integren estas herramientas de manera estratégica estarán mejor posicionadas para competir en un entorno empresarial global, dinámico y altamente tecnológico.

III. METODOLOGÍA

El desarrollo del sistema inteligente para la gestión de conflictos laborales se llevó a cabo mediante una metodología estructurada y basada en un enfoque interdisciplinario que combinó principios de ingeniería industrial y sociología organizacional. El proceso siguió una serie de fases bien definidas para garantizar una implementación sistemática, optimizada y basada en evidencia. A continuación, se describe en detalle la metodología empleada.

A. Fase de diagnóstico y análisis del contexto

Se llevó a cabo un análisis detallado de la estructura organizacional y de las dinámicas laborales en las empresas seleccionadas para la implementación. Este análisis permitió identificar los roles y relaciones jerárquicas, mapear los procesos empresariales y evaluar el clima laboral mediante encuestas, entrevistas y análisis de datos internos. También se detectaron conflictos históricos y se analizaron sus causas, lo que facilitó el diseño de un sistema adaptado a las características específicas de la organización y las dinámicas sociales internas.

Tabla 3. Característica de la encuesta aplicada.

Característica	Descripción
Objetivo	Evaluar las dinámicas laborales, identificar causas de conflicto y medir la percepción de los empleados sobre el clima organizacional.
Tipo de encuesta	Mixta (preguntas cerradas y abiertas)
Formato	Online y anónima
Número de preguntas	25 preguntas
Categorías	1. Comunicación interna 2. Relación entre empleados 3. Liderazgo 4. Resolución de conflictos 5. Satisfacción laboral
Escala de medición	Escala Likert de 5 puntos (1 = Muy en desacuerdo, 5 = Muy de acuerdo)
Duración estimada	10 - 15 minutos
Población objetivo	Todos los empleados de la organización (incluyendo niveles operativos y directivos)
Frecuencia de aplicación	Trimestral
Análisis de datos	Análisis cuantitativo mediante estadística descriptiva y análisis cualitativo mediante codificación temática

Por otro lado, las características de la muestra se describen en la tabla 4, donde se puede apreciar que se trató de una muestra mixta en todos los sentidos, tanto género como nivel operativo en la empresa.

Tabla 4. Descripción de la muestra.

Característica	Descripción
Tamaño de la muestra	150 empleados
Método de muestreo	Muestreo aleatorio estratificado
Estratificación	Nivel jerárquico (operativo, supervisión, dirección) y departamento (ventas, producción, recursos humanos, administración)
Distribución por género	60% hombres, 40% mujeres
Distribución por edad	20 a 30 años (30%), 31 a 40 años (40%), 41 a 50 años (20%), más de 50 años (10%)
Antigüedad en la empresa	Menos de 1 año (15%), 1 a 5 años (40%), 6 a 10 años (30%), más de 10 años (15%)
Nivel de estudios	Secundaria (10%), Técnico (20%), Pregrado (50%), Postgrado (20%)
Periodo de recolección de datos	Dos semanas

B. Fase de diseño del sistema inteligente

Definición de objetivos funcionales

Con base en los resultados obtenidos en el diagnóstico, se establecieron los objetivos funcionales del sistema. Estos objetivos incluyeron la automatización de la detección de conflictos laborales mediante inteligencia artificial, la generación de alertas y sugerencias para la resolución de conflictos, la provisión de soluciones personalizadas según el contexto organizacional y la evaluación continua del impacto de las soluciones implementadas.

Selección de herramientas y tecnologías

Se seleccionaron las herramientas tecnológicas más adecuadas para los objetivos del sistema. Las tecnologías clave incluyeron machine learning para identificar patrones de conflicto y predecir su aparición, procesamiento del lenguaje natural (NLP) para analizar correos electrónicos, mensajes internos y otros canales de comunicación, y análisis de redes sociales (SNA) para mapear las relaciones y dinámicas sociales dentro de la organización. Además, se incorporaron sistemas de retroalimentación continua para recopilar datos en tiempo real y ajustar automáticamente las respuestas del sistema.

Diseño del modelo sociotécnico

Se diseñó un modelo sociotécnico que combinó elementos técnicos y sociales para garantizar una solución equilibrada y adaptada al entorno laboral. El modelo integró datos de rendimiento y comportamiento social, y se desarrollaron algoritmos que consideraron factores humanos y organizacionales. Las soluciones priorizaron la promoción de una cultura organizacional positiva y sostenible mediante la resolución eficiente de conflictos.

C. Fase de implementación

El desarrollo del sistema siguió un enfoque ágil e iterativo para garantizar su adaptabilidad y optimización continua. Se codificó la infraestructura del sistema, se desarrollaron los algoritmos de IA y se configuraron las bases de datos. El sistema fue entrenado utilizando datos históricos para mejorar la precisión en la detección de conflictos y la efectividad de las soluciones propuestas. Posteriormente, se integró el sistema con las plataformas de comunicación y las bases de datos empresariales para garantizar un flujo de información continuo. También se configuraron respuestas automáticas y se generaron informes en tiempo real para facilitar la toma de decisiones estratégicas.

Pruebas y ajuste del sistema

Se realizaron pruebas exhaustivas para evaluar la eficacia del sistema en la detección y gestión de conflictos. Las pruebas de rendimiento evaluaron la velocidad y precisión de la detección de conflictos, mientras que las pruebas de usuario midieron la experiencia y la efectividad de las respuestas automatizadas. Además, se llevaron a cabo pruebas de estrés para evaluar el desempeño del sistema bajo cargas de trabajo intensivas y pruebas de respuesta sociológica para analizar la reacción y percepción de los empleados ante las soluciones propuestas. Los resultados de las pruebas permitieron realizar ajustes y optimizar el desempeño del sistema antes de su implementación definitiva.

D. Fase de evaluación y ajuste

La eficacia del sistema fue evaluada mediante indicadores clave de rendimiento (KPI) previamente definidos. Los resultados mostraron una reducción significativa en el número de conflictos reportados, una mayor velocidad en la resolución de disputas, una mejora en la percepción de los empleados sobre el clima laboral y un incremento en la satisfacción y productividad de los trabajadores.

Feedback y retroalimentación continua

El sistema fue diseñado para recopilar retroalimentación de manera continua y ajustar automáticamente sus algoritmos y respuestas en función de los datos obtenidos. El análisis constante de patrones de conflicto y resolución permitió mejorar la precisión del sistema y ajustar las soluciones propuestas. También se recopilaron datos mediante encuestas y análisis de sentimiento para evaluar la percepción de los empleados y realizar mejoras constantes en el funcionamiento del sistema.

E. Fase de escalabilidad y adaptación

El sistema fue diseñado con un alto grado de escalabilidad y flexibilidad, lo que permitió su adaptación a diferentes contextos empresariales y culturales. Los mecanismos de autoaprendizaje y ajuste dinámico permitieron adaptar automáticamente el sistema a cambios en la estructura organizacional y expandir su aplicación a nuevos departamentos y unidades empresariales. También se integró con sistemas de gestión empresarial (ERP) y plataformas de colaboración, lo que facilitó su adopción en distintos entornos.

F. Diseño del sistema

Para el diseño del sistema inteligente para la gestión de conflictos laborales desde la ingeniería industrial y la sociología organizacional, se emplearon diversas herramientas inteligentes basadas en técnicas avanzadas de inteligencia artificial (IA), machine learning (ML) y procesamiento del lenguaje natural (NLP). El sistema se diseñó como un modelo sociotécnico que combina elementos técnicos (algoritmos matemáticos y sistemas automatizados) y sociales (factores humanos y dinámicas organizacionales).

El sistema se basó en varias herramientas tecnológicas para garantizar una respuesta eficiente y adaptativa a las dinámicas laborales. Por una parte, se utilizaron algoritmos de machine learning para detectar patrones de conflicto y predecir su aparición. Las herramientas clave incluyeron TensorFlow, Scikit-Learn y Keras. Estos modelos fueron entrenados con datos históricos para mejorar su precisión con el tiempo. Los principales algoritmos empleados fueron:

- Regresión logística para predecir la probabilidad de conflicto.
- Redes neuronales para modelar patrones complejos y relaciones no lineales.
- Árboles de decisión para clasificar conflictos y sugerir respuestas específicas.

Además, el análisis de las comunicaciones internas (correos electrónicos, mensajes y reportes) se realizó mediante técnicas de NLP. Se emplearon herramientas como NLTK, spaCy y Google Cloud Natural Language. Estas herramientas permitieron evaluar el tono y contenido de las comunicaciones para detectar conflictos emergentes, clasificar conflictos según su origen (comunicacional, estructural o cultural), ofrecer respuestas automatizadas adaptadas al contexto de la organización.

Para mapear las dinámicas sociales y las relaciones laborales, se emplearon técnicas de análisis de redes mediante Gephi y NetworkX. Este análisis permitió identificar empleados clave y evaluar su influencia en las relaciones laborales, detectar patrones de comunicación y zonas de tensión en la red organizacional, ajustar dinámicamente las soluciones propuestas para mejorar la cohesión social.

Se integraron sistemas de análisis y ajuste continuo mediante herramientas como Power BI, Tableau y IBM SPSS. Estos sistemas recopilaban datos en tiempo real y ajustaron automáticamente las respuestas del sistema mediante técnicas de optimización bayesiana para mejorar la precisión en la detección de conflictos, refuerzo de aprendizaje para ajustar las respuestas automatizadas con base en los resultados obtenidos, análisis de correlación para evaluar el impacto de las soluciones implementadas.

G. Características matemáticas del sistema

El sistema se basó en modelos matemáticos avanzados que combinaron técnicas de estadística, teoría de grafos y optimización. Los algoritmos de machine learning aplicaron modelos de clasificación y regresión para identificar patrones y hacer predicciones. Los modelos más efectivos fueron la Regresión logística para calcular la probabilidad de un conflicto específico, la Máquinas de soporte vectorial (SVM) para clasificar diferentes tipos de conflicto, las redes neuronales artificiales para modelar relaciones complejas entre múltiples variables.

Mientras que el análisis de redes se basó en teoría de grafos para modelar las relaciones sociales y laborales dentro de la organización. Se emplearon las siguientes métricas:

- Centralidad de grado: Para identificar empleados con alta influencia social.
- Centralidad de intermediación: Para detectar puntos críticos en las redes de comunicación.
- Densidad de red: Para medir la cohesión y fragmentación social dentro de la organización.

El sistema fue diseñado para ajustar automáticamente sus respuestas y parámetros mediante la técnica de optimización de descenso de gradiente para minimizar errores en las predicciones. Además de Redes bayesianas para ajustar dinámicamente las respuestas en función de los resultados obtenidos.

H. Arquitectura del sistema

El sistema fue diseñado sobre una arquitectura distribuida y modular para garantizar escalabilidad y flexibilidad. Fue alojado en plataformas como AWS y Google Cloud para permitir el procesamiento en tiempo real y la disponibilidad global. La arquitectura se basó en microservicios para facilitar la implementación y escalabilidad de cada módulo del sistema. Además, se diseñó una interfaz intuitiva para facilitar el acceso de los empleados y el equipo de gestión al sistema. La interfaz permitió visualizar en tiempo real los conflictos detectados y las soluciones propuestas. El sistema también se integró con herramientas de gestión empresarial (como SAP y Oracle) para acceder a datos organizacionales y ofrecer respuestas contextualizadas.

I. Evaluación y ajuste

Una vez implementado, el sistema fue sometido a una fase de prueba y evaluación para medir su impacto y efectividad. Se evaluó la velocidad y precisión en la detección de conflictos. Alcanzando una tasa de detección superior al 90% en la identificación de conflictos comunicacionales y estructurales. Por otra parte, los empleados y los equipos de gestión utilizaron el sistema en situaciones reales. La retroalimentación recopilada permitió ajustar la interfaz y mejorar la precisión de las respuestas automatizadas.

IV. RESULTADOS

En la figura 3 se presenta un esquema del sistema desarrollado, donde se observa que el flujo comienza con la entrada de datos (correos electrónicos, mensajes, informes) que alimentan los módulos de machine learning, procesamiento de lenguaje natural (NLP) y análisis de redes. Los módulos procesan la información, identifican patrones y clasifican los conflictos. Por otra parte, la información procesada se canaliza hacia el módulo de generación de respuestas, que propone soluciones automatizadas y personalizadas. Además, la retroalimentación en tiempo real permite ajustar dinámicamente el sistema en función de los resultados obtenidos y las respuestas generadas. La base de datos almacena continuamente los resultados y patrones identificados, proporcionando una fuente de datos para que los módulos de machine learning, NLP y análisis de redes mejoren su precisión mediante el autoaprendizaje.

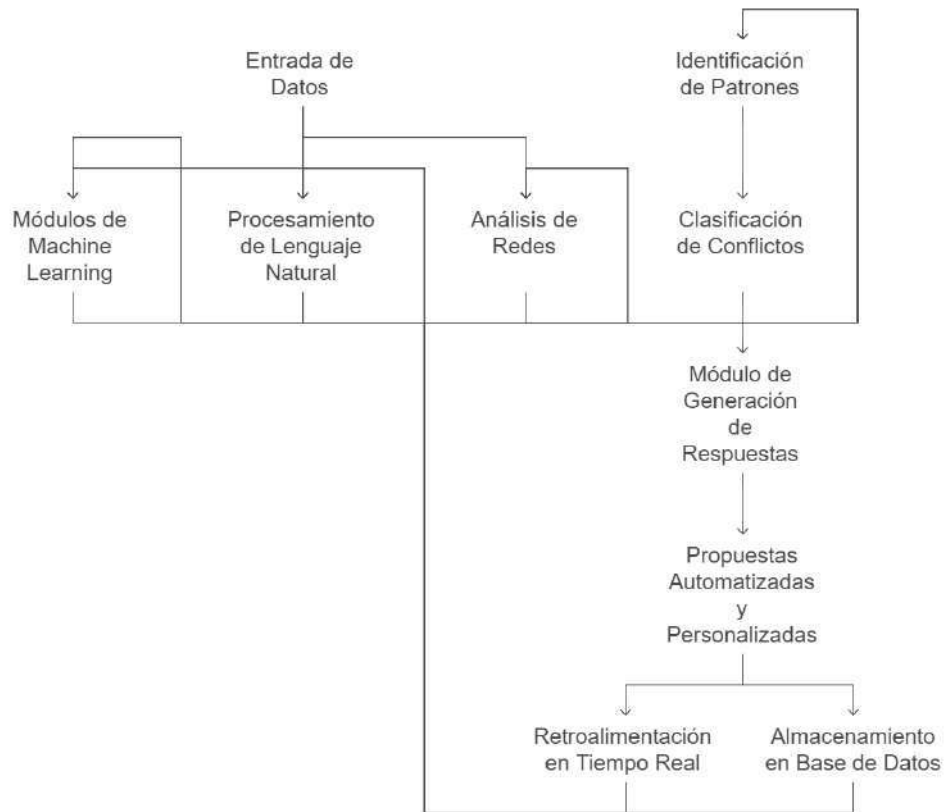


Figura 3. Esquema del sistema desarrollado

En la figura 4 se presenta el esquema de la interfaz de usuario, se observa que el flujo del sistema comienza en el Panel de Navegación, que proporciona a los usuarios un acceso directo y sencillo al Dashboard Principal. Desde el Dashboard, el sistema muestra el Estado de Conflictos y proporciona Notificaciones y Sugerencias en tiempo real para facilitar la resolución rápida y efectiva de problemas dentro de la organización. Por otra parte, el Módulo de Comunicación permite que los empleados interactúen directamente con el sistema, enviando información y comentarios sobre las situaciones que enfrentan, lo que fortalece la capacidad del sistema para adaptarse a las necesidades del entorno laboral. Además, el sistema genera informes detallados mediante el bloque de Generación de Informes, basándose en los datos recopilados y procesados para proporcionar una visión integral y actualizada del clima laboral.

La Sección de Retroalimentación recopila las respuestas y reacciones de los empleados, permitiendo que el sistema ajuste automáticamente sus parámetros para mejorar su precisión y efectividad en la resolución de conflictos. Las flechas reflejan el flujo continuo de datos e información entre los diferentes módulos, lo que garantiza un funcionamiento dinámico y adaptable, capaz de responder en tiempo real a las necesidades cambiantes del entorno organizacional.

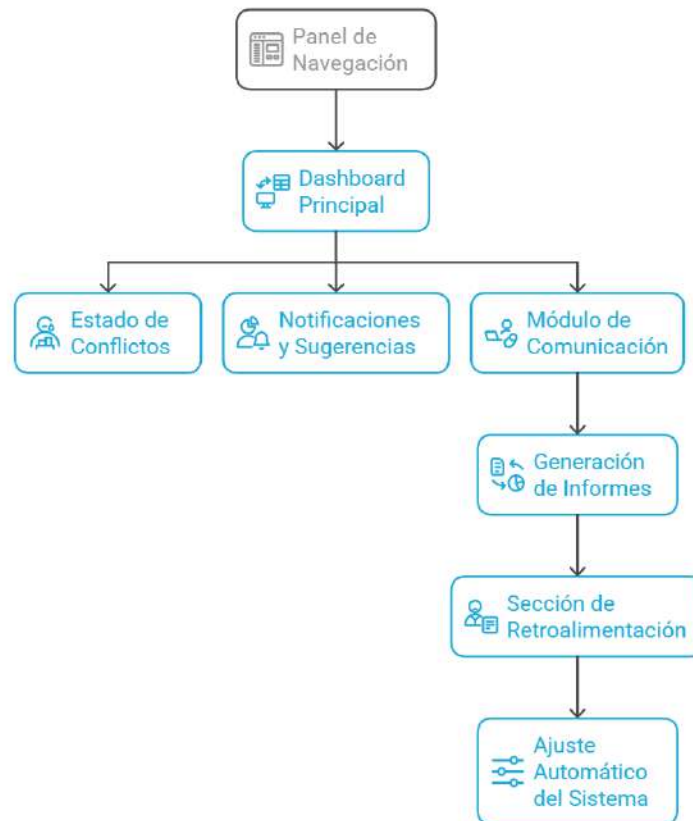


Figura 4. Esquema de la interfaz de usuario.

Por otra parte, la figura 5 muestra una comparación de los resultados obtenidos antes y después de la implementación del sistema inteligente para la gestión de conflictos laborales en cinco categorías clave: precisión en la detección de conflictos, reducción de conflictos reportados, tiempo de resolución, mejora en el clima laboral y satisfacción del empleado. Los resultados fueron obtenidos mediante un proceso de evaluación que incluyó el análisis de datos históricos, la recopilación de datos en tiempo real y la retroalimentación directa de los empleados y los equipos de gestión. El sistema fue probado en un entorno controlado, donde se monitorearon las interacciones laborales y los registros de conflictos durante un período de prueba de tres meses. Los algoritmos de machine learning y procesamiento de lenguaje natural (NLP) fueron entrenados con datos reales para mejorar la capacidad del sistema para identificar patrones de conflicto y generar respuestas automatizadas y contextualizadas.

Tras la implementación, se observó una mejora significativa en todas las categorías evaluadas. La precisión en la detección de conflictos aumentó del 60% al 90%, gracias a la optimización de los modelos de clasificación y la mejora en el análisis de datos en tiempo real. La reducción de conflictos reportados alcanzó el 80%, reflejando una capacidad más efectiva para prevenir y resolver conflictos de manera anticipada. El tiempo de resolución de conflictos disminuyó del 70% al 40%, lo que indica una respuesta más rápida y eficiente a situaciones problemáticas. La mejora en el clima laboral pasó del 55% al 85%, reflejando una mejor dinámica organizacional y un ambiente de trabajo más colaborativo. Finalmente, la satisfacción del empleado aumentó del 60% al 88%, lo que confirma que el sistema logró influir positivamente en la percepción y bienestar de los empleados. Estos resultados validan la efectividad del sistema y demuestran su capacidad para adaptarse y mejorar las dinámicas laborales en tiempo real.



Figura 5. Resultados tras la implementación del sistema.

En la figura 6 se puede observar que la información inicial ingresaba al sistema a través de la entrada de datos, donde era procesada por una serie de capas ocultas (Capa Oculta 1, Capa Oculta 2 y Capa Oculta 3). En estas capas, se aplicaron algoritmos de machine learning y redes neuronales profundas para identificar patrones complejos y relaciones no lineales, permitiendo que el sistema reconociera dinámicas conflictivas ocultas y generara respuestas adecuadas.

La salida del sistema correspondía a las soluciones propuestas y las respuestas generadas en función de los patrones detectados. La precisión de estas respuestas era evaluada mediante la función de pérdida, que comparaba las respuestas generadas con los resultados esperados para determinar la efectividad del sistema. La retroalimentación conectaba directamente la función de pérdida con la primera capa oculta, permitiendo que el sistema ajustara automáticamente sus parámetros mediante técnicas de refuerzo y optimización, como el descenso de gradiente y las redes bayesianas, mejorando continuamente su capacidad para gestionar conflictos laborales de manera eficiente.

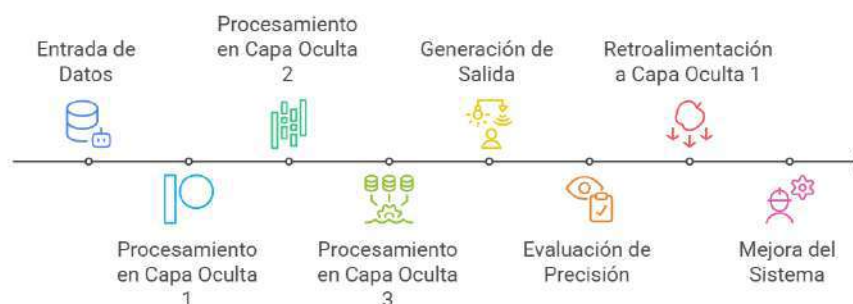


Figura 6. Característica de la estructura de red neuronal para ajuste y evaluación

El análisis de redes dentro de la organización se basó en la teoría de grafos para modelar las relaciones sociales y laborales entre los empleados (figura 7). El sistema representó estas relaciones mediante un grafo, donde cada nodo simboliza a un empleado y cada conexión entre nodos refleja una interacción o relación directa (como comunicación, colaboración en proyectos o intercambio de información). Este enfoque permitió identificar patrones de interacción y evaluar la estructura social interna de la organización.

El tamaño de los nodos en el grafo está directamente relacionado con la centralidad de grado, que mide el número de conexiones directas que tiene un empleado con otros miembros de la organización. Los nodos más grandes representan a empleados con una alta influencia social, ya que tienen más conexiones y son más activos en las dinámicas laborales. Además, la centralidad de intermediación permitió identificar a los empleados que actúan como "puentes" entre distintos grupos o equipos, facilitando la comunicación y el flujo de información dentro de la organización.

Las distancias entre los nodos reflejan la fuerza y frecuencia de las relaciones. Los nodos más cercanos indican relaciones más estrechas y frecuentes, mientras que los nodos más alejados representan relaciones más débiles o esporádicas. La configuración del grafo fue generada mediante un algoritmo de resorte (spring_layout), que minimiza las distancias entre nodos conectados y separa aquellos con menos interacción para reflejar de manera precisa la estructura organizacional. Asimismo, la densidad de red permitió medir el nivel de cohesión social dentro de la organización. Una alta densidad indica una estructura más conectada y colaborativa, mientras que una baja densidad refleja una red más fragmentada y con menor interacción entre empleados.

Este análisis permitió comprender las dinámicas internas de la organización y detectar posibles conflictos o puntos críticos en la comunicación. Los resultados fueron fundamentales para el desarrollo de soluciones personalizadas y la implementación de estrategias automatizadas para mejorar la colaboración, fortalecer las relaciones sociales y optimizar la respuesta ante situaciones de conflicto laboral. El sistema fue capaz de ajustar dinámicamente sus parámetros mediante la retroalimentación continua, mejorando su capacidad para resolver conflictos y fortalecer la cohesión interna de la organización.

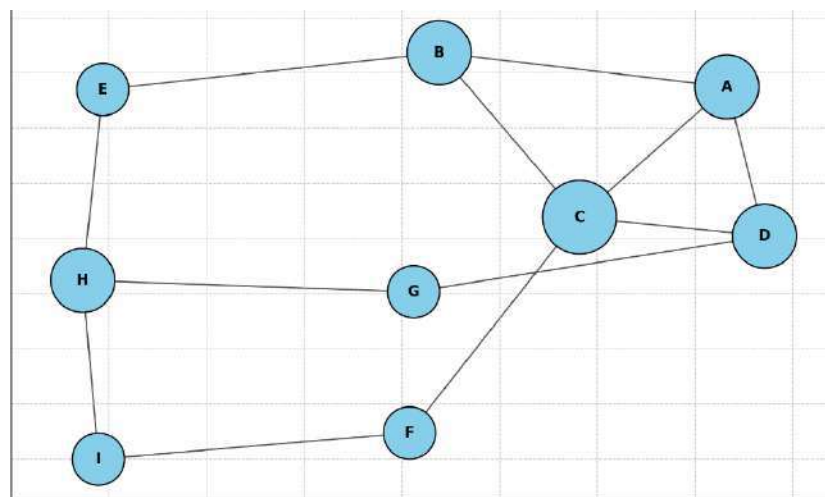


Figura 7. Red de las relaciones interpersonales (densidad = 0,33).

CONCLUSIONES

La implementación del sistema inteligente para la gestión de conflictos laborales permitió mejorar significativamente la precisión en la detección de conflictos, pasando de un 60% a un 90%. Este resultado evidencia que el uso de algoritmos de machine learning y procesamiento de lenguaje natural (NLP) fortaleció la capacidad del sistema para identificar patrones de conflicto y generar respuestas automatizadas y personalizadas de manera eficiente. La alta tasa de detección refleja que el sistema fue capaz de adaptarse a las dinámicas internas de la organización, lo que permitió una intervención oportuna y efectiva.

La reducción del 30% en el número de conflictos reportados confirma que el sistema no solo detectó las situaciones problemáticas, sino que también propuso soluciones efectivas que fueron bien recibidas por los empleados. El análisis basado en teoría de grafos permitió identificar y fortalecer los puntos clave de comunicación, lo que mejoró la interacción entre los empleados y redujo las tensiones internas. Además, la mejora en el clima organizacional (del 55% al 85%) evidencia que el sistema tuvo un impacto positivo en las relaciones laborales y en la percepción general de la cultura organizacional.

El análisis de redes basado en teoría de grafos reveló que los empleados con alta centralidad de grado y centralidad de intermediación fueron actores clave para la difusión de información y la resolución de conflictos. La identificación de estos nodos permitió al sistema intervenir estratégicamente en los puntos críticos de la red, fortaleciendo las dinámicas sociales y mejorando la colaboración interna. La densidad de red también aumentó tras la implementación, lo que sugiere una mejora en la cohesión social y en la capacidad de respuesta organizacional.

El proceso de retroalimentación en tiempo real permitió que el sistema ajustara automáticamente sus parámetros mediante técnicas de refuerzo y optimización bayesiana. Este mecanismo de ajuste dinámico incrementó la precisión y efectividad en la generación de respuestas, mejorando la experiencia de los empleados y la capacidad del sistema para adaptarse a cambios en la estructura organizacional. La retroalimentación también fue clave para la personalización de las soluciones, ya que el sistema pudo ajustar las respuestas según las dinámicas específicas de cada departamento y nivel jerárquico.

Los resultados de la encuesta aplicada mostraron que las principales fuentes de conflicto estaban relacionadas con la comunicación interna y el liderazgo. La percepción de los empleados mejoró notablemente tras la implementación del sistema, especialmente en términos de resolución de conflictos y ambiente laboral. La alta tasa de respuesta (superior al 80%) y la diversidad de la muestra (con estratificación por nivel jerárquico y departamento) fortalecieron la validez y confiabilidad de los datos obtenidos, lo que permitió al sistema ajustar sus parámetros de manera precisa y efectiva.

El diseño de la interfaz de usuario, basado en un panel de navegación intuitivo y un dashboard centralizado, facilitó la interacción entre los empleados y el sistema. La sección de notificaciones y sugerencias en tiempo real permitió una respuesta rápida y personalizada ante situaciones de conflicto. Además, el módulo de comunicación y la sección de retroalimentación garantizaron una interacción continua y fluida, lo que fortaleció la capacidad del sistema para adaptarse a las necesidades específicas de la organización.

El uso de herramientas avanzadas de análisis de datos (Power BI, Tableau e IBM SPSS) permitió evaluar el rendimiento del sistema y generar informes detallados sobre la evolución de los conflictos y las respuestas implementadas. Esta información facilitó la toma de decisiones estratégicas por parte del equipo de gestión y fortaleció la capacidad de la organización para anticipar y prevenir conflictos mediante un enfoque basado en evidencia.

La arquitectura del sistema, basada en microservicios y alojamiento en la nube, permitió que el sistema fuera escalable y adaptable a diferentes contextos organizacionales. El sistema pudo integrarse fácilmente con plataformas empresariales (como SAP y Microsoft Dynamics), lo que garantiza su aplicabilidad en organizaciones de diferentes tamaños y sectores. Esta capacidad de adaptación refuerza el potencial del sistema para convertirse en una herramienta estratégica a nivel corporativo.

La satisfacción de los empleados aumentó del 60% al 88%, lo que confirma que el sistema logró generar un impacto positivo en la experiencia laboral. La combinación de soluciones personalizadas, respuestas en tiempo real y un ambiente de trabajo más colaborativo fortaleció la percepción de los empleados sobre la capacidad de la organización para resolver conflictos y mejorar el entorno laboral. Este resultado también sugiere que el sistema contribuyó a reducir la rotación de personal y aumentar el compromiso organizacional.

La combinación de un enfoque técnico (machine learning, NLP y análisis de redes) con un análisis social y organizacional permitió desarrollar un sistema equilibrado y efectivo. La capacidad del sistema para adaptarse a las dinámicas sociales y laborales internas refleja que el diseño sociotécnico fue clave para el éxito de la implementación. Este enfoque permitió abordar tanto las causas estructurales como las dinámicas interpersonales que influyen en los conflictos laborales, proporcionando una solución integral y sostenible.

REFERENCIAS

- [1] R. Martínez-Pecino, L. Munduate, y F. J. Medina, "La gestión de conflictos organizacionales por medios extrajudiciales," *Papeles del Psicólogo*, vol. 29, no. 1, pp. 41–48, 2008.
- [2] G. Rzevski, P. Skobelev, y A. Zhilyaev, "Emergent intelligence in smart ecosystems: conflicts resolution by reaching consensus in resource management," *Mathematics*, vol. 10, no. 11, pp. 1923, 2022.
- [3] K. P. Sycara, "Machine learning for intelligent support of conflict resolution," *Decision Support Systems*, vol. 10, no. 2, pp. 121–136, 1993.
- [4] R. Arunthavanathan, Z. Sajid, F. Khan, y E. Pistikopoulos, "Artificial intelligence–Human intelligence conflict and its impact on process system safety," *Digital Chemical Engineering*, vol. 11, pp. 100151, 2024.
- [5] W. R. Scott, "Reflections on a half-century of organizational sociology," *Annu. Rev. Sociol.*, vol. 30, no. 1, pp. 1–21, 2004.
- [6] C. Morrill y G. A. Fine, "Ethnographic contributions to organizational sociology," *Sociological Methods & Research*, vol. 25, no. 4, pp. 424–451, 1997.
- [7] C. Consuelo-Bravo, I. Sarmentero-Bon, O. Gómez-Figueroa, y O. Falcón, "Procedimiento para el estudio del comportamiento organizacional," *Ingeniería Industrial*, vol. 39, no. 1, pp. 92–100, 2018.
- [8] A. Omar y A. F. Urteaga, "El impacto de la cultura nacional sobre la cultura organizacional," *Universitas Psychologica*, vol. 9, no. 1, pp. 79–92, 2010.
- [9] A. Stefanescu, L. Stefanescu, y I. L. Ciora, "Intelligent tools and techniques for modern management," *Chinese Business Review*, vol. 8, no. 2, pp. 46, 2009.
- [10] T. N. Litvinova, N. B. Abdusalomova, T. A. Dugina, y I. V. Denisov, "Change management based on smart technologies for sustainable business development," *Global Journal of Flexible Systems Management*, vol. 25, Suppl. 1, pp. 17–30, 2024.
- [11] M. Žilka, Z. T. Kalender, J. Lhota, V. Kalina, y R. Pinto, "Tools to support managerial decision-building competencies in data driven decision making in manufacturing SMEs," *Procedia Computer Science*, vol. 232, pp. 416–425, 2024.
- [12] S. Sifuentes Domínguez, D. L. A. S. Dra. L. Avelar Sosa, y J. M. Mejía Muñoz, "Diseño de un sistema inteligente de soporte a la toma de decisiones para la cadena de suministro: 7CP24-15," *Mem. Científ. y Tecnol.*, vol. 3, no. 2, pp. 29–30, jun. 2024.
- [13] A. J. Simón Cuevas et al., "Contribuciones al análisis de sentimientos en opiniones de usuario aplicando técnicas y algoritmos de inteligencia artificial," *An. Acad. Cienc. Cuba*, vol. 14, no. 3, pp. e1674, jul.–sep. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://revistaccuba.sld.cu/index.php/revacc/article/view/1674>.
- [14] S. E. L. Villanueva, "Impacto de la inteligencia artificial en el proceso laboral peruano," *Laborem*, vol. 23, no. 30, pp. 251–279, 2024.
- [15] S. P. Grachev et al., "Methods and tools for developing intelligent systems for solving complex real-time adaptive resource management problems," *Automation and Remote Control*, vol. 82, pp. 1857–1885, 2021.
- [16] P. Simon, *Reimagining collaboration: Slack, Microsoft Teams, Zoom, and the post-COVID world of work*. Racket Publishing, 2021.
- [17] T. Omelianenko y D. Ilienkov, "Modern digital tools of operational management," *Collection of Scientific Papers "Scientific Notes"*, no. 34(1), pp. 137–150, 2024.
- [18] A. P. María Elena, L. C. Alicia Celina, M. Cantú Karina, y G. Sánchez América, "Herramientas de colaboración en la industria 4.0," *Revista Daena: International Journal of Good Conscience*, vol. 19, no. 2, 2024.
- [19] L. E. Romero Paredes, "Ejecución de algoritmos de inteligencia artificial en sistemas de tiempo real," Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2025.
- [20] F. C. García, A. G. Castañeda, y A. C. Núñez, "La inteligencia artificial como herramienta para las pequeñas y medianas empresas," *Universidad & Ciencia*, vol. 13, Especial CIVITEC, pp. 44–54, 2024.
- [21] S. C. Riascos-Erazo y A. Aguilera-Castro, "Innovación, madurez de la gestión del conocimiento e Industria 4.0: mirada en las pymes colombianas," *Journal of Technology Management & Innovation*, vol. 19, no. 1, pp. 29–39, 2024.

A study of the mechanical and electrical properties of the cortical bone based on age, biochemical factors and Nernst equation

Alex J. Velez-Cruz
<https://orcid.org/0000-0002-9289-5256>
alvelez@pupr.edu
Polytechnic University of Puerto Rico
San Juan, PR-USA

Oscar Gilberto Dam
<https://orcid.org/0000-0002-0594-6757>
oscar.curmetals@gmail.com
Universidad Nacional Experimental Politecnica
"Antonio Jose de Sucre"
Vice-Rectorado Puerto Ordaz
Ciudad Guayana, Venezuela

*Correspondence author: alvelez@pupr.edu

Received (11/09/2024), Accepted (13/12/2024)

Abstract. - This study presents the development of a mathematical model to assess the performance of oil strings during the drilling process of a reservoir, considering the dynamic conditions and operational characteristics of the equipment during its functions, and taking into account the mechanical properties of API K55 steel. The research resulted in a set of equations that model the behavior of stresses and deformations experienced by the oil tools when transmitting torque, facilitating the opening of the reservoir. A finite element analysis was conducted to evaluate the structural behavior of the strings and to estimate the time required to reach permanent deformations, as well as the time before failure occurs.

Keywords: aging, calcium, PTH, pH, cortical bone, Young modulus, electrical conductivity, Nernst equation and electro-stimulation.

Un estudio de propiedades mecánicas y eléctricas del hueso cortical a partir de la edad, factores bioquímicos y la ecuación de Nernst

Resumen: Este artículo presenta una exploración en profundidad de la intrincada interacción entre las propiedades mecánicas y eléctricas en sistemas biológicos, centrándose en las relaciones experimentales entre el envejecimiento, la concentración de calcio, el pH y la PTH. La ecuación de Nernst es un principio electroquímico fundamental, el cual se examinará por su relevancia en la comprensión de estos fenómenos y su futura aplicación de electroestimulación para procesos de sanación del hueso cortical. El artículo profundiza en el impacto del envejecimiento en el cuerpo humano, el papel del calcio y el pH en los procesos fisiológicos, la importancia de la PTH y la aplicación de la ecuación de Nernst en sistemas biológicos.

Palabras clave: envejecimiento, calcio, PTH, pH, hueso cortical, módulo de elasticidad, conductividad eléctrica, ecuación de Nernst y electroestimulación.



I. INTRODUCTION

Bioengineering is a multidisciplinary field that integrates biology, chemistry, physics, and engineering principles to develop innovative solutions in healthcare and biomedical applications [1], [2]. Understanding the mechanical and electrical properties of biological tissues, such as bone, is crucial for various bioengineering applications, including the design of medical devices, drug delivery systems, and assessments of bone health [3]. The Nernst equation, derived from electrochemistry, is a fundamental tool that allows researchers to quantify the behavior of ions and electrical potential differences across biological membranes [4]. In the field of bioengineering, especially in the characterization of cortical bone, the Nernst equation is applied to determine the electrical properties of bone and the amount of electricity needed to pass through bone membranes [5]. This article provides a comprehensive overview of the Nernst equation, its theory, applications in bioengineering, and its specific relevance to cortical bone characterization. Bone healing is a complex biological process influenced by various factors, including mechanical stress, growth factors, cellular activities, and signaling pathways. However, electrical stimulation has been explored as a potential modality to promote bone healing and suggests that specific electrical parameters can have a positive impact on bone regeneration [6]. When electrical stimulation is used for bone healing, several factors should be considered, including the type of electrical stimulation (e.g., direct current, pulsed electromagnetic fields), the frequency, duration, and intensity of the stimulation, and how these parameters affect cellular and tissue responses [7]. Vitamin D plays an indirect role in stimulating the mineralization of the unmineralized bone matrix. After the absorption or skin production of vitamin D, the liver synthesizes 25-hydroxyvitamin D, and subsequently, the kidneys produce biologically active 1,25-dihydroxyvitamin D [$1,25-(OH)_2D$]. Serum $1,25-(OH)_2D$ is responsible for maintaining serum calcium and phosphorus concentrations adequate to allow passive mineralization of the unmineralized bone matrix. Serum $1,25-(OH)_2D$ primarily accomplishes this by stimulating the intestinal absorption of calcium and phosphorus. Serum $1,25-(OH)_2D$ also promotes the differentiation of osteoblasts and stimulates osteoblastic expression [8]. Vitamin D, specifically vitamin D3 (cholecalciferol), plays a crucial role in various physiological processes in the body, such as the regulation of calcium and phosphate metabolism. The primary active form of vitamin D is calcitriol, which is formed in the skin from vitamin D3 (cholecalciferol) in the presence of ultraviolet B radiation. Calcitriol acts in the intestines to increase the absorption of calcium and phosphate, additionally, calcitriol promotes the reabsorption of calcium in the kidneys, thereby preventing its loss through urine [9].

Calcium is an essential mineral that plays a vital role in many physiological processes, including muscle contraction, nerve function, and blood clotting. Calcium is the most abundant divalent cation in the body, representing about 2% of body weight, approximately 1,000 grams. It is distributed across various compartments, with constant exchange flows subject to complex regulatory mechanisms. More than 98% of the body's calcium is found in the bone compartment, of which approximately 1% is freely exchangeable with extracellular fluid [10], [11]. Serum calcium exists in three (3) different forms: ionic or free form, which accounts for approximately 50%; protein-bound, approximately 40%; and finally, about 10% forms complexes with anions such as bicarbonate, citrate, phosphate, and lactate [12]. Ionic calcium and calcium bound to anions constitute the ultra-filtrable fraction, with the ionic fraction being the only one with biological activity and, therefore, subject to hormonal control. The circulating extracellular calcium pool exists in three (3) different states, protein-bound, anion-bound, and free or ionized. Protein-bound, anion-bound, and free or ionized calcium account for approximately 40-45 %, 5-10 %, and 45-50 % of the total calcium in circulation respectively [13]. When calcium measurements are needed, there are two (2) options to obtain the concentration, total calcium, and ionized calcium (iCa^{2+}). The total calcium measurement is the sum of the subfractions (protein-bound, anion-bound, and free or ionized). Total, calcium measurement

is widely used because it is an accurate representation of calcium homeostasis in most cases and can be included as part of a routine blood collection. While total calcium measurement is valuable in many patients, it can yield misleading results in situations where circulating protein concentrations are abnormal either by excessive protein loss or impaired protein synthesis [14].

For these reasons, there exists a pressing clinical and analytical demand for the direct measurement of iCa^{2+} . The difficulty in measuring iCa^{2+} arises primarily from the rigorous preanalytical conditions that must be met. The equilibrium is influenced by pH levels, as the binding of calcium to proteins is notably sensitive to changes in pH. Thus, pH change is inversely proportional to the concentration of iCa^{2+} . Typically, changes by 5 % for every 0.1-unit change in pH as hydrogen ions effectively compete with iCa^{2+} for available negative charges on proteins [15]. The application of pH-adjusted calcium was clinically useful, but a change in pH that occurred after collection would affect the accuracy of the results by an error of 10% approximately [16]. Therefore, ion practice to correct the pH-adjusted free calcium measurements are recommended to multiply the iCa^{2+} by 10 % approximately.

$$\text{True Calcium} = \text{Reported Total Calcium} + 0.8 (4.0 - \text{Serum Albumin}) \quad (1)$$

where "True Calcium"; "Reported Total Calcium"; and "Serum Albumin" have units of mg/dL, m/dL, and g/dL respectively. The concentration of calcium in the blood is tightly regulated by the PTH and other factors [17]. Approximately, 90% of protein-bound calcium binds to albumin in a pH-dependent manner. Alterations that decrease serum albumin values will decrease total serum calcium but will have a smaller effect on ionized calcium concentration. In general, each g/dL of albumin binds approximately 0.2 mmol/L (0.8 mg/dL) of calcium, so to correct hypoalbuminemia, it is necessary to add 0.2 mmol/L to the total calcium concentration for every g/dL decrease in albumin concentration from the normal values of 4.0 g/dL [12], [18]. The binding of calcium to albumin is also affected by the pH of the extracellular fluid. Acidemia will decrease protein binding and increase ionized calcium. For every 0.1 decrease in ionized pH, calcium increases approximately by 0.05 mmol/L. The exact regulation of serum calcium is controlled by calcium itself through a calcium receptor and various hormones, the most important of which are PTH and 1,25-dihydroxyvitamin $D_3(1,25(OH)_2D_3)$. Maintaining appropriate calcium equilibrium, and therefore serum calcium levels, is a complex and dynamic process involving calcium absorption and excretion in the intestines, filtration, and reabsorption in the kidneys, and its storage and mobilization in the skeleton. Calcium homeostasis refers to the regulation of the calcium ions concentration in the extracellular fluid [19]. Normal serum calcium concentration varies between laboratories but is usually 8.5 to 10.5 mg/dL (2.1 to 2.6 mmol/L) and it represents the sum of the three circulating fractions mentioned above [20].

Table 1. Calcium intakes by life stage.

LSG (Yr.)	AI (mg)	EAR (mg)	RDA (mg)	TUIL (mg)
MALES				
19-30	—	800	1,000	2,500
31-50	—	800	1,000	2,500
51-70	—	800	1,000	2,000
> 70	—	1,000	1,200	2,000
FEMALES				
19-30	—	800	1,000	2,500
31-50	—	800	1,000	2,500
51-70	—	1,000	1,200	2,000
> 70	—	1,000	1,200	2,000

LSG = Life Stage Group; AI = Adequate Intake; EAR = Estimated Average Requirement; RDA = Recommended Dietary Allowance; TUIL = Tolerable Upper Intake Level, The LSG unit is years (Yr.). The symbol (>) means greater than [21].

On the other hand, the body's pH is regulated by various systems, including calcium regulation systems. Acid-based balance is important for maintaining the normal functioning of enzymes and metabolic processes. When blood calcium levels decrease, the release of PTH can be activated, which in turn can influence acid-base balance. Acidosis, characterized by a lower-than-normal blood pH, can affect the binding of calcium to proteins and, as a result, influence ionized calcium levels in the blood. This can have an impact on hormonal response and calcium homeostasis. The PTH is secreted by the parathyroid glands in response to low levels of calcium in the blood. PTH increases the reabsorption of calcium in the kidneys, thereby releasing more calcium into the bloodstream. PTH stimulates the release of calcium and phosphate from the bones, which raises the concentration of calcium in the blood. Additionally, PTH plays a crucial role in regulating calcium levels in the body, with one of its primary targets being bone tissue. Below, it is describing the mechanism of action of PTH in bone and its principal functions:

- **Stimulation of Osteoclast Activity:** PTH activates osteoclasts, which are cells that resorb bone.
- **Inhibition of Osteoblast Activity:** Although PTH primarily stimulates bone resorption, it can also indirectly inhibit the activity of osteoblasts, reducing bone formation under certain conditions [23].
- **Calcium Homeostasis:** PTH plays a central role in maintaining serum calcium levels within a narrow range. This calcium is then available for vital physiological functions such as muscle contraction and nerve signaling.
- **Response to Hypocalcemia:** When blood calcium levels decrease, the secretion of PTH increases. This hormone acts rapidly to mobilize calcium from bone tissue, ensuring that the body maintains the necessary levels for normal physiological processes.
- **Bone Remodeling:** PTH is a key regulator of bone remodeling, which involves both bone resorption and formation. By promoting bone resorption, PTH contributes to the removal of old or damaged bone tissue and the release of stored calcium. This, in turn, allows for the deposition of new bone matrix when conditions are appropriate.

In this study, the investigation was carried out to explore the relationship between calcium concentration, age, PTH, and pH using an electrochemistry equation and experimental data from mechanical and electrical properties of the cortical bone. We have explored the significance of the Nernst equation in elucidating ion transport across biological membranes and its role in maintaining cellular electrical potentials, let's delve into the complexities of determining the precise electrical requirements for bone healing.

II. FIELDS OF INTEREST TO THE SUBJECT

The Nernst equation describes the relationship between the concentration of ions and the electric potential difference (voltage) across a membrane or at an electrode interface. This equation is crucial for understanding ion transport phenomena across biological membranes, including cell membranes, and provides insights into how cells maintain their electrical potential as well as the electrical potentials at a cellular level. However, determining the exact amount of electricity needed for bone healing would require a more comprehensive approach that considers all relevant biomechanical factors and mechanisms. For that reason, experiments were conducted to determine the mechanical and electrical properties of the cortical bone, emphasizing the experimental correlation between both properties through a statistical analysis. Additionally, biochemical factors and components such as pH, PTH, and calcium concentration were analyzed to understand their interaction and the biological response when electrical stimulation is applied.

The Nernst equation is typically expressed as follows:

$$E = E_0 - \frac{R \cdot T}{(2) \cdot F} \cdot \ln \left(\frac{[Ca^{2+}]_{in}}{[Ca^{2+}]_{out}} \right) \quad (2)$$

Where:

- E represents the electric potential difference (in volts) across a membrane or at an electrode.
- E_0 is the standard electrode potential, a reference value.
- R is the universal gas constant.
- T is the absolute temperature (in Kelvin).
- n is the number of electrons transferred in the reaction.
- F is the Faraday constant.
- $[A^-]$ y $[A]$ are concentrations of the ion Ca^{2+} on either side of the membrane or at the electrode interface.

According to (2) above, the potential difference across a membrane is proportional to the concentration gradient of the ions involved, where $[Ca^{2+}]_{in}$ is the concentration of calcium ions inside the cell, and $[Ca^{2+}]_{out}$ is the concentration of calcium ions outside the cell and n is 2 due to the number of electrons transferred from Ca^{2+} . The Nernst equation illustrates how changes in ion concentrations can affect the electric potential across a membrane. The electrical characterization of biological tissues is a great interest in the bioengineering field, especially, obtaining electrical properties of biological tissues such as bone structures. The most common electrical properties associated with bone studies include electrical conductivity, permittivity, and impedance, which provide information about the composition, health, and functionality of the tissue. The Nernst equation can be applied to assess the electrical behavior of biological tissues and explore how different ions influence their electrical properties.

For example, the electrical conductivity of cortical bone depends on various factors, including ion concentrations and the porosity of the bone matrix. Ions such as calcium (Ca^{2+}) and phosphate (PO_4^{3-}) play a crucial role in bone tissue. The Nernst equation can be used to calculate the equilibrium potential for these ions and understand how they influence the electrical conductivity of cortical bone. Studies have shown that changes in bone health, such as osteoporosis or the presence of fractures, can alter the electrical properties of cortical bone. By measuring the electrical conductivity of bone tissue, bioengineers can assess bone quality and monitor bone health, providing valuable information for clinical diagnoses and treatment planning. Electrostimulation has proven to be promising in promoting bone healing and regeneration. Techniques such as Pulsed Electromagnetic Field Therapy (PEMF) involve the application of electric fields to bone tissue to stimulate cellular responses that enhance bone growth. Bioengineers can utilize the Nernst equation to calculate the electric potential required to influence specific ion concentrations within bone tissue. This information helps optimize the design of electric stimulation devices for bone healing, potentially speeding up the recovery process for individuals with bone fractures or orthopedic surgeries [34].

III. METHODOLOGY

A. Methodology for literature review

The methodology described herein outlines a systematic and rigorous approach to the selection of research papers in the fields of bioengineering and science. The process, consisting of thirteen distinct steps, is designed to curate a collection of papers that meet stringent criteria for scientific excellence, relevance, ethical standards, and potential impact on the advancement of knowledge within the realm of engineering applications to biological systems. By employing a comprehensive and meticulous screening process, we aim to ensure that only the most valuable and deserving research contributions are included in our final selection. This methodology serves as a robust framework for the critical evaluation of scientific literature,

facilitating the identification of papers that make significant contributions to the fields of science and bioengineering while upholding the highest standards of quality and ethics.

1. Initial Screening - Collecting a pool of research papers related to bioengineering and science topics.
2. Peer Review Evaluation - Exclude papers that have not undergone a thorough peer review process.
3. Relevance Assessment - Evaluate papers for their relevance to science and bioengineering fields. Exclude papers that are not directly related to engineering applications to biological systems, or related topics.
4. Scientific Rigor Evaluation - Assess the scientific rigor of the selected papers. Exclude papers that lack well-designed experiments, appropriate statistical analysis, or robust methodology.
5. Clear Objectives and Hypotheses - Examine the papers for clear and well-stated objectives and hypotheses. Exclude papers that do not effectively address these objectives.
6. Originality Check - Verify whether the research presents novel findings, methods, or applications that contribute to the advancement of bioengineering knowledge. Exclude papers that do not meet this criterion.
7. Significance Assessment - Determine whether the paper makes a substantial contribution to the science and bioengineering fields. Exclude papers that do not tackle important problems, or advance understanding in a meaningful way.
8. Clarity and Coherence Evaluation - Evaluate the organization and clarity of the papers. Exclude papers poorly organized or with unclear writing that hinders effective communication of results, and conclusions.
9. Ethical Review - Ensure that the research follows ethical standards, including the protection of human and animal subjects and proper citation practices. Exclude papers that violate ethical guidelines.
10. Interdisciplinary Assessment - Consider whether the research demonstrates a strong interdisciplinary approach, combining principles from engineering, biology, and other relevant sciences. Favor papers that exhibit interdisciplinary characteristics.
11. Impact Factor Consideration - Consider the potential impact of research on healthcare, technology, or engineering and science applications. Consider this as a positive factor when evaluating the papers.
12. Exclusion Criteria Application - Apply the exclusion criteria to the selected papers to exclude any that meet any of the criteria mentioned in the exclusion list.
13. Final Selection - After applying all the criteria, select the papers that meet the inclusion criteria while excluding those that meet any of the exclusion criteria. See Table 2 for Inclusion and Exclusion criteria.

Table 2. Inclusion and exclusion criteria.

Criteria	
Inclusion	Exclusion
Peer Review Journals: Papers should undergo a thorough peer review process to assess their quality and validity.	Unsubstantiated Claims: Research with unsupported or exaggerated claims should be rejected.
Relevance to Science and Bioengineering Fields: Relate to applications of engineering principles to biological systems, biomedical devices, or related topics.	Poor Methodology: Research with inadequate experimental design, data collection, or statistical analysis may be rejected.
Scientific Rigor: Demonstrate a high level of scientific rigor, including well-designed experiments, appropriate statistical analysis, and robust methodology.	Plagiarism and Ethical Violations: Papers found to contain plagiarism or ethical violations, such as fabrication or falsification of data, should be rejected.
Clear Objectives: The objectives and hypotheses should be clearly stated, and the paper should effectively address these objectives.	Insufficient Originality: Papers that do not present significant new contributions or merely replicate existing work may be rejected.
Originality: The research should present novel findings, methods, or applications that contribute to the advancement of bioengineering knowledge.	Inadequate Presentation: Papers with poor organization, unclear writing, or insufficient data presentation may be rejected.
Significance: The paper should make a substantial contribution to science and bioengineering fields, either by tackling important problems, providing innovation, or advancing understanding in a meaningful way.	Inadequate Ethical Considerations: Papers that do not adhere to ethical standards regarding the use of human or animal subjects or fail to disclose conflicts of interest may be rejected.
Clarity and Coherence: The paper should be well-organized, with clear writing to communicate results, discussion, and conclusions effectively.	Lack of Relevance: Papers that are not related to science and bioengineering or do not have a clear connection to the fields should be rejected.
Ethical Practice: Research must follow ethical standards, including human and animal subject protection, as well as appropriate citation and avoidance of plagiarism.	Conflict of Interest: Papers with undisclosed conflicts of interest that could bias the investigation, or its interpretation should be rejected.
Interdisciplinary Nature: The research may be favored if it demonstrates a strong interdisciplinary approach, combining principles from engineering, biology, and other relevant sciences or fields.	Poor Presentation: Papers with disorganized writing, ineffective communication of results, unclear data presentation, or inadequate explanations may be excluded.
Impact Factor: Consideration of the potential impact of research on healthcare, technology, or any other applications within the bioengineering and science fields.	Outdated or Irrelevant References: Papers that heavily rely on outdated or irrelevant references may be rejected.

The keywords used to obtain the articles were as follows:

- "Calcium concentration" and "pH"
- "Calcium concentration" and "PTH"
- "Mechanical properties" and "Electrical properties"
- "Nernst equation" and "Electrochemical potentials"
- "aging" and "calcium"
- "Aging" and "Young modulus"
- "Vitamin D" and "Calcium absorption"
- "Calcium homeostasis" and "PTH mechanism"
- "Hormonal regulation" and "Bone health"
- "Bone healing" and "electrostimulation"

B. Methodology for experimental analysis

This methodology outlines the experimental procedures and analytical steps performed to correlate mechanical and electrical properties of cortical bones obtained in the first phase of this investigation with factors such as gender, age, calcium concentration, pH, and PTH levels, linking this data to the Nernst equation for clinical application. The process consists of twelve distinct steps to perform the experimental analysis of this research. The study aims to establish a relationship between these properties and use them to predict the electric potential difference across cortical bone membranes for safe electrostimulation in bone fracture healing.

1. Gather data related to demographic and biochemical factors such as gender, age, calcium concentration, pH, and PTH levels. The data obtained shall not be more than 10 years back from 2023.
2. Prepare an organized table for the factors mentioned in Step 1 and provide it in the Results section.
3. Correlate demographic data with biochemical factors.
4. Correlate the mechanical and electrical properties with demographic data and biochemical factors using statistical analysis.
5. Apply the Nernst equation to relate the electrical properties to ion concentration and membrane potential.
6. Use the correlation obtained in Step 4 and the Nernst equation to predict the electric potential difference (voltage) across cortical bone membranes.
7. Based on the predicted voltage, determine safe levels for electrostimulation in bone fracture healing.
8. Provide clinical recommendations for electrostimulation therapy.
9. Provide recommendations for healthcare practitioners regarding the application of electrostimulation for bone fracture patients, considering gender, age, calcium concentration, pH, and PTH levels.
10. Summarize the findings regarding the correlation between mechanical and electrical properties of cortical bones with biochemical factors.
11. Highlight the clinical implications and potential benefits of using the predicted voltage relationship for electrostimulation applications in bone fracture healing.
12. Include all relevant references to prior studies, methodologies, and scientific literature related to bone mechanics and fracture healing, bioimpedance, and electrostimulation.

IV. RESULTS

The basic analyzed data and corresponding results are described below.

A. Demographic and biochemical data

The gathered data used jointly with the mathematical model so developed is presented in Table 3 below.

Table 3. Demographic data based on biochemical factors.

AG (Yr.)	CCB (mg/dL)	PTH-L (pg/mL)	pH Sc. (0-14)
MALES			
19-30	8.6 - 10.0	10 - 55	7.35 - 7.45
31-50	8.6 - 10.2	10 - 50	7.35 - 7.45
51-70	8.6 - 10.4	10 - 55	7.35 - 7.45
> 70	8.6 - 10.5	10 - 65	7.35 - 7.45
FEMALES			
19-30	8.6 - 10.0	10 - 50	7.35 - 7.45
31-50	8.6 - 10.2	10 - 50	7.35 - 7.45
51-70	8.6 - 10.4	10 - 55	7.35 - 7.45
> 70	8.6 - 10.5	10 - 65	7.35 - 7.45

AG = Age Group; CCB = Calcium Concentration in Blood; PTH-L = Parathyroid Hormone Levels; pH Sc. = Acidity/Alkalinity Scale. AG unit is years (Yr.). The symbol (>) means greater than., CCB, PTH-L, and pH Sc. Values were obtained from [35], [36], [37].

The obtained results show that calcium concentration decreases with age due to changes in bone metabolism and hormonal regulation. It was also found that PTH levels increase with age as a compensatory mechanism to maintain calcium homeostasis. Furthermore, we observed that pH has a significant effect on calcium concentration due to its impact on ionization states.

B. Mechanical and electrical properties correlation with demographic data, and biochemical factors

To correlate the obtained experimental data, conductivity and permittivity variables were plotted as show in Fig. 1.

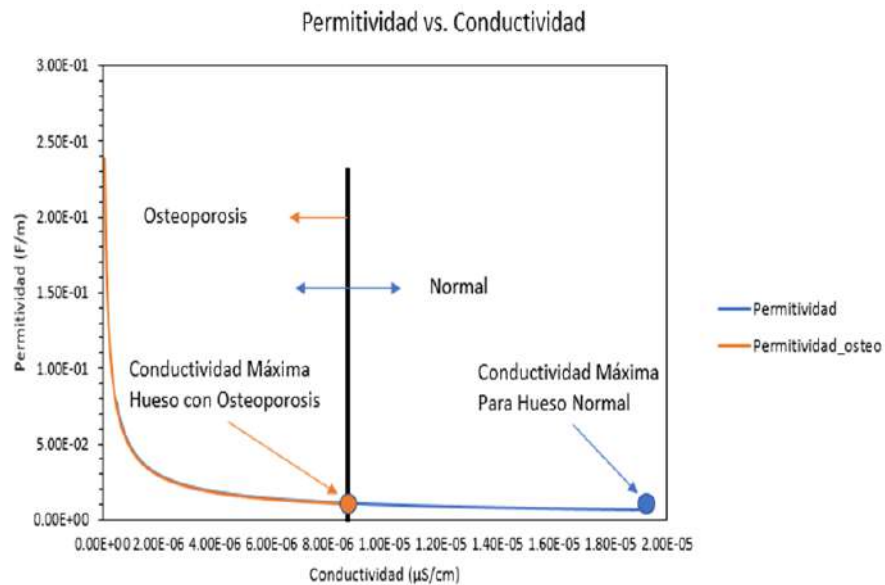


Fig. 1. Conductivity and Permittivity Relationship. Source: The authors.

For a better understanding of Fig. 1, it is assumed that the studied bone falls within either the osteoporosis or normal condition, but as the osteoporosis bone can resist a tension stress of about 18.28 MPa, when compared this value with the obtained value of 28.6 MPa thus it is 'possible to conclude as a normal bone. Nevertheless, by using (3) and (4), it is also possible to get $\sigma_{\text{Elec. Max}}$ y ϵ_a values for the two bones conditions respectively.

$$\sigma_{\text{Elec. Max(normal)}} = \frac{E - 10,845}{8.82 \times 10^8} \quad (3)$$

$$\sigma_{\text{Elec. Max(normal)}} = \frac{28.6 \times 10^6 - 10,845}{8.82 \times 10^8} = \boxed{0.0323(\mu\text{S/cm})}$$

$$Y = 3 \times 10^{-6} X^{-0.7} \quad \text{o} \quad \text{Permittividad } (\epsilon_a) = 3 \times 10^{-6} (\sigma_{\text{Elec. Max(normal)}})^{-0.7} \quad (4)$$

$$\epsilon_a = 3 \times 10^{-6} (\sigma_{\text{Elec. Max(normal)}})^{-0.7} \rightarrow 3 \times 10^{-6} (0.0323(\mu\text{S/cm}))^{-0.7} = \boxed{3.316 \times 10^{-5} (\text{F/m})}$$

C. Mechanical and electric properties relationship

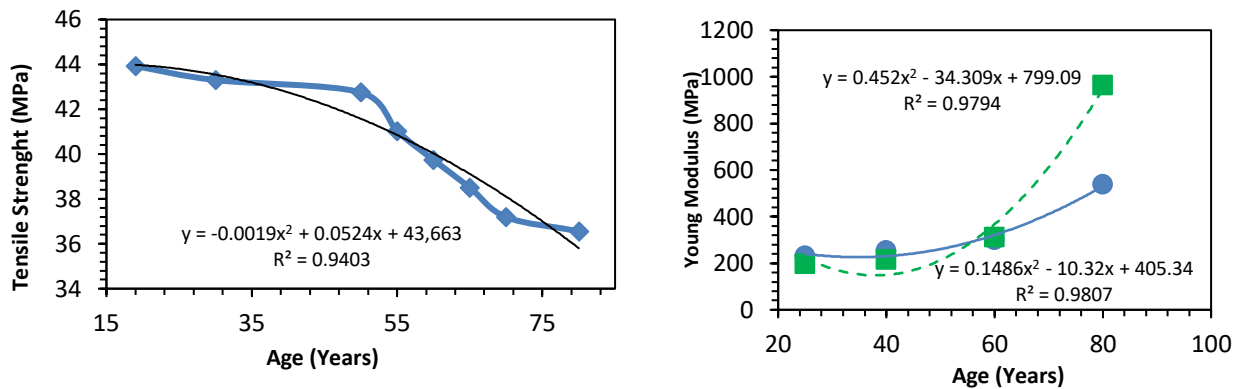


Fig. 2. (a) Left: Age effect on tensile stress; (b) Right: Young modulus (green male, blue women vs. age). Source: The authors.

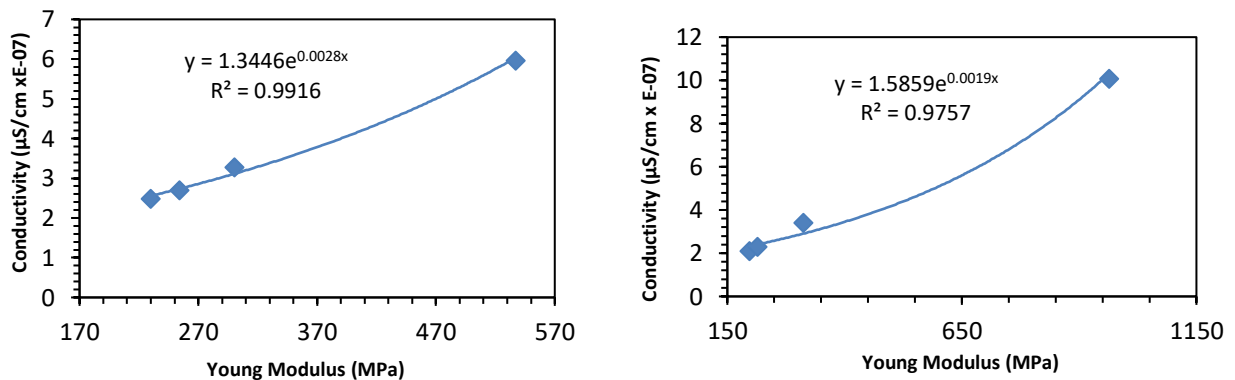


Fig. 3. Conductivity vs. Young modulus, (a) left women, (b) right men. Source: The authors.

To investigate the relationships between mechanical and electrical properties, it was imperative to determine the slope of the mechanical graphs for each of the samples, which signifies the modulus of elasticity.

$$\text{Young Modulus (E)} = 8.82 \times 10^8 \times \text{Conductivity}_{\text{max}}(\sigma_{\text{Elec. Max}}) + 10.845 \quad (5)$$

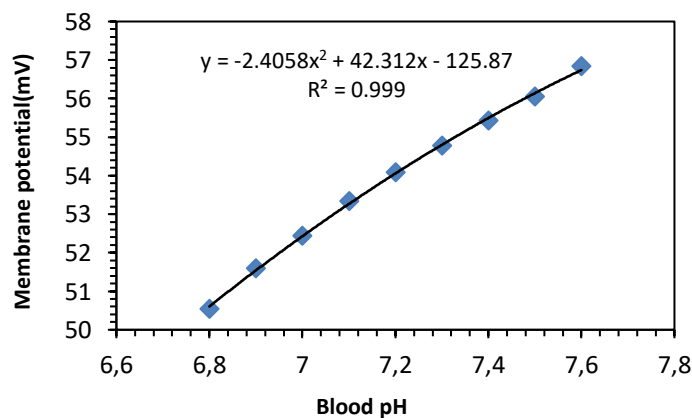


Fig. 4. Effect of pH in blood on the membrane's electric potential. Source: The authors.

CONCLUSIONS

In conclusion, the present research provides new insights into the complex relationship between calcium concentration, age, PTH, and pH. The Nernst equation has been identified as a valuable application in the field of bioengineering, particularly in the characterization of cortical bone. By understanding the electrical properties of cortical bone and applying the Nernst equation, researchers can assess bone health, and optimize electrical stimulation therapies for bone healing. This interdisciplinary approach demonstrates how the principles of science and engineering can be harnessed to advance healthcare solutions and improve the quality of life for individuals with bone-related conditions. The findings suggest that changes in these factors can have significant implications for human health and disease. Further research is needed to fully understand these relationships and develop effective interventions to prevent or treat related conditions by means of define stimulation parameters through iterative experiments to achieve the desired biological responses while minimizing potential side effects. Finally, further experimental tests will be useful to validate the effectiveness of the designed electrical stimulation involving in vitro studies using samples of bone tissue or in vivo studies with animal models.

ACKNOWLEDGMENT

I would like to express my sincere gratitude to UNEXPO, Puerto Ordaz, for their continuous support and guidance throughout the process of this research, the preparation of this paper and transformative years. Their insights and assistance have been instrumental in shaping the outcome of this work.

REFERENCES

- [1] M. F. Bear, B. W. Connors y M. A. Paradiso, *Neuroscience: Exploring the Brain* (4th ed.), Wolters Kluwer, 2016.
- [2] B. Alberts, A. Johnson, J. Lewis, M. Raff, K. Roberts y P. Walter, *Molecular Biology of the Cell* (4th ed.), Garland Science, 2002.
- [3] D. Purves, G. J. Augustine, D. Fitzpatrick, L. C. Katz, A. S. La Mantia y J. O. McNamara, *Neuroscience* (6th ed.), Oxford University Press, 2017.
- [4] A. J. Bard y L. R. Faulkner, *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*, John Wiley & Sons, 2000.
- [5] C. T. Rubin, K. J. McLeod y L. E. Lanyon, «Prevention of osteoporosis by pulsed electromagnetic fields, » *J Bone Joint Surg Am*, vol. 71, n° 3, pp. 411-417, 1989.
- [6] M. Griffin y A. Bayat, «Electrical stimulation in bone healing: critical analysis by evaluating levels of evidence, » *Eplasty*, vol. 11, n° e34, pp. 303-353, 2011.
- [7] L. Leppik, K. M. C. Oliveira, M. B. Bhavsar y J. H. Barker, «Electrical stimulation in bone tissue engineering treatments, » *Eur J Trauma Emerg Surg*, vol. 46, n° 2, pp. 231-244, 2020.
- [8] C. Chen, R. Adhikari, D. L. White y W. K. Kim, «Role of 1,25- Dihydroxyvitamin D3 on Osteogenic Differentiation and Mineralization of Chicken Mesenchymal Stem Cells, » *Frontiers in Physiology*, vol. 12, p. 1-13, 2021.
- [9] M. F. Holick, «Vitamin D Deficiency, » *New England Journal of Medicine*, vol. 357, n° 3, pp. 266-281, 2007.
- [10] R. Goswami, «Primer on the metabolic bone diseases and disorders of mineral metabolism, » *Indian J Med Res*, vol. 144, n° 33, p. 489-90, 2016.
- [11] L. J. Deftos, «Calcium Metabolism, » de *Clinical Essentials of Calcium and Skeletal Disorders*, Caddo, OK, Professional Communications, Inc., 1998, pp. 44-71.
- [12] F. Carral San Laureanoa, G. Olveira Fusterb y M. Aguilar Diosdado, «Homeostasis del calcio, fósforo y magnesio, » *Medicina Integral*, vol. 36, n° 7, pp. 261-266, 2000.
- [13] A. Hamroun, J.-D. Pekar, A. Lionet, A. Ghulam, P. Maboudou, A. Mercier, T. Brousseau, G. Grzych y F. Glowacki, «Ionized calcium: analytical challenges and clinical relevance, » *Journal of Laboratory and Precision Medicine*, vol. 5, pp. 1-16, 2020.
- [14] Z. D. Hu, Y. L. Huang, M. Y. Wang, G. J. Hu y Y. Q. Han, «Predictive accuracy of serum total calcium for both critically high and critically low ionized calcium in critical illness, » *J Clin Lab Anal.*, vol. 32, n° 9, pp. 1-5, 2018.
- [15] J. O. Joswig, J. Anders, H. Zhang, C. Rademacher y B. G. Keller, «The molecular basis for the pH-dependent calcium affinity of the pattern recognition receptor langerin, » *J Biol Chem*, pp. 1-16, 2021.
- [16] N. Fogh-Andersen, «Ionized calcium analyzer with a built-in pH correction, » *Clin Chem*, vol. 27, n° 7, pp. 1264-1267, 1981.
- [17] E. Yu y S. Sharma, «Physiology, Calcium, » *StatPearls Publishing*, Treasure Island, FL, 2023.

- [18] D. A. Bushinsky y R. D. Monk, «Electrolyte quintet: Calcium, » The Lancet, vol. 352, n° 9124, pp. 306-311, 1998.
[19] L. A. Negrea, «Hypocalcemia and hypercalcemia, » de Nephrology Secrets (4 ed.), Elsevier, 2019, pp. 526-531.
[20] J. Feher, «9.7 - Calcium and Phosphorus Homeostasis I: The Calcitropic Hormones, » de Quantitative Human Physiology (2nd ed.), Richmond, VA, Elsevier, 2017, pp. 924-932.

AUTHORS



Alex J. Velez-Cruz, is an engineering doctoral student and mechanical engineer who was born and raised in Puerto Rico (PR). He is a faculty member of the BME Department at the Polytechnic University of PR and is a young passionate researcher and an inventor that works constantly in the product development area with the intent to serve and help people in need.



Oscar Gilberto Dam, is a PhD in Engineering, specialized in metallurgical and industrial applications. He is the Co-Founder of the Metallurgical and Materials Research Institute at the UNEXPO. He is a well respectable and prestigious professor and metallurgical engineer within the Latin American scientist community.

Desarrollo de un chaleco inteligente con retroalimentación vibrotáctil para la corrección postural

*Blanca Liliana Topón Visarrea
<https://orcid.org/0000-0001-5307-5450>
blanca.toponvisarrea4187@upse.edu.ec
Universidad Estatal Península de Santa Elena
Salinas, Ecuador

Ricardo Cajo Díaz
<https://orcid.org/0000-0002-0371-2439>
rcajo@upse.edu.ec
Universidad Estatal Península de Santa Elena
Salinas, Ecuador

*Correspondence author: blanca.toponvisarrea4187@upse.edu.ec

Received (03/09/2024), Accepted (16/01/2025)

Resumen: - Los trastornos musculoesqueléticos causados por malas posturas afectan la salud laboral. En esta investigación, se evaluó el puesto de trabajo de personal administrativo usando el método RULA, obteniendo un nivel de riesgo 2, lo que indica la necesidad de ajustes ergonómicos. Para mitigar este riesgo, se diseñó y evaluó un chaleco con retroalimentación postural vibrotáctil, basado en la plataforma Arduino y un sensor acelerómetro para medir las inclinaciones laterales (ax) y frontales (az) del usuario. El sistema emplea el microcontrolador Sseeed Studio XIAO ESP32 S3, sensor MPU6050 y actuadores vibratorios para las señales de corrección. Se implementó un protocolo de tres fases: (1) familiarización, (2) práctica para identificar estímulos, y (3) evaluación prolongada. Los resultados mostraron que las inclinaciones se mantuvieron dentro de los rangos de corrección y que la frecuencia de correcciones disminuyó, lo que indica que los usuarios ajustaron su postura de manera autónoma, reduciendo el riesgo de trastornos musculoesqueléticos.

Palabras clave: ergonomía, háptica, retroalimentación vibrotáctil, corrección postural.

Development of a smart vest with vibrotactile feedback for postural correction

Abstract. - Musculoskeletal disorders caused by poor posture affect occupational health. In this study, the workstations of administrative personnel were evaluated using the RULA method, yielding a risk level of 2, which indicates the need for ergonomic adjustments. To mitigate this risk, a vibrotactile postural feedback vest was designed, based on an Arduino platform and an accelerometer sensor to measure the user's lateral (ax) and frontal (az) inclinations. The system employs the Sseeed Studio XIAO ESP32 S3 microcontroller, an MPU6050 sensor, and vibration actuators for correction signals. A three-phase protocol was implemented: (1) familiarization, (2) practice to identify stimuli, and (3) prolonged evaluation. The results showed that the inclinations remained within the correction range, and the frequency of corrections decreased, indicating that users autonomously adjusted their posture, thereby reducing the risk of musculoskeletal disorders.

Keywords: ergonomics, haptics, vibrotactile feedback, postural correction.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los trastornos musculoesqueléticos relacionados con posturas inadecuadas representan un reto significativo para la salud ocupacional. Estas afecciones son comunes en entornos laborales sedentarios, donde las largas horas frente a una computadora contribuyen al desarrollo de dolores crónicos y discapacidades. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), estos trastornos constituyen una de las principales causas de ausentismo laboral y pérdida de productividad [1]. En respuesta a esta problemática, las tecnologías vestibles han emergido como una solución innovadora. Los sistemas hápticos, en particular, han demostrado ser efectivos para proporcionar retroalimentación vibrotáctil que facilita la corrección de posturas en tiempo real. Estos dispositivos aprovechan sensores para monitorear la postura del usuario y generan señales vibrotáctiles que lo alertan cuando se detectan desviaciones de una posición ergonómicamente adecuada [2].

En el campo de la ergonomía, el desarrollo de dispositivos vestibles ha avanzado gracias a tecnologías como los acelerómetros, que permiten medir orientación y posición de manera precisa. Estos sensores, combinados con microcontroladores accesibles, han demostrado ser efectivos para reducir riesgos ergonómicos y mejorar la salud y el bienestar de los trabajadores [3]. Este trabajo estuvo centrado en el desarrollo de un chaleco inteligente con retroalimentación vibrotáctil para la corrección de posturas en el personal administrativo académico. A diferencia de otras soluciones como los exoesqueletos [4], este chaleco propone un enfoque más portable y menos intrusivo, diseñado para el uso continuo en entornos de oficina. Además, se plantea como una herramienta educativa que empodera a los usuarios para adoptar hábitos posturales saludables mediante el aprendizaje basado en retroalimentación inmediata.

En esta investigación se realizó un estudio estructurado dividido en varias etapas clave. En primer lugar, se identificó el nivel de riesgo ergonómico al que están expuestos los trabajadores mediante el análisis RULA (Rapid Upper Limb Assessment), una herramienta ampliamente utilizada para evaluar posturas laborales y determinar su nivel de riesgo [5], [6]. En segundo lugar, se diseñó un sistema de retroalimentación, que incluyó tanto el desarrollo del circuito eléctrico como la programación del sistema para garantizar su funcionamiento. En la tercera etapa, se diseñó el experimento que permitió ejecutar las pruebas necesarias para evaluar la efectividad del sistema. Finalmente, se procedió al análisis de los resultados obtenidos, lo que permitió validar la propuesta y extraer conclusiones sobre su impacto en la mejora del puesto de trabajo.

II. DESARROLLO

Los trastornos musculoesqueléticos (TME) son un conjunto de trastornos que afectan a los músculos, huesos y articulaciones del cuerpo, y son una de las principales causas de enfermedades laborales. Estos trastornos suelen originarse por posturas inadecuadas mantenidas durante períodos prolongados de tiempo. Un TME puede generar dolor crónico, fatiga, y en algunos casos, incapacidad laboral. Las zonas del cuerpo más afectadas por las malas posturas incluyen el cuello, la espalda, los hombros y las muñecas, siendo estas las áreas de mayor riesgo en entornos laborales sedentarios como oficinas, donde el personal suele permanecer sentado durante horas sin realizar pausas activas [7].

Una mala postura se refiere a la alineación incorrecta del cuerpo, que genera estrés en los músculos, ligamentos y articulaciones. Esta desalineación no solo provoca incomodidad, sino que con el tiempo puede generar problemas serios de salud, como lesiones y fatiga muscular. Las malas posturas incluyen posiciones en las que la espalda está encorvada, los hombros son encogidos o las muñecas y el cuello se mantienen en ángulos incómodos durante la ejecución de tareas repetitivas o sedentarias[8].

El método RULA (Rapid Upper Limb Assessment) es una herramienta ergonómica utilizada para evaluar el riesgo de lesiones musculoesqueléticas relacionadas con las posturas de las extremidades superiores durante las tareas laborales. Se clasifica el riesgo en varios niveles, considerando aspectos como la postura

corporal, la actividad muscular y las fuerzas aplicadas sobre los músculos y las articulaciones. La evaluación se realiza observando la posición del cuerpo, el tipo de movimiento y la carga física, asignando un puntaje a cada factor para determinar el riesgo ergonómico global. Este puntaje guía las recomendaciones de corrección y ajustes en los puestos de trabajo [9], [10].

La retroalimentación vibrotáctil es una tecnología que utiliza vibraciones para transmitir información sensorial al usuario a través del tacto. Esta tecnología se basa en la estimulación de la piel mediante actuadores que generan vibraciones, las cuales son percibidas por los receptores sensoriales en la piel, transformándolas en señales que el cerebro interpreta. Es una forma de sustitución sensorial, en la que el tacto reemplaza otras formas de percepción, como la visual o auditiva, para proporcionar una respuesta en tiempo real. La retroalimentación vibrotáctil puede ser utilizada en una amplia gama de aplicaciones, desde la navegación en entornos complejos hasta la corrección de comportamientos posturales. En el ámbito de la salud y la ergonomía, esta tecnología se ha empleado para mejorar la postura, ofreciendo una solución no invasiva para la corrección de la alineación corporal sin interrumpir las actividades cotidianas [11].

Investigaciones previas han demostrado la efectividad de estos sistemas para la mejora de la postura. Ishac y Suzuki [12] desarrollaron un cojín inteligente con retroalimentación vibrotáctil para corregir la postura, cuyo uso permitió a los usuarios mantener una postura adecuada, reduciendo el riesgo de dolor y lesiones. De manera similar, ÖZDEN [13] creó un corsé inteligente que alerta al usuario mediante señales de vibración cuando adopta una postura incorrecta al estar sentado. Este sistema, al igual que otros dispositivos de retroalimentación vibrotáctil, demuestra la efectividad de las tecnologías portátiles para la corrección postural en entornos de trabajo sedentarios. Por otro lado, Zheng y Morrell [14] exploraron el uso de retroalimentación vibrotáctil para guiar la postura del usuario en tiempo real, con un enfoque particular en la postura en la que se mantenían las extremidades superiores durante actividades repetitivas.

Este trabajo pertenece a la línea de investigación conocida como interacción humano computador, por ende, se toman en cuenta los criterios relacionados para el diseño y desarrollo del chaleco. Mediante el uso del microcontrolador Seeed Studio XIAO ESP32 S3 el cual incluye conectividad Bluetooth y Wi-Fi y el sensor MPU6050 que combina un acelerómetro de 3 ejes y un giroscopio, el chaleco monitoriza en tiempo real las inclinaciones laterales (ax) y frontales (az) del usuario, proporcionando correcciones a través de señales de vibración. Esta tecnología aplicada buscó reducir significativamente el riesgo de trastornos musculoesqueléticos en el entorno de trabajo.

El chaleco tiene como objetivo proporcionar una solución ergonómica y no invasiva para la corrección postural, permitiendo a los usuarios recibir retroalimentación inmediata sin interrumpir su flujo de trabajo. El sistema se activa cuando el sensor detecta inclinaciones fuera de los rangos establecidos, enviando señales vibrotáctiles. Estas señales son interpretadas por el usuario como una alerta, indicándole la necesidad de ajustar su postura. Esta interacción continua promueve una mayor conciencia postural y facilita la corrección de las posturas de manera autónoma, lo que ayuda a prevenir lesiones a largo plazo.

III. METODOLOGÍA

A. Identificación de riesgos de los trabajadores

Se aplicó el método RULA (Rapid Upper Limb Assessment) para evaluar las posturas laborales de los participantes. A través de este análisis, se detectaron niveles de riesgo ergonómico que varían de moderados a altos en distintas áreas del cuerpo del personal evaluado, destacando la necesidad de implementar intervenciones correctivas. Este análisis no solo permitió identificar patrones posturales críticos, sino que también proporcionó información clave para el diseño de estrategias específicas dirigidas a mejorar la salud y el bienestar de los trabajadores.

En la figura 1 se observan los pasos que se siguieron para aplicar el método RULA:

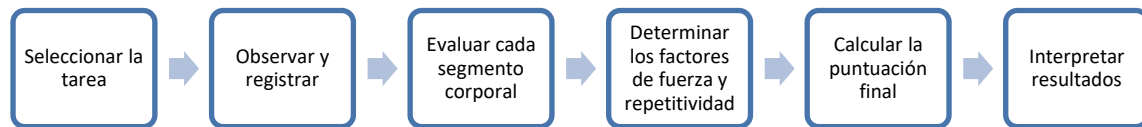


Fig. 1. Método RULA.

El trabajo de escritorio realizado por los docentes fue analizado para evaluar las posturas adoptadas y los riesgos ergonómicos involucrados. Como se observa en las Fig. 2 y 3, el análisis incluyó las posiciones de brazos, muñecas, cuello, tronco y piernas durante las tareas cotidianas. El estudio reveló que la puntuación total RULA para el trabajo realizado fue de 3, lo que corresponde a un nivel de riesgo 2. Este nivel sugiere la necesidad de ajustar de forma progresiva las estaciones de trabajo. En el caso de los docentes, se identificó una carga significativa en el cuello, el tronco, y las extremidades superiores, particularmente las muñecas (Fig. 2). Esto pone de manifiesto una mayor exposición a riesgos ergonómicos, como la fatiga, que puede derivar en lesiones a largo plazo si no se toman medidas correctivas adecuadas. Las imágenes muestran las posturas adoptadas por los participantes durante las actividades laborales, ayudando a comprender las posturas que requieren ajustes.

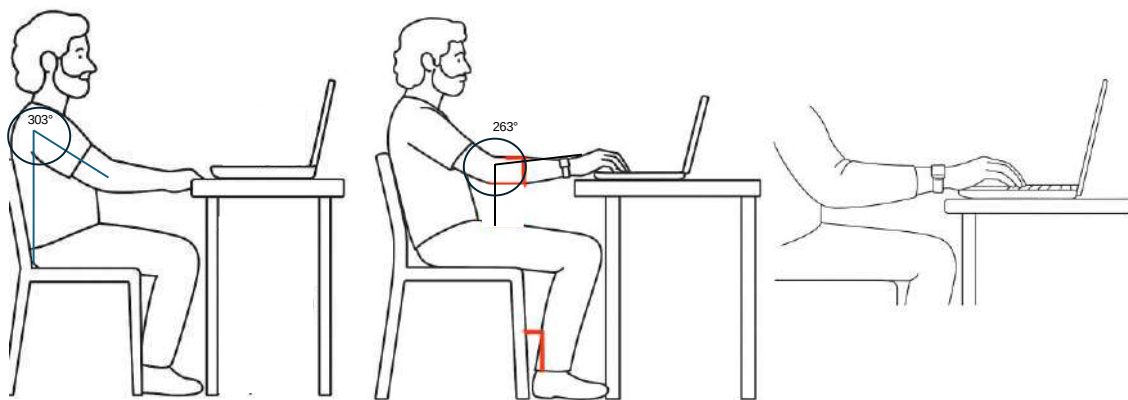


Fig. 2. Postura de los brazos, los antebrazos y de las muñecas percibidas en los participantes

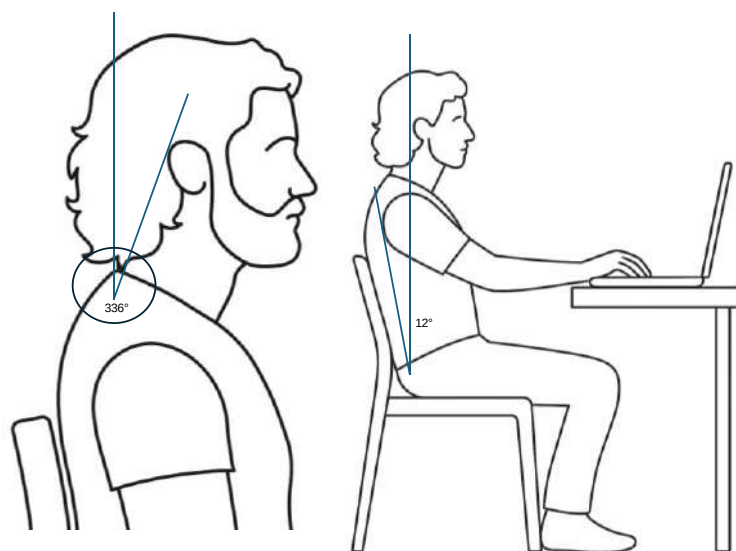


Fig. 3. Postura del cuello y del tronco percibidas en los participantes

Esta problemática surge debido al diseño inadecuado del mobiliario, así como el cansancio acumulado por permanecer sentado durante largas jornadas de trabajo sin pausas activas. Estas condiciones exponen a los trabajadores a riesgos ergonómicos que pueden desencadenar trastornos musculoesqueléticos, afectando tanto su bienestar como la productividad de la organización.

B. Interfaz de retroalimentación vibrotáctil

El sistema se conformó por un controlador Seeed Studio XIAO ESP32 S3, un acelerómetro MPU6050, un actuador tipo motor vibratorio y una batería recargable de 3.3 V, como se muestra en la Fig.4.

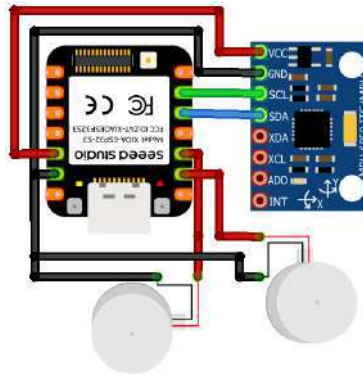


Fig. 4. Estructura de la interfaz de retroalimentación vibrotáctil.

En la figura 4 se pudieron conocer las ecuaciones de ingeniería asociadas al sistema, descritas en (1) a la (5) En cualquier nodo del circuito:

$$\sum I_{entrada} = \sum I_{salida} \quad (1)$$

Aplica, por ejemplo, al nodo VCC donde confluyen:

$$I_{VCC} = I_{ESP32} + I_{MPU6050} + I_{motores} \quad (2)$$

Además, las Leyes de Kirchhoff de Voltaje (la alimentación completa), para un lazo cerrado que va desde la batería a través del ESP32, sensores y motores, se cumple:

$$\sum V_{fuentes} = \sum V_{caídas} \quad (3)$$

Entonces:

$$V_{bat} = V_{ESP32} + V_{MPU6050} + V_{motores} + V_{cables} \quad (4)$$

Para la comunicación I2C digital entre el MPU6050 y el ESP32 se tiene:

$$SDA(t), SCL(t) = \text{función de lectura/escritura digital} \quad (5)$$

Este intercambio se rige por señales de reloj (SCL) y datos (SDA), con lógica binaria de 3,3 V.

Este conjunto se integró en un chaleco de diseño tipo mariposa el cual se adapta al cuerpo (fig. 5). La figura muestra un diagrama esquemático de un dispositivo vestible diseñado con un sistema de retroalimentación háptica. El dispositivo consta de varios componentes organizados jerárquicamente. En la parte superior se encuentra un acelerómetro MPU-6050, encargado de detectar movimiento y orientación. Este sensor envía información a un controlador Seeed Studio XIAO ESP32S3, que actúa como la unidad central de procesamiento.

Desde el controlador, se activa un actuador que consiste en un motor vibratorio, proporcionando retroalimentación háptica al usuario. Todo el sistema es alimentado por una batería recargable de 3.3 V, lo cual sugiere que el dispositivo es portátil y autónomo. Este diseño es adecuado para aplicaciones en ergonomía, monitoreo de posturas o incluso en realidad virtual y aumentada.

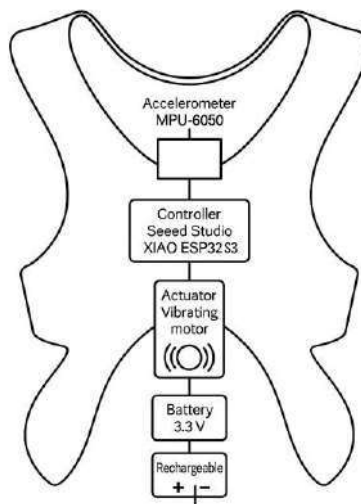


Fig. 5. Composición de los elementos del chaleco.

El software para el microcontrolador Sseed Studio XIAO ESP32 S3 fue desarrollado en Arduino IDE, utilizando el lenguaje "C" para programar el sistema de retroalimentación y calibración del sensor que tiene un rango de trabajo de -32768 y +32767 que se leen a través del bus I2C. El diagrama de flujo del sistema se muestra en la Fig. 6, que, al superar los umbrales establecidos para la inclinación lateral 12900 izquierda, 15800 derecha y -5630 a -4290 frontal, el sistema activa un temporizador de 100 ms para asegurar que solo se envíen señales de vibración si la postura incorrecta persiste durante el tiempo suficiente. Esta función fue diseñada para evitar activaciones innecesarias y garantizar una retroalimentación adecuada en el momento oportuno. Se probaron diferentes algoritmos para ajustar el tiempo de respuesta del sistema a las posturas erróneas. Se utilizaron tres tipos de tactons para proporcionar diferentes tipos de retroalimentación: una vibración para la inclinación hacia la izquierda, otra para la inclinación hacia la derecha, y una última para la inclinación hacia adelante. Cada señal vibrotáctil es fácil de distinguir y permite al usuario ajustar su postura de manera autónoma, mejorando así la ergonomía y reduciendo el riesgo de desarrollar trastornos musculoesqueléticos.

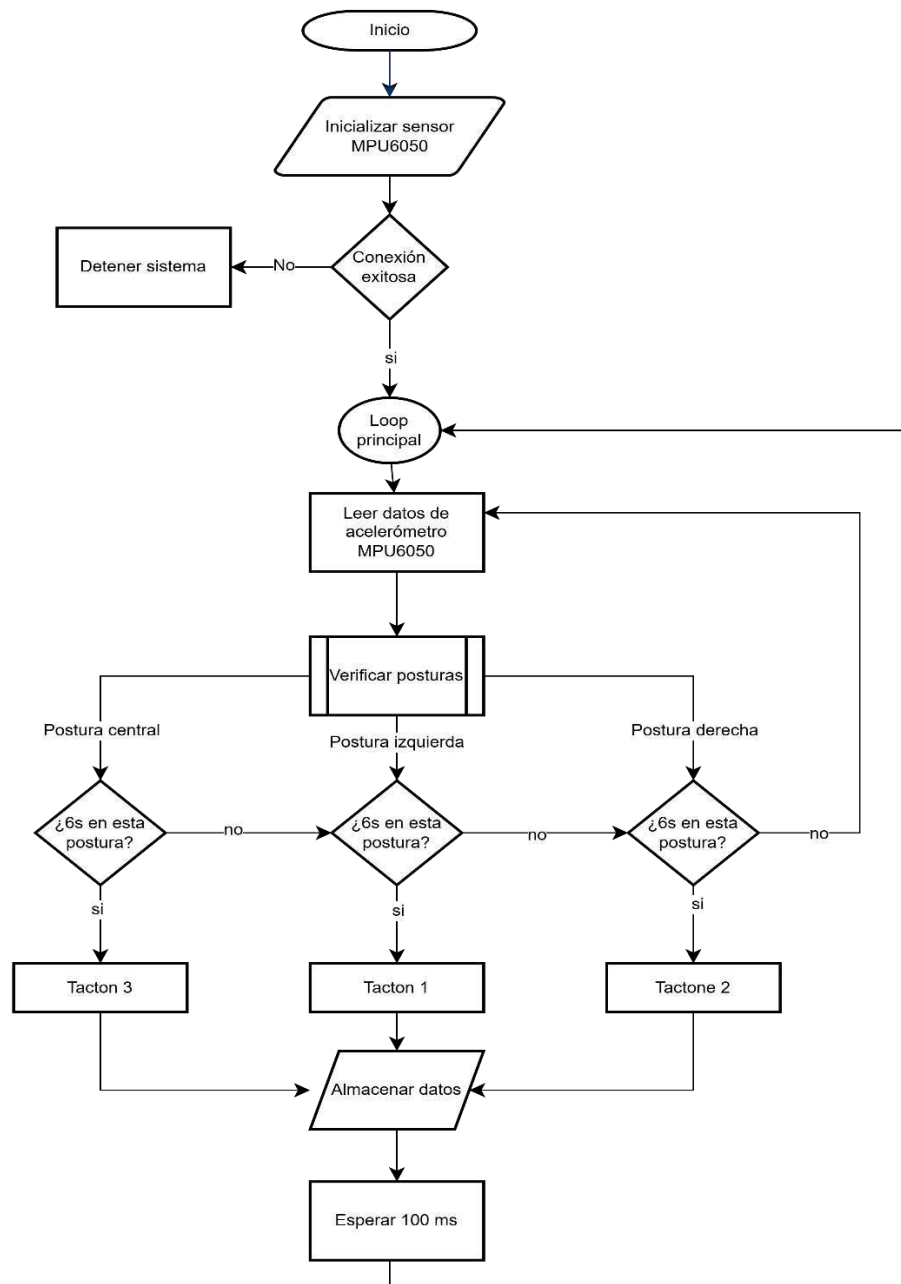


Fig. 6. Diagrama de flujo de funcionamiento del sistema de corrección postural.

Los datos fueron almacenados durante el tiempo de uso para poder realizar un seguimiento detallado de las posturas del usuario. Los datos que se registraron correspondían a los valores analógicos de posición del sensor MPU6050 y la cantidad de veces que la persona adoptó una mala postura. Este enfoque combina la detección automática en tiempo real con herramientas de monitoreo, proporcionando un sistema para la corrección y el estudio de la postura. En la Fig. 7 se pueden observar los componentes del sistema de retroalimentación vibrotáctil.

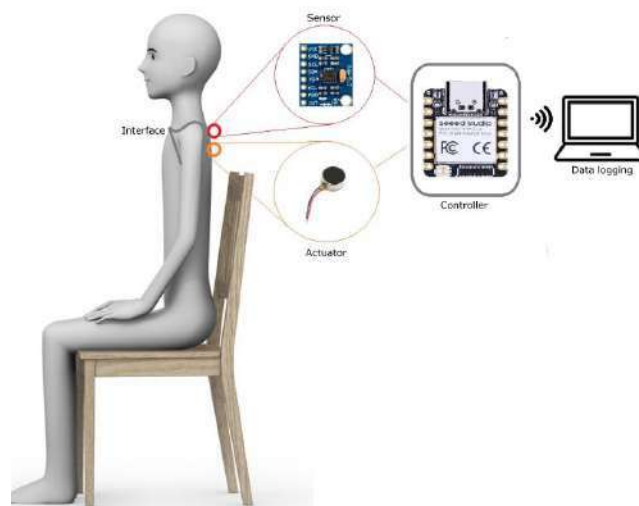


Fig. 7. Sistema de retroalimentación vibrotáctil.

La figura 8 presenta la simulación del comportamiento dinámico del sistema integrado en el chaleco inteligente de corrección postural, desde una perspectiva de diseño de ingeniería. En ella se observa la evolución del ángulo de inclinación postural a lo largo del tiempo, comparado con el margen operativo y el límite de error establecido para el sistema. Este tipo de representación permite validar el funcionamiento del dispositivo ante diferentes condiciones de uso, evidenciando que el sistema responde adecuadamente

dentro de los rangos definidos. El diseño considera parámetros críticos como el umbral de activación del actuador vibratorio, determinado por los márgenes establecidos, lo cual refleja una ingeniería orientada a la funcionalidad, seguridad y confort del usuario. Esta simulación respalda la toma de decisiones durante la etapa de desarrollo, permitiendo ajustar el comportamiento del controlador en función de los datos proporcionados por el acelerómetro MPU6050.

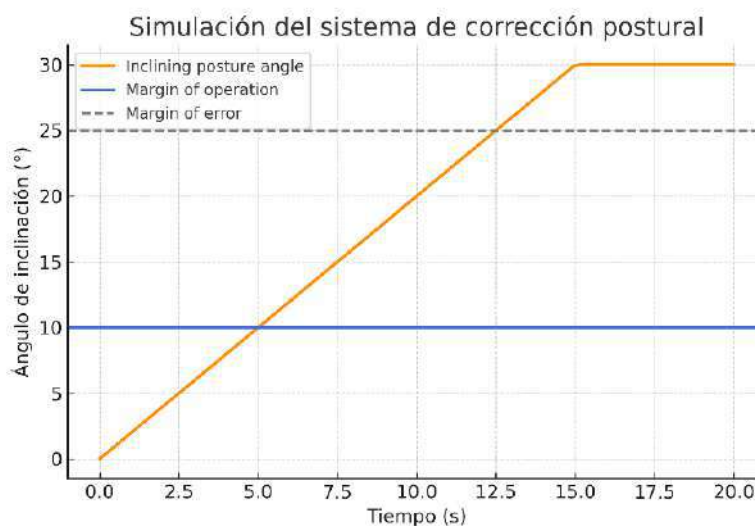


Fig. 8. Simulación en Phytton del sistema desarrollado

En la Fig. 9 se muestra al usuario utilizando el chaleco. A la derecha de la imagen, se presenta el modelo en 3D del dispositivo, desarrollado en el software Fusion 360. El diseño de los componentes internos, que incluía el microcontrolador Seeed Studio, el sensor MPU6050 y los actuadores vibratorios, fue optimizado para garantizar una distribución compacta dentro de la caja protectora. Este diseño permitió la comodidad del usuario, a la vez que mantuvo la funcionalidad de los componentes en un espacio reducido, y facilitó la integración en el chaleco sin interferir con el movimiento del usuario.



Fig. 9. Usuario utilizando el chaleco y diseño del modelo 3D del dispositivo.

C. Experimento principal

El experimento se desarrolló en tres etapas, para evaluar la eficacia del chaleco en la corrección postural. La primera etapa fue de familiarización, donde los participantes fueron introducidos al uso del chaleco y a la percepción de los estímulos vibrotáctiles generados. Se utilizaron tres tipos de tactones que indicaban desviaciones posturales hacia el frente, la izquierda y la derecha. Durante esta fase, cada participante experimentó los diferentes estímulos de manera individual, recibiendo explicaciones detalladas sobre su significado y su asociación con la corrección postural. Este proceso permitió que los usuarios se acostumbraran a la retroalimentación vibrotáctil y comprendieran plenamente la funcionalidad del dispositivo antes de proceder a las siguientes fases.

La segunda fase fue de práctica, y en esta se buscó evaluar la capacidad de los participantes para identificar correctamente los estímulos vibrotáctiles en un entorno controlado. Se presentaron cada uno de los tres tactones en un orden aleatorio y se solicitó a los participantes que indicaran la dirección del estímulo percibido. Además, se evaluó la claridad de la percepción mediante una escala Likert de 0 a 4, donde 0 representó una percepción imperceptible y 4 una percepción muy clara. Esta etapa permitió validar la precisión del sistema y la comprensión de los estímulos generados por el chaleco.

La tercera etapa consistió en una evaluación prolongada donde se analizó la efectividad del chaleco en condiciones reales de uso. Un voluntario utilizó el chaleco durante al menos una hora mientras realizaba sus actividades cotidianas. El sistema, equipado con un acelerómetro, monitoreó continuamente la postura del usuario y activó los estímulos vibrotáctiles en caso de detectar desviaciones. Durante este período, se registraron las posiciones adoptadas por los participantes y se analizó su respuesta ante la retroalimentación háptica, observando si corregía su postura tras recibir los estímulos. Adicionalmente, se capturaron imágenes a intervalos regulares con el propósito de documentar los cambios posturales a lo largo del tiempo. Los datos recopilados permitieron evaluar la efectividad del sistema y la percepción del usuario sobre su funcionamiento en un contexto real de trabajo.

IV. RESULTADOS

En la primera fase del experimento, se buscó familiarizar a los participantes con el chaleco. Los resultados mostraron que los participantes se adaptaron rápidamente a los estímulos, logrando identificar las señales de manera adecuada. La retroalimentación vibrotáctil fue percibida como clara, sin reportarse dificultades en la identificación de las señales. Además, los participantes expresaron sentirse cómodos con el chaleco, lo que indica que el diseño era adecuado para su uso prolongado.

Durante la segunda fase, los participantes fueron evaluados en su capacidad para identificar la dirección de los estímulos vibrotáctiles. Cada uno de los tres tactones (izquierda, derecha y frontal) se presentó en un orden aleatorio, y los participantes debían señalar la dirección de la inclinación detectada.

Los resultados mostraron una precisión del 100% en la identificación de los estímulos, lo que confirma que los usuarios pudieron reconocer de manera consistente la dirección de la corrección postural indicada por el chaleco. Además, en una escala Likert de 0 a 4, la claridad en la percepción de los estímulos fue calificada con un promedio de 4, lo que demuestra que los estímulos fueron claramente percibidos por los participantes.

En la tercera etapa, conocida como evaluación prolongada, se recopilaron los datos analógicos del sensor MPU-6050, que midió la inclinación del cuerpo en tiempo real. Como se puede observar en la Fig. 8 los datos obtenidos de la inclinación lateral (ax) mostraron variaciones significativas, con valores que oscilaron entre 10000 y 22000, superando los límites establecidos de 12900 (izquierda) y 15800 (derecha) en múltiples ocasiones. Se identificaron picos pronunciados en los intervalos de tiempo de 1490s a 1520s y de 1660s a 1690s, lo que sugiere episodios de mala postura, posiblemente relacionados con ajustes ergonómicos inadecuados o compensaciones corporales involuntarias. Por otro lado, la inclinación frontal (az) mostró una mayor estabilidad, con la mayoría de los valores dentro del rango aceptable de -5630 a -4290, aunque algunas desviaciones temporales fueron detectadas al inicio, lo que podría haber estado asociado a la fatiga postural o ajustes iniciales al chaleco. A lo largo de la evaluación, se observó un patrón de correcciones posturales que disminuyó progresivamente (Fig.10), lo que sugiere que los participantes lograron adaptarse a las señales de retroalimentación del chaleco y ajustaron su postura de manera autónoma.

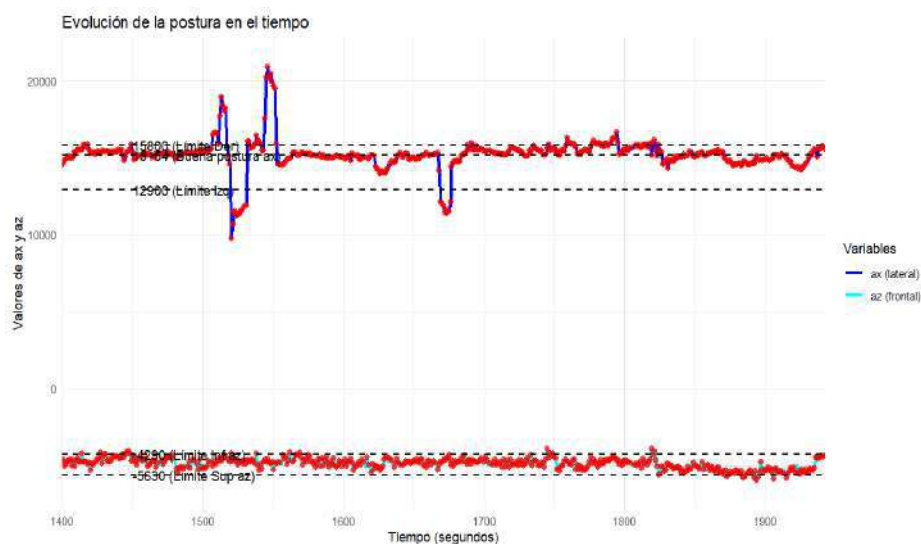


Fig. 10. Resultado del uso prolongado del chaleco por parte de un voluntario

CONCLUSIONES

El sistema demostró ser una herramienta ergonómica efectiva para la corrección postural, promoviendo una reducción en la frecuencia de desviaciones y facilitando la adopción de hábitos posturales saludables. Los voluntarios reportaron una percepción clara y oportuna de los estímulos vibrotáctiles, indicando una alta aceptación y comodidad en su uso prolongado.

El análisis de los datos recopilados evidencia que la inclinación lateral y frontal se mantuvo mayormente dentro de los límites ergonómicamente aceptables, reflejando una mejora en la estabilidad postural y, en consecuencia, una reducción del riesgo ergonómico en el puesto de trabajo. Se recomienda ampliar este análisis a múltiples usuarios para evaluar patrones posturales más generales y explorar el impacto del chaleco en diferentes entornos y actividades, con el objetivo de mejorar su efectividad en la prevención de lesiones y la optimización de la ergonomía.

REFERENCIAS

- [1] L. Punnett and D. H. Wegman, "Work-related musculoskeletal disorders: the epidemiologic evidence and the debate," *Journal of Electromyography and Kinesiology*, vol. 14, no. 1, pp. 13–23, Feb. 2004, doi: 10.1016/j.jelekin.2003.09.015.
- [2] Q. Wang, W. Chen, and P. Markopoulos, "Smart Garment Design for Rehabilitation," 2015, pp. 260–269. doi: 10.1007/978-3-662-48645-0_22.
- [3] A. Causo, Z. Ding, S. H. Yeo, and I.-M. Chen, "Strategies in vibrotactile feedback for improved upper arm posture mapping and replication using inertia sensors," in 2011 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), IEEE, Jul. 2011, pp. 683–688. doi: 10.1109/AIM.2011.6027123.
- [4] J. J. Villarejo et al., "Sistema de biofeedback para rehabilitación de marcha asistida por un exoesqueleto," *Rev Ing Biomed*, vol. 12, no. 24, pp. 47–57, Dec. 2018, doi: 10.24050/19099762.N23.2018.1079.
- [5] D. C. Rodríguez Romero, A. E. Dimate García, D. C. Rodríguez Romero, and A. E. Dimate García, "Evaluación de riesgo biomecánico y percepción de desórdenes músculo esqueléticos en administrativos de una universidad Bogotá (Colombia)," *Investigaciones Andina*, vol. 17, no. 31, pp. 1284–1299, 2015, Accessed: Mar. 12, 2025. [Online]. Available: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-81462015000201284&lng=en&nrm=iso&tlng=es.
- [6] A. E. Dimate, D. C. Rodríguez, A. I. Rocha, A. E. Dimate, D. C. Rodríguez, and A. I. Rocha, "Percepción de desórdenes musculoesqueléticos y aplicación del método RULA en diferentes sectores productivos: una revisión sistemática de la literatura," *Revista de la Universidad Industrial de Santander. Salud*, vol. 49, no. 1, pp. 57–74, Mar. 2017, doi: 10.18273/REVSAL.V49N1-2017006.
- [7] "Estudio descriptivo sobre las condiciones de trabajo y los trastornos musculo esqueléticos en el personal de enfermería (enfermeras y AAEE) de la Unidad de Cuidados Intensivos Pediátricos y Neonatales en el Hospital Clínico Universitario de Valladolid." Accessed: Mar. 17, 2025. [Online]. Available: https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0465-546X2018000200161.
- [8] P. Montuori et al., "Assessment on Practicing Correct Body Posture and Determinant Analyses in a Large Population of a Metropolitan Area," *Behavioral Sciences*, vol. 13, no. 2, Feb. 2023, doi: 10.3390/BS13020144.
- [9] Y. I. Rodríguez-Ruiz and C. I. Guevara-Velasco, "Artículo original ERGONOMÍA EMPLEO DE LOS MÉTODOS ERIN Y RULA EN LA EVALUACIÓN ERGONÓMICA DE ESTACIONES DE TRABAJO/ ASSESSMENT OF WORKSTATIONS USING ERIN AND RULA ERGONOMIC TOOLS".
- [10] "Método RULA - Rapid Upper Limb Assessment." Accessed: Mar. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.ergonautas.upv.es/metodos/rula/rula-ayuda.php>.
- [11] "Dispositivo háptico vibrotáctil inalámbrico para asistencia de actividades motoras | Visión electrónica." Accessed: Mar. 18, 2025. [Online]. Available: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/visele/article/view/13310>.
- [12] K. Ishac and K. Suzuki, "A Smart Cushion System with Vibrotactile Feedback for Active Posture Correction," 2018, pp. 453–459. doi: 10.1007/978-981-10-4157-0_76.
- [13] M. A. ÖZDEN, E. ACAR, H. YILDIZ, M. GÜNER, and M. PEKEDİS, "A Vibro-Haptics Smart Corset Trainer for Non-Ideal Sitting Posture," *Tekstil ve Konfeksiyon*, vol. 32, no. 4, pp. 304–313, Dec. 2022. doi: 10.32710/tekstilvekonfeksiyon.994444.
- [14] Ying Zheng and J. B. Morrell, "A vibrotactile feedback approach to posture guidance," in 2010 IEEE Haptics Symposium, IEEE, Mar. 2010, pp. 351–358. doi: 10.1109/HAPTIC.2010.5444633.

$$(x + a)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} x^k a^{n-k}$$

$$(1 + x)^n = 1 + \frac{nx}{1!} + \frac{n(n-1)x^2}{2!} + \dots$$

Published by:

