

Vol. 2, N°3, Marzo de 2021

DOI: 1047460

ISSN 2737-6419

# Athenea

Revista en Ciencias de la Ingeniería



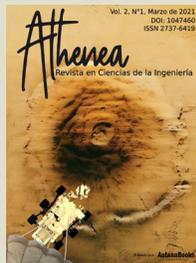
Editado por: **AutanaBooks**  
*Engineering & Services*

## REVISTA ATHENEA

Revista Electrónica Editada por AutanaBooks.

Periodicidad Trimestral.

Nuestra Portada:



La NASA publicó recientemente las primeras fotografías de la superficie del planeta Marte, obtenidas por la misión espacial del rover Perseverance. En la foto se observa el cráter Jezero, este cráter fue el lugar escogido por los científicos de la NASA para el aterrizaje del rover Perseverance debido a sus particulares características [1].

### Referencias

[1]El Tiempo, «Vea la foto panorámica de Marte que tomó la misión Perseverance,» El Tiempo, 26 Febrero 2021.

### EQUIPO TECNICO

-Webmaster y Metadatos: Ing. Ángel Lezama (Quito, Ecuador).

a2lezama@gmail.com

-Diseño Gráfico y maquetación: Lcda. Eliannys Copeland (AutanaBooks, Ecuador).

mmdssnn250195@gmail.com

-Asistente Administrativa: Lcda. Cruzcelis López (AutanaBooks, Ecuador).

cruceliserkanessi@gmail.com

-Traductora: Lcda. Joralci López Herrera (AutanaBooks, Ecuador).

joralci@gmail.com

Los artículos, opiniones y colaboraciones que se publican en esta revista no representan necesariamente la filosofía informativa ni institucional de AutanaBooks y podrán ser reproducidos previa autorización de la Editora. En caso de reproducción se agradece citar la fuente y enviar ejemplares del medio utilizado AutanaBooks, a la siguiente dirección: Ecuador, Quito, sector mitad del mundo, Av. Manuel Córdova Galarza y Av. Shyris, Conjunto Jardines de San Antonio, Casa B1. Teléfono: +593 984600573, correo: editorial@autanabooks.com

Visualización de la Revista:

www.autanabooks.com

## DIRECTORIO DE LA REVISTA ATHENEA, EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA

### CONSEJO EDITORIAL

Editora: Dra. Franyelit Suárez, (AutanaBooks, Quito, Ecuador), (Universidad de las Américas, Quito, Ecuador) editorial@autanabooks.com

### COMITÉ ACADÉMICO

Dr. Luis Rosales( Universidad Nacional Experimental Politécnica "Antonino José de Sucre", Vice Rectorado Puerto Ordaz, Puerto Ordaz, Venezuela).

luis.rosals2@gmail.com

Dr. Janio Jadán (Universidad Tecnológica Indoamérica, Quito, Ecuador). janiojadan@uti.edu.ec

Dra. Hilda Márquez (Universidad Metropolitana de Quito, Quito, Ecuador).

amarquez@umet.edu.ec

Dr. Diego Bonilla (Universidad Estatal de Bolívar, Guaranda, Ecuador). produccion@bhconsultores.com

Dr. David Parra (Universidad Israel, Quito, Ecuador). david.parra@uisrael.edu.ec

Mgt. Alberto Haro (Empresa Enyde.ec, Quito, Ecuador). alberto.haro@it-solutions-ec.com

Mgt. Gustavo Chango (Pontificia Universidad Católica-Sede Esmeraldas, Esmeraldas, Ecuador).

gustavo.chango@pucese.edu.ec

Dra. Gloria Peña (Pontificia Universidad Católica-Sede Esmeraldas, Esmeraldas, Ecuador ).

gloria.peña@pucese.edu.ec

Dra. Beatriz Maldonado (Pontificia Universidad Católica-Sede Esmeraldas, Esmeraldas, Ecuador).

beatriz.maldonado@pucese.edu.ec

Mgt. Karina Mendoza (Universidad UTE, Quito, Ecuador).

karina.mendoza@ute.edu.ec

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

juansegura@uti.edu.ec

Dra. Neris Ortega (Universidad Metropolitana de Quito, Quito, Ecuador).

nortega@umet.edu.ec

Dra. Elsa Albornoz (Universidad Metropolitana de Quito, Quito, Ecuador).

ealbornoz@umet.edu.ec

Mgt. Evelyne Josefina Campos Reyes (Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela).

evelynehosefina@gmail.com

Mgt. María Fernanda Romero Grimán (Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela).

mferromero@gmail.com

Mgt. Francis del Valle Rosas de Serge (Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela).

francisrosas1@hotmail.com

Lcda. Noreiddy Moreno (Corporación Misión de María, Santiago de Chile, Chile).

norimoreno@gmail.com

Mgt. Eva del Carmen Ochoa Smith (Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela).

evaochoasmith@gmail.com

Mgt. Martha Lopresti (Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela).

## CONTENIDO

- 5 *Fuentes Jorge Mauricio, Yáñez Henry, Villalobos Andrea, Veintimilla Diego,* Diseño conceptual de audífonos de conducción ósea y accionamiento cutáneo.
- 21 *Quiroga Josué, Flor Omar, Solórzano Santiago, Calahorrano José,* Design of a Videolaryngoscope with sensor and pressure alert
- 28 *Feijoo Patricio, Bustamante Esteban, Guillén Christian,* Curvas granulométricas como alternativa para la caracterización del material rocoso en minería
- 40 *Ayala Ricardo, Freire Juan, López Juan, Salazar Javier,* Análisis de la energía eólica como sustituto para la energía convencional en casas del Distrito Metropolitano de Quito, Ecuador
- 47 *Oscar Dam G,* Model for the approximate assessment of nitrogen content in swollen reduced iron ore from single measurements.

## EDITORIAL

*Las nuevas formas de impartir la ingeniería en gran parte de las universidades, está suficientemente desligada de las ciencias, la técnica ha ido suplantando a la ciencia y es nuestra labor en la Revista Athenea de Ciencias de la Ingeniería destacar los avances y desarrollos que se proyectan en el día a día. Es necesario que las universidades sostengan una mayor relevancia de la ciencia en todas las carreras de ingeniería, que cada vez estén más integradas a la formación profesional de las áreas de ingeniería.*

*Hacer ingeniería no es una tarea sencilla, involucra una importante comprensión de los problemas, desde la ciencia y la técnica, con una visión amplia de la realidad y con un importante aporte tecnológico, que dé respuesta a situaciones diversas del mundo que nos rodea.*

*Los nuevos equipos de trabajo exigen profesionales multidisciplinarios, que se integren para aportar soluciones cada vez más óptimas y más eficientes. Así, la ingeniería actual se acopla a los desarrollos científicos y tecnológicos en casi todas las áreas del saber, y aporta con nuevos desarrollos para hacer un futuro apto para las nuevas generaciones.*

***Dra. Franyelit Suárez***

***Editora Revista Athenea***

***Ciencias de la Ingeniería***

## Diseño conceptual de audífonos de conducción ósea y accionamiento cutáneo

**Fuentes Jorge Mauricio<sup>1</sup>**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0342-643X>  
jmfuentes@uce.edu.ec  
Universidad Central del Ecuador  
Quito Ecuador

**Yáñez Henry<sup>2</sup>**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1611-3697>  
hayanez@uce.edu.ec  
Universidad Central del Ecuador  
Quito Ecuador

**Villalobos Andrea<sup>3</sup>**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3552-9030>  
avillalobos@uce.edu.ec  
Universidad Central del Ecuador  
Quito Ecuador

**Veintimilla Diego<sup>4</sup>**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4331-8388>  
Diego Veintimilla  
dveintimilla@outlook.com  
Solidarity Tech  
Quito Ecuador

Recibido (08/02/21), Aceptado (18/02/21)

**Resumen:** En el Ecuador los problemas de hipoacusia generan en los niños que la padecen graves problemas de comunicación, al ser este un problema de más de 1000 casos al año, se requiere una solución de bajo costo. Actualmente para solucionar problemas de hipoacusia causados por daños en el oído externo, se usan en casos audífonos de conducción ósea, que son dispositivos que se colocan mediante implante o mediante cintillos unidos a la cabeza, junto al hueso mastoides, este tipo de dispositivos generan rechazo en niños, debido a su incomodidad y evidente notoriedad. En este proyecto se hace uso de la metodología de la Ingeniería Kansei (IK), enfatizando en las emociones para el desarrollo de un dispositivo que cause respuestas positivas en los niños que lo usan y también en sus padres. Para aplicar el método de IK se plantearon 16 diseños de dispositivos de conducción ósea y mediante un análisis estadístico de la teoría de cuantificación se seleccionó un diseño que genere las emociones definidas en los usuarios. El dispositivo diseñado, luego de la evaluación realizada cubre las expectativas de los niños y genera una aceptación por parte del usuario.

**Palabra Claves:** Kansei, audífono, conducción ósea, diseño de producto.

## Conceptual design of bone conduction and skin drive hearing aids

**Abstract:** In Ecuador, hearing loss problems cause serious communication problems in children with severe communication problems, being a problem of more than 1000 cases per year, a low-cost solution is required. Currently to solve problems of hearing loss caused by damage to the external ear, they are used in cases bone conduction hearing aids, which are devices that are placed by implant or by belts attached to the head, next to the mastoid bone, this type of devices generate rejection in children, due to their discomfort and visible notoriety. This project makes use of the Kansei Engineering (IK) methodology and emotional design for the development of a device that causes positive emotions in children who use it and in their parents. To apply the IK method, 16 designs of bone conduction devices were developed, and a statistical analysis of quantification theory selected a design that generates the emotions defined in the users. The designed device, after the evaluation carried out covers the expectations of the children and does not cause the rejection.

**Keywords:** Kansei, earphone, bone conduction, product design.



## I. INTRODUCCIÓN

La Organización Mundial de la Salud (OMS) especificó que más del 5% de la población mundial, es decir 360 millones de personas, padece pérdida de audición discapacitante. Entre ellos, 328 millones son adultos y 32 millones niños [1]. El Estudio Colaborativo Latino Americano de Malformaciones Congénitas (ECLAMC) recopila información de los recién nacidos que padecen malformaciones como es el caso de la microtia (malformación auditiva congénita que da lugar a una oreja pequeña) la cual provoca la pérdida de la capacidad auditiva produciéndose una dificultad o imposibilidad para oír normalmente (hipoacusia), este estudio y recopilación de información lleva establecido ya 23 años [2], ha encontrado que la tasa de niños que tienen malformaciones como la microtia va aumentando constantemente y uno de los factores es la altura, ya que se encuentra una aparición de la enfermedad en el 86% de niños con microtia que reside sobre los 2500 metros sobre el nivel del mar, siendo la ciudad de Quito quien abarca el 75% de la población [3].

Se dice que alguien sufre pérdida de audición cuando no es capaz de oír tan bien como una persona cuyo sentido del oído es normal, es decir, cuyo umbral de audición en ambos oídos es igual o superior a 25 dB. La pérdida de audición puede ser leve, moderada, grave o profunda. Afecta a uno o ambos oídos y entraña dificultades para oír una conversación o sonidos fuertes [3]. La prevalencia mundial de la hipoacusia se sitúa en 5/1000 recién nacidos vivos, lo que supone que alrededor de 1500 niños nacen en el Ecuador con algún grado de hipoacusia. Cabe destacar que sólo una quinta parte de ellos, es decir 1/1000, presentan hipoacusia severa profunda y lo que representa en el Ecuador unos 300 casos nuevos cada año [5].

Viendo esta problemática, se desarrolló un dispositivo de audio por conducción ósea que beneficiará a niños y niñas de 5 a 13 años de edad, luego de un análisis estadísticos de clúster, con hipoacusia debido a factores como malformaciones congénitas de oído externo y medio, otitis crónica y así mismo un sin número de enfermedades que provoca esta discapacidad. Se desarrollo un producto que sin duda mejore las condiciones de vida de este grupo de niños. Comprende la interacción de diferentes campos del conocimiento como el diseño industrial, la electrónica, la medicina y la acústica para integrarlo de manera adecuada.

En un primer momento de la investigación, se recopilaron para el diseño: datos médicos, archivos de tomografías médicas, libros de texto, artículos científicos, tesis, documentos web que puedan sustentar el proyecto. Posteriormente se realizaron entrevistas con médicos especialistas relacionados al tema, profesores, padres de familia y usuarios finales con el fin de obtener los requisitos y objetivos de diseño.

### A. Estado del Arte

El área de la salud ha evolucionado de manera significativa pues día a día se va creando y descubriendo soluciones ante los distintos padecimientos de las personas provocados por enfermedades, esto se ha dado por la interacción de distintos campos con es la tecnología y sin duda el diseño industrial que brindan grandes aportes para la invención e innovación de nuevos dispositivos que mejoren la calidad de vida las personas. Muchos avances técnicos y tecnológicos que ayudan a niños y niñas con deficiencia auditiva a integrarse a la sociedad y a eliminar las barreras existentes en un mundo hecho para normo-oyentes, optimizando su calidad de vida. Dentro de un sin número de alternativas de dispositivos que se generan a diario en el mundo se puede mencionar a los audífonos que, aunque no es una solución definitiva para eliminar la deficiencia auditiva puede sin duda mejorar o corregir la audición de los deficientes auditivos [5].

Un auxiliar auditivo consta de uno o varios micrófonos que captan la señal sonora, esta información es transmitida al amplificador ubicado en la parte interna de la prótesis auditiva y ésta señal amplificada es llevada al oído externo muy cerca de la membrana timpánica a través del molde auditivo y desde ahí la fuente sonora continúa el mismo trayecto que se realizaría en una persona con 12 audición normal, a diferencia que la señal tiene un mayor volumen para que pueda ser percibida por el niño con deficiencia auditiva [5].

Los implantes cocleares son otra opción para intentar solucionar la hipoacusia, consiste en una prótesis eléctrica que pretende paliar una deficiencia bilateral del oído interno, sea profunda o severa, adquirida o congénita. Contrariamente a las prótesis auditivas acústicas, que actúan por medio del órgano de Corti, los implantes cocleares estimulan directamente las neuronas auditivas [6]. De igual forma otra alternativa es sin duda son los audífonos por conducción ósea el cual es un implante de conducción ósea es un dispositivo médico semi implantable que transmite sonido por conducción ósea directa al oído interno, evitando el oído externo y el oído medio. Consta de un procesador externo con un micrófono que capta el sonido y lo transmite al implante, que hará vibrar el hueso del cráneo y los líquidos del oído interno, empleando la capacidad natural del cuerpo para transmitir el

sonido a través del tejido óseo [7].

En este trabajo se estudió la influencia del diseño de un dispositivo de conducción ósea en la percepción de las emociones de niños con hipoacusia leve y moderada, con el objeto de diseñar un audífono que no cause rechazo en niños y padres. Para realizar esto se empleó la ingeniería Kansei, técnica de desarrollada por [8] y que se ha usado para el desarrollo de diferentes tipos de productos como interfases de usuario [9], productos seriados [10], [11] y hasta en el área arquitectónica [12], [13]. En la primera parte se presentan los fundamentos teóricos y matemáticos de la ingeniería Kansei, luego en la metodología se explica cómo se aplicó la ingeniería Kansei para el desarrollo de unos audífonos de conducción ósea. En la sección de resultados se presenta la evaluación realizada con el método de cuantificación QT1 [14] y regresión lineal con variables ficticias (dummy) de cada una de las palabras Kansei definidas. También se presenta una evaluación final del diseño seleccionado, realizando una evaluación de la aceptación estética a niños con hipoacusia. Cabe indicar que el artículo se centra en la parte estética del producto, los estudios de mejora auditiva se encuentran en otro artículo.

## II. DESARROLLO

### A. Ingeniería Kansei y emociones

La Ingeniería Kansei nace en Japón en los años 70 a través del trabajo de Mitsuo Nagamachi. El propio autor define la IK como “una tecnología ergonómica para el desarrollo de productos orientados a las necesidades y sentimientos del consumidor/usuario”. Este método se centra en los deseos y necesidades emocionales de los consumidores [15], [16]. A grandes rasgos, aplicando la Ingeniería Kansei, se consigue obtener información acerca de las emociones que produce un producto al usuario y traducir dichas emociones o sentimientos en propiedades estéticas del producto [4]. Las emociones que causa el producto en los usuarios se pueden medir usando técnicas biométricas [17], [18] y técnicas de procesamiento de imagen [19] así como también métodos más sencillos como encuestas. Esto se consigue mediante el sistema de IK, el cual utiliza métodos estadísticos que aseguran la validez de los resultados, en la Fig. 4 se muestra un esquema del proceso de la IK.

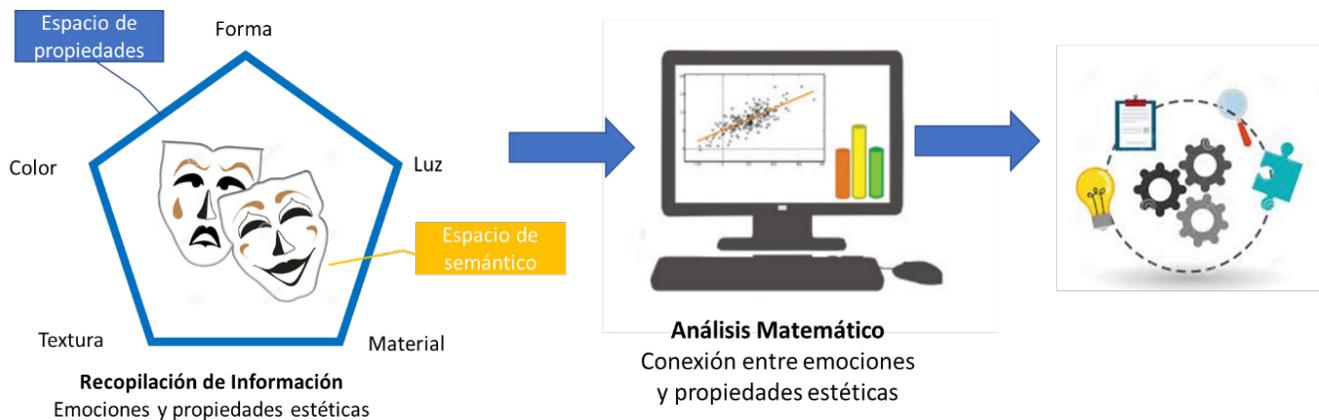


Fig.1 Esquema de la metodología de la Ingeniería Kansei.

Los pasos detallados para aplicar el método de la IK se muestran en la Fig.2, los cuales se describen en los siguientes párrafos.

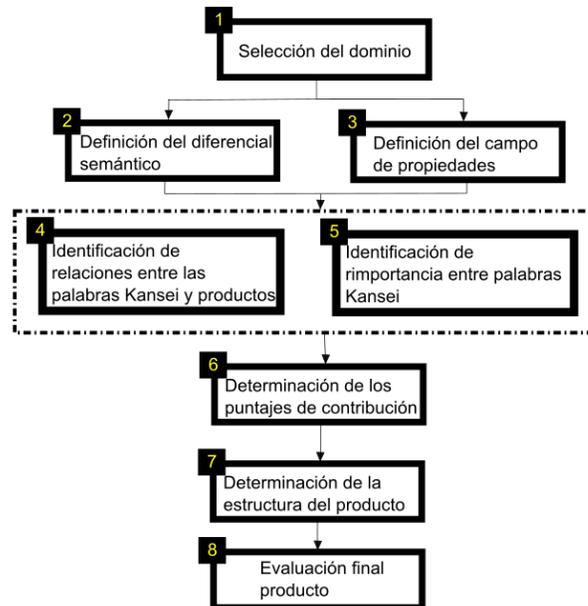


Fig.2 Esquema detallada de la implementación de la metodología de la Ingeniería Kansei (IK)

### B. Selección del dominio

En este paso se decide sobre qué área de estudio se investigará, lo cual debe estar acorde con las áreas de mercado de la empresa o institución y sus productos actuales y su estrategia de negocio, es decir se debe definir en qué mercado se estudiará la solución de diseño.

#### Análisis Clúster

El objetivo del análisis clúster es para separar al conjunto de encuestados en grupos homogéneos, para esto en la encuesta se solicitan datos como la edad, preferencias de usos del producto, localización geográfica, conocimiento del producto o cualquier otra variable que podría diferenciar el rango de respuestas obtenidas al evaluar las palabras Kansei. Con estas encuestas se podrá establecer perfiles de usuarios con relación a las preguntas realizadas al evaluar el diferencial semántico.

### C. Definición del campo semántico

El campo semántico define el conjunto de emociones o “Kanseis” que genera el producto en los usuarios. Para esto se requiere recopilar las sensaciones que generarán los productos en los usuarios. Inicialmente se recopilan información de las sensaciones y emociones y propiedades estéticas que causa un producto en el usuario o cliente, a través de la revisión de revistas especializadas, catálogos de productos, publicidad, entrevistas con expertos y usuarios, con lo cual se define un espacio semántico, inicialmente se pueden tener cientos de sensaciones y emociones que puede causar un producto, las cuales son reducidas, aplicando métodos con el diagrama de afinidad o método KJ [20].

En este estudio se usará la IK, tipo I, usando el método la escala de diferencial semántico de Osgood. Este método se utiliza para aclarar la estructura del lenguaje psicológico. Osgood organizó palabras positivas y negativas a ambos lados de una línea horizontal. Por ejemplo, hermoso—feo se establecen en ambos lados de un continuo. Pero la IK está destinada a lograr un buen diseño, no un diseño feo. Por lo tanto, organizamos palabras Kansei positivas y negativas en ambos lados de la escala, como hermosas, no hermosas. Hay varias escalas, 5 escalas, 7 escalas, 9 escalas y 11 escalas [21], ver en la Fig. 3, un ejemplo de la escala de diferencial semántico (DS).

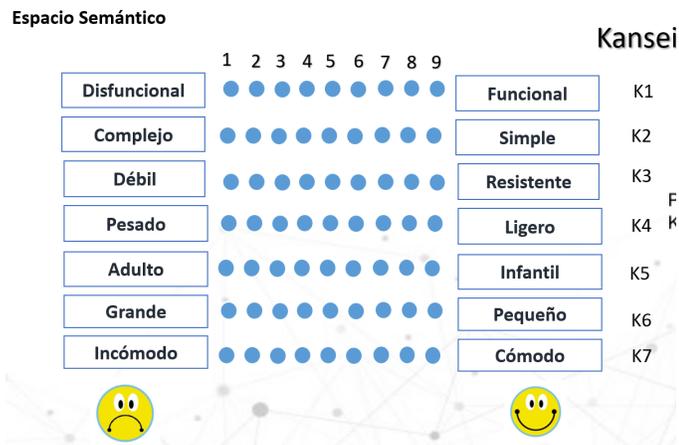


Fig. 3. Ejemplo de escala de diferencial de Osgood para las palabras Kansei definidas para un audífono.

#### D. Definición del campo de propiedades

El campo de propiedades incluye la identificación de todas las propiedades del producto con las que se quieren producir determinadas emociones en el usuario, para esto se divide al producto en sus propiedades físicas características, esto se lo puede realizar con la participación de los expertos en el producto y diseñadores y también revisando información de la cartera de productos de la empresa. Cada una de las propiedades poseerá una serie de subniveles, por ejemplo, la propiedad cuerpo poseerá los subniveles rectangular, redondo, paralelogramo y ovalado. Aquí generalmente se procede en base a la experiencia del equipo de diseño o usando ingeniería inversa analizando productos similares en el mercado.

En esta parte del proceso también se realizan diferentes combinaciones sub-propiedades que reflejen todas o la mayoría de las combinaciones de las propiedades estéticas definidas en el campo de propiedades. Las combinaciones de productos diseñados se muestran a los clientes en la encuesta de DS para validar la relación entre Kanseis y propiedades del producto.

#### E. Identificación de la relación entre las palabras Kansei y la síntesis de productos.

Se aplican métodos estadísticos a partir de los resultados de las encuestas de DS para verificar la validez del test y encontrar la relación entre las palabras Kansei y las variables del producto.

##### Test de fiabilidad alfa de Cronbach

Se utiliza para medir la fiabilidad de una escala de medida o test, es decir, para medir la ausencia de errores en una prueba, específicamente en la IK se usa para medir la fiabilidad de las pruebas para evaluar la relación entre las palabras Kansei y las propiedades de los productos. El coeficiente alfa de Cronbach generalmente varía de 0 a 1, mientras que un límite inferior generalmente acordado para el coeficiente es 0.70. Sin embargo, en los estudios exploratorios, un valor de 0,60 es aceptable, mientras que los valores de 0,80 o más se consideran satisfactorios en las etapas más avanzadas de la investigación [22]

##### Síntesis QT1

La técnica QT1 se usa para encontrar directamente las relaciones existentes entre cada una de las propiedades y niveles que poseen los productos analizados y las palabras Kanseis. [23] recomienda el uso de esta metodología en la IK. En esta metodología se usa un modelo de regresión lineal múltiple, con la particularidad que se usan variables categóricas o dummy, lo cual predice una relación entre las variables categóricas y la respuesta cuantitativa [24].

Para aplicar la síntesis QT1 se codifican las propiedades del producto y sus niveles en variables dummy. Las variables dummy son variables de carácter cualitativo, indican la presencia o ausencia de alguna propiedad o característica del producto. Las variables dummy tomarán el valor 1, si la propiedad está presente en el producto, o 0 en el caso contrario.

Para la codificación del espacio de propiedades se define como “j” a las propiedades y “k” a las sub-propiedades

de la propiedad “j”, denominándose  $d_i(j,k)$  como la codificación del espacio de propiedades, en el cual se tiene (1), en la Fig. 4 se presenta un ejemplo de la codificación definida para un audífono.

$$d_i(j,k) = \begin{cases} 1, & \text{si la sub-propiedad esta presente en el producto} \\ 0, & \text{si la sub-propiedad no esta presente en el producto} \end{cases} \quad (1)$$

Categorías (c)	1. Cuerpo			
	Redondo	Rectangular	Paralelogramo	Ovalado
	C11	C12	C13	C14
Audífonos				
P1	1	0	0	0

**Fig. 4. Ejemplo de la codificación del espacio de propiedades para la propiedad cuerpo y sus 4 subpropiedades, 1 indica la presencia en el producto de la propiedad, 0 la ausencia de esta propiedad.**

#### F. Identificación de la importancia a través de las palabras Kansei

Se definen la ecuación de regresión lineal múltiple donde  $Y_i$  es valoración promedio que obtiene cada Kansei, si existen 7 Kansei, entonces  $i=7$ , con esto se obtiene la ecuación (2).

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_p X_{pi} + \epsilon_i; i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

El modelo de predicción de regresión lineal múltiple usando variable “dummy” del método QT1 se expresa como (3):

$$Y_i = \sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^{c_j} \beta_{jk} \delta_i(j,k) \quad (3)$$

donde  $j=1, 2, \dots, r$  (siendo  $r$  el número total de propiedades) y  $k= 1, 2, \dots, c_j$  ( es el número total de sub-propiedades para cada propiedad  $j$ )

Para la conexión entre el espacio de propiedades y las palabras Kansei evaluadas a través del DS, se define como  $Y_i$  a el valor obtenido de valoración media de cada Kansei para el clúster definido en el estudio.  $B_{jk}$  es el valor del coeficiente de la variable “dummy” en la ecuación de regresión lineal múltiple, expresado en (2), este coeficiente muestra la relación de la variable “dummy” con la valoración del Kansei  $Y_i$ . El objetivo es predecir con exactitud la influencia de las propiedades y sus niveles en los sentimientos de los clientes expresados en los términos Kansei.

#### G. Determinación de las puntuaciones de contribución

En esta etapa se analiza la contribución de cada propiedad del diseño a la evaluación total del cada Kansei  $Y_i$ . Las puntuaciones de contribución corresponden a los coeficientes  $B_{jk}$  de la ecuación de regresión lineal múltiple.

#### H. Determinación de la estructura del producto

Luego realizar el proceso de IK, se obtienen las propiedades específicas que debe tener el producto a diseñar. Con la inclusión de estas características se debe desarrollar un producto que cumpla con las especificaciones de

marca y estilo de la empresa o institución, con todo esto se diseñara un producto que proyecte las emociones y sentimientos que se desean crear en el usuario final. Para esto se debe crear un producto que contenga las sub-propiedades con los valores más altos y produzcan la valoración más alta del Kansei.

### **I.Evaluación final del producto.**

Finalmente, se presenta un boceto, o diseño 3D del modelo constructivo del producto seleccionado al cliente o usuario final para que vuelva a evaluar este producto según la misma escala de DS usado inicialmente, para confirmar si el producto produce las emociones y sentimientos que se quiere impartir al producto. Se introducen los valores promedio de las evaluaciones de los Kansei en la ecuación de regresión lineal múltiple obtenida a partir de la ecuación (1)

## **III.METODOLOGÍA.**

### **A.Selección del dominio**

Para determinar el tipo de producto, mercado objetivo, usuarios y consumidores del audífono de conducción ósea se realizó una encuesta demográfica en la cual se realizaron preguntas sobre la edad del niño, tipo de hipoacusia, género del usuario, lateralidad de la hipoacusia. Se aplicó la encuesta al grupo de padres y usuarios de Microtia Ecuador.

Una vez que se recopilieron estos datos, se efectuó un análisis de Clúster para separar grupos homogéneos de menores de 18 años y mayores de 18 años. Todo el estudio posterior se realizó en base al primer grupo de menores de 18 años. El método de agrupación clúster elegido para el estudio fue el K-means, el cual parte de unos datos iniciales supuestamente homogéneos para encontrar grupos heterogéneos entre ellos, mediante el uso del programa de análisis estadístico Minitab®18. Mediante el análisis clúster y un dendograma se separaron los grupos homogéneos de respuestas.

### **B.Definición del diferencial semántico.**

En esta etapa se recolectaron las palabras Kansei para describir el dominio que se estableció en el paso anterior con el objeto de calificar el tipo de producto potencial más amplio y confiable caracterizado en el dominio. Para la recolección inicial de palabras se revisaron catálogos, publicidad e información disponibles de audífonos, tanto conducción ósea, como de audífonos normales. También se entrevistó a profesionales del área de terapia de lenguaje para que den sus criterios sobre el diseño que debería tener un audífono. Como el número de palabras iniciales fue amplio, se utilizó un diagrama de afinidad para agrupar palabras que cubran el rango de palabras Kansei definidas. A estas palabras se las definió como las palabras Kansei.

### **C.Definición del campo de propiedades.**

En esta fase, se identificaron y recogieron las características del producto que describen el dispositivo de conducción ósea caracterizado en el dominio homogéneo luego del análisis clúster. La selección de las características del audífono dio lugar a la construcción de una base de datos con estilos de audífonos, estas se obtuvieron a partir de entrevistas con expertos en audiología, el equipo del proyecto, revisión de bibliografía de audífonos y catálogos de producto. Para cada propiedad del producto se definió una serie de sub-propiedades. Finalmente, el grupo de trabajo definió técnicamente las características más relevantes para el desarrollo del producto. Para esto se generaron 16 bocetos o renders de productos que incluyen una combinación de las sub-propiedades definidas. Estas variaciones de audífonos se obtuvieron considerando las recomendaciones de [8] quienes han establecido lo siguiente: (a) un producto en la selección no puede tener más de una categoría para el mismo artículo; (b) no puede haber productos con categorías iguales para todos los artículos simultáneamente; y (c) debe haber al menos dos unidades de producto seleccionadas en la misma categoría para un artículo dado.

### **D.Identificación de relaciones entre las palabras Kansei y la síntesis de productos.**

Se vinculó las palabras Kansei y las características de los productos a través de una encuesta realizada en línea al grupo Microtia Ecuador, utilizando una escala numérica del 1 al 9, tal como se indica en la Fig. 3, para evaluar la medida en que los productos que representan el dominio están correlacionados con impresiones, sentimientos y emociones. Se les presentaron a los usuarios los 16 diseños generados para que cada uno sea evaluado usando la

escala de DS. Se aplicó el test de fiabilidad alfa de Cronbach para verificar la fiabilidad de la encuesta, esperando un valor mayor que 0.8

### E. Identificación de importancia entre palabras Kansei

Se aplicó la teoría de cuantificación QT1 para encontrar la relación entre las palabras QT1 y las variantes de producto obtenidas, para esto se codificó el campo de propiedades como variables “dummy”. Finalmente se obtuvieron los coeficientes de la ecuación de regresión lineal múltiple de acuerdo con la ecuación (2) usando la herramienta de generación de regresiones lineales del programa Excel.

### F. Determinación de las puntuaciones de contribución.

Al final de aplicar el QT1, se obtuvo el grado de asociación entre cada característica del producto y la palabra Kansei, denominado Category Score (CS), que ayudó para la construcción de un modelo de predicción, para esto se evaluó con la ecuación de regresión lineal múltiple, ver la ecuación (3), la contribución de cada sub-propiedad del producto, usando la codificación de variables “dummy”.

### G. Selección de la estructura del producto.

Se seleccionó la estructura del producto que tenga el valor más alto del CS, a partir de esto se seleccionaron las sub-propiedades y se realizó un modelado del producto en el programa Solidworks.

### H. Evaluación del producto final

Se presentó el modelado del producto a un grupo de personas del grupo Microtia Ecuador y se le hizo que lo evalúen con la misma escala de DS que se usó inicialmente empleando las 7 palabras Kansei seleccionadas.

## IV. RESULTADOS

### A. Selección del dominio:

Se obtuvo un total de 16 respuestas a la encuesta demográfica, un resumen de las características demográficas se muestra en la tabla 1.

**Tabla 1. Clasificación de los usuarios que respondieron a la encuesta demográfica.**

No	Lugar de residencia	Edad del usuario	Sexo del usuario	Tipo de hipoacusia
1	Pelileo	8	Masculino	Moderado
2	Quito	29**	Masculino	Profunda
3	Ambato	13	Femenino	Severa
4	El Carmen	27**	Femenino	Severa
5	Quito	2	Masculino	Severa
6	Quito	8	Masculino	Severa
7	Cuenca	45**	Masculino	Severa
8	Manabí	39**	Femenino	Moderado
9	Quito	42**	Masculino	Severa
10	Loja	12	Masculino	Profunda
11	Quito	9	Femenino	Severa
12	Quito	7	Masculino	Severa
13	Quito	12	Masculino	Moderado
14	Quito	26**	Masculino	Moderado
15	Ambato	5	Masculino	Moderado
16	Quito	9	Masculino	Moderado

\*\* Grupo que no se tomó en cuenta en el estudio debido a que pertenecen a otro grupo homogéneo.

A partir de la tabla 1, se obtuvo el dendrograma de la Fig. 5, en el cual se observan claramente el grupo de mayores de 18 años y el grupo de menores de 13 años con todos los niveles de hipoacusia y con ambos sexos.

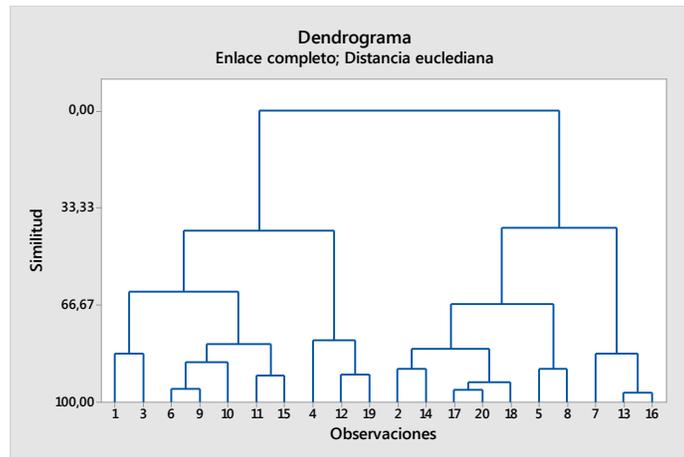


Fig. 5. Dendrograma a partir del análisis clúster, se muestran en el segundo nivel 2 grupos definidos.

### B. Definición del diferencial semántico.

A partir del análisis de información sobre productos similares, se obtuvieron 100 palabras Kansei iniciales, las cuales, con el método del diagrama de afinidad, de acuerdo a la Fig. 6a, fueron resumidas a 7 pares de palabras Kansei finales para el estudio, como se indica en la Fig. 6b.

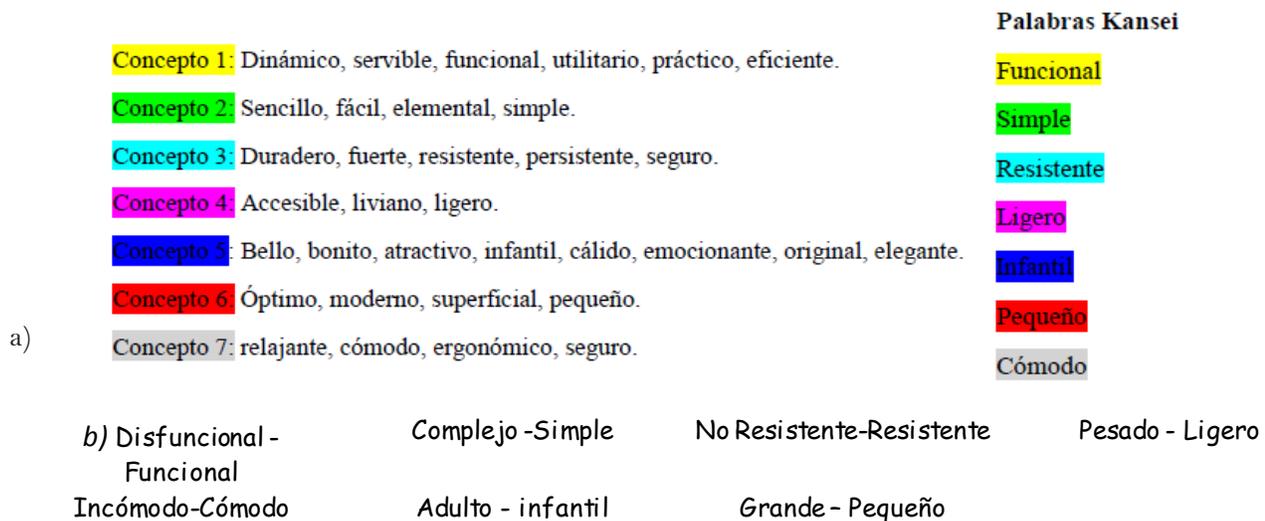


Fig. 6. a) Diagrama de afinidad b) Definición de las palabras Kansei, las palabras a la izquierda definen el requisito que no es funcional para el cliente y la que está a la derecha define la palabra Kansei funcional..

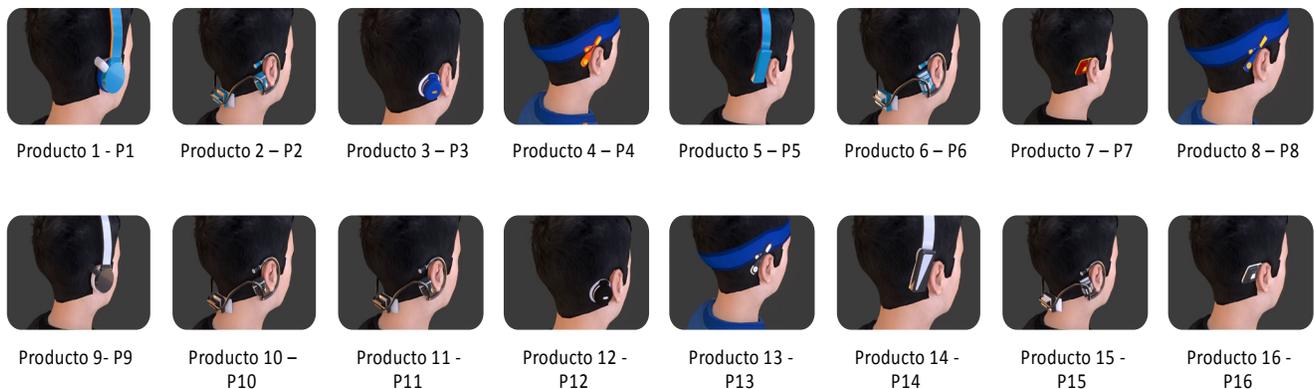
### C. Definición del campo de propiedades.

Se definieron 4 propiedades principales que debería tener un audífono de conducción ósea: 1) cuerpo del dispositivo de vibración; 2) tipo de ajuste al cráneo; 3) forma del dispositivo de vibración; y 4) color. Dentro de cada una de las propiedades se definieron las sub-propiedades, lo cual se muestra la figura 7.



**Fig. 7. Ejemplo de campo de propiedades y subpropiedades**

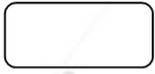
A partir de la combinación de las sub-propiedades se definieron 16 variantes de productos obtenidas a partir de imágenes renderizadas y modeladas en el programa Solidworks. Las 16 variantes del producto se muestran en la figura 8.



**Fig 8. Variantes del producto a partir de la combinación de las sub-propiedades.**

#### **D. Identificación de relaciones entre las palabras Kansei y la síntesis de productos.**

Los 16 diseños fueron mostrados a los participantes a través de un cuestionario de Google forms. Se procuró que todas las imágenes presentadas tengan el mismo ángulo de perspectiva. Se pidió a los participantes que evaluaran estos diseños y dieran la puntuación para cada par de palabras. Los promedios de las puntuaciones de pares de palabras de cada muestra se calcularon y se usaron para en el análisis de cuantificación. En la Fig. 9 se muestra un ejemplo de las imágenes presentadas a los encuestados. Las 7 palabras Kansei definidas se les presentaron a los encuestados para que les evalúen en una escala del 1 al 9, similar a la mostrada en figura 3, para evaluar las 16 variantes del producto.

Cuerpo	Ajuste al cráneo	Vibrador	Color	Propuesta
C11  Redondo	C21  Diadema	C31  Redondo	C42  Infantil	
C12  Cuadrado	C23  Sujeción posterior	C32  Cuadrado	C42  Infantil	

**Fig. 9.** Muestra de dos de los diseños usados en las encuestas mostradas a los usuarios.

Cada uno de los 16 participantes en la encuesta, evaluaron cada Kansei, con la escala de DS, los resultados la evaluación promedio de los 16 participantes en la encuesta se muestra en la tabla 2. Se usaron también los resultados de la encuesta de DS para aplicar la prueba de fiabilidad alfa de Cronbach, el cual dio un valor de 0.87.

**Tabla 2.** Resultado de las evaluaciones promedio mediante el DS de 16 variantes de productos para las 7 palabras Kansei.

	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7
Producto	K1 - Funcional	K2 - Simple	K3 - Resistente	K4 - Ligero	K5 - Infantil	K6 - Pequeño	K7 - Cómodo
P1	4,1	2,5	3,9	2,9	2,6	2,9	3
P2	3,4	2,6	2,8	2,6	2,4	2,4	2,6
P3	6,1	5,5	5,4	6,1	5,6	6	6
P4	5,3	4,2	4,2	4,2	3,7	3,6	3,6
P5	4,8	4	4	3,8	3,3	2,9	3,2
P6	3,9	2,7	2,9	2,7	2,7	2,7	2,5
P7	5,5	5,3	5	5,3	4,4	4,9	4,8
P8	4,8	4,2	4,7	4,1	4	4	4
P9	4,6	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2
P10	3,7	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9
P11	5,9	5,7	5,7	5,1	5,8	5,8	5,8
P12	3,8	3	3	3	3	3	3
P13	4,7	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
P14	4	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
P15	5,4	5,3	5,3	5,1	4,7	5,4	5,4
P16	5,4	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2

#### Análisis de Cuantificación – Síntesis QT1

La codificación de las variables dummy a partir de la presencia o no de las sub-propiedades se muestra en la tabla 3.

**Tabla 3 . Codificación del campo de propiedades con variables dummy.**

Categorías (c)	Propiedades/Categorías										
	1. Cuerpo				2. Ajuste al cráneo			3. Vibrador		4. Color	
	Redondo	Rectangular	Paralelogramo	Ovalado	Diadema	Adhesivo	Posterior	Redondo	Cuadrado	Negro	Infantil
Audífonos											
P1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1
P2	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1
P3	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1
P4	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1
P5	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1
P6	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1
P7	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1
P8	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1
P9	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0
P10	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0
P11	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0
P12	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0
P13	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0
P14	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0
P15	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0
P16	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0

Nota: “1” representa la presencia de la propiedad; “2” representa la usencia de la propiedad.

Se usó el programa Excel para sacar la relación en los 7 Kansei ( $Y_i$ ) usando una regresión lineal múltiple con variables dummy de acuerdo con la ecuación (2). En todos los casos se obtuvo un coeficiente de correlación (CMM) mayor a 0.8, el CMM es un parámetro importante para mostrar la fiabilidad de los resultados estadísticos. Generalmente, el resultado estadístico es fiable y puede ser aceptado si CMM es mayor de 0.7. En este estudio todos los valores de CMM son mayores a 0.77, lo que indica que todos los resultados son fiables, los CMM se muestran en la tabla 4.

**Tabla 4. Coeficientes y rangos obtenidos a través del análisis estadístico de cuantificación QT1 y regresión lineal múltiple con variables “dummy”.**

Propiedad	Subpropiedad	Cod	Funcional		Simple		Resistente		Ligero		Infantil		Pequeño		Cómodo	
			Score	Range	Score	Range	Score	Range	Score	Range	Score	Range	Score	Range	Score	Range
			K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7							
1. Cuerpo	Redondo	C11	-0.75	1.70	-1.27	2.47	-0.42	1.02	-0.98	1.98	-0.68	2.33	-0.28	1.18	-0.38	1.43
	Rectangular	C12	0.95		1.20		0.60		1.00		1.65		0.90		1.05	
	Paralelogramo	C13	0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00	
	Ovalado	C14	0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00	
2. Ajuste al cráneo	Diadema	C21	-1.65	2.20	-2.75	3.27	-2.00	2.37	-2.55	2.98	-2.80	3.03	-2.85	2.88	-2.80	2.98
	Adhesivo	C22	0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00	
	Posterior	C23	-2.20		-3.27		-2.37		-2.98		-3.03		-2.88		-2.98	
3. Vibrador	Redondo	C31	1.30	1.30	1.57	1.57	0.82	0.82	1.38	1.38	1.83	1.83	1.03	1.03	1.18	1.18
	Cuadrado	C31	0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00	
4. Color	Negro	C41	-0.05	0.05	-0.05	0.05	-0.29	0.29	-0.24	0.24	0.17	0.17	0.18	0.18	0.14	0.14
	Infantil	C42	0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00	
Constante			5.48	5.33	5.29	5.32	4.46	5.06	5.03							
CMM			0.77	0.88	0.84	0.88	0.89	0.92	0.92							

### E. Determinación de las puntuaciones de contribución.

La columna score de la tabla 4 explica el grado de correlación entre los elementos de diseño y el par de palabras Kansei. Por ejemplo, tomar el par de palabras funcional-disfuncional a través de las 4 subpropiedades de la propiedad cuerpo, el valor redondo obtiene el valor más bajo, -0.75, lo que indica que se acerca más a la palabra Kansei

disfuncional. Contrariamente, la forma de cuerpo rectangular, obtiene el valor más alto, 0.95, lo que muestra que este diseño es más funcional. La ecuación de la regresión lineal múltiple para el Kansei 1 (funcional) de da según la ecuación (4). Las otras categorías de propiedades y valores de los Kansei pueden analizarse con el mismo método.

$$K_1 = 0,95C_{12} + 0C_{22} + 1,30C_{31} + 0C_{41} \quad (4)$$

La columna “range” de la tabla 4 para cada Kansei puede explicar la influencia de cada propiedad sobre el juicio de percepción de la emoción del usuario, este valor “range” se calcula restando el valor mayor de la columna “score” menos el valor menor. Tomemos como ejemplo las palabras “funcional-disfuncional”; el orden en descenso del valor “range” es ajuste al cráneo (2.2), cuerpo (1.70), vibrador (1.30) y color(0.05). Se puede inferir que el ajuste al cráneo tiene la mayor influencia en el juicio de percepción, el segundo es el cuerpo, y el color tiene menos influencia.

#### F. Selección de la estructura del producto.

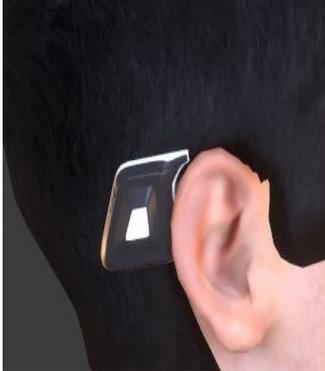
La estructura seleccionada a partir de seleccionar los valores más altos de los coeficientes de la ecuación de regresión lineal múltiple (score) se indican en la Fig. 10a, en el cual el diseño incorpora un diseño rectangular, con adhesivo, con vibrador redondo y de color negro Fig 10b. En la Fig. 10c. se muestra el diseño del audífono puesto en la cabeza del usuario.

Kansei	Propiedad	Subpropiedad
Funcional, Simple, Resistente, Ligero, Infantil, Pequeño, Cómodo	1. Cuerpo	Rectangular
	2. Ajuste al cráneo	Adhesivo
	3. Vibrador	Redondo
	4. Color	Negro

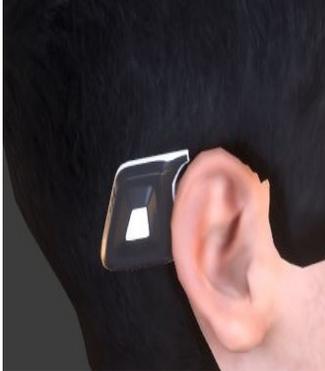
a)



b)



c)



**Fig. 10. a) Combinación de sub-propiedades que obtuvieron el mayor puntaje b) Modelado del producto final c) Modelado del producto final sobre el hueso mastoides del usuario.**

#### G. Evaluación del producto final

La Fig. 11a muestra la evaluación que obtuvo el diseño final presentado (Fig.11) a un grupo de personas. En esta evaluación se obtuvo respuesta de 37 personas del grupo Microtia Ecuador, se obtienen una evaluación promedio de 6.5 sobre 9 puntos de la escala de DS, mientras que la predicción mediante cada una de las ecuaciones de regresión lineal múltiple se obtiene un valor promedio de 5.15 sobre 9, lo que indica que el diseño produce las emociones indicadas por el conjunto de palabras Kansei, ver Fig. 11b.

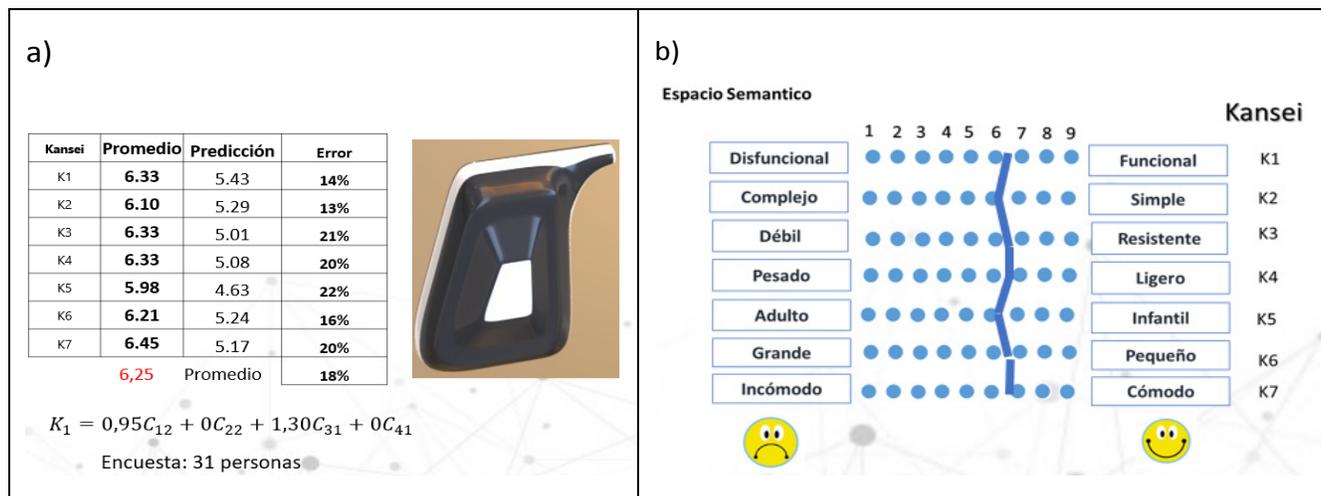


Fig. 11. a) Resultados de la evaluación del diseño seleccionado por usuarios usando los Kansei. b) Escala de diferencial semántico para el diseño final.

## V.CONCLUSIONES

1) Se ha logrado crear un concepto de un dispositivo para audición por conducción ósea y accionamiento cutáneo que permite causar emociones positivas en el usuario final, aplicando la ingeniería Kansei, superior a la predicción realizada por la regresión lineal múltiple, este tipo de evaluación final evaluando el diseño con otra muestra de posibles usuarios, no se ha encontrado en otros estudios de IK.

2) Todas las emociones medidas mediante la encuesta del producto final seleccionado muestran reacciones positivas sobre el diseño, en un valor sobre la escala de 9.

3) Esta metodología permite el desarrollo de un producto que será bien aceptado por el mercado objetivo, solo realizando modelos conceptuales, sin el costo que implica la construcción de un modelo físico y el posible rechazo futuro de los usuarios.

## RECONOCIMIENTO

Se agradece a la Comisión de Investigación Formativa y a los Proyectos Semilla de la Universidad Central del Ecuador, por su apoyo con la dirección y financiamiento para el desarrollo de esta investigación.

## REFERENCIAS

- [1] El Telégrafo, «La discapacidad auditiva afecta a 360 millones de personas en el mundo,» 28 septiembre 2017.
- [2] J. Nazer, G. Lay-Son y L. Cifuentes, «Prevalencia al nacimiento de microtía-anotía. Maternidad del Hospital Clínico de la Universidad de Chile, período 1983-2005,» Revista médica de Chile, 2006.
- [3] M. E. Arévalo Molina y D. E. Sánchez Navarrete, «Identificación de factores de riesgo de microtía en niños atendidos en el servicio de otorrinolaringología del Hospital Pediátrico Baca Ortiz, en el período 2010 a 2014,» Universidad Católica del Ecuador, Quito, 2016.
- [4] Organización Mundial de la Salud, «Organización Mundial de la Salud,» 15 marzo 2019. [En línea]. Available: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/deafness-and-hearing-loss>.
- [5] F. Coello, H. Cuevas y E. Andrade, «El tamizaje auditivo neonatal en Ecuador, un compromiso ineludible,» pp. 177-184, 2016.
- [6] M. F. Torres Saravia, «Estudio comparativo del nivel de desarrollo neuropsicológico en niños y niñas con deficiencia,» Quito, 2013.
- [7] R. Dauman, B. Carbonniér, V. Soriano, S. Berger-Lautissier, J. Bouyé, E. Debruge, G. Coriat y J.-P. Bébéar, «Implantes cocleares en el adulto y en el niño,» Elsevier, pp. 1-13, 2000.
- [8] M. J. Lavilla Martín de Valmaseda, L. Cavalle Garrido, A. Huarte Irujo, F. Núñez Batalla, M. Manrique Rodríguez, Á. Ramos Macías, C. d. P. Vernetta, E. Gil-Carcedo Sañudo, L. Lassaleta, I. Sánchez-Cuadrado, J. M. Espinosa Sánchez, Á. Batuecas Caletro y C. Cenjor Español, «Guía clínica sobre implantes de conducción de vía

ósea.» Elsevier, pp. 761-766, 2017.

[9]M. Nagamachi y A. M. Lokman, Innovations of Kansei Engineering, Tokyo: CRC Taylor & Francis Group, 2003.

[10]I. Griha y T. Isa, «Kansei Engineering Approach in Software Interface Design Indra,» JOURNAL OF SCIENCE INNOVARE, vol. 01, nº 01, pp. 22-26, 2018.

[11]I. Mañero y A. García, «El diseño Kansei y su aplicación en la invención de una muleta de ayuda a la movilidad,» Revista Anales ICAI, vol. 1, nº 1, pp. 1-17, 2010.

[12]Y. Wang y Y. Chen, «The Kansei Research on the Style of Women's Overcoats,» Multiconference on "Computational Engineering in Systems Applications"(CESA),, pp. 431-436, 2006.

[13]L. S. Martínez, La percepción del confort. Análisis de los parámetros de diseño y ambientales mediante Ingeniería Kansei: Aplicación a la biblioteca de Ingeniería del Diseño (UPV), Valencia: UPV, 2011.

[14]P. Rodríguez de Andrés, Ingeniería Kansei y su aplicación en el diseño emocional de bibliotecas, Valencia: UPV - Universidad Politécnica de Valencia, 2013.

[15]Fundación Prodiotec, Diseño Afectivo e Ingeniería Kansei - Guía Metodológica, Gijón, Asturias, España: Centro Tecnológico para el Diseño y la Producción Industrial en Asturias Parque, 2011.

[16]S. Schütte, Engineering Emotional Values in Product Design, Linköping, Sweden: Linköpings Universitet Department of Mechanical Engineering, 2005.

[17]A. M. Lokman, «Design and Emotion: The Kansei Engineering,» Faculty of Computer and Mathematical Sciences, Universiti Teknologi MARA (UiTM) Malaysia, vol. 1, nº 1, pp. 1-14, 2010.

[18]S. Khalid, Biometrics and Kansei Engineering, New York: Springer Science+Business Media, 2012.

[19]L. D. Ferreira y D. C. Amaral, «A full example of technical procedure to application of the Kansei Engineering,» Product: Management & Development, vol. 13, nº 2, pp. 103-118, 2015.

[20]Y. Matsubara y M. Nagamachi, «An application of image processing technology in Kansei Engineering,» Ergonomie et design, vol. 4, pp. 123-126, 1994.

[21]J. E. Bauer, G. L. Duffy y R. T. Westcott, The Quality Improvement Handbook, Milwaukee: ASQ - Quality Press, 2006.

[22]M. Nagamachi, Kansei/Affective Engineering and History of Kansei/Affective Engineering in the World, Boca Raton: Taylor and Francis Group, LLC, 2011.

[23]E. Mooi, M. Sarstedt y I. Mooi-Reci, Springer Texts in Business and Economics Market Research The Process, Data, and Methods Using Stata, Singapore: Springer Nature, 2018.

[24]S. T. W. Schütte, J. Eklund, J. R. Axelsson y M. Nagamachi, «Concepts, Methods and Tools in Kansei Engineering,» Theoretical Issues in Ergonomics Science, nº 1, 2004.

[25]G. Smith, Essential Statistics, Regression, and Econometrics., Elsevier Inc. All, 2015.

## RESUMEN CURRICULAR



**Ing. Mauricio Fuentes MSc**, Ingeniero Mecánico, Máster en Gestión de la Calidad y Productividad, Docente en de la Carrera de Ingeniería en Diseño Industrial de la Universidad de la Central del Ecuador.



**Tnlogo. Henry Yáñez**, Tecnólogo en Emergencias Médicas, Egresado de la Carrera de Ingeniería en Diseño Industrial de la Universidad de la Central del Ecuador.



**Mgt. Andrea Villalobos**, Ingeniera en Diseño Gráfico Publicitario. Maestría en Arquitectura de la Información en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Sede Ambato. Profesora investigadora en la Universidad Central del Ecuador.



**Ing. Diego Veintimilla**, MBA mención Gestión de Proyectos (EPN), Diplomado en Calidad y Productividad, Ing. de Sistemas Informáticos y de Computación (EPN). Asesor en Emprendimiento, Innovación y Gestión Empresarial. Coordinador de Proyectos –Solidarity Tech.

## Design of a Videolaryngoscope with sensor and pressure alert

**Quiroga Josué<sup>1</sup>**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6819-56743>  
jequiroga@uce.edu.ec  
Universidad Politécnica Salesiana,  
Facultad de ingeniería electrónica  
Quito-Ecuador

**Flor Omar<sup>2</sup>**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3455-5982>  
omar.flor@udla.edu.ec  
Universidad de las Américas,  
Facultad de Ingenierías y Ciencias Aplicadas  
Ingeniería Industrial  
Quito-Ecuador

**Solórzano Santiago<sup>3</sup>**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8154-5277>  
santiago.solorzano@udla.edu.ec  
Universidad de las Américas,  
Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas  
Ingeniería de Software  
Quito-Ecuador

**Calahorrano José<sup>4</sup>**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5077933X>  
jose.calahorrano@uce.edu.ec  
Universidad Central del Ecuador,  
Escuela de Medicina  
Quito-Ecuador

**Recibido (08/02/21), Aceptado (18/02/21)**

**Abstract:** This work presents the design and construction of a laryngoscope model with camera vision that has a vibrating device to alert the medical specialist when the force exerted causes possible damage to the patient's airway during the intubation process. Design and fabrication considerations are described using Cast Material Position (FFD). The design is validated with the use of a high-fidelity simulator, the performance is compared with commercial models and the criteria of specialists are taken into account to improve all the necessary aspects. The model presented a great functional advantage, providing greater patient safety, reducing the risk of exposure of the internal tissue to high forces in the intubation process, facilitating clinical processes for health personnel.

**Keywords:** Video laryngoscope, intubation, 3d printer, PLA.

## Diseño de un laringoscopio con sensor y alerta de presión

**Resumen:** Este trabajo presenta el diseño y construcción de un modelo de laringoscopio con visión de cámara que posee un dispositivo vibratorio para alertar al especialista médico cuando la fuerza ejercida causa posibles daños en la vía aérea del paciente en el proceso de intubación. Se describen consideraciones de diseño y fabricación mediante posición de material fundido (FFD). El diseño se valida con el uso de un simulador de alta fidelidad, se comparan las prestaciones con respecto a modelos comerciales y se toman en cuenta los criterios de especialistas para mejorar todos los aspectos necesarios. El modelo presentó una gran ventaja funcional, brindando mayor seguridad al paciente, disminuyendo el riesgo a la exposición del tejido interno a elevadas fuerzas en el proceso de intubación facilitando los procesos clínicos al personal de salud

**Palabras Clave:** Videolaringoscopio, intubación, impresora 3d, PLA.



## I. INTRODUCTION

The laryngoscope, also known as a larynx, is a medical device that allows you to see inside the pharynx and larynx. This type of procedure is known as laryngoscopy, and it is performed to examine the glottis and vocal cords in order to perform endo tracheal intubation [1].

EL Laringo, has two main parts: Handle and Leaf. The function of the handle is to allow the user to hold and control the instrument in the most comfortable way possible. Inside there are type C or AA batteries which, thanks to their voltage and current, allow a light to be turned on to illuminate and improve the visibility of the patient's vocal cords. The blade or also called shovel, serves to separate the epiglottis and the patient's tongue. The blade can be reusable or disposable according to its material. The blade is made up of five parts: Spatula (1), Guide or step (2), flange (3), pick (4) and light bulb (5).

The spatula constitutes the main part of the blade, the bottom part makes contact with the patient's tongue and the top part faces the ceiling. The guide or step projects upward from the sheet towards the ceiling. The flange is projected laterally from the guide, The beak is the tip of the blade that is placed over the vellúcula or beyond the epiglottis to raise it directly, the focus allows illumination and is located near the tip of the laryngoscope. There are several sizes of blades on the market, there are three basic types of blades: Macintosh curved, Jackson or Wisconsin Straight and Straight with curved tip (Miller). The Macintosh curved blade has a parabolic curve with the straight distal third, which is the distance between the teeth and the vocal cords and allows the tip to be positioned at the angle formed by the epiglottis with the base of the tongue. The Jackson-Winsconsin straight blade and Miller curved-tip straight blade have straight blades that enter below the laryngeal surface of the epiglottis, moving forward and upward thereby elevating the epiglottis. It is useful in cases of flaccid epiglottis and in minor pediatric patients due to the anatomical characteristics.



**Fig 1. a. metal laryngoscope, b. videolaryngoscope**

Video laryngoscopes are laryngoscopes that use a video camera to visualize the structures of the airway. Video laryngoscopy enables skill development in airway management techniques by visualizing the glottis without the need to obtain a direct line [3]. When performing intubation with the video laryngoscope and thanks to its camera located in the distal part of the blade, the user is allowed to observe the glottis with panoramic vision without the need to “align its axes”. The video laryngoscope has a visual field between 45 ° and 60 °, as opposed to the distant and tubular vision of 15 ° that a classic laryngoscopy provides [4]. Video laryngoscopy, compared to direct laryngoscopy for difficult intubations, provides significantly better vision of the vocal cords, a higher success rate, faster intubations, and less need to optimize maneuvers. Therefore, video laryngoscopy is considered to lead to a clinically relevant improvement in intubation conditions and may be recommended for the management of difficult airways [5].

Through the use of computer-aided drawing software, parts and assemblies can be modeled in 2 and 3 dimensions, allowing the generation of new designs that add new functionalities and improvements in the use of medical implements such as laryngoscopes. This technology provides a tool to create, design, simulate, manufacture, pu-

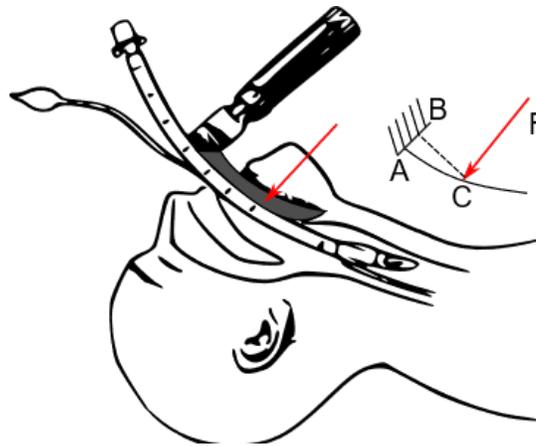
blish and manage the data of the design process. [6].

Video laryngoscopes, according to users, compared to traditional Macintosh blade laryngoscopes, have proven to be more user-friendly especially for beginners. They are useful in practical teaching in airway treatments, since said image can be shared through monitors or other devices to be viewed by students [8] [9].

This section describes aspects about the design and that have allowed the implementation of the device, taking into account the structure, materials and electronic systems.

## II.DEVELOPING

This section describes aspects about the design and that have allowed the implementation of the device, taking into account the structure, materials and electronic systems.

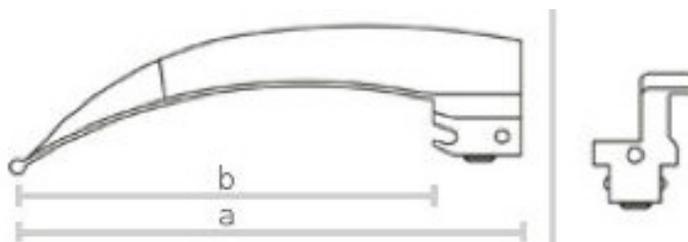


**Fig2. Scheme of the intubation process with the use of a laryngoscope**

In figure 2 the laryngoscope is observed in the position required for intubation in which the blade enters through the larynx and in the process it will be subjected to a force represented by  $F$  with a perpendicular distance  $BC$ , this force represents the reaction of teeth on the blade, this load can be high depending on the patient's conditions.

### A. Mechanical Aspects

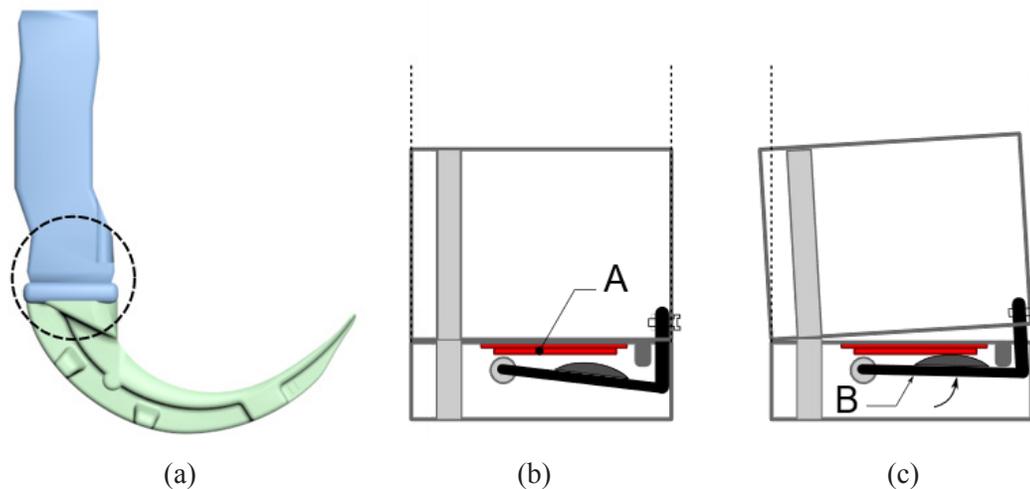
Using computer-aided design, components were graphed, based on the geometry of existing designs such as described in [9], Figure 1 presents the reference dimensions.



**Fig 3. Blade and blade schematic at the end of a laryngoscope.**

In figure 2, a diagram of a commercial laryngoscope is presented with a number 3 blade and whose dimensions  $a$  and  $b$  are 135 and 114 mm, these blades vary according to the type of patient and have various dimensions and radii of curvature. In figure 3, a diagram with three representations is presented, figure 3a. presents the structure of the laryngoscope with a mark that highlights the position of the internal mechanism presented in figure 3b, in which position A describes the location of the piezoelectric sensor that allows interpreting the applied load when the handle is slightly inclined by the action of the strength of the specialist (figure 3c). Around point B, the mobile

mechanism, attached to the clamping handle, allows light pressure on the sensor at A.



**Fig 4. Designed laryngoscope, a) structure, b) mechanism without force on the handle, c) mechanism pressing piezoelectric sensor.**

The geometry proposed allows to provide a hold and support for the blade that must withstand bending moments in the order of  $60 \text{ N} / \text{m}$  at its point of union of the two parts. The design contemplates a reduction in stress concentrators and the possibility of incorporating a digital screen that obtains the visualization of the camera that is located near the end of the blade (figure 6).

## B. Materials

Considering the 3D printing process by casting and deposition of molten polymer filament [11], Acryl Nitrile Butadiene Styrene (ABS) is an alternative that provides a resistance of up to  $45 \text{ Mpa}$  [12], however its use is not considered suitable in contact with human skin, for performance studies using a high fidelity simulator, this material has been chosen for its low cost.

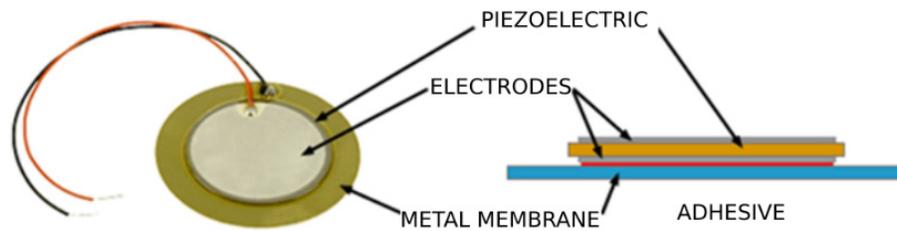
One of the new materials for applications in contact with cell tissue is Rokit's plastics, Skinflex, which is specially designed for interaction with human skin free of carcinogenic elements and which, apart from the elastic property it incorporates, allows elements to be made. such as shoe insoles, bracelets, clothing and accessories and wearables in general. This material complies with the regulations of the North American health agency FDA [13].

## C. Components

For the implementation of the video laryngoscope, the components and materials that meet the characteristics of operability, low cost and easy accessibility in the national market are selected and described below.

The main structure of the laryngoscope is manufactured with PLA material easily accessible in the local market and which is used in printing processes with fused filament, also with common machines for this process.

A piezoelectric sensor was used (figure 4), which makes it possible to obtain an electrical signal by means of which it will be conditioned and will allow estimating the bending stress applied at the point of attachment of the handle and the blade.



**Fig 5. Structure of the piezoelectric sensor.**

A wireless endoscope camera was also incorporated, which has IP67 waterproof technology, resists water, camera resolution is 640 \* 480 (VGA), 1280 \* 720, viewing angle of 66 degrees, Focal distance of 4 cm, camera diameter of 7.0mm, it has 6 white LED lights with adjustable intensity, it has an image transmission range of 15 meters via Wi-Fi communication and a maximum of 4 smart devices can be connected simultaneously to observe the image.

### III.METHODOLOGY

For the development of this functional prototype, a characterization of a commercial laryngoscope was first carried out with a Macintosh blade number 3 with dimensions a: 135 mm, b: 114 mm and width at the distal end: 14.5 mm with an arrangement similar to that of the from figure 1.

From the reference dimensions, the other elements of the video laryngoscope were designed with the help of computer-assisted drawing software, whose main structure and final design shown in figure 2. It was also verified that the critical point of the design was not exceed the 45 Mpa limit for phantom tests, considering a maximum force capable of breaking a healthy tooth whose value corresponds to 100 Kg, one scheme of distribution of force shown in figure 2.

A mechanism was designed to implement a piezoelectric sensor in such a way that information on the force applied between the gripping handle and the blade of the laryngoscope can be obtained, as shown in figures 3b and 3c, for this was electrical circuit was implemented.

For the implementation, a 3D printer and polylactic acid polymer (PLA) were used, through which the model made as the figura 6.

### IV.RESULTS

Figure 6 shows the model obtained in the design process as well as its functionality of transmitting the image to the cellular device. In this case, cable is used, however the design can be improved by wireless communication.



**Fig. 6. Video laryngoscope prototype completed.**

The criteria of the specialist doctors who use this device generally propose that this instrument is useful for airway management, facilitating intubation. The visualization it provides is clear and useful for operations carried out on the larynx. According to tests carried out in high-fidelity simulators, it is feasible to provide a grade I laryngoscopy, reducing the optimization maneuvers necessary for successful intubation and allowing the assistant to perform said cooperation under direct vision, as shown in Figure 6.

The design presents adequate rigidity for its use and the built-in sensor manages to transmit a signal when the force exceeds a parameter defined by the programmer. Inside the handle, the embedded system and the connections required to obtain the signal from the piezoelectric sensor were conveniently located.

## V. CONCLUSIONS

Efficacy evaluated by 95% was demonstrated by 6 doctors who use video laryngoscopes to perform intubations of patients attended by the Anesthesiology Service of the Eugenio Espejo Hospital located in Quito, Ecuador, for these evaluations the high fidelity Siman 3G Simulator was used.

The implementation of a pressure sensor, together with the designed mechanism and its position, adequately provide the possibility of configuring a vibrating mechanism that alerts the user and thus prevents the patient from receiving an overload of forces on the skin of his larynx. The clamping handle has the appropriate size to implement all the electronics for the control of the vibrating mechanism, without enlarging the structure of the device.

The device designed for PLA or ABS material is a suitable alternative for educational processes in medical areas and allows easy handling and use. However, with materials inert to interaction with human skin and devoid of carcinogenic elements, it can be used in patients with a verification of the surface quality after its manufacture.

## RECOGNITION

The contribution of the Central University in the use of the High Faithfulness Simulators for these investigative purposes is greatly appreciated.

## REFERENCES

- [1]D, Freitas. "Prototipo De Videolaringoscopia: Wi-Mac-Multivision". *Revista Chilena De Anestesia*. Volumen (49), número (2), páginas (262-270), 2020.
- [2]G, Velázquez. "Videolaringoscopia Artesanal Macintosh". *Anestesia en México*. Volumen (28). Número (1). Abril 2016.
- [3]R, Cooper. J, Pacey. M, Bishop. S, McCluskey. "Early clinical experience with a new videolaryngoscope (GlideScope) in 728 patients". *Can J Anaesth*. Volumen (52), número (2), Feb 2005.
- [4]C, Billington. P, Kearns. R, Kirkbride. K, Mackintosh. C, Reeve. et al. "A comparison of McGrath and Macintosh laryngoscopes in novice users: a manikin study". *Anaesthesia*. Volumen (64), número (11), Nov 2021.
- [5]A, Jungbauer. M, Schumann. V, Brunkhorst. A, Börgers, H, Groeben. "Expected difficult tracheal intubation: a prospective comparison of direct laryngoscopy and video laryngoscopy in 200 patients". *Br J Anaesth*. Volume (102), number (4), April 2009.
- [6] A, Caño. M, De la Cruz. "Diseño, ingeniería, fabricación y ejecución asistidos por ordenador en la construcción: evolución y desafíos a futuro", *Informes de la Construcción*. Volume (59), number 505, pag 53-71, marzo 2007.
- [7]V, Mazzanti. L, Malagutti. F, Mollica. "FDM 3D Printing of Polymers Containing Natural Fillers: A Review of their Mechanical Properties". *Polymers*. 28 jun 2021.
- [8]K, Howard. Y, Huang. R, Matevosian. M, Kaplan. R, Steadman. "Video-assisted instruction improves the success rate for tracheal intubation by novices". *Br J Anaesthesia*. Volume (101), number(4):568-572. Oct 2008.
- [9]S, Maya. "Role of video laryngoscopes in anesthesia practice". *Revista Mexicana de Anestesiología*. Volume (35). Number (1), 344-361, Jun 2012.
- [10]M, Kaplan. D, Ward. G, Berci. "A new video laryngoscope-an aid to intubation and teaching". *J Clin Anesth*. Volume (14), number (8), 620-626. Dec 2002.
- [11]D, Cabrera. G, Massano. S, Fernandez. S, Chaile. et al. "Video-laringoscopia de bajo costo desarrollado con tecnología de impresión 3D", *Revista Chilena de Anestesia*, volumen (47), numero 4, 2018.
- [12]N, Perez. A, Sanchez. M, Guagliano. M, Villanueva. "HISOPOS, LARINGOSCOPIOS Y AEROSOL BOX-IMPRESIÓN 3D COVID-19", *Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación-Argentina*. 2020

[13]K, Yoontae. E, Lee. A, Davydov. S, Frukhbeyen. J. Seppala. S, Takagi. L, Chow and S, Alimperti. 3Dprint.com, “Biofabrication of 3D printed hydroxyapatite composite scaffolds for bone regeneration”. 30 nov 2020.

## RESUMEN CURRICULAR



Josué Quiroga, Ingeniero Electrónico de la Universidad Politécnica Salesiana, Desempeña el cargo de Técnico Docente de la Clínica de Simulación Médica y Robótica de la Universidad Central Ecuador. Intereses en Biomédica y Simulación Clínica.



Omar Flor, Ingeniero Mecánico de la Escuela Politécnica del Ejército, Máster en Automática, Robótica y Telemática en la Universidad de Sevilla-España, docente e investigador en la Universidad de las Américas en Quito-Ecuador



Santiago Solórzano es Máster en Inteligencia Artificial, cuenta con una Ingeniería en Redes y Telecomunicaciones, Tecnología en Electrónica Instrumentación y Aviónica; consultor para el PNUD. Su formación le ha permitido manejar y desarrollar proyectos con tecnología de punta impulsando soluciones de múltiples ingenierías, en el ámbito de la Robótica, IA, IoT, WSN, Electrónica.



José Calahorrano, Médico de la Universidad Central del Ecuador, Especialista en Cuidados Intensivos en la Universidad San Francisco de Quito, Máster en Gerencia de Salud para Desarrollo Local en la Universidad Técnica Particular, Docente del Postgrado de Medicina Crítica de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito – Ecuador Biomédica y Simulación Clínica

## Curvas granulométricas como alternativa para la caracterización del material rocoso en minería

**Feijoo Patricio<sup>1</sup>**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6901-7933>  
pfeijoo@uazuay.edu.ec  
Universidad del Azuay  
Cuenca-Ecuador

**Bustamante Esteban<sup>2</sup>**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1200-9681>  
estebanbus@es.uazuay.edu.ec.  
Universidad del Azuay  
Cuenca-Ecuador

**Guillén Christian<sup>3</sup>**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2950-6067>  
cg8uazuay.edu.ec@es.uazuay.edu.ec  
Universidad del Azuay  
Cuenca-Ecuador

**Recibido (08/02/21), Aceptado (18/02/21)**

**Resumen:** En proyectos mineros es importante determinar ciertos parámetros, como la resistencia a compresión simple (RCS) del material rocoso, ya que es fundamental para el uso de clasificaciones geomecánicas, como RMR o Índice Q, las que establecen geometrías para estabilidad en canteras y fortificación en minas subterráneas, evitando desprendimientos de rocas o derrumbes, garantizando la salud de trabajadores y protección de equipos. Pero, para conocer la RCS, es necesario enviar muestras al laboratorio, lo cual hace tediosa y costosa su valoración. Este trabajo introduce una propuesta para la determinación de este parámetro, mediante una sucesión simple y sencilla de procesos mecánicos. Obtenidas muestras de roca, prepararlas, triturarlas, clasificarlas y valorada su RCS, se establece una relación entre estos parámetros, evitando enviar permanentemente muestras al laboratorio. Esta relación se presenta de una manera gráfica, de fácil interpretación y propone una ecuación, para de esta forma obtener el parámetro de una manera aproximada.

**Palabra Claves:** Minería, trituración de rocas, curvas granulométricas, resistencia a la compresión uniaxial.

## Granulometric curves as an alternative for the characterization of rocky material in mining

**Abstract:** In mining projects, is important to determine certain parameters, such as the unconfined compressive strength (UCS) of the rock material, since it is fundamental for the use of geomechanical classifications, such as RMR or Q Index, which establish geometries for stability in quarries and fortification in underground mines, avoiding rock falls or landslides, guaranteeing the health of workers and protecting equipment. But, to know the UCS, it is necessary to send samples to the laboratory, which makes its evaluation tedious and expensive. This work introduces a proposal for the determination of this parameter, through a simple and straightforward sequence of mechanical processes. Once rock samples are obtained, prepare them, crush them, classify them and assess their UCS, a relationship is established between these parameters, avoiding permanently sending samples to the laboratory. This relationship is presented in a graphical way, easy to interpret and proposes an equation, in order to obtain the parameter in an approximate way.

**Keywords:** Mining, rock crushing, granulometric curves, uniaxial compressive strength.



## I. INTRODUCCIÓN

En minería se cuentan con equipos básicos para la ejecución de la explotación de minerales o materiales pétreos, debido a esto y a la ubicación de los depósitos, en muchas ocasiones se dificulta el hecho de enviar permanentemente muestras al laboratorio para obtener la resistencia a la compresión simple del material rocoso, por lo que los técnicos o ingenieros en minas estamos en la búsqueda constante de ensayos in situ y así poder establecer una solución al problema.

En pequeña minería, específicamente, la determinación de este parámetro es un problema permanente, ya que la toma de muestras del material rocoso conlleva un tiempo y costo que dificulta a las empresas y muchas de las ocasiones se lo deja de realizar generando una falta de análisis de las estructuras mineras en términos de seguridad.

La caracterización del material rocoso es fundamental para la evaluación de las condiciones de estabilidad que presentan los macizos rocosos, por lo que este parámetro se lo debe obtener indispensablemente. Pero muchas veces debido a las condiciones en las cuales se encuentran las labores mineras, resulta complicado y a veces casi imposible enviar muestras de roca a laboratorios para determinar el valor de la RCS, y en estos tiempos es la problemática de los encargados de evaluar la estabilidad de las estructuras en el campo, por lo que se presenta la imperiosa necesidad de generar alternativas in situ para la valoración de la RCS 1.

Por esta razón se propone una metodología que correlaciona la resistencia a la compresión simple de la roca estudiada y su granulometría, caracterizando el material rocoso. Los resultados son alentadores y coadyuvan a determinar la propiedad mencionada, con una aproximación aceptable para efectos de los cálculos posteriores.

## II. DESARROLLO

El comportamiento mecánico de una masa de roca in situ es diferente de una masa de suelo. Los dos motivos fundamentales que actúan juntos son los siguientes: a) El material rocoso es mucho más fuerte y resistente que el material de suelo. b) Una masa rocosa presenta casi siempre sistemas de debilidades estructurales (fracturas, diaclasas, fisuras, juntas, discontinuidades, fallas de varios tamaños).

Por este motivo se tiene que distinguir entre macizo rocoso y material rocoso. Se habla de material rocoso entendiendo el material intacto, es decir un testigo o muestra de pequeño tamaño generalmente constituido por material sin fracturas. Se habla de macizo rocoso a todo el conjunto del material rocoso y de las discontinuidades presentes en él. Un macizo rocoso es por esto constituido por muchos bloques de material rocoso separados por discontinuidades, fisuras, etc. 2.

En la caracterización del macizo rocoso, a partir de afloramientos, se realizan una serie de observaciones y medidas de campo que son la base y sistemática para que quede caracterizado. Hay que tener en cuenta, el número y orientación de las familias, tamaño del bloque e intensidad de la fracturación, grado de meteorización y resistencia del macizo 3.

En muchos proyectos de ingeniería de minas, la clasificación de los macizos rocosos se realiza inicialmente para determinar la estabilidad de las obras a ejecutar. Estas clasificaciones son conocidas como clasificaciones geomecánicas y derivan de la diferencia existente entre las propiedades de la roca por su naturaleza y las del macizo, que presentan diferentes grados de fracturación y meteorización. Las clasificaciones geomecánicas son sistemas de valoración del comportamiento del terreno rocoso. Se basan en calificar numéricamente las propiedades y características específicas de la roca en un emplazamiento determinado y posteriormente obtener una calificación final como la suma de las valoraciones parciales 4. Las clasificaciones geomecánicas modernas más difundidas en la ingeniería de túneles son las conocidas como Rock Mass Rating o sistema RMR, la clasificación del Instituto Geotécnico Noruego, o sistema Q y el Geological Strength Index (GSI). Las primeras dos clasificaciones se basan en los datos de recuperación de núcleos (RQD), número de familias de discontinuidades, rugosidad y estado general de las juntas, presencia de agua y adicionalmente pueden considerar la resistencia de la roca matriz, la orientación de las discontinuidades respecto a la excavación y el tipo de obra de que se trate 5.

Una de las propiedades importantes que se debe conocer sobre el material rocoso es la resistencia a la compresión simple o uniaxial (RCS), y para obtener este parámetro se deben obtener muestras de roca que aflore en el yacimiento, preparar probetas adecuadas y enviarlas a laboratorios para la determinación de la presión de ruptura. Este trabajo debe ser permanente ya que la geología de los proyectos mineros varía en el avance de la explotación y por naturaleza las rocas son anisótropas y heterogéneas 6.

### A. Resistencia a la Compresión Uniaxial (RCU).

El comportamiento de un macizo rocoso es diferente de un material rocoso, debido a que el material rocoso es más fuerte y un macizo rocoso presenta casi siempre sistemas de debilidades estructurales llamadas juntas. Se habla de material rocoso cuando el material es intacto, por ejemplo, un testigo o muestra de pequeño tamaño que no presenta fracturas. Se habla de macizo rocoso a todo el conjunto de material rocoso y discontinuidades que lo conforman. En cuanto a la matriz rocosa, material rocoso o simplemente roca, hay muchos parámetros que se emplean para su identificación y descripción de sus características. Estas propiedades junto con la composición mineralógica determinan su comportamiento. La matriz rocosa rompe a favor de las superficies de fractura que se generan al superarse su resistencia pico. Así, de una forma indirecta los ensayos de compresión miden la resistencia al corte de las rocas. La resistencia a la compresión uniaxial de la matriz rocosa es un parámetro muy variable que depende de muchos factores. Factores intrínsecos: tipo de roca (factor condicionante básico), grado de microfisuración, porosidad y grado de alteración y/o meteorización. Esto da lugar a que no solo varíe la resistencia de un tipo de roca a otra, sino que, dentro de un mismo tipo de roca, se pueda dar un amplio rango de valores. Esta dispersión de valores, se corresponde a valores “medidos” de la resistencia, que están también influidos por. Factores extrínsecos: características del ensayo y características de la muestra.

La resistencia a la compresión simple ha sido uno de los parámetros clasificatorios de las rocas desde el punto de vista ingenieril 7. La resistencia a la compresión simple de las rocas también es muy importante cuando se van a utilizar métodos de arranque de materiales mediante el uso de explosivos. Las rocas responden de forma muy diferente a la onda de detonación del explosivo en lo que respecta a la primera etapa de formación de fisuras, primordial y origen del fenómeno de rotura y fragmentación.

Las rocas extremadamente duras pero frágiles rompen bien mientras que las rocas blandas elásticas apenas son fragmentadas 8. De igual forma es importante para el cálculo del uso de explosivos en métodos como el propuesto por López-Jimeno para los respectivos parámetros de la voladura 9. La resistencia de una roca o de sedimentos no bien consolidados está influida por la mineralogía de sus partículas y por el contacto que hay entre ellas 10.

Se suele entender por “resistencia” a la carga específica (por unidad de sección), que es necesario aplicar a un material para producir su rotura. Según el esfuerzo que se aplique la resistencia puede ser: a compresión, a tracción, a flexión, a corte, a torsión, etc. La resistencia a la compresión simple (o compresión uniaxial) de la matriz rocosa, es el valor que se obtiene cuando se aplica una carga de compresión en una dirección dada, sin aplicar ningún otro esfuerzo en ninguna otra dirección.

Se suele expresar con la siguiente relación:

$$RCU = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Donde:

P es la carga de rotura y A es la sección sobre la que se aplica.

A continuación, podemos observar en la tabla 1, la clasificación de las rocas según la resistencia a la compresión.

**Tabla 1. Clasificación de las rocas en función de la Resistencia a Compresión Simple (ISRM)**

Descripción	Resistencia a la Compresión Simple o Uniaxial (MPa)
Resistencia muy baja	1 al 25
Resistencia baja	25-50
Resistencia media	50-100
Resistencia alta	100-200
Resistencia muy alta	>200

### B. Trituración de Rocas.

Para hablar del proceso de trituración necesitamos entender sobre los tipos de máquinas que existen para esta actividad, industrialmente se utilizan diferentes tipos de máquinas de trituración. Se clasifican de acuerdo a la etapa y al tamaño de material tratado.

**Trituradoras Primarias.** Fragmentan trozos grandes hasta un producto de 8" a 6". Se tienen dos tipos de máquinas: Trituradoras de Mandíbulas y Trituradoras Giratorias.

**Trituradoras Secundarias.** Fragmentan el producto de la trituración primaria hasta tamaños de 3" a 2" entre estas máquinas tenemos: Trituradoras Giratorias, Trituradoras Cónicas y Trituradoras Hydrocónicas.

**Trituradoras Terciarias.** Fragmentan el producto de la trituración secundaria hasta tamaños de 1/2" o 3/8", entre estas máquinas tenemos: Trituradoras Cónicas y Trituradoras de Rodillos 11.

En adelante desarrollaremos la información pertinente a este tema. Los equipos más comunes que podemos encontrar en el medio son las trituradoras de mandíbulas, las de cono, de martillos, de impacto (vertical y horizontal), y de rodillos. Estas trituradoras se pueden clasificar en dos grandes grupos: Las trituradoras por compresión y las de impacto 12.

**Trituradoras por compresión.**

Son aquellas máquinas que comprimen mecánicamente las rocas dentro de una cámara hasta que se fracture la roca en partículas menores. Las trituradoras de mandíbulas, cono y de rodillos operan según el principio de compresión.

#### **Trituradora de mandíbula (Jaw crusher).**

Las trituradoras de mandíbulas se usan principalmente en la etapa primaria. La fracturación de las rocas ocurre en la cámara de trituración, la que está compuesta de una mandíbula fija y una mandíbula móvil. Estas mandíbulas están provistas de unas placas dentadas de acero al manganeso llamadas forros. El forro fijo va instalado a la mandíbula que no tiene movimiento y es ésta la que recibe la presión, el forro móvil está montado en la mandíbula que tiene el movimiento oscilante por acción de un eje excéntrico, estos forros deben reemplazarse regularmente, debido al desgaste que se genera por la fricción con las rocas. Hay dos tipos básicos de trituradoras de mandíbulas, las de un solo efecto y las de doble efecto. La trituradora de un solo efecto cuenta con un eje excéntrico en la parte superior de la estructura. La rotación del eje junto con la placa basculante produce una acción lenta de vaivén con mucha energía. Una trituradora de doble efecto tiene básicamente dos ejes y dos placas basculantes. El primer eje es un eje pivotante en la parte superior de la trituradora, mientras que el otro es un eje excéntrico que acciona las dos placas articuladas. La mandíbula móvil tiene un movimiento puro de vaivén hacia la mandíbula fija. El movimiento oscilante que causa compresión, tanto en la entrada como en la descarga de material, le da a la trituradora de simple efecto una mejor capacidad que de las trituradoras de doble efecto de tamaño similar. La trituradora de mandíbulas es un equipo robusto y fiable, y por ello muy popular en plantas de trituración primaria. La capacidad de producción de la trituradora depende de las características de las materias a triturar (intensidad, dureza, y composición de granulosis alimentada, etc.), las filtraciones de la trituradora y las condiciones de operación (casos de alimentación y dimensión de la salida de materias), etc. 13.

### C. Clasificación Granulométrica.

La clasificación o cribado es el proceso donde se separan las fracciones de roca. El análisis granulométrico es una prueba en donde se determina la distribución de partículas de diferentes tamaños por medio de cribas 14. Esta selección se hace a través de mallas metálicas o poliuretano que van montadas en las cribas vibratorias. Los principios de cribado para cualquier tipo de material en zarandas vibratorias son básicamente los mismos, los resultados dependerán mucho de las configuraciones que se hayan aplicado. Una vez que el material esté sobre la superficie de la caja de cribado, se genera el fenómeno de la estratificación, en cuyo proceso por efecto del movimiento vibratorio, las partículas gruesas emergen a la parte superior de la capa de material y las partículas más pequeñas buscan su camino hacia la parte inferior de la capa a través de los espacios creados entre las partículas gruesas. Los factores que afectan la estratificación son: Velocidad del flujo de material, el espesor de la capa del material, características de inclinación de la criba, características de la potencia del motor, configuración de la amplitud, dirección de rotación del elemento excéntrico, tipo de movimiento y frecuencia y humedad superficial de las partículas, un alto contenido de humedad dificulta la estratificación con poca probabilidad de separación. Grado de limpieza con referencia a la plasticidad.

Por este procedimiento, el tamaño de partícula se asocia al número de aberturas que tiene el tamiz por pulgada lineal, utilizando el concepto de tamaño de FERET que se define como el tamaño que corresponde a la distancia entre dos tangentes paralelas a la partícula, trazadas en la misma dirección de la medición 15.

El análisis granulométrico o distribución de partículas del material tratado, es importante en los procesos de investigación para un control de la operación. El análisis granulométrico (o análisis del tamaño de partículas) del material tratado, cuyo resultado puede ser representado en forma de tabla o por medio de la respectiva curva granulométrica, reviste una gran importancia para cualquier proceso de tratamiento, sea en fase de proyecto y estudio en laboratorio, sea para el control de las operaciones durante el funcionamiento de una planta. El análisis granulométrico es generalmente llevado a cabo con métodos mecánicos (serie de cribas o tamices) o con métodos hidráulicos y neumáticos. En general las cribas se usan para clasificaciones hasta tamaños superiores a 40 micrones indicativamente, mientras que las clasificaciones hidráulica y neumática son utilizadas para clasificar a tamaños menores. Para clasificación a tamaños menores que 40 micrones se está desarrollando también el nuevo campo de las técnicas electrónicas 16.

La granulometría, tema que nos ocupa, es la composición, en porcentaje, de los diversos tamaños de agregado en una muestra. Esta proporción se suele indicar de mayor a menor tamaño, por una cifra que representa, en peso, el porcentaje parcial de cada tamaño que pasó o quedó retenido en los diferentes tamices que se usan obligatoriamente para tal medición 17. La separación de un material en diferentes fracciones, según sus tamaños, es necesaria para conocer su competencia desde una visión geotécnica. Esta clasificación comprende dos partes: por tamizado para las partículas gruesas (gravas y arenas) y el de sedimentación para la fracción fina del suelo (limos y arcillas). Por granulometría o análisis granulométrico de un agregado se entenderá todo procedimiento manual o mecánico por medio del cual se pueda separar las partículas constitutivas del agregado según tamaños, de tal manera que se puedan conocer las cantidades en peso de cada tamaño que aporta el peso total. Para separar por tamaños se utilizan mallas de diferentes aberturas, las cuales proporcionan el tamaño máximo de agregado en cada una de ellas. En la práctica los pesos de cada tamaño se expresan como porcentajes retenidos en cada malla, con respecto al total de la muestra. Estos porcentajes retenidos se calculan tanto parciales como acumulados, en cada malla, ya que con estos últimos se procede a trazar la gráfica de valores de material (granulometría).

Las curvas pueden ser representadas de varias formas, la forma más utilizada provee el uso de diagramas semilogarítmicos, con las abscisas (tamaños de mallas o de clasificación en general) en escala logarítmica y las ordenadas (porcentaje de pasante o retenido) en escala lineal. La necesidad de usar la escala logarítmica para los tamaños de clasificaciones cesaría en efecto en el caso de muestras muy homogéneas granulométricamente. Es importante en una reducción de tamaño lograr mantener las curvas granulométricas empinadas lo mayor posible.

### III. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este trabajo se obtuvieron muestras de afloramientos, específicamente tres y de cada sitio se han obtenido 30 muestras de roca.

El primer afloramiento, denominado Cojitambo, está formado por unas andesitas, las cuales son rocas volcánicas de grano fino, son comunes, como coladas de lava en regiones orogénicas y ocasionalmente forman pequeñas intrusiones. El segundo afloramiento, denominado Racar, es un travertino, el cual se debió a la depositación

de rocas calcáreas en una zona de procesos de sedimentación. El tercer afloramiento, denominado Tuhual, está compuesto de una andesita más compacta que la del primer afloramiento. Las muestras deben ser extraídas de los diferentes afloramientos, pero evitando obtenerlas de la parte superficial de los mismos, para impedir efectos de alteración y erosión, las muestras deben ser en lo posible sanas, sin fracturas y sin signos de intemperismo.

La siguiente etapa es elaborar las probetas que generará cada muestra, en este caso vamos a obtener 60 probetas de cada sitio de estudio, estas probetas serán en pares, es decir existirá por cada muestra una probeta A y una probeta B, las mismas que debemos tratar de elaborarlas de las mismas dimensiones, esto es 5 cm x 5 cm x 12 cm. La probeta A será la que va al proceso de compresión y la probeta B la que va al proceso de trituración y clasificación (Figura 1).



**Fig. 1. Muestras o probetas de roca de Tuhual**

Para el afloramiento denominado Cojitambo tenemos las probetas 1AC y 1BC, 2AC y 2BC, 3AC y 3BC..... hasta las probetas 30AC y 30BC. Para el afloramiento Racar tenemos las probetas 1AR y 1BR, 2AR y 2BR, 3AR y 3BR..... hasta las probetas 30AR y 30BR. Finalmente, para el afloramiento Tuhual tenemos las probetas 1AT y 1BT, 2AT y 2BT, 3AT y 3BT..... hasta las probetas 30AT y 30BT. La codificación de las muestras corresponden a la siguiente descripción: la letra A es para el ensayo de resistencia a la compresión simple, la letra B para el ensayo de trituración y clasificación, la letra C es para identificar a las probetas del afloramiento Cojitambo, la letra R para el afloramiento Racar y la letra T para el afloramiento Tuhual.

Se inició el trabajo con las pruebas de resistencia a la compresión simple (probetas A). Para la ejecución de los ensayos de resistencia a la compresión se usó una prensa Humboldt, que tiene facultades para someter materiales a ensayos de tensión y compresión. La presión se logra mediante placas o mandíbulas accionadas por tornillos o sistema hidráulico. La máquina de ensayos tiene como función comprobar la resistencia de diversos tipos de materiales, para esto posee un sistema que aplica cargas controladas sobre una probeta (modelo de dimensiones preestablecidas) y mide en forma gráfica la deformación, y la carga al momento de su ruptura 18.

Paralelamente se procedió a ejecutar el proceso de trituración y clasificación (probetas B) y para la trituración se usó una trituradora de mandíbulas MEM R22.

Obtenido el material de la trituradora se lo sometió a la clasificación con los tamices 12.7 mm, 9.52 mm, 4.75 mm y 2 mm. El tiempo de clasificación fue de 2 minutos. Este proceso final nos proporciona las diferentes masas que son retenidas en los tamices y mediante los diagramas semilogarítmicos podemos generar las diferentes curvas granulométricas. En la figura 2, se observan las curvas del afloramiento de Cojitambo. También cabe indicar que ya se obtuvieron los diferentes valores de resistencia a la compresión simple, de las probetas para cada sitio de estudio.

#### IV.RESULTADOS

Obtenidas las diferentes curvas granulométricas procedemos a linealizarlas, en función de dos magnitudes  $x$  e  $y$  que se relacionan a través de una ecuación lineal,  $y = mx + b$ , donde las constantes  $b$  (ordenada en el origen) y

m (pendiente) son los valores a establecer. El método para determinar los parámetros m y b consiste en ingresar los datos de las curvas granulométricas en programas para que cada una de las mismas sea linealizada y de esta forma obtener dichos valores (Figura 3). La linealización se la realizó con el método de mínimos cuadrados y el objetivo principal es obtener los parámetros b y m, los cuales representan la condición que mientras menor sea el valor el producto de b por m entonces tendremos una mayor RCS.

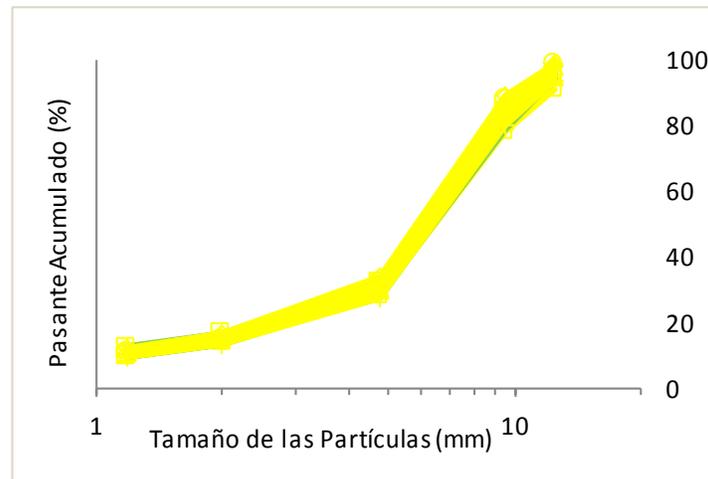


Fig. 2. Curvas granulométricas del afloramiento Cojitambo

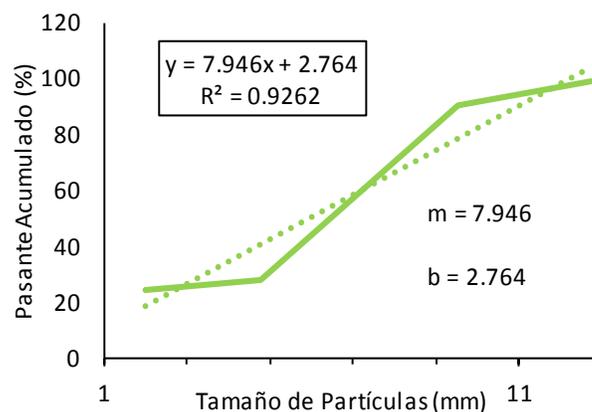


Fig. 3. Linealización de la curva granulométrica 10BR

Esta linealización se la ejecuta en las 30 curvas granulométricas de las muestras para cada afloramiento, es decir de todas las probetas B, lo que nos entrega 30 valores de pendiente (m) y 30 valores de intercepción (b). Determinados los valores se procede a identificar los respectivos pares de datos, entre la resistencia a la compresión simple de cada probeta A con la relación (bm) de cada probeta B.

Analizados los datos y conocedores de que una roca, al poseer una resistencia a la compresión más alta, al momento de un impacto, como el proporcionado por los efectos de la trituración, esta se desintegrará en pedazos de material rocoso, con más finos en su volumen final, que una roca menos resistente. Esta proposición nos conlleva a un ordenamiento de los datos, es decir, mientras más alto es el valor de la RCS de la probeta, más porcentaje de finos tendrá, en consecuencia, los valores del producto (bm) serán los más bajos. La relación existente entre la multiplicación de la intercepción y la pendiente (bm) y la resistencia a la compresión simple de las probetas, nos permitió obtener una expresión para cada sitio de estudio, es decir para cada conjunto de muestras. En el caso específico de Cojitambo tenemos la figura 4, en la cual se observa una línea de tendencia, la cual representada con la ecuación 2, nos indica la relación entre el producto de b por m y la RCS, en este caso bm se establece entre los límites -20 y 10 y el valor de la RCS entre 10 y 50 MPa.

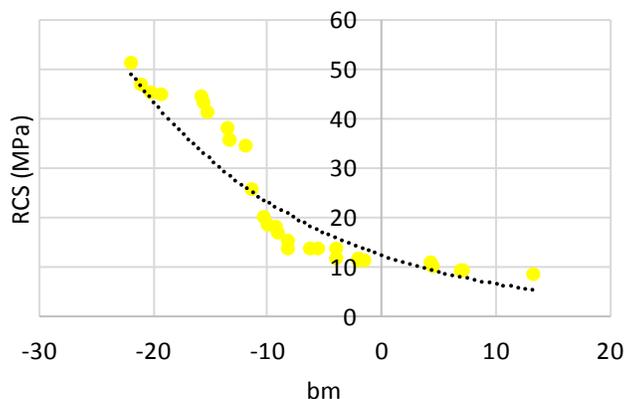


Fig. 4. RCS y la relación (bm) para Cojitambo

Podemos manifestar que la correlación entre estos valores o propiedades están sujetos a la ecuación:

$$RCS (MPa) = 12.41 e^{-0.063 \cdot (bm)} \quad (2)$$

Esta relación presenta un  $R^2$  igual a 0.8507, lo cual conlleva al objetivo propuesto.

De igual forma se procede con el afloramiento Racar (Figura 5), relación que se representa con la ecuación 3, en este caso bm se establece entre los límites 10 y 100 y el valor de la RCS entre 10 y 50 MPa.

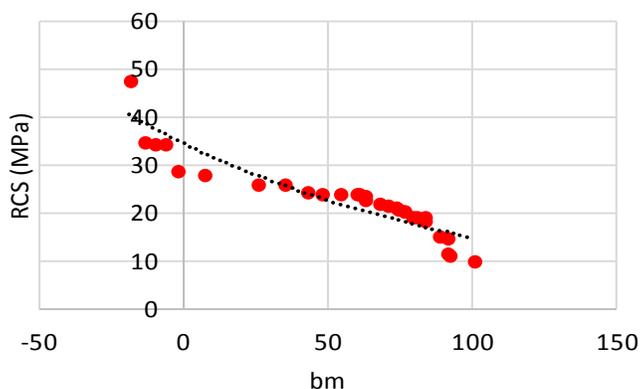


Fig. 5. RCS y la relación (bm) para Racar

La correlación entre estos valores o propiedades están sujetos a la ecuación:

$$RCS (MPa) = 34.474 e^{-0.008 \cdot (bm)} \quad (3)$$

Esta relación presenta un  $R^2$  igual a 0.7824.

Finalmente, para el afloramiento Tahal (Figura 6), la relación se representa con la ecuación 4, en este caso bm se establece entre los límites -10 y 10 y el valor de la RCS entre 10 y 56 MPa.

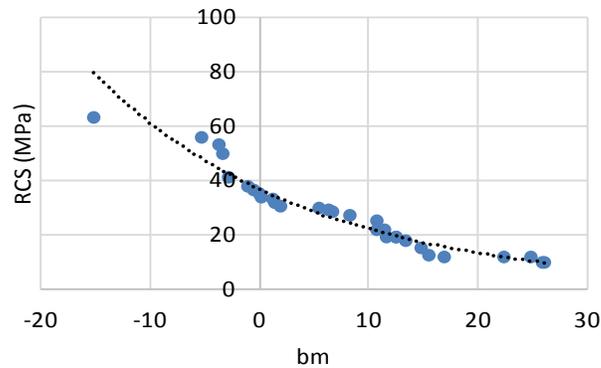


Fig. 6. RCS y la relación (bm) para Tahual

La correlación entre estos valores o propiedades están sujetos a la ecuación:

$$RCS (MPa) = 36.612 e^{-0.051 \cdot (bm)} \quad (4)$$

Esta relación presenta un  $R^2$  igual a 0.9497.

Analizados los resultados iniciales, se procedió a ingresar todos los valores como un solo grupo, con lo cual obtuvimos una secuencia de graficación muy interesante, la misma se la puede observar en la figura 7. A más de lo expuesto se obtuvo la ecuación 5, la cual permite determinar los valores de la RCS en función del parámetro bm.

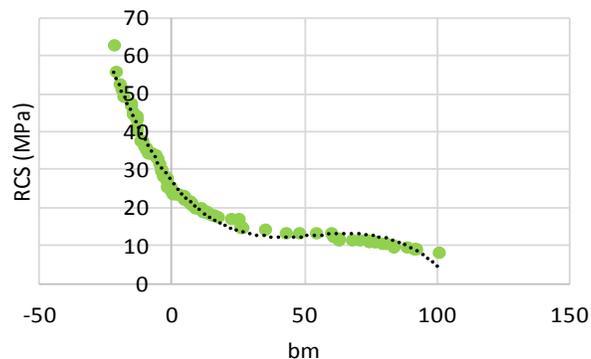


Fig. 7. RCS y la relación (bm) para todas las muestras

Esta grafica nos ha permitido encontrar una relación para los tres afloramientos y de manera bastante aproximada se la ha generado, estableciendo dominios para cada afloramiento y mediante una nueva graficación ajustada, se puede establecer cuando un valor (bm) corresponde a cada grupo de roca, a más de obtener aproximadamente el valor de la resistencia a la compresión simple. Esto se lo puede observar en la figura 8 y la ecuación 6.

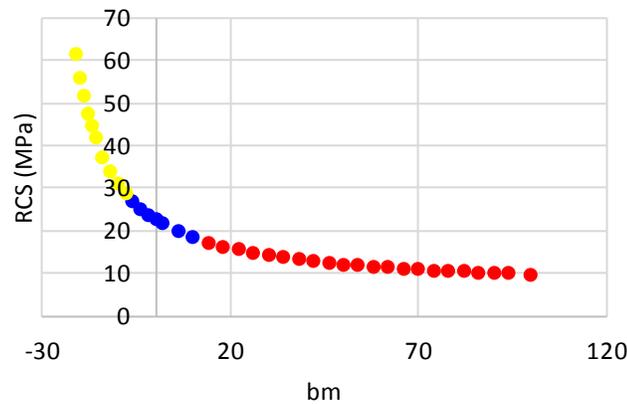


Fig. 8. Relación entre la RCS y la relación (bm)

La correlación que más se ajusta entre los datos de la figura 7 es la siguiente:

$$RCS (MPa) = -0.0001(bm)^3 + 0.0172(bm)^2 - 0.8817bm + 26.818 \quad (5)$$

Esta relación presenta un  $R^2$  igual a 0.9832.

Debido a un manejo más ágil, se propone una relación ajustada a los datos que se presentan en la figura 8, la cual es:

$$RCS (MPa) = \left( \frac{500}{(bm) + 30} \right) + 6 \quad (6)$$

Esta relación debe ser usada entre los límites:

$$-20 \leq (bm) \leq 100$$

Estos límites se establecen, ya que el producto de bm, debe estar contenido para todos los afloramientos entre dichos valores. Además, se muestra que el error aproximado es de  $\pm 5\%$ , entre las ecuaciones 5 y 6 lo que representa el usar la ecuación ajustada 6, la cual es más didáctica, en lugar de utilizar la ecuación 5.

## V. CONCLUSIONES

La ejecución de pruebas de trituración y clasificación de probetas de roca, con las dimensiones descritas en este trabajo, es factible de ser ejecutadas in situ, ya que la mayor parte de empresas mineras cuentan con los equipos apropiados para dichos ensayos.

La elaboración de las curvas granulométricas, su linealización y la determinación de los parámetros (b) y (m), especificados en este trabajo, son de ejecución inmediata, mediante un software adecuado o simplemente un paquete de Microsoft Office.

Existe una correlación entre la RCS y el valor de (bm), de las diferentes muestras de rocas analizadas, lo cual nos proporciona una vía rápida, directa y económica para determinar un valor aproximado a la propiedad (RCS) de otras rocas presentes en un proyecto minero.

Para cada afloramiento se ha determinado una relación entre la RCS y el parámetro (bm), las cuales podrían permitir una aproximación de la RCS dentro de los dominios de cada una de ellas, a más de lo expuesto, en la figura 8 se establecen los valores de dominios para cada afloramiento. Para Cojitambo (bm) debe estar entre -20 y -10, para Tahual (bm) debe estar entre -10 y 10 y para Racar (bm) debe estar entre 10 y 100.

Esta propuesta nos permite determinar la RCS para rocas entre 9 a 56 MPa, es decir hasta rocas de resistencia media. Si el parámetro (bm) obtenido no está enmarcado dentro del rango alcanzado en la figura 8, es importante

que esos materiales sean enviados a laboratorio para la determinación de la RCS, ya que es probable que tengamos rocas de resistencia muy alta, las cuales no cumplan la propuesta mencionada.

Esta metodología es aplicable en minería, para el estudio geotécnico y comportamiento de la roca y macizo rocoso; y en base a esta determinación se podrán continuar con los estudios de uso de explosivos y evaluación de factores de seguridad, para la estabilidad, de las obras a ejecutar durante la fase de explotación de la mina o cantera.

## REFERENCIAS

- [1]E. P. Feijoo Calle y J. C. Padrón Suarez, «LA RESISTIVIDAD DE ROCAS Y SU RELACIÓN CON LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE EN MINA», uct, vol. 24, n.º 99, pp. 61-67, abr. 2020.
- [2]E. P. Feijoo Calle, C. A. Flores Vera y B. A. Feijoo Guevara, "El concepto del área granulométrica y su relación con la resistencia a la compresión simple de rocas", 2019 VII Congreso Internacional de Ingeniería, Ciencias y Tecnología (IESTEC), Panamá, 2019, págs. 52-56, doi: 10.1109/IESTEC46403.2019.00018.
- [3]F. Escolano, A. Mazariegos, Guía de reconocimiento de rocas en Ingeniería Civil. España: Editorial Garceta, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Madrid, 2014.
- [4]E. P. Feijoo Calle y D. M. Román Celi, «CORRELACIÓN ENTRE LA DEFORMACIÓN Y LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN ROCAS», uct, vol. 23, n.º 91, p. 6, may. 2019.
- [5]L. González de Vallejo, M. Ferrer, L. Ortuño, C. Oteo, Ingeniería Geológica. España: 2004.
- [6]E. P. Feijoo Calle y D. C. Iñiguez Toral, «CORTE EN ROCAS Y SU RELACIÓN CON LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE». RISTI, N.º E 30, 59-67, jun. 2020.
- [7]M. Galván, Mecánica de Rocas. Correlación entre la Resistencia a Carga Puntual y la Resistencia a la Compresión Simple. Colombia: Universidad del Valle, Cali, 2015.
- [8]J. Alonso, J. Gómez, J. Herbert, Perforación y voladura de rocas en minería. España: Universidad Politécnica de Madrid, 2013.
- [9]L. Murcia, "Procedimiento para el diseño de mallas de voladura en explotación de canteras a cielo abierto con base en la estabilidad temporal y final de los bancos de producción". Tesis de Grado, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, 2016.
- [10]F. G. Blyth, M. H. de Freitas, Geología para Ingenieros. México: Cecs, 2003.
- [11]F. Arévalo, I. Cano, "Influencia de la instalación de una chancadora y faja transportadora en el incremento de producción del área de molienda de óxido de calcio Puylucana, Cajamarca". Tesis de Grado, Universidad Privada del Norte, Cajamarca, Perú, 2018.
- [12]M. Colquehuanca, "Implementación de mejora al sistema de una planta de trituración de roca, para optimizar el rendimiento en el proceso de producción de agregados". Tesis de Grado, Universidad Privada del Norte, Lima, Perú, 2018.
- [13]R. Calabuig, "Efecto de la adición de cal en las propiedades mecánicas y durabilidad de hormigones con altos contenidos en cenizas volantes silíceas". Tesis profesional, Piura, Universidad Nacional de Piura, Perú, 2015.
- [14]D. Olgúin, "Proceso de Producción de Agregados Pétreos y su Control de Calidad". Tesis de Grado, Universidad Autónoma de México, México D. F., México, 2016.
- [15]C. Lara, H. Cuestas, "Determinación del wok index según la teoría de E. Bond mediante pruebas de molienabilidad de sulfuros para el control de la etapa de molienda a nivel de laboratorio en la Facultad de Ingeniería Química U.N.C.P. Universidad Nacional del Centro del Perú". Tesis de grado, Huancayo, Perú, 2012.
- [16]A. Maistri, Guía al Curso de Tratamiento de Minerales y a las Prácticas de Laboratorio. Universidad del Azuay. Ecuador: Universidad del Azuay, 1993.
- [17]J. Toirac, Caracterización Granulométrica de las Plantas productoras de arena en la República Dominicana. República Dominicana, Ciencia y Sociedad, 2012.
- [18]Feijoo P., Brito E., "Caracterización de la roca mediante propiedades físicas y su relación con la Resistencia a la Compresión Simple", 2020 I Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología Morona Santiago (CICTMS), Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, Ecuador.

## RESUMEN CURRICULAR



**Patricio Feijoo**, Ingeniero en Minas, graduado en la Universidad del Azuay (Cuenca-Ecuador), con estudios y pasantías en: Bolivia, Brasil, España, Australia en áreas de la geología, geofísica y desarrollo de actividades de explotación de minas. Se encuentra vinculado a la docencia en la Universidad del Azuay.



**Christian Guillén**, Ingeniero en Minas, graduado en la Universidad del Azuay en el 2020 (Cuenca-Ecuador), con pasantías en: Planta de beneficio “Sagrado Corazón de Jesús”, Asociación Comunitaria Minera “El Mirador” (Ponce Enriquez) y en el Ministerio de energía y recursos no renovables zonal 6.



**Esteban Bustamante**, Ingeniero en Minas, graduado en la Universidad del Azuay en el 2020 (Cuenca-Ecuador), con pasantías en: Minería Subterránea (GOLDEN MINNING), Planta de Beneficio y Recuperación “Corazón de Jesús”, en el Ministerio de energía y recursos no renovables zonal 6.

## Análisis de la energía eólica como sustituto para la energía convencional en casas del Distrito Metropolitano de Quito, Ecuador

**Ayala Ricardo<sup>1</sup>**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5214-4263>  
ricardo.ayala@udla.edu.ec  
Universidad de las Américas  
Quito - Ecuador

**Freire Juan<sup>2</sup>**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9344-5217>  
juan.freire.gallegos@udla.edu.ec  
Universidad de las Américas  
Quito - Ecuador

**López Juan<sup>3</sup>**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4004-6412>  
Juan.lopez.cox@udla.edu.ec  
Universidad de las Américas  
Quito - Ecuador

**Salazar Javier<sup>4</sup>**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3910-1357>  
javier.salazar@udla.edu.ec  
Universidad de las Américas  
Quito - Ecuador

Recibido (08/02/21), Aceptado (18/02/21)

**Resumen:** En este trabajo se plantea el análisis de la energía producida por turbinas de viento, que son dispositivos diseñados para el aprovechamiento de la velocidad del viento, y la energía cinética que esta causa cuando impacta en unos álabes dispuesto para este fin. El movimiento provocado es aprovechado para la obtención de energía. Este tipo de sistemas es altamente utilizado, ya que una turbina puede generar entre 5kW hasta 10KW. En este trabajo se analiza el diseño, construcción, y aplicaciones más significativas en la vida doméstica, para el aprovechamiento de energía limpia y la reducción de energías convencionales. Se toman en cuenta trabajos científicos relevantes que brindan un aporte significativo a esta temática de estudio.

**Palabra Claves:** Turbinas eólicas, energía, electricidad.

## Analysis of wind energy as a substitute for conventional energy in houses in the Metropolitan District of Quito, Ecuador

**Abstract:** In this work, the analysis of the energy produced by wind turbines, which are devices designed to take advantage of wind speed, and the kinetic energy that this causes when it impacts on blades arranged for this purpose is proposed. The movement caused is used to obtain energy. This type of system is highly used, since a turbine can generate between 5kW and 10KW. This work analyzes the design, construction, and most significant applications in domestic life, for the use of clean energy and the reduction of conventional energy. Relevant scientific works that provide a significant contribution to this study topic are taken into account.

**Keywords:** Wind turbines, energy, electricity.



## I. INTRODUCCIÓN

Desde hace muchos años, la energía eólica e hidráulica han sido las únicas fuentes de origen no animal empleadas en la realización de trabajo mecánico. Hace 5000 años en el antiguo Egipto, se creó la primera forma de aprovechar la energía proveniente del viento la cual se aplicaba en la navegación para las embarcaciones a vela, posteriormente se empezó a usar en Babilonia en el siglo XVII mediante molinos de viento con el fin de regar cultivos y moler el grano [1].

Se ha encontrado que en los últimos años que la mayor fuente de energía eléctrica es proveniente del carbón con un 39,3% contribuyendo a la contaminación atmosférica dada las altas emisiones de CO<sub>2</sub> producidas en el proceso. No muy lejos se encuentran otros tipos de fuentes de generación de energía como pueden ser la energía nuclear, el gas natural e hidroeléctrica. Por otro lado, con respecto a la generación de energías renovables se ha podido evidenciar que componen solamente el 7% de la demanda mundial, entre ellas la energía eólica, geotérmica y solar [2]. Es por esto que en la actualidad la energía eólica es la energía limpia que más crecimiento ha tenido, ya que está estrechamente ligada con múltiples beneficios al no contaminar el agua ni producir gases de efecto invernadero, causando un impacto ambiental sumamente bajo por lo que las energías renovables eólicas se encuentran bajo una creciente demanda [1].

Gracias a los avances tecnológicos en el campo eólico han permitido que la producción de este tipo de energía sea tan barata como la energía producida por el carbón o la nuclear, convirtiéndose en un factor clave para la transformación a un modelo energético sostenible y no perjudicial al medio ambiente. Con esto en mente los países han ido cambiando su producción de energía a una forma más sostenible y amigable en el tiempo. Entre los países que han incorporado este tipo de energía eólica se puede encontrar a potencias energéticas como EEUU que cuenta con una producción mundial del 23% significando una generación de 123 teravatio-hora, seguido por China con un 22,2% y luego Alemania, España, India, Reino Unido, Canadá y Brasil todas ellas con un 9,5%, 5,9%, 5,1%, 4,8%, 3,2% y 2,6% respectivamente [2].

En Quito se consumen 128,4 kW/h en promedio por hogar. Una turbina puede generar entre 5 y 10 kW dependiendo de la velocidad del viento, por lo que podría contribuir de manera importante a esta demanda de energía. Se debe tener en cuenta que una turbina de tan solo 1,5 kW podría cubrir las necesidades de una casa que consume aproximadamente 300 kWh mensual, con una velocidad de 14 millas por horas (6,26 m/s) de promedio anual [3]-[10].

Las partes básicas de un sistema eólico de electricidad son el rotor que es la parte de la turbina que captura la energía del viento, generador o alternador que es el encargado de convertir la energía cinética del rotor en electricidad, la cola que es la cual permite la estabilidad, torre que es la cual determina la altura donde estará y evita las turbulencias, el cableado que es donde se transporta la electricidad y por último los componentes del "sistema de balance" que serían los controladores, inversores y baterías [3].

Adicional a ello, los álabes o aspas de rotación, en lo que respecta al diseño o modelado es un proceso fundamental para el área de generación de electricidad con el viento, ya que, de su diseño depende la cantidad de energía que se podrá obtener del viento, es por esto que es importante realizar de manera minuciosa los cálculos para la creación de los álabes para así generar el torque adecuado para que la turbina pueda generar lo kW requeridos [4].

En el presente todas las energías convencionales están expuestas al precio del barril del petróleo, por ende, si el crudo tiene un precio alto los costos de la energía también se verán afectados y esto como consecuencia lleva a que los recursos como el gas y el carbón también impulsen una subida de precios, ya que estos recursos son los que más se utilizan para la creación de energía convencional. Debido a esto, los países están buscando otras fuentes de energía no convencionales para poder suplir la demanda de energía [5].

En el caso de Ecuador, también se puede mencionar que ha optado por sumarse a estas iniciativas de energías renovables no convencionales (ERNC), cada día la demanda de energía va aumentando no sólo por el aumento de la población, sino también por el incremento de las industrias dentro del país. También se ha encontrado que existe un gasto innecesario de energía como otro factor clave de la creciente demanda y por esto se buscan fuentes de energías amigables con el medio ambiente y que se las pueda aprovechar de manera continua [6].

Hoy en día en el país existen muchos proyectos de creación de energía eléctrica, pero el que más ha destacado, por sus particularidades, ha sido la hidroeléctrica Coca Codo Sinclair, que prometía una capacidad de producción de 1.500 MW y una durabilidad de 50 años, pero estas características no fueron alcanzadas, y actualmente es posible afirmar que la represa no está en su capacidad máxima y presenta importantes falencias

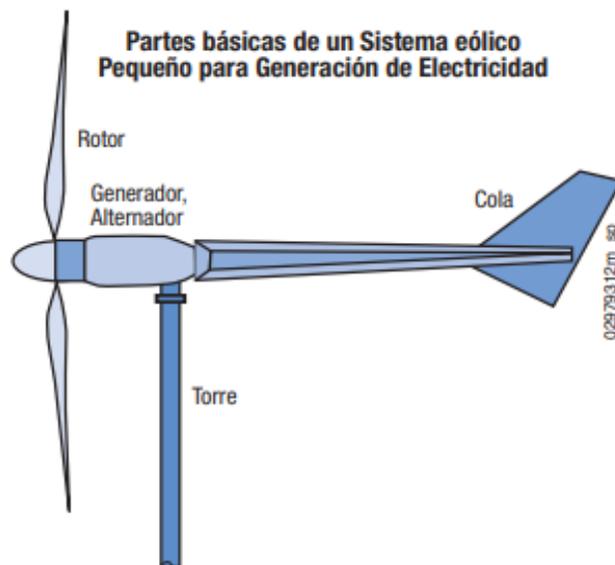
de diseño, operatividad, y producción [7]. Este tipo de resultados conducen a pensar que, en el Ecuador, resulta más factible la propuesta de desarrollo de menor envergadura, donde los posibles errores no tengan impactos tan relevantes en la sociedad [9].

Con estas consideraciones, en este trabajo se expone un análisis de las posibles ventajas y desventajas del uso de la energía eólica para las viviendas, que permitan reducir el consumo tradicional de energía y a su vez reducir el impacto ambiental.

El trabajo está compuesto por cuatro secciones; en la primera se ha dado a conocer una introducción del tema desarrollado, en la segunda se expondrán las fundamentaciones teóricas de las turbinas eólicas y los diseños más destacados en la comunidad científica, en la tercera sección se describe la metodología, y finalmente se exponen los resultados y las conclusiones.

## II. DESARROLLO

La turbina eólica está compuesta por dos o tres alabes cuya composición generalmente es de fibra de vidrio y son de eje horizontal y son denominadas “corriente viento arriba”. El diámetro del rotor es el que determinará la cantidad de energía eléctrica que se puede generar con una turbina que a su vez se ve definido por la turbina y la capacidad de viento que es capaz de interceptar. Finalmente, tanto la cola, el generador y el rotor se encuentran acoplados en la coraza de la turbina, ya que la cola es la encargada de ayudar a la turbina para que esta se encuentre siempre frente al viento [3].



**Fig 1. Generación de Electricidad**

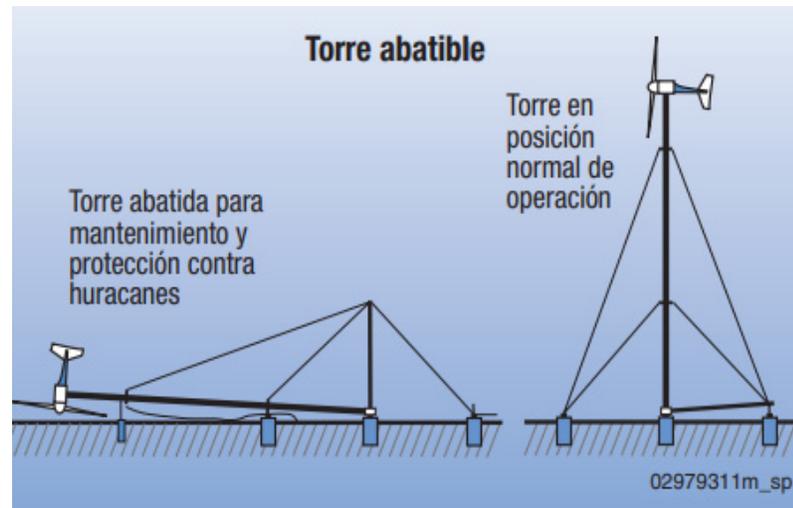
Fuente: [11]

Por otro lado, para la torre se debe tomar en consideración la altura al momento de montar el sistema, ya que por lo general a mayor altura se produce una mayor cantidad de energía y por esto la turbina debe ser montada en una torre. De igual manera la torre ayuda a impedir aquellas turbulencias que pueden ocurrir al nivel del suelo debido a ciertas interrupciones producidas por construcciones, árboles y colinas. Es recomendable que la turbina en una torre sea instalada a 9 metros de cualquier obstáculo ubicado a 90 metros de la torre [3].

Se detallan dos tipos de torres que tienen una mayor aplicación en usos residenciales las cuales son: autoportantes y retenidas. Ambas torres son económicas y se construyen en secciones tubulares o estructurales de acuerdo a los soportes y el diseño para los cables de retención, aun así, el radio adecuado para sostener dichos cables debe ser de al menos o la mitad de la altura de la torre por lo que es necesario contar con suficiente espacio para poder fijarlos [3].

Otra alternativa que se presenta al momento de construir las turbinas eólicas son las torres abatibles, técnicamente son iguales a las torres anteriormente nombradas, pero en este caso la torre es posible llevar hasta el

suelo para el mantenimiento de los rotores, generador y cola, o también para salvaguardar el equipo en caso de huracanes. En este artículo no se contemplará el uso de torres abatibles debido a que será de uso residencial la propuesta y por ende no contará con el espacio suficiente para poder abatir las torres y otro punto es el alto costo de estas [3].



**Fig 2. Sistemas Eólicos Pequeños para Generación de Electricidad**

Fuente: [11]

Dentro de Ecuador existen proyectos que han buscado usar energía renovable en este caso la eólica pero a gran escala como son los proyectos en la Isla de San Cristóbal [6] cuyo objetivo fue generar el 70% de energía y reducir el uso del diésel, otro proyecto es el Villonaco en Loja [6] con el objetivo de mejorar la calidad de vida de los habitantes, también está el proyecto de Membrillo igualmente en Loja [6] con el fin de contribuir al uso y desarrollo de energías renovables preservando las áreas protegidas y por último el proyecto de Huascachaca en Azuay [6] que fue para fomentar más proyectos de este índole. Tomando como ejemplo el proyecto de la isla San Cristóbal donde se utilizó un sistema eólico-diésel con un costo aproximado de 9,8 millones de dólares con tres aerogeneradores de 50 metros de altura y con aspas de 59 metros para producir un total de 2,4 MW [6]. Tomando en cuenta estos antecedentes este artículo pretende encontrar la manera de generar energía eólica de manera accesible para así proveer de energía a un conjunto de casas, oficinas, entre otros, con el máximo aprovechamiento de los recursos y cuidando el medio ambiente.

### III.METODOLOGÍA

El trabajo se realizó de forma cualitativa debido a que este método permite interpretar y evaluar información que se ha obtenido mediante tesis, artículos de revistas y artículos de noticias con el fin de indagar de manera más profunda en el tema a tratar.

Algunos trabajos evalúan los principales aspectos para la creación de un aerogenerador y como se utilizó la energía del aire desde la antigüedad [1]. Otros autores tenían el objetivo de conocer los países que más ocupan energía eólica en sus sistemas de producción de energía [2]. Importantes publicaciones han sido empleadas con el fin de conocer todos los elementos que componen un sistema eólico de generación de electricidad [3]. Otros autores han valorado la importancia del diseño del álabes para el aprovechamiento de las corrientes de aire [4]. Otras investigaciones han mostrado el contexto internacional sobre las energías convencionales y no convencionales [5], que han servido de soporte para importantes estudios en el Ecuador [6]. Algunas propuestas de energía no fueron tan eficientes y arrojaron importantes pérdidas económicas, entre las que se puede mencionar la Coca Codo Sinclair [7], [9].

En la figura 3 se describe el proceso de instalación básica para el uso de una turbina eólica residencial que cumpla con las características de espacio y condiciones favorables para la turbina, también se debe tomar en cuenta

que el cableado sea acorde a las leyes vigentes del país, después que se hayan cumplido los requisitos anteriores se procederá a instalar la turbina eólica para luego una vez montada esta se debe decidir si tendrá un sistema de almacenamiento mediante baterías con un costo más elevado, o si irá directo a la red [8]. En el informe presentado por el Instituto nacional de estadística y censos se utilizó con el fin de saber la energía eléctrica que se consume en los hogares ecuatorianos [10], [11], [12].

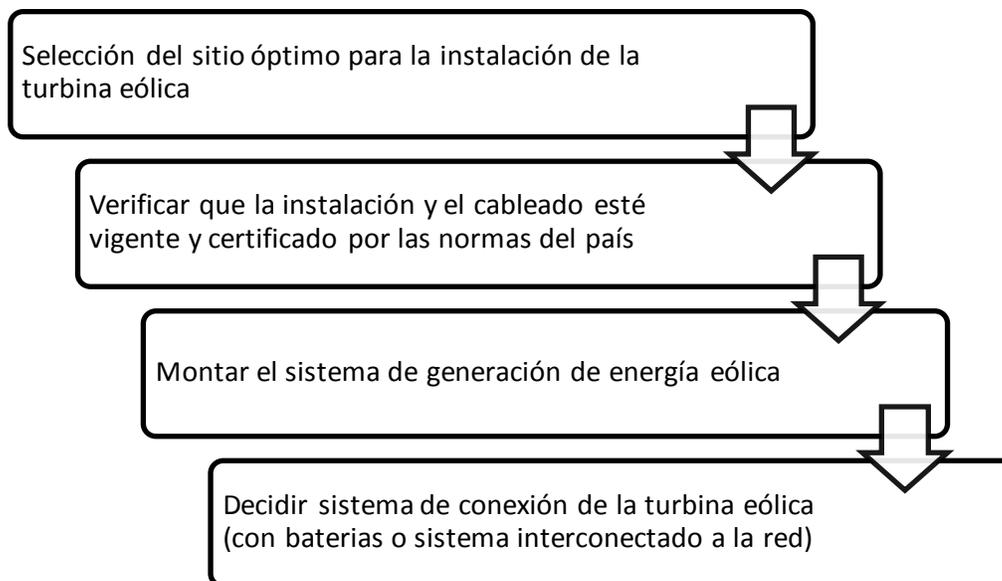


Fig 3. Proceso de instalación de una turbina eólica en el hogar.

#### IV. RESULTADOS

1. Para la implementación de un sistema eólico se debe considerar la obstrucción del viento que causa un árbol o una casa para el funcionamiento efectivo del mismo, por lo que las características de cada torre dependerán de la zona y los obstáculos presentes. En la figura 4 [3] se observa que la distancia que se debe tener en consideración es la altura ( $H$ ) de la casa o del árbol más grande que se encuentre en el sector de la construcción, el inicio de la corriente de aire debe estar a una distancia de  $2H$ , con esto se debe tener en cuenta que las torres deben estar a un rango de  $20H$  respecto al objeto medido y con una altura de  $2H$  para la turbina para que esta no tenga turbulencias y pueda aprovechar el máximo la corriente de aire.

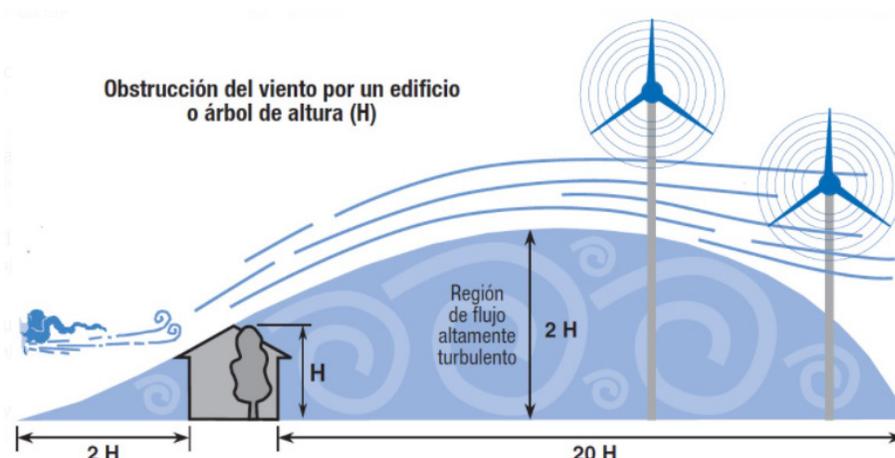


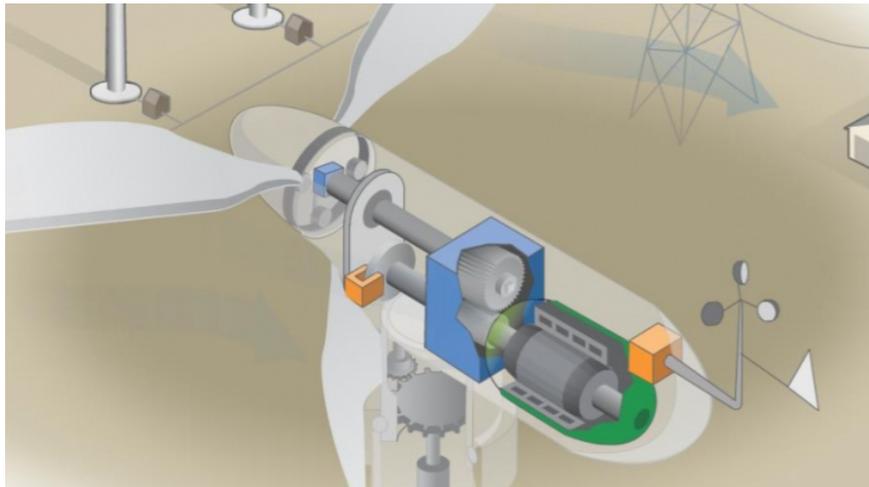
Fig 4. Sistemas Eólicos Pequeños para Generación de Electricidad

Fuente: [11]

2. Entre los materiales óptimos para la construcción de los álabes consiste en la mezcla de carbono y fibra de vidrio esto debido a su baja corrosión, es un material ligero, su alta resistencia a los químicos y su fácil reparación en caso de un desperfecto.

3. En algunos países la polución se ha vuelto un problema cada vez más crítico, sobre todo en países con sobrepoblación donde dichos niveles llegan a superar en demasía los límites aconsejables, por ende, la implementación de energía renovable y limpia permitirá que estos niveles se reduzcan y generará conciencia en el cuidado y preservación del medio ambiente, ya que si no las consecuencias serán aún más graves y notorias para el mundo.

4. En la figura 5 [11] se puede observar la composición interna que permite la generación de energía de una turbina eólica. El principio básico por el cual funciona es que los alabes van girando en función al viento permitiendo captar la energía cinética del mismo haciendo que gire el rotor, el generador recoge la energía cinética y la transforma en eléctrica, el anemómetro es usado para medir la velocidad del viento y la veleta su dirección; y finalmente con la ayuda de un transformador la energía es convertida a un voltaje superior para ser enviada a la red eléctrica o las baterías de almacenaje [12].



**Fig 5. Funcionamiento de turbinas eólicas.**

Fuente: [12]

## REFERENCIAS

- [1] I. Montalvo y J. Cabezas, «Diseño de Prototipo de Aerogenerador con almacenamiento de energía, monitoreado por un sistema SCADA,» Universidad San Francisco de Quito, Quito, 2011.
- [2] E. B, «¿Qué países son los mayores productores de energía eólica?,» elBoletín, p. 1, 12 octubre 2017.
- [3] Departamento de Energía de EE.UU, «Sistemas Eólicos Pequeños para Generación de Electricidad,» 2007.
- [4] K. Molina, D. Ortega, M. Martínez, W. Pinto-Hernández y O. A. E. González, «Modelado de la interacción fluido estructura (FSI) para el diseño de una turbina eólica HAWT,» 2018.
- [5] H. Rudnick Van de Wyngard, «Evolución de Costos ERNC,» Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, 2012.
- [6] D. A. Maldonado Rivera y D. X. De Jerónimo Toromoreno, «Ubicación de un Parque de Energía Eólica en la Costa Ecuatoriana,» Universidad San Francisco de Quito, Quito, 2008.
- [7] B. Miranda, «Coca Codo Sinclair: los problemas de la multimillonaria represa que China construyó en Ecuador,» BBC NEWS, 25 febrero 2019.
- [8] L. G. Carrasco Sanzana y M. A. Mardones Sepúlveda, «Estudio de instalación de un Aerogenerador en el Colegio Concepción Pedro de Valdivia,» Universidad del Bío-Bío, Concepción, 2015.
- [9] A. F. Ugalde Vázquez, «Prohibido Olvidar,» El Mercurio, Cuenca, 2021.
- [10] Instituto nacional de estadística y censos, «Información ambiental en hogares,» Ecuador, 2012.
- [11] Sector Electricidad, «¿Cómo funcionan las turbinas eólicas?,» Sector Electricidad, 2017.
- [12] Popular Mechanics, «¿Cómo funcionan los aerogeneradores?,» World Energy Trade, 2019.

## RESUMEN CURRICULAR



**Ricardo Ayala**, estudiante de Ingeniería Industrial en la Universidad de las Américas, cursando el 7mo semestre. Experiencia en áreas de procesos y proyectos



**Juan Martin Freire**, estudiante de Ingeniería Industrial en la Universidad de las Américas, cursando el 7mo semestre. Experiencia en seguridad industrial y procesos.



**Juan Pablo López**, estudiante de Ingeniería Industrial en la Universidad de las Américas, cursando el 7mo semestre



**Javier Salazar**, estudiante de Ingeniería Industrial en la Universidad de las Américas, cursando el 7mo semestre

## Model for the approximate assessment of nitrogen content in swollen reduced iron ore from single measurements

Oscar Dam G.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0594-6757>

oscar.curmetals@gmail.com

UNEXPO Puerto Ordaz

Fellow- International Iron Metallics Association

(IIMA)

Puerto Ordaz-Venezuela

Recibido (08/02/21), Aceptado (18/02/21)

**Abstract:** A method of calculation has been derived to assess the nitrogen estimated content in iron reduced samples. The method is based on the review of observations and laboratory measurements of relationships between the rate of reduction and the corresponding metallic iron formation during the reduction process. The metallic iron formation has been calculated from relationships that apply to a wide variety of types of ores undergoing reduction under a nitrogen-containing gas mixture in proportions above 50% by volume. The empirical correlations found between the rates of metallization, the sample swelling index, and the equilibrium nitrogen solubility in iron can be used for determined the approximate final content of nitrogen in the reduced samples from the estimated and measured final volume of the reduced specimens. It is necessary to have an accurate analysis of the starting sample as well as the reducibility information.

**Keywords:** Iron ore, nitriding, catastrophic swelling, rate of metallization, reduction degree

## Modelo para la evaluación aproximada del contenido de nitrógeno en mineral de hierro reducido hinchado a partir de mediciones únicas

**Resumen:** Se presenta un método de cálculo concebido para estimar el contenido de nitrógeno disuelto en muestras hierro de reducido. El método se basa la reinterpretación de las observaciones y medida de las relaciones entre la velocidad de reducción y el correspondiente hierro metálico formado durante el proceso de reducción. La formación de hierro metálico ha sido calculada a partir de relaciones que aplican a una gran variedad de tipos de mineral de hierro reducidos con gases reductores que contienen más de un 50% en volumen de nitrógeno. Las correlaciones empíricas encontradas entre la velocidad de metalización, el índice de hinchamiento de las muestras y la solubilidad en equilibrio de nitrógeno en hierro pueden ser utilizadas para determinar en forma aproximada el contenido de nitrógeno en las muestras reducidas a partir de la medición final del volumen de la muestra reducida. Para el uso del modelo desarrollado es necesario disponer del análisis inicial preciso de la muestra, así como de los datos de la reducibilidad de la misma.

**Palabras Clave:** Óxidos de hierro, nitruración, hinchamiento catastrófico, velocidad de metalización, grado de reducción

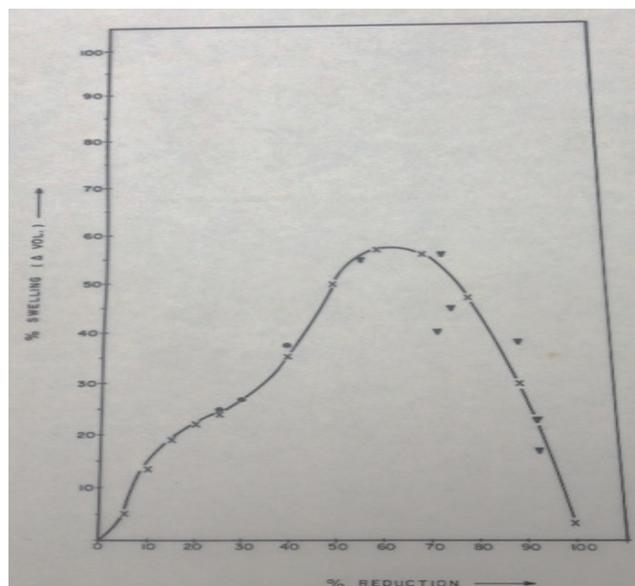


## I. Introduction

The catastrophic swelling of iron oxides undergoing reduction with gas mixtures containing nitrogen gas in proportions higher than 0.5% in volume, has been studied at different temperature levels but has not considered the influence of the nitriding of the freshly formed iron in the magnetite-Wustite reduction step. Recently a close approach to this effect has been undertaken to assess the correlation and effect of the nitrogen absorption rate on the rate of increase of the iron oxide volume while the formation of iron increases. The model presented below is based on the review and reinterpretations of laboratory observations and measurements of empirical relationships between the rate of reduction and the corresponding metallic iron formation during the reduction process. The iron formation has been calculated from relationships that apply to a wide variety of types of ores undergoing reduction under nitrogen-containing gas mixtures in proportions above 50% by volume [1]. The validity of the model has been tested by comparing its calculated values with those obtained in reducibility laboratory tests and by determining the reduced iron sample during the reduction path by using the method determined by Dam and Jeffes [2], which was tested by comparing it with analytical chemistry results showing a 3% error between the actual and computed results analytical errors, which compares with the sampling and analytical errors.

## II. Experimental data

The basic data used in this paper was taken from reference [4] related with hydrogen and carbon monoxide in the order of 30% as the reducing gas and 70% nitrogen gas, and the variables were chosen were the reducibility curves from which the mathematical method described [5] allowed the assessment of the following variables a) metallic iron content, b) the rate of metallic iron formation and c) the swelling index for measuring the sample volume increase all along the reduction path.



**Fig. 1. Catastrophic swelling of reduced iron oxide samples undergoing reduction with 30% H<sub>2</sub>/70% N<sub>2</sub> and 30% CO/70 % N<sub>2</sub> at 900 °C [1].**

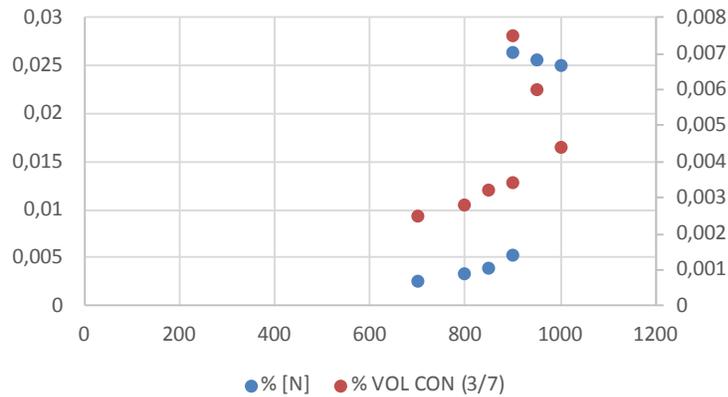
The mathematical expression of the curve shown in Figure I once the reduction degree is converted to (dFe/dt) at 30% reduction, is as follows

$$\Delta \% \text{Volume} = (22.9579 + 72.5247 * PN_2) * \text{EXP}(-b * (dFe/dt)30\%) \quad (1)$$

$$b (\text{min}/\%) = -0.1071 * PN_2 - 0.0115 \quad (2)$$

Where PN<sub>2</sub> is the partial pressure of nitrogen in the reducing gas mixture expressed in a fraction of it, b

is a constant for each nitrogen content in the gas mixture, and  $(dFe/dt)$  is the rate of metallization measure at 30% reduction. From the corresponding graphic, it was possible to obtain the following data a) relationship between the nitrogen content and the reduced iron sample, b) the rate of the volume increase and the reduction temperature. The first correlation was discussed by Dam [5] and show for follow-up purposes in Figure 2, the second correlation was derived from a similar curve described by Agarwal [7], as shown in Figure III in the data analysis section.



**Fig. 2. Nitrogen content (% y axis left) relationship with the reducing temperature (x axis) y and the volume increase of the reduced iron simple (%/1000, y axis right), reducing gas 30% CO/70% N<sub>2</sub> (Source author [3])**

### III. Data analysis

The available data [6] was gathered around the achieved reduction degree at a given time, the metallic iron content at the before mentioned reduction degrees and time the measured volume increase of the sample at the selected percent reduction and time when reducing gas, hydrogen, or carbon monoxide, containing 70% nitrogen by volume at 900 degrees Celsius for the ammonia gas case and 970 degrees Celsius for the case of the use of Indian coals containing nitrogen in the form of ammonia. The conversion of the data from Fig. 1 is shown in Table 1, in this table it is shown the different types of reduction kinetics as shown in Fig. 4, which mathematical expression for the curve shown below in equation 3 for the gas reducing mixture 30% H<sub>2</sub>/70% N<sub>2</sub>.

$$\%Vol = -0.2333t^2 + 8.4435t - 20.436 \quad (3)$$

**Table 1. Reduction time min**

Reduction time min	2	5	6	7	8	10	12	14	18	25	30	45	60	90
%Vol.30%H <sub>2</sub> /70%N <sub>2</sub> . 900 °C	5	10	18	23	28	45	49	59	57	47				
%Vol Coal 970 °C	1							16.1			16,5	16,7	17,5	15.8

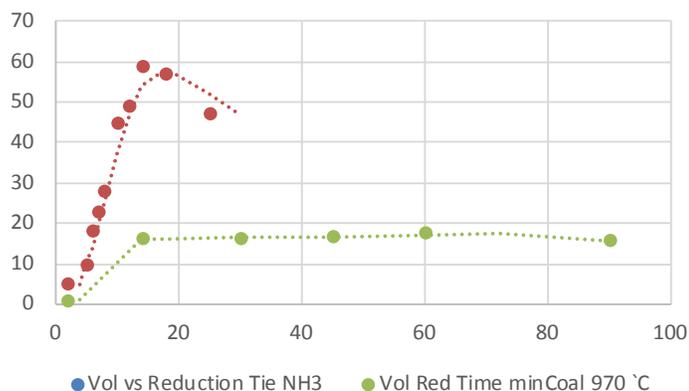


Fig. 3. %Volume increase as a function of the reduction time (min). (Source the author)

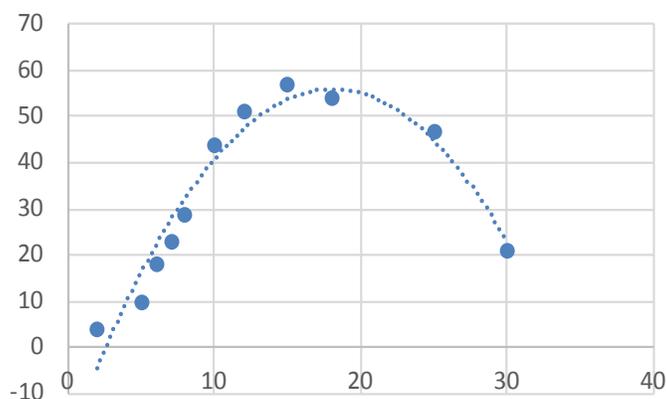


Fig. 4. Rate of % volume increase (swelling) as a function of the reduction time (min) for 30% H<sub>2</sub>/CO and 70% N<sub>2</sub> reducing gases. (Source. Author).

The empirical mathematical expression for estimation of the swelling index (%Vol.) as shown in Figure 5 is expressed as follows

$$(\%Vol) = -0.2333t^2 + 8.4435t - 20.436 \tag{4}$$

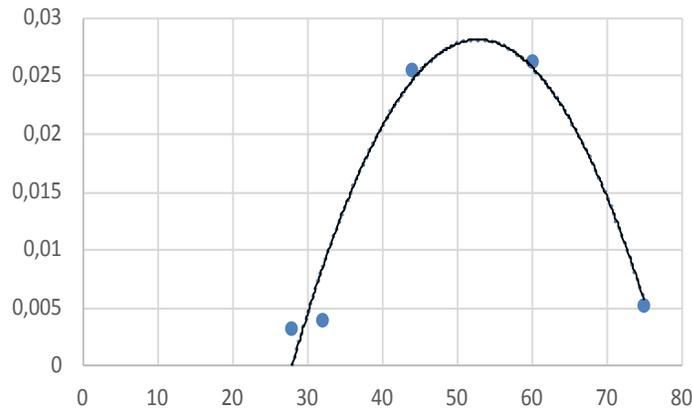
The combination of the relationships shown between the reduction time, the metallic iron formation, the volume increase with the unstable equilibrium nitrogen solubility taken from the FeN diagram, is ten possible to estimate the nitrogen absorbed by reduced iron as the oxide reduction takes place under certain conditions which are from 0,5 % by volume upwards in the reducing mixture. Fig. 5 is shown the relationship between the volume increase and the estimated nitrogen dissolved in the reduced iron expressed as [%N]. The results show in Table 2, are consistent with the results shown in Figure II, obtained from the following mathematical expression (5).

Table 2. Nitrogen dissolved in reduced iron[%N] versus an increase of sample volume

% Vol.	28	32	75	80	44
% [N]	0,003	0,004	0,005	0,0263	0,025
	3	0	3		6

The relationship found between the swelling index (% Volume) and the dissolved nitrogen [%N] in the metallic iron in the reduced sample, will allow the calculation of the iron lattice stress distortion and further effects and represented by the following mathematical equation 5.

$$[\%N] = -5E-05 (\%Vol)^2 + 0.0048(\%Vol) - 0.0989 \quad (5)$$



**Fig. 5. Relationship between the reduced iron % volume expansion (x axis) with the dissolved nitrogen (%) in fresh metallic iron produced.**

#### IV. The calculation method

For the estimation of the amount of dissolved nitrogen in reduced iron the following calculation steps

a. Based on the initial analytical analysis of the sample, and from the continuous reduction curve calculate the % reduction, and the specific reduction velocity known as

$$(d\%R/dt)_{40\%} = 33.6 / (t_{30\%R} - t_{60\%R}) \quad (\text{expressed in } 1/\text{min}) \quad (6)$$

Where  $t_{30\%R}$  = time for 30% reduction, and  $t_{60\%R}$  = time for 60% reduction

b. Once the % reduction (%R), is calculated, proceed to calculate % Metallization, using equation 6 [2]

$$\%M = 1.4286 \%R - 42.86 \quad (\text{assume error } 0,5\%) \quad (7)$$

c. From step b, calculate the %Fe met,

d. Once the metallic Fe is known, proceed to calculate the  $(dFe/dt)$  at a 30% reduction from the new curve %Fe met vs. time. As an approximate value, it can be calculated as in equation 8

$$(dFe/dt)_{30\%R} = 0,83 * (d\%R/dt)_{40\%R} \quad (8)$$

e. As the %N<sub>2</sub> in the mixture is a known value, as well as the  $(dFe/dt)$  at 3%, calculate the (% Delta volume) can be calculated from equations 1 and 2.

f. From step e, use equation 4 for the estimation of the % volume increase (swelling index).

g. Once the % volume increase (swelling index) is calculated, is then possible to estimate the % nitrogen dissolved using equation 5.

#### A. Example of calculation

The initial ore composition is assumed

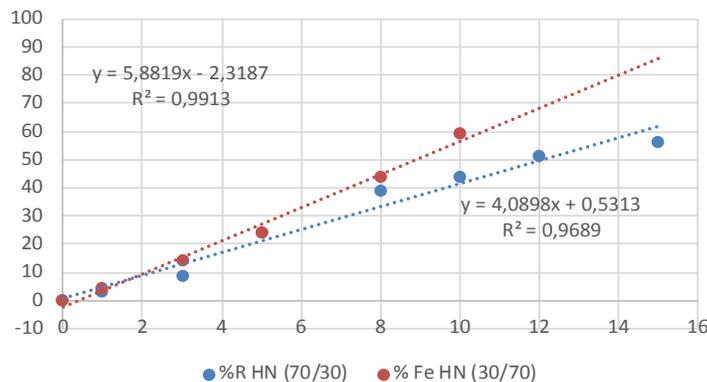
a. %Fe total 65.5, %FeO 0.45, which gives 28.09 %O<sub>2</sub>, reduced to give a %Fe total of 80.58.

b. Meaning a %R of 66.6.

c. The metallization degree is obtained through equation 6, obtaining a value for % M of 51.8.

d. The basic mass balance gives the following complete analysis as Fe met. is 41.77%, Fe+2 is 35.85% and Fe+3 of 2.96%.

e. From the laboratory reducibility test curve, both the rate of reduction (d%R/dT)40% and the rate of metallization (d %M/dt)30% can be obtained as 5.88 %Fe/min.



**Fig. 6. Metallic iron formation(dFe/dt) 30% versus the reduction time for gas reduction with 3% H<sub>2</sub>/70% N<sub>2</sub>.**

### B. The %volume increase (Swelling Index)

The volume increase is obtained from Fig.5 and equation 4, obtaining the value of 49.7%.

For the obtained %volume increase, the expected [%N] in equilibrium with iron is in the order of 0.02% +/- 5% calculation accumulative error at the degree reduction considered.

The % nitrogen dissolved could be used for calculation of the stresses action for the lattice volume distortion.

### V. Results discussion

The empirical relationships found between the rate of metallization (sM/dt) at 30 % reduction, the swelling index (%Volume), and the dissolved nitrogen in iron [N] in reduced samples, provides a useful tool in developing a mathematical model enabling to estimate the nitrogen absorption in the fresh iron produced during the reduction of iron ore samples. and therefore its effect on the swelling mechanism to be deduced from a single weight loss determination

Because of a limited data source on the nitrogen content in direct reduced iron, it is believed that it can be used for the assessment of more reliable measurement of the swelling mechanism of small scale laboratory swelling measurements during thermogravimetric swelling experiments and assessment.

With the estimation of the dissolved nitrogen, it is also possible to calculate the stresses on the reduced iron sample by the desorption of molecular gas during the cooling of the samples which has been overlooked in the measured swelling index according to the approved standard.

### REFERENCES

- [1]M. Kumar, B. Himanshu & S. Kumar. "Reduction and Swelling of Fired Hematite Iron Ore Pellets by Non-coking Coal Fines for Application in Sponge Ironmaking". Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review - MINER PROCESS EXTR METALL REV. 34. 10.1080/08827508.2012.656776. 2012.
- [2]I. Mikko, M. Olli, A. Tuomas, V. Ville-Valtteri, K. Jari, P. Timo & F. Timo. "Dynamic and Isothermal Reduction

Swelling Behaviour of Olivine and Acid Iron Ore Pellets under Simulated Blast Furnace Shaft Conditions”. ISIJ International. 52. 1257-1265. 10.2355/isijinternational.52.1257. 2012.

[3]M. Kumar. “Study of reduction kinetics of iron ore pellets by noncoking coal”. Thesis of Master. National Institute of technology, Rourkela. 2009

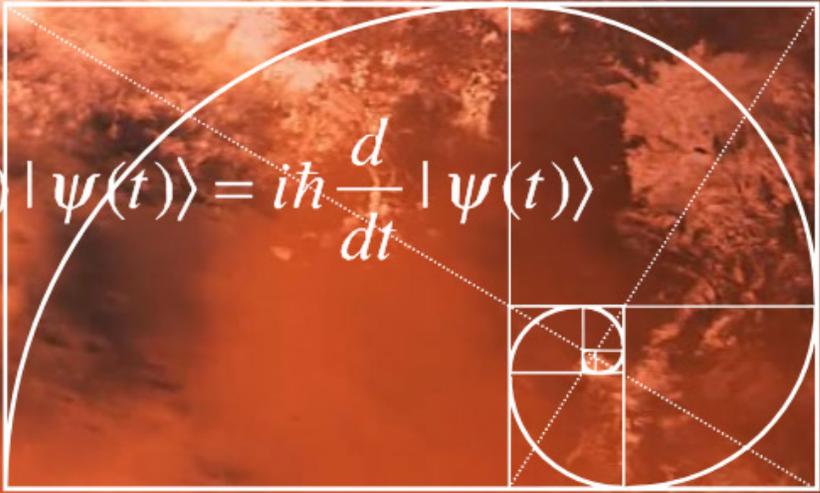
[4]O. Dam. “The Influence of Nitrogen on the Swelling Mechanism of Iron Oxides During Reduction”. PhD Thesis .Univ. of London. 1983.

[5]O. Dam and J. Jeffes. “Model for the Assessment of Chemical Composition of reduced iron ores from single measurements”. Ironmaking and Steelmaking Journal. Vol. 14, N°5. 1987.

[6]O. Dam. “Efecto de la descomposición de gas de amoníaco (NH<sub>3</sub>) sobre el hinchamiento de óxidos de hierro durante reducción”. UCT Journal. Vol 100, 24. May 2020

[7]R. Agarwal and S. Hembram. “To Study the Reduction and Swelling Behavior Iron Ore Pellets”. BSc. Department of Metallurgical and Materials Engineering National Institute Of Technology, Rourkela. May 2013

[8]Z. Chen , C. Zeilstra , J. Van der Stel , J. Sietsma & Y. Yang. “Review and data evaluation for high-temperature reduction of iron oxide particles in suspension”. Ironmaking & Steelmaking. Vol. 47. N°7. pp. 741-747. 2019.



The image features a white rectangular box overlaid on a background of turbulent, orange and red flames. Inside the box, on the left side, is the Schrödinger equation: 
$$H(t) |\psi(t)\rangle = i\hbar \frac{d}{dt} |\psi(t)\rangle$$
 To the right of the equation is a diagram of a golden rectangle. A white spiral line starts from a small square in the bottom-right corner and winds outwards, passing through the corners of the rectangle. Dotted lines represent the diagonals of the rectangle.