

**ÁREA INGENIERÍA MECÁNICA  
Y CIENCIAS DE LA  
COMPUTACIÓN  
TRABAJOS COMPLETOS**

## **ÍNDICE**

01TCMC – Algoritmo Bioinspirado en Murciélagos Aplicado a Optimización en redes MPLS .....	737
02TCMC - Curvas de dispersión aplicadas a la propagación de ondas guiadas en estructuras de sección circular hueca .....	746
03TCMC - Inversiones en tecnología valuadas mediante Opciones Reales. Nuevo software para pagos mediante dispositivos móviles. ....	756
04TCMC - Geometría computacional y análisis biomecánico de una intervención endovascular en aneurismas cerebrales mediante láminas delgadas de Kirchoff-Love de espesor variable.....	764
05TCMC - Estudio de durabilidad del acero al carbono aisi 1045 afectado por drenaje ácido.....	773

## **01TCMC – Algoritmo Bioinspirado en Murciélagos Aplicado a Optimización en redes MPLS**

### **Bio-Inspired Bats Algorithm Applied to MPLS Networks Optimization**

Javier Carletto<sup>1</sup>, Mercedes Carnero<sup>2</sup>, Javier Díaz<sup>3</sup>, José Hernández<sup>2</sup>

1. Universidad Nacional de San Luis – Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias. Ruta Prov. 55 Ext. Norte – Villa Mercedes – San Luis.
2. Universidad Nacional de Río Cuarto – Facultad de Ingeniería. Ruta Nac. 36 – Km. 601 Río Cuarto – Córdoba. 3. Universidad Nacional de La Plata – Facultad de Informática. Calle 50 y 120 La Plata – Buenos Aires.  
E-mail: javiercarletto@gmail.com

#### **Resumen**

El abrupto crecimiento del tráfico presente en las redes convergentes actuales, trae como consecuencia la implementación de nuevas tecnologías que permiten ofrecer a los usuarios mayores anchos de banda para lo cual es necesario realizar una distribución óptima del tráfico, tomando algún criterio de desempeño y teniendo en cuenta la elasticidad del flujo que involucra atender tráficos tan disímiles como voz, video, sonido, datos, entre otros. Además, una distribución que considere estos aspectos permite disminuir la congestión en algunos puntos de la red, incrementando su rendimiento global. MPLS (conmutación de etiquetas multiprotocolo) se ha convertido en una tecnología eficaz en la solución a estos inconvenientes, aunque el problema de la selección de la mejor ruta y de la distribución de tráfico no solo sigue existiendo, sino que exige nuevas propuestas de optimización del enrutamiento. Se presenta en este trabajo el diseño de un algoritmo inspirado en el comportamiento de murciélagos con el objetivo de distribuir los requerimientos en los enlaces disponibles de una red minimizando el costo de enrutamiento, al tiempo que se satisfacen restricciones en cuanto a demanda y capacidad de cada enlace. Se presenta la descripción y modelado del problema, la estructura de la propuesta de solución y resultados comparativos, que demuestran un buen desempeño del algoritmo.

Palabras clave: MPLS, Optimización, Algoritmo de Murciélago.

#### **Abstract**

Nowadays, the sudden growth of traffic in current convergent networks results in the implementation of new technologies that allow users to offer greater bandwidths for which it is necessary to make an optimal distribution of traffic, considering some performance criteria and taking into account elasticity of flow that implies attending very dissimilar traffic such as voice, video, sound or data. In addition, a distribution that considers these aspects allows reducing congestion in some links of the network, increasing its overall performance. MPLS (Multiprotocol Label Switching) has become an effective technology to solve these problems, although the problem of selecting the best route and distributing traffic remains and requires new proposals for optimization of the routing. The aim of this work is to propose a strategy inspired by the behavior of bats for optimal distribution of the requirements on available links of a network, minimizing the cost of routing, while satisfying constraints in terms of demand and capacity of each link. A description and modeling of the problem, the structure of the proposed solution and comparative results are presented, demonstrating good performance of the algorithm.

Keywords: MPLS, Optimization, Bat Algorithm

## 1. Introducción

Las redes de todo el mundo que forman Internet han sufrido, y sufren en la actualidad, un crecimiento vertiginoso fundamentalmente en el número de usuarios que la utilizan, y por consiguiente un aumento del tráfico de datos debido a los servicios que se van agregando a las redes convergentes, tales como VoIP, TV sobre Internet, radio sobre Internet, video *streaming* multi-punto, entre otros. Esto trae como consecuencia la demanda cada vez mayor de nuevos y mejores servicios que Internet debe ofrecer, lo que obliga a plantearse la implementación de nuevas tecnologías que permitan disponer mayores anchos de banda.

El algoritmo típico de enrutamiento que determina la “ruta más corta” puede producir el congestiónamiento de ciertos enlaces, mientras existen otras rutas disponibles que no son utilizadas. Este tipo de enrutamiento provoca demoras impredecibles y pérdida de datos. Si bien esto no ha representado un problema para las aplicaciones tradicionales de Internet, tales como web, correo electrónico, transferencia de archivos y similares, la nueva generación de aplicaciones, exige alto rendimiento, mayor ancho de banda y baja latencia (Hernández Camacho, 2015).

El objetivo básico de la Ingeniería de Tráfico (Traffic Engineering, IE) es adaptar los flujos de tráfico a los recursos físicos de la red. La idea es equilibrar de forma óptima la utilización de esos recursos, de manera que no haya algunos que están sobre-utilizados, creando cuellos de botella, mientras otros puedan estar subutilizados (Delfino *et al.*, 2006).

Existen varios mecanismos para optimizar el rendimiento que incluyen el modelado, medición, caracterización y el control de tráfico en una red para obtener objetivos específicos de rendimiento y ofrecer servicios competitivos a los clientes. Uno de estos mecanismos de transporte de datos estándar, creado por la IETF y definido en el RFC 3031, se la conoce como la conmutación de etiquetas multiprotocolo comúnmente denominada MPLS por sus siglas en inglés, MultiProtocol Label Switching (Rosen *et al.*, 2001)

Las redes de comunicaciones han evolucionado hacia esta infraestructura capaz de transmitir flujo de información multiservicio sobre una misma plataforma. Por ejemplo, es posible transmitir datos, voz y video en la misma infraestructura basada en IP, Debido a las

características específicas de cada tipo de tráfico, la red debe tratar cada uno de ellos de manera diferencial para garantizar una calidad de servicio demandada por los usuarios (Cruz *et al.*, 2013).

MPLS constituye un elemento clave en el despliegue de técnicas de Ingeniería de Tráfico ya que su idea básica es separar completamente el plano de control (enrutamiento) del plano de datos (reenvío de paquetes) mientras mantiene la compatibilidad con las infraestructuras de red IP existentes (Hernández Camacho, 2015).

En una red MPLS, los enrutadores de borde son conocidos como Label Edge Routers (LER) y son los enrutadores de entrada, próximo a la fuente, y de salida, en el lado de destino del dominio MPLS. Los enrutadores internos al dominio MPLS son conocidos como Label Switch Routers (LSR). Para la transmisión, se genera una ruta entre los LERs correspondientes para reenviar paquetes etiquetados a través de los LSRs, conocida como Label Switched Path (LSP), a través de la cual fluyen los paquetes sobre la base de sus etiquetas en lugar de utilizar la estrategia tradicional de utilizar la información provista en los encabezados de los paquetes IP.

Una de las tareas de la ingeniería de tráfico consiste en seleccionar LSPs adecuados para un correcto equilibrio de carga en el sistema, disminuyendo la congestión y maximizando la utilización de los enlaces. Los protocolos de enrutamiento juegan un papel vital para el cálculo de rutas óptimas en la entidad MPLS TE, donde se pueden utilizar varios algoritmos para el cálculo de rutas óptimas, dependiendo de las funciones objetivo (Masood *et al.*, 2018),

MPLS integra las funciones de administración de tráfico de capa 2 con la escalabilidad y flexibilidad del enrutamiento de capa 3 (Gerometa, 2012), o como lo expresa Hernández Camacho (2015) combina la inteligencia del enrutamiento con la velocidad de la conmutación.

En los últimos años, MPLS ha obtenido una reputación notable debido a su soporte para técnicas de conmutación mixtas, ofreciendo varios parámetros de Calidad de Servicio (QoS) sin comprometer los recursos de la red. El enrutamiento eficiente es el componente clave de la gestión de la ingeniería de tráfico en redes MPLS, que satisface la QoS con una gestión eficaz de los recursos. Las redes MPLS en lugar de usar datagramas IP tradicionales, usan paquetes etiquetados de corta longitud dentro del

dominio de la red evitando la búsqueda compleja en las tablas de enrutamiento (Masood *et al.*, 2018).

MPLS puede optimizar los recursos de la red y proporcionar un tratamiento de calidad de servicio al tráfico, por lo que se ha convertido en el estándar de facto para la infraestructura de red central. Es escalable, está orientado a la conexión e independiente de cualquier tecnología de transporte de reenvío de paquetes. También reduce la búsqueda de direcciones IP en cada enrutador y minimiza la latencia de la red. Mejora el reenvío de paquetes en una red y supera las desventajas del reenvío IP (PremKumar y Saminadan, 2017) Una red MPLS puede decidir la mejor ruta para cada flujo, asignar múltiples servicios en la misma red y tratar cada tráfico según los requisitos de QoS (Ridwan *et al.*, 2019).

El mecanismo MPLS puede canalizar múltiples tipos de tráfico a través de la red central. El túnel es la ruta por donde fluye el tráfico en la red central MPLS. La tunelización es una herramienta poderosa porque solo los enrutadores de entrada y salida necesitan conocer el contenido del tráfico transportado a través del túnel. Los detalles están ocultos a los enrutadores en el núcleo. Con el uso de túneles MPLS, el tráfico se puede enrutar explícitamente siguiendo las políticas de tráfico especificadas (Ridwan *et al.*, 2019)

Sin embargo, más allá del avance impuesto por MPLS, el problema de la optimización de la selección de las rutas para dirigir el flujo de una determinada demanda sigue existiendo y es un problema complejo de abordar.

En este sentido han sido aplicadas distintas técnicas para encontrar soluciones óptimas a este problema y se pueden utilizar varios algoritmos para el cálculo de dichas rutas y con diferentes funciones objetivo. En general, esto implica resolver un problema de optimización combinatorio considerado NP-hard (Barabas *et al.*, 2012; Masood *et al.*, 2017; Masood *et al.*, 2018).

Recientemente, las herramientas de optimización basadas en aplicaciones de inteligencia artificial han obtenido un reconocimiento importante por resolver problemas de optimización en diferentes campos. Estas herramientas o técnicas de optimización se desarrollan en varios enfoques entre los que se cuentan los algoritmos bioinspirados, basados en la genética o inspirados en el estudio de comportamiento de

animales que trabajan en enjambres para conseguir alimento (Gero 1987; Masood *et al.*, 2018). Estos métodos son agrupados dentro de las estrategias heurísticas y metaheurísticas.

Las heurísticas son algoritmos de optimización estocástica que se utilizan para resolver problemas de alta complejidad computacional. En este tipo de problemas, más fáciles de enunciar que de resolver, los algoritmos exactos pueden tener bajo rendimiento, cuando no incapacidad, para proporcionar soluciones en tiempos aceptables. Los algoritmos que implementan heurísticas proveen soluciones de alta calidad, aunque no necesariamente la óptima, con un costo computacional razonable. Las estrategias generales que se utilizan para guiar heurísticas, son denominadas metaheurísticas. “Los procedimientos metaheurísticos son una clase de métodos aproximados” que están diseñados para resolver problemas de difícil optimización combinatoria, en los que los heurísticos clásicos no son efectivos” (Osman *et al.*, 1995).

Existen varios antecedentes de aplicaciones de estas técnicas en optimización de redes MPLS. En Cruz *et al.* (2013) se aplicó una estrategia basada en Búsqueda Tabú para resolver el problema de un multicamino restringido de mínimo costo en redes MPLS con buenos resultados en cuanto a la calidad de las soluciones. El-Sayed *et al.* (2013) aplicaron técnicas evolutivas para minimizar los costos de enrutamiento y optimizar el equilibrio de carga considerando varias restricciones, incluidas las capacidades de enlace, la longitud de la ruta, el número de divisiones de tráfico para cada demanda y el número total de rutas. Onety *et al.* (2013) presentaron un algoritmo genético para la optimización de múltiples índices de calidad de servicio de redes MPLS. Masood *et al.* (2018), propusieron un modelo de optimización para redes MPLS e implementaron un algoritmo inspirado en la ecolocalización de delfines (DEA) para el cálculo de la ruta óptima. Masood *et al.* (2019), propusieron una versión novedosa, con modificaciones en la estrategia de aprendizaje elitista (ELS), en optimización por enjambre de partículas (PSO ) que no sólo resuelve el problema de exploración existente en PSO, sino que también produce soluciones óptimas con tasas de convergencia eficientes para diferentes escalas de red MPLS / GMPLS.

El algoritmo de murciélago (Bat Algorithm, BA) ha sido propuesto por Yang, (2010) y fue presentada como una metaheurística novedosa, inspirada en el mecanismo de ecolocalización de los quirópteros y, según su autor, generalmente

superior a la Optimización de Enjambre de Partículas y los Algoritmos Genéticos (GA). Gagnon *et al.* (2020) ha cuestionado tal afirmación sosteniendo que, en realidad, no es un modelo perfecto y sugiriendo que resulta un híbrido entre las técnicas de optimización por enjambre de partículas y recocido simulado. Por otra parte, Lin (2018) propuso la utilización de un algoritmo basado en BAT para asignación de recursos en redes definidas por software (SDN)

El objetivo del presente trabajo es diseñar un algoritmo para minimizar el costo de ruteo, respetando las restricciones de satisfacción de demanda y de capacidad de los enlaces, aplicando una técnica bio-inspirada en murciélagos.

El trabajo se estructura como sigue: en la sección 2 se describe el problema a resolver, la representación de las soluciones y el método de optimización propuesto. En la sección 3 se dan detalles de la parametrización del algoritmo, su aplicación en un ejemplo concreto, los resultados obtenidos y su comparación con los arrojados por una búsqueda tabú. Finalmente se establecen, en la sección 4, las conclusiones de este trabajo.

## 2. Materiales y métodos

El problema de la optimización a considerar es encontrar la mejor ruta para una determinada secuencia de flujo de datos que llegan a una red multiservicio, de tal manera que se minimice algún criterio de desempeño. El abordaje de dicho problema, supone un modelo para representar la red y una función objetivo a optimizar. Se han considerado varias alternativas, tanto mono objetivo como multiobjetivo teniendo en cuenta diferentes factores tales como la disponibilidad y utilización del ancho de banda, medición de congestión a través de diferentes métricas, tipo de tráfico o calidad de servicio requerido. Más allá de la mayor o menor complejidad que pueda imponerse a la función objetivo, el problema puede considerarse una variante del problema general de enrutamiento (Reis, 2019).

Se considera la topología de una red MPLS modelada mediante un grafo  $G=(V, E)$  donde  $V$  es el conjunto de  $n$  nodos que representan los enrutadores en la red mientras que  $E$  es el conjunto de los  $m$  enlaces entre nodos de  $G$ . Cada enlace tiene un costo  $c_e$  y una capacidad  $Cap_e$  asociados.

Un requerimiento es una solicitud de ancho de banda asegurado entre dos puntos de la red. Por

tanto un requerimiento  $t$  será especificado mediante una terna  $t=(S_t, D_t, d_t)$  donde  $S_t$  es el nodo origen,  $D_t$  el nodo destino y  $d_t$  la demanda requerida o el flujo en *unidades/seg* que se desea transportar entre esos nodos. Se supone que entre el nodo origen y destino existe al menos un camino (de uno o más enlaces) entre los cuales se repartirá el flujo solicitado. El conjunto de los caminos entre  $S_t$  y  $D_t$  se denomina  $P_t$ .

La figura 1 muestra un ejemplo de requerimiento entre un origen  $S_t$  y un destino  $D_t$ . Se han identificado dos caminos posibles para el flujo entre los nodos extremos. El primero, identificado como  $p_1$  atraviesa los enlaces  $e_1, e_2, e_4$  y  $e_5$ . Otro camino, de menor número de saltos, está identificado como  $p_2$  y utiliza los enlaces  $e_1, e_3, e_5$ . En este ejemplo, el conjunto de los caminos para el requerimiento  $t=(S_t, D_t, d_t)$  es  $P_t=\{p_1, p_2\}$  y  $L_t=2$  (la cantidad de caminos posibles).

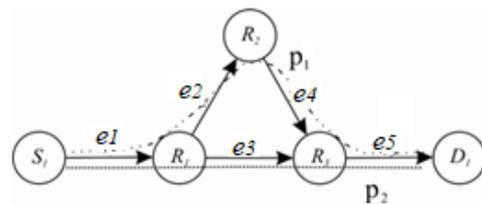


Figura 1: Dos caminos posibles para un requerimiento de tráfico

El costo total de un camino  $p$  para una solicitud  $t$  se puede calcular como:

$$costo_{p,t} = \sum_{e \in E} c_e a_{p,t,e} \quad (1)$$

Donde  $c_e$  corresponde al costo del enlace  $e$  y  $a_{p,t,e}$  una variable binaria cuyo valor es 1 en el caso del que camino  $p$  de la solicitud  $t$  use el enlace  $e$  y 0 en caso contrario.

Si  $x_{p,t}$  es la porción de tráfico de la solicitud  $t$  que se enruta por el camino  $p$ , se debe considerar que la demanda de dicha solicitud debe ser satisfecha, es decir, que debe cumplirse:

$$\sum_{p=1}^{L_t} x_{p,t} = d_t \quad \forall t \in T \quad (2)$$

El costo total del sistema está dado por:

$$z = \sum_{t \in T} \sum_{l=1}^{L_t} \text{costo}_{p,t} \cdot x_{p,t} \quad (3)$$

Por lo que la formulación matemática del problema se puede representar por:

$$\text{s.a.} \quad \min z \quad (4)$$

$$\sum_{p=1}^{L_t} x_{p,t} = d_t \quad \forall t \in T \quad (5)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{l=1}^{L_t} x_{p,t} a_{p,t,e} < \text{Cap}_e \quad (6)$$

La ecuación 5 exige el cumplimiento de la demanda mientras la ecuación 6 representa la restricción de la capacidad del enlace, es decir, que la suma de los flujos asignados a cada enlace no puede superar su capacidad de transmisión.

#### Representación de una solución

Una solución a un requerimiento consiste en la descomposición del ancho de banda requerido en los caminos posibles del conjunto  $P_r$ . Las demandas se representan mediante la matriz  $D$  cuyos elementos no nulos especifican la demanda en cada enlace. Una propuesta de solución, entonces, consiste en un conjunto de vectores, en general de diferente longitud, que representan los caminos alternativos para transportar el tráfico demandado. La demanda, por lo tanto, se divide entre los caminos alternativos elegidos.

Considérese el ejemplo de la figura 2. En ella se presenta una red cuya matriz de adyacencia es  $A$  y cuya matriz de demanda es  $D$ . Por lo anteriormente dicho, existen tres solicitudes de tráfico en los enlaces (1,2) (1,4) y (2,3). De 10 *u/seg*, 20 *u/seg* y 10 *u/seg* respectivamente. Utilizando la nomenclatura ya definida, el conjunto de solicitudes es  $T=\{t_1, t_2, t_3\}$  con  $t_1=(1,2,10)$ ,  $t_2=(1,4,20)$  y  $t_3=(2,3,10)$ .

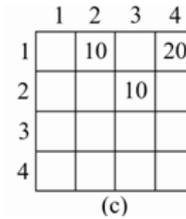
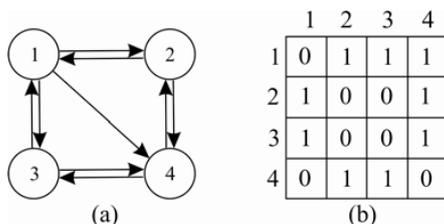


Figura 2: (a) Una red de ejemplo (b) Matriz de adyacencia (c) Matriz de Demanda

Tomando el primer requerimiento, se debe transportar un flujo de 10 *u/seg* entre los nodos 1 y 2. Los caminos posibles entre los nodos son:  $p_{1,t1}=\{(1,2)\}$ ,  $p_{2,t1}=\{(1,3) (3,4) (4,2)\}$  y  $p_{3,t1}=\{(1,4) (4,2)\}$ .

Una propuesta de solución puede ser descomponer el flujo de 10 *u/seg* en dos caminos de 5 *u/seg*. En otras palabras, la mitad del flujo pasará por el enlace (1,2) y la otra mitad por los enlaces (1,3) (3,4) y (4,2). El camino  $p_3$  no se utiliza en esta propuesta de distribución. Tal situación se muestra en la figura 3.

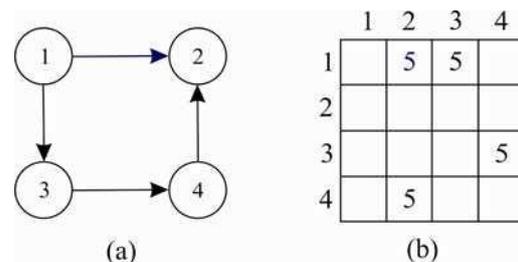


Figura 3: (a) Dos caminos en la red. (b) Distribución de flujo para el requerimiento t1

La propuesta para este requerimiento se representa mediante un vector de longitud  $L_r$  donde cada componente indica el flujo asignado a cada camino en  $P_r$ . En este ejemplo, el vector será:

$$x_{t1} = [x_{p1,t1} \ x_{p2,t1} \ x_{p3,t1}] = [5 \ 5 \ 0] \quad (7)$$

Trabajando de manera similar para los otros requerimientos de tráfico se tiene que para  $t_2=(1,4,20)$ , pueden identificarse los caminos  $p_{1,t2}=\{(1,2) (2,4)\}$ ,  $p_{2,t2}=\{(1,3) (3,4)\}$  y  $p_{3,t2}=\{(1,4)\}$ , y en el tercer y último requerimiento,  $t_3=(1,4,10)$  los caminos posibles son  $p_{1,t3}=\{(2,1) (1,3)\}$ ,  $p_{2,t3}=\{(2,1) (1,4) (4,3)\}$  y  $p_{3,t3}=\{(2,4) (4,3)\}$

Una solución estará representada por un conjunto de vectores: uno por cada uno de los requerimientos de tráfico que se hallan explicitados en la matriz de demanda. Si se considera que el conjunto de requerimientos  $T$  tiene una cardinalidad igual a  $r$ , entonces la

solución es un conjunto de  $r$  vectores de dimensión  $L_{t_i}, \forall i = 1:r$ .

$$x = \left[ \begin{array}{l} (x_{p1,t1}, x_{p2,t1}, \dots, x_{pL_{t1},t1}) \dots \\ (x_{p1,t2}, x_{p2,t2}, \dots, x_{pL_{t2},t2}) \dots \\ (x_{p1,tr}, x_{p2,tr}, \dots, x_{pL_{tr},tr}) \end{array} \right] \quad (8)$$

La ecuación 8 muestra como  $x$  representa una solución al problema. En la siguiente sección se discuten aspectos relacionados con la estrategia de optimización implementada en este trabajo: el algoritmo de murciélagos.

#### Algoritmo de murciélagos

La inteligencia de enjambre es una disciplina, dentro del campo de la inteligencia artificial, que trata de imitar el comportamiento de seres vivos basado en las interacciones entre los integrantes de un enjambre tanto con sus pares como con el ambiente para conseguir un objetivo común. Generalmente basado en acciones simples, individuales y 742oord.inadas a través de una fuerte comunicación mantienen, en el proceso, un control descentralizado y una organización colectiva.

Los algoritmos basados en estas inteligencias se inspiran en el conocimiento del comportamiento biológico de enjambres, especialmente insectos y otros animales que en sus comportamientos forman colonias o racimos. Los científicos e investigadores están muy interesados en imitar el comportamiento de estas entidades inteligentes para formar inteligencia colectiva formulando ecuaciones matemáticas paso a paso o construyendo algoritmos avanzados para resolver problemas reales (Okwu y Tartibu, 2021). Entre los algoritmos bioinspirados más utilizados se encuentran los inspirados en abejas, colonia de hormigas, mariposas, saltamontes, lobos grises, etc.

Dentro de este conjunto de metaheurísticas basado en población se encuentra el algoritmo de murciélagos (Bat Algorithm, BA), una técnica propuesta por Yang (2010) basado en el comportamiento de un conjunto de estos pequeños animales en búsqueda de alimento utilizando su capacidad de ecolocalización (EL). Si bien la técnica ha recibido algunos cuestionamientos Gagnon *et al.* (2020), hay reportes de su utilización para la toma rápida de decisiones y la resolución de problemas complejos en diferentes campos de aplicación tan disímiles como ingeniería, negocios o transporte (Okwu y Tartibu, 2021).

Los murciélagos emiten sonidos de diferente amplitud y frecuencia, escuchan el eco reflejado por los objetos circundantes y pueden distinguir la presa de otros obstáculos y predadores. A medida que se acerca a la presa, el volumen del sonido disminuye y la frecuencia de los pulsos emitidos aumenta. El patrón de vuelo de los animales es complejo y la técnica de optimización es una simplificación de estas observaciones de la naturaleza, aunque, aun así, la metáfora sigue siendo válida. Para simular el comportamiento por ecolocalización y usarla en el diseño del algoritmo, Yang (2010) propuso una serie de reglas: para estimar la distancia, el murciélagos utiliza su habilidad de EL y, para cazar, vuela a cierta velocidad  $v_i$  en una posición  $x_i$  emitiendo ultrasonido con frecuencia en un rango  $[f_{min}, f_{max}]$  con una tasa de pulsos  $r_i$  y con un volumen máximo  $A_0$  que puede variar hasta un valor mínimo  $A_{min}$

Para simular una nueva posición (nueva solución potencial) deben ajustarse los valores de frecuencia, volumen y velocidad.

$$f_i = f_{min} + (f_{max} - f_{min}) \beta \quad (9)$$

$$v_i^t = v_i^{t-1} + (x_i^t - x^*) f_i \quad (10)$$

$$x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t \quad (11)$$

donde  $x_i$  representa la posición del murciélagos en el espacio de búsqueda,  $v_i$  es la velocidad y  $f_i$  la frecuencia de los pulsos emitidos, mientras que  $\beta$  es un vector aleatorio en el rango (0,1).  $X^*$  es la mejor solución obtenida hasta ahora. Las dimensiones del problema de optimización determinarán los valores límites de la frecuencia. En la primera iteración se le asigna una frecuencia aleatoria a cada murciélagos de la población y ellos se mueven usando sus nuevas velocidades, acorde con las ecuaciones 9,10 y 11. Además, cuando los individuos se acercan a  $x^*$  el volumen disminuye y la tasa de pulsos  $r_i$  se incrementa.

A medida que van transcurriendo las generaciones, en un tiempo  $t$ , cuando un individuo se acerca a la solución  $x^*$  el volumen del sonido disminuye y la tasa de pulsos se incrementa tal como lo muestran las ecuaciones 12 y 13 donde  $\alpha$  y  $\gamma$  son parámetros del problema.

$$A_i^t = \alpha A_i^{t-1} \quad (12)$$

$$r_i^t = r_i^0 [1 - \exp(-\gamma(t-1))] \quad (13)$$

donde  $r_i^0$  representa la tasa de pulsos inicial.

Se muestra a continuación un pseudocódigo del algoritmo propuesto en (Umar y Rashid, 2021)

**Carga parámetros iniciales**

*P* (Tamaño de la población)

*T* (Máximo número de iteraciones)

**Definir posición  $x_i$  de cada murciélago** (generada aleatoriamente)

**Definir  $f_i$**  para cada murciélago en la posición  $x_i$

**Definir** para cada murciélago los valores de  $v_i$ ,  $A_i$  y  $r_i$

**Definir dimensiones del problema:  $d$**

**Definir la función objetivo  $f(x_1, x_2, \dots, x_d)$**

**Repetir**

**Para cada murciélago**

Crear nuevas posiciones (usando ec 9 a 11)

Seleccionar un valor aleatorio  $rnd$

**si  $rnd > r_i$**

$x_b$  = solución entre las mejores

$x_b$  = solución cercana a  $x_b$

**sino**

$x_b$  = "vuelo aleatorio" desde  $x_b$

**fin\_si**

**si  $rnd < A_i$  &  $f(x_i) < f(x^*)$**

$x^* = x_b$

incrementar  $r_i$

reducir  $A_i$

**fin\_si**

**fin\_for**

**hasta** ( $t \neq T$ )

Dada la naturaleza estocástica del mecanismo utilizado, se realizaron 1000 ejecuciones del algoritmo, obteniéndose el mínimo global en el 55% de los casos y una solución muy próxima a dicho mínimo, sólo una unidad de costo más, en el 40% de los casos. Puede afirmarse, dado que se utilizaron vectores de números enteros, que el 95% de los ensayos obtiene el mínimo global. Para observar la convergencia del algoritmo se capturaron los mejores fitness obtenido en cada una de las iteraciones. La figura 4 muestra la evolución de la función de ajuste al cabo de 50 iteraciones para un caso en el cual se obtiene el óptimo global al problema.

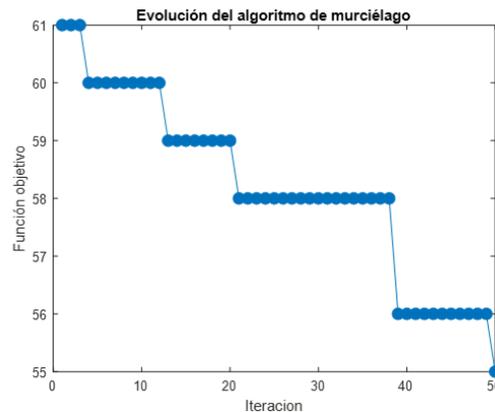


Figura 4 Evolución de la función de ajuste

**3. Resultados y Discusión**

Se ha tomado el ejemplo planteado en la figura 2 de una red con 4 nodos, 12 enlaces posibles, y 9 enlaces activos, uno de ellos unidireccional. Al igual que en (Cruz *et al.*, 2013) se han considerado para todos los enlaces, un costo unitario y una capacidad de 15 u/seg. Se ejecutó el algoritmo de murciélago en Matlab 2020 sobre un equipamiento dotado con un procesador AMD Ryzen 7 2700X con 8 núcleos. 16 GB de RAM con SO Windows 10 de 64 bits. Los parámetros generales del algoritmo se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros del algoritmo de murciélago implementado.

Parámetro	Valor
Tamaño de la población	50
Número máximo de iteraciones	50
Frecuencia mínima	0
Frecuencia máxima	1
Volumen A0	0.99
Tasa de pulsos inicial	0.5
Gamma	0.5

Para poder realizar la comparación entre la técnica propuesta en relación a búsqueda tabú, reportada en (Cruz *et al.*, 2013) se han calculado los mismos estadísticos y tabulado tal como se muestra en la tabla 2.

Como puede apreciarse, el algoritmo de murciélago posee un buen desempeño respecto de la calidad de los resultados. Aunque no se han reportado tiempos en la referencia, los valores obtenidos con la técnica propuesta resultan muy competitivos puesto que en todos los casos se han obtenido las soluciones en tiempos inferiores a 1 seg.

Tabla 2. Comparación Búsqueda Tabú – BA

Estadístico	Búsqueda Tabú	Algoritmo de murciélago
Mínimo	55	55
Media	56.75	55.59
Desvío	0.57	0.92
Coef. Variación	1.01	1.66

#### 4. Conclusiones

La optimización de redes multiservicio permite la distribución de flujo teniendo en cuenta el tipo de tráfico que debe enrutarse. Se ha propuesto una estrategia heurística basada en algoritmo de murciélago para resolver el problema de enrutamiento en redes multiservicio y se ha comparado contra una técnica basada búsqueda tabú. El algoritmo ha demostrado poseer un buen desempeño, tanto en relación a la calidad de las soluciones como en la velocidad de obtención del óptimo. Trabajos futuros se orientan a la optimización de redes MPLS o redes definidas por software SDN, con otros métodos relacionados con inteligencia de enjambres.

#### 5. Referencias

Barabas, T.; Ionescu, D.; Veres, S.A., (2012) *Traffic engineering algorithm for differentiated multicast services over MPLS networks*, in Proc. 7th SACI, Timisoara, Romania.

Cruz, I.; Carossio, C.; Carnero, M.; Hernández, J.L. (2013) *Optimización de ruteo en redes de conmutación de etiquetas multiprotocolo*. Asociación Argentina de Mecánica Computacional. Mecánica Computacional Vol. XXXII, págs. 2613-2621

Delfino, A.; Rivero, S.; San Martín, M., (2006) *Ingeniería de tráfico en redes MPLS* – I Congreso Regional de Telecomunicaciones MVD Tecom 2006

El-Sayed, M.; El-Alfy, N., Mujahid, S.N.; Selim S.Z., (2013) *A Pareto-based hybrid multiobjective evolutionary approach for constrained multipath traffic engineering optimization in MPLS/GMPLS networks*. Journal of Network and Computer Applications 36 pp 1196-1207

Gagnon, I.; April, A.; y Abran, A. (2020). *A critical analysis of the bat algorithm*. Engineering Reports. 2. 10.1002/eng2.12212.

Gero, J., (1987) *Artificial intelligence and engineering optimization*. Engineering Optimization, vol. 12, pp. 89-90.

Gerometa, O.A., (2012) *MPLS Frame-Mode Básico*. Cuadernos EduBooks® ISBN:978-987-27966-1-7

Hernández Camacho, T., (2015) *Estudio de la ingeniería de tráfico en redes MPLS mediante casos de uso práctico con la herramienta VNX* - Trabajo Final Máster Universitario en Ingeniería de Redes y Servicios Telemáticos - Universidad

Politécnica de Madrid Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación

Lin, R. and Ye, Z. (2018) *A bat algorithm for SDN network scheduling*. EURASIP J. Wirel. Commun. Netw., <https://doi.org/10.1186/s13638-018-1145-y>

Masood, M.; Fouad, M.M.; Glesk, I., (2018) *Analysis of Artificial Intelligence-Based Metaheuristic Algorithm for MPLS Network Optimization*, 20th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), pp. 1-4, doi: 10.1109/ICTON.2018.8473751.

Masood, M.; Fouad, M.; Glesk, I., (2017) *A Pareto based approach with elitist learning strategy for MPLS/GMPS networks*, in Proc. 9th CEEC, Colchester, UK,

Ridwan, M.A. y otros cinco autores, (2019). *Recent trends in MPLS Networks: Technologies, Applications and Challenges*. IET Communications. 14. 10.1049/iet-com.2018.6129.

Rosen, E.; Viswanathan, A.; Callon, R, (2001) *Multiprotocol Label Switching Architecture*, RFC 3031, DOI 10.17487/RFC3031, January 2001, <<https://www.rfc-editor.org/info/rfc3031>>.

Okwu M., Tartibu L. k., (2021) *Metaheuristic Optimization: Nature-Inspired Algorithms Swarm and Computational Intelligence, Theory and Applications*. Studies in Computational Intelligence 927, Springer, ISBN 978-3-030-61110-1, pp. 1-151

Onety, R.E.; Tadei, R.; Neto, O.M.; Takahashi, R.H.C., (2013) *Multiobjective optimization of MPLS-IP networks with a variable neighborhood genetic algorithm*. Applied Soft Computing 13 pp. 4403-4412

Osman, I.H. and Kelly, J.P. (eds.). *MetaHeuristics: Theory and Applications*, Boston USA Ed. Kluwer Academic, (1996).

PremKumar, S.; Saminadan, V., (2017) *Performance evaluation of smart grid communication network using MPLS*. Int. Conf. on Communication and Signal Processing (ICCSP), Chennai, India, 2017, pp. 2116–2120

Reis J., Rocha M., Phan T. K., Griffin D., Le F. y Rio M., (2019) *Deep Neural Networks for Network Routing*, International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), 2019, pp. 1-8, doi: 10.1109/IJCNN.2019.8851733.

Umar S. y Rashid. T. A. (2021) *Critical analysis: Bat algorithm based investigation and*

*application on several domains.* CoRR,  
abs/2102.01201, 2021.

Yang, X. S. (2010). *A new metaheuristic bat-inspired algorithm.* In *Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NICSO 2010)* (pp. 65–74). Springer, Berlin, Heidelberg

## **02TCMC - Curvas de dispersión aplicadas a la propagación de ondas guiadas en estructuras de sección circular hueca**

### **Dispersion curves applied to the propagation of guided waves in structures of hollow circular section**

Gonzalo Díaz<sup>1</sup>, María Emilia Castelló<sup>1</sup>, Marcos Amado<sup>1</sup>, Javier Idzi<sup>1</sup>, Fernando Gutierrez<sup>1</sup>, Eduardo B. Groth<sup>2</sup>.

1. UIDET Ingeniería Aplicada en Mecánica y Electromecánica (IAME), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Calle 48 y 116, La Plata, Argentina.
2. Laboratório de Metalurgia Física LAMEF, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Paulo Gama, 110 - Bairro Farroupilha - Porto Alegre - Rio Grande do Sul, Brasil.  
Correo electrónico de contacto: gonzalo.diaz@ing.unlp.edu.ar

#### **Resumen**

El uso de estructuras tubulares largas, como cañerías de transmisión de fluidos o soporte estructural (área civil), son habituales en muchas industrias (petroleras, petroquímicas, plantas de energía). Estas estructuras deben garantizar fiabilidad y ausencia de defectos, necesitando un método de inspección adecuado para asegurarlo.

Su inspección, empleando ensayos no destructivos convencionales es costosa, difícil y a veces imposible por la longitud, inaccesibilidad a las estructuras completas y dependencia de la evaluación exacta de los defectos; motivo por el cual muchos investigadores consideran el uso de ondas guiadas como método de inspección porque permite utilizar ondas con diferentes propiedades para la detección de defectos.

Estas ondas proporcionan una solución atractiva a este problema porque pueden excitarse en un lugar de la estructura y propagarse a muchos metros. Sin embargo, este método se dificulta por la presencia de muchos modos de onda posibles, siendo la mayoría dispersivos.

En el presente trabajo se estudian las características de propagación de ondas guiadas en estructuras metálicas de sección circular hueca, calculando las curvas de dispersión obtenidas por dos metodologías de trabajo empleando elementos finitos, obteniéndose curvas de dispersión para una sección cilíndrica.

Palabras clave: ondas guiadas, ensayo no destructivo, curvas de dispersión

#### **Abstract**

The use of long tubular structures, such as fluid transmission pipes or structural support (civil area), are common in many industries (oil, petrochemical, power plants). These structures must guarantee reliability and absence of defects, requiring an adequate inspection method to ensure this.

Its inspection, using conventional non-destructive tests, is expensive, difficult and sometimes impossible due to its length, inaccessibility to complete structures and dependence on the exact evaluation of defects; This is why many researchers consider the use of guided waves as an inspection method because it allows the use of waves with different properties for the detection of defects.

These waves provide an attractive solution to this problem because they can be excited in one place in the structure and travel many meters. However, this method is made difficult by the presence of many possible wave modes, the majority being dispersive.

In the present work, the characteristics of guided wave propagation in metallic structures of hollow circular section are studied, calculating the dispersion curves obtained by two work methodologies using finite elements, obtaining dispersion curves for a cylindrical section.

Keywords: guided waves, nondestructive testing, dispersion curves.

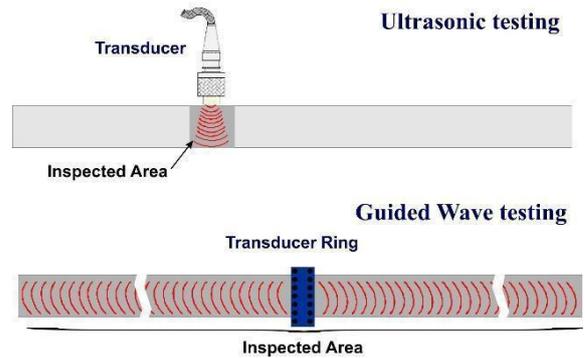
## 1. Introducción

El área estructural de la ingeniería tiene como foco el diseño y concepción de estructuras que no colapsen, presentando buen desempeño a lo largo de su vida útil sin fallar abruptamente. No siempre es posible estimar la vida de las estructuras reales, debido a una gran cantidad de factores, como la homogeneidad de las propiedades de los materiales utilizados en la construcción y severidad de las acciones actuantes, entre otros, que hacen que sea compleja la estimación de vida estructural. Es por ello que el desarrollo de métodos que revelen la situación de la integridad estructural son de fundamental importancia, razón por la cual se justifica la enorme inversión realizada en la ingeniería moderna en el desarrollo de técnicas de evaluación y monitoreo de las estructuras sin producción de daño de la misma, los llamados ensayos no destructivos (END).

Dentro de los END se encuentran los ensayos por ultrasonido, basados en la medición de la propagación de ondas acústicas en el medio que constituye la pieza a analizar. Las ondas transportan energía en cuanto se propagan por un medio, cuando este medio es físico (no vacío) y la onda a propagar lo deforma, el fenómeno es conocido como acústica, rama de la física que estudia el sonido que no necesariamente es el audible por el hombre.

Estos, son de utilidad para identificar la presencia de posibles discontinuidades en la pieza tanto superficiales como internas y utilizan la reflexión de las ondas que, en función de su comportamiento, podrán detectar la presencia de las discontinuidades y su ubicación.

En estructuras donde una de sus dimensiones es mucho más grande que las otras dos es común la propagación de las llamadas ondas guiadas, teniendo buena relación costo-beneficio debido a la simplicidad y rapidez de inspección. La comparación entre la forma convencional de realizar inspecciones con la utilización de ondas guiadas se muestra en la Figura 1. Las ondas guiadas cubren la totalidad del espesor de la estructura en una distancia mucho mayor comparándola con el área de cobertura localizada de la inspección convencional. Esta metodología permite localizar daños en estructuras inaccesibles (sumergidas, enterradas o aisladas) debido a que solo se requiere una pequeña área de acceso cuando se aplica una vibración que se extenderá como una onda guiada [Rose, 2014]. En este caso es posible, con un mismo sensor emisor receptor, obtener información de defectos localizados a distancias considerables en estructuras de acero de difícil acceso (de hasta 100 metros dependiendo el material).



**Figura 1. Comparación entre inspección por ultrasonido convencional y de ondas guiadas**

Para el caso de las ondas guiadas que viajan en sólidos, los límites interactúan de una manera muy especial para que se puedan satisfacer las condiciones de borde. Los límites podrían ser la superficie de una estructura de gran espesor donde la estructura se considera como medio, espacio o medio infinito. En este caso, las ondas superficiales de Rayleigh (tipo de onda acústica superficial que viaja a lo largo de la superficie de los sólidos) pueden propagarse sobre la superficie de una placa, por ejemplo, o sobre cualquier estructura donde la frecuencia es tal que la longitud de onda es muy pequeña en comparación con el grosor de la estructura.

Asimismo, las ondas guiadas pueden propagarse en diferentes tipos de estructuras: placas delgadas, varillas, caños y estructuras de varias capas. A medida que las ondas se propagan de un lado a otro, se produce una conversión de modo, por lo que cada vez que se encuentra una interfaz, tanto las ondas longitudinales como las de corte (ondas P y S) se reflejan y/o se refractan como en el caso de los medios de varias capas.

Estructuras tubulares, rieles, recipientes sometidos a presión, y tanques son algunos ejemplos de tipologías estructurales en las que se presenta el característico fenómeno de propagación de ondas en la dirección de las mayores dimensiones. En estos casos el fenómeno de dispersión se caracteriza por la propagación de ondas elásticas que viajan en direcciones longitudinales. Para su estudio resulta fundamental la utilización de las curvas de dispersión que dependen de las dimensiones finitas de la estructura estudiada. Pocas soluciones analíticas que permiten la construcción de estas curvas están disponibles destacándose la propuesta por Lamb para placas [Auld, 1973].

Una eventual discontinuidad en la estructura generaría una interacción que dependerá de las condiciones geométricas y del modo de propagación presente en ese medio. De esta manera, el estudio de los modos en que las ondas elásticas se propagan puede determinar para cada

situación una forma eficiente de caracterizar las discontinuidades presentes en la estructura analizada.

La utilización de las curvas de dispersión permite entender cómo una determinada perturbación que tiene una función temporal y espacial específica se polariza en ondas modales que viajan a velocidades diferentes las cuales producen el fenómeno de dispersión. Estudiar la propagación de ondas sobre una determinada guía de onda con geometría específica utilizando las curvas de dispersión permite entender que frecuencias y modos pueden polarizar.

De esta manera se puede determinar que en perfiles con forma tubular inducir cierto tipo de ondas permite generar perturbaciones que propagan grandes distancias con una baja dispersión o procurar ondas que tengan sus componentes modales mayores en el interior de la guía disminuyendo así el amortiguamiento debido al poder disipativo del revestimiento o contactos con el medio ambiente. Son los anteriores solo algunos ejemplos del tipo de información que la correcta utilización de las curvas de dispersión permite obtener como resultado.

En el caso de la aplicación de la técnica de emisión acústica [Groose & Ohtsu 2009] la perturbación asociada a ruptura es compleja y mucha información puede ser extraída de ella. En el caso de estructuras laminares estas ondas viajan en las direcciones longitudinales y el fenómeno de dispersión permite que la emisión emanada durante la ruptura interna se polarice y disperse siendo posible así interpretar mejor la información incluida en ella.

Existen diversos métodos numéricos para la construcción de curvas de dispersión para una geometría específica. Asimismo, es posible realizar la simulación de una onda propagando una guía de ondas, utilizando elementos finitos para su discretización espacial y algún esquema explícito de integración para resolver el problema en el dominio del tiempo. Registrando información en una región espacial del modelo durante un lapso de tiempo es posible identificar si la dispersión de la excitación aplicada responde a lo predicho por las curvas de dispersión asociadas a la guía de onda estudiada. En este trabajo se estudiarán los conceptos teóricos relacionados a la propagación de onda guiada en caños metálicos mediante el análisis de curvas de dispersión estudiando su aplicación en métodos de detección temprana de fallas.

Las metodologías de cálculo para hallar las curvas de dispersión consisten en la aplicación de dos modelos diferentes, el modelo axisimétrico y el modelo por condiciones periódicas. Estos modelos se analizan en detalle en la siguiente sección.

## **2. Materiales y método**

### **2.1 Materiales y geometría**

La selección de materiales para su aplicación en la construcción o fabricación de tubos y caños, es un proceso que requiere ciertas consideraciones de las características del material apropiado para el servicio requerido.

Además, debe considerarse el entorno operativo que rodea la cañería o el componente de la cañería. La degradación de las propiedades del material o la pérdida de una sección transversal efectiva de carga puede ocurrir a través de la corrosión, la erosión o una combinación de ambas. La naturaleza de las sustancias que contiene la cañería también es un factor importante.

También se deben tener en cuenta las características de fabricación de los materiales considerados. La capacidad de doblarse o formarse, la idoneidad para soldar u otros métodos de unión, la facilidad de tratamiento térmico y la uniformidad y estabilidad de la microestructura resultante. El proceso de selección debe conducir al material más económico que cumpla con los requisitos de las condiciones de servicio y los códigos y normas que se aplican.

Para los usos mencionados se puede encontrar que la producción de caños y tubos se basa en acero debido a su gran resistencia y alta fiabilidad, particularmente en aceros al carbono y aceros aleados e inoxidables.

Los aceros al carbono representan los 2/3 de todos los materiales usados en cañerías, excepto los aceros de medio y alto contenido de carbono debido a que su alto contenido de carbono dificulta en exceso la soldabilidad del material.

Desde el punto de vista económico, no es conveniente usar aceros aleados para prolongar la vida de las cañerías, debido a que las instalaciones industriales tienen una duración limitada y su costo es varias veces mayor que los del acero al carbono.

### **2.2 Método de elementos finitos semianalítico (SAFE)**

El método SAFE se ha adoptado para la resolución de problemas de propagación de ondas en guías de ondas de sección compleja. Fue desarrollado como un enfoque alternativo a los métodos tradicionales, como el método de matriz global, debido, principalmente, a sus beneficios de resolver problemas arbitrarios de guía de onda de sección transversal [Hayashi, Song y Rose 2003].

En este método, la guía de onda se discretiza en la sección transversal, mientras que se adopta una solución analítica en la dirección de propagación de la onda. Basado en un esquema de variaciones, se puede construir un sistema de

ecuaciones lineales con la frecuencia y el número de onda como incógnitas, las que pueden resolverse utilizando rutinas estándar de valores propios. De esta manera, se pueden resolver problemas de propagación de ondas en guías de ondas con secciones transversales complejas como, por ejemplo, laminados multicapa y rieles [Gavric 1995; Hayashi, Song y Rose 2003], donde frecuentemente es difícil obtener soluciones analíticas.

Para las guías de onda que son infinitamente largas en una dimensión, el método SAFE es superior al método por elementos finitos (FEM) puro en el que se utilizan representaciones analíticas exactas para una o dos dimensiones de la guía de onda, reduciéndose el costo computacional.

El método semianalítico también es ventajoso en comparación con los métodos de matriz analítica, es menos propenso a la falta de raíces en el desarrollo de las curvas de dispersión. El empleo temprano de este método en la resolución de problemas de propagación de ondas guiadas se puede encontrar en el trabajo Dong y col. [1972], donde se observa su utilización en el análisis de modos de onda en un codo de tubería [Hayashi y col. 2004] y en materiales con propiedades viscoelásticas [Bartoli y col., 2006; Matt y col., 2005].

### 2.3 Modelo axisimétrico

El modelo axisimétrico para el cálculo de curvas de dispersión consiste en modelar una guía de ondas a través de un aro de gran radio (Figura 2), en la cual la sección transversal bajo estudio es la sección transversal del aro ( $R > 10L$ , siendo  $R$  el radio adoptado y  $L$  una dimensión característica de la sección transversal estudiada).

El aro consiste en un sólido de revolución que, bajo condiciones de contorno de simetría axial, puede resolverse mediante el empleo de un modelo constituido por elementos finitos axisimétricos [Boeraeve, 2010].

En el análisis modal de modelos de esta naturaleza, los paquetes de simulación ofrecen una forma de establecer cuántos nodos y antinodos pueden tener los modos encontrados en el análisis, y cómo aplicar una restricción a los desplazamientos de la sección transversal periódicamente.

En el caso del aro estudiado, la restricción de los desplazamientos perpendiculares a la sección transversal genera los antinodos y la restricción a los desplazamientos paralelos genera los nodos.

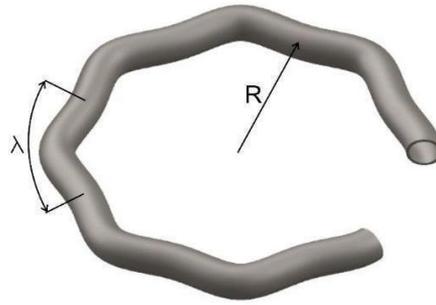


Figura 2. Esquema del método SAFE axisimétrico

Los softwares comerciales de elementos finitos, que ofrecen un análisis modal a través del modelo axisimétrico, usualmente permiten la entrada de las condiciones de contorno descriptas a través de un comando. Este comando, preestablece una cantidad de longitudes de onda  $\lambda$  para las cuales el modelo está sujeto a vibrar.

La cantidad de longitudes de onda son fijadas a través de un parámetro conocido como  $C_{order}$  [Celga, 2008]. Por consiguiente, resulta de importancia determinar este parámetro, que representa el número por el cual debemos dividir a la longitud de la circunferencia del modelo axisimétrico analizado, para poder determinar la longitud de onda  $\lambda$  definida como:

$$\lambda = (2 \cdot \pi \cdot R) / C_{order} \quad (1)$$

$$\lambda = (2 \cdot \pi) / k \quad (2)$$

De las ecuaciones 1 y 2 es posible establecer una relación entre el parámetro  $C_{order}$  y el número de onda  $k$  de la siguiente manera:

$$C_{order} = k \cdot R \quad (3)$$

Para la obtención de las curvas de dispersión utilizando el modelo axisimétrico, debe hacerse un barrido para las longitudes de onda de interés. El número de onda se puede modificar variando el valor de  $C_{order}$  (o de  $R$ ), es decir que, los valores de  $\lambda$  y  $k$  varían para cada nuevo valor de  $C_{order}$ . Por consiguiente, el análisis modal calculará un conjunto de frecuencias naturales donde cada una de ellas pertenece a un modo que se propaga por la guía de ondas en estudio.

Se realiza un análisis modal con el modelo axisimétrico donde los valores de  $k$  se varían dentro de los requeridos para el estudio y se fija el valor del radio ( $R$ ) de la simetría axial, de dimensiones mayores que las dimensiones de la sección transversal ( $R > 10L$ ). De este análisis, se obtienen los valores de las frecuencias naturales de la estructura para cada valor de  $C_{order}$ , a partir de la cual se obtendrán los puntos para cada valor de  $k$  de la curva de dispersión.

Una vez obtenidos los puntos provenientes del estudio modal para cada valor de  $k$ , se los grafica obteniendo, de esta manera, una nube de puntos que generarán las curvas de dispersión.

Para el cálculo de la sección, se utiliza el elemento PLANE83 (Figura 3) que permite automatizar el proceso de formación de las curvas de dispersión [Idzi, 2017]. Este elemento, está definido por cuatro nodos que tienen tres grados de libertad cada uno: trasladados en las direcciones  $x$ ,  $y$ , y  $z$  nodal. En el caso de coordenadas nodales sin rotar, estas direcciones corresponden a las direcciones tangencial, radial y axial.

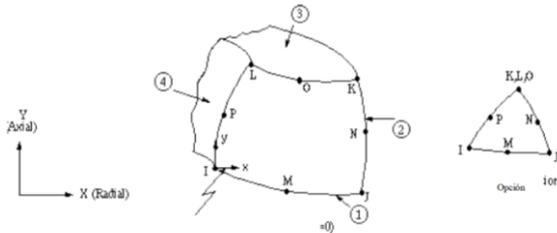


Figura 3. Elemento PLANE83, utilizado en modelo axisimétrico para el cálculo de las curvas de dispersión del caño en estudio [ANSYS®, 2009]

#### 2.4 Modelo de elementos finitos tridimensional considerando condiciones periódicas

Este método consiste en modelar una porción de la guía de onda en elementos finitos, como se muestra en la Figura 4, donde sobre las caras A y B son aplicadas las condiciones de contorno periódicas.

Estas condiciones de contorno hacen posible el acoplamiento de los desplazamientos de las caras, de modo que la cara A tenga un desplazamiento igual a la cara B, o que los desplazamientos de ambas caras tengan sentido contrario pero el mismo valor absoluto.

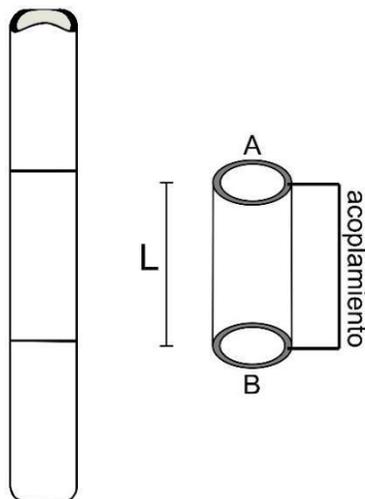


Figura 4. Porción de la guía de ondas utilizada en la elaboración del modelo de longitud  $L$ , mostrando en detalle las caras A y B, sobre las cuales se aplican las condiciones de contorno periódicas

Las condiciones de contorno periódicas, son aplicadas en el modelo nodo a nodo de manera que cada nodo de la cara A tenga su respectivo par en la cara B y ambos se encuentran acoplados entre sí.

En el presente trabajo, se utiliza un comando que permite aplicar las condiciones periódicas acoplando los nodos entre sí a través de la ecuación 4,

$$\sum_{i=1}^n (u_{Aj}^i C_A + u_{Bj}^i C_B) = 0 \quad (4)$$

donde  $u_{Aj}^i$  y  $u_{Bj}^i$  son los desplazamientos de los nodos de las caras A y B en la dirección  $j$ , y  $C_A$  y  $C_B$  son los coeficientes escalares que determinan las características de la restricción.

Si se aplican las condiciones de contorno sobre los desplazamientos de las secciones laterales del modelo, su análisis modal proporciona las frecuencias de vibración, es decir, las frecuencias (imágenes) de las curvas de dispersión. El valor de  $k$  es inversamente proporcional a la longitud de onda  $\lambda$ , la cual proviene de la expresión 5,

$$\lambda = L/p \quad (5)$$

donde  $L$  es la longitud del modelo y su valor arbitrario puede elegirse convenientemente de acuerdo a la región de las curvas de dispersión de interés, y  $p$  es la cantidad de veces que el patrón de deslizamiento, perteneciente al modo, se repite dentro del modelo.

En la práctica, la determinación de  $p$  depende de un análisis visual de cada uno de los modos calculados.

El objetivo de este método consiste en, con las condiciones periódicas impuestas, hacer que el modelo imite el comportamiento de una guía de ondas durante el pasaje de una propagación, haciendo posible la generación de las curvas de dispersión de una guía de ondas de cualquier geometría.

Esta metodología, permite visualizar el modo de propagación en un modelo de tres dimensiones pero presenta la dificultad de automatizar el método.

Con este método se obtuvieron, únicamente, puntos característicos de las curvas de dispersión, para poder visualizar los modos asociados a las curvas obtenidas con el método basado en el modelo axisimétrico anteriormente explicado.

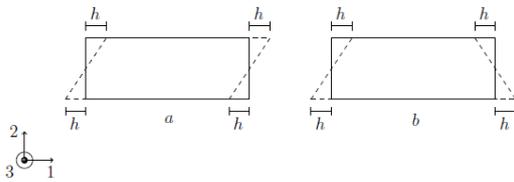
A continuación, se presentan observaciones adicionales sobre la implementación del método por condiciones periódicas:

- Es importante entender, que existe una cierta libertad al escoger la relación entre las condiciones de contorno de las caras A y B. La lógica de esta metodología es, a través de las condiciones de contorno reproducir el desplazamiento producto del pasaje de una

perturbación por una guía de ondas y, a través de la selección de las condiciones de contorno dar preferencia a los desplazamientos característicos de un modo u otro.

- Inicialmente se puede trabajar con condiciones de contorno libres, pero al calcular los modos de vibración por el análisis modal, aparecerían modos que no pertenecen a la guía de ondas, dificultando la identificación de los mismos, motivo por el cual se aplican condiciones periódicas.

En la Figura 5 se representan, esquemáticamente, los desplazamientos debidos a condiciones de contorno simétricas y antisimétricas (periódicas), aplicadas sobre las caras del modelo.



**Figura 5. Condiciones de contorno periódicas (a) simétricas y (b) antisimétricas**

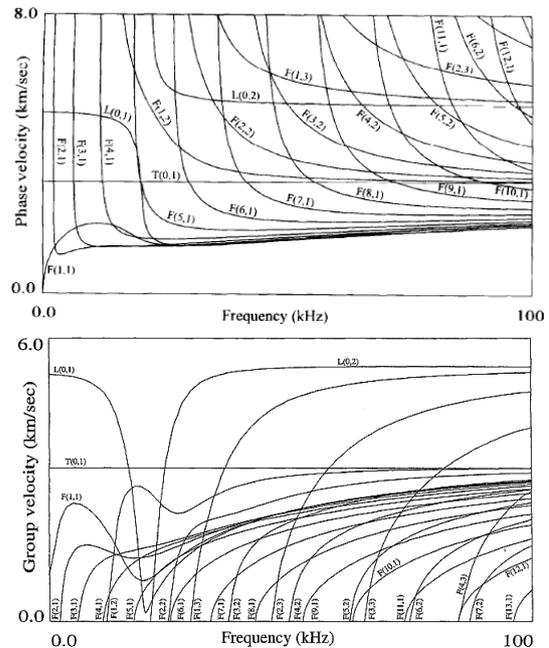
Al correr el análisis modal por elementos finitos, se calculan una serie de frecuencias naturales, cada una con su respectivo campo de desplazamientos característico (modo de vibración). Dentro de los modos generados, es posible determinar patrones que se van repitiendo, significando que, a una determinada frecuencia  $f$ , el modelo presenta un campo de desplazamientos específico, y a una frecuencia  $f'$  ( $f > f'$ ) se obtiene el mismo campo de desplazamientos pero reducido, de manera que el patrón se repite dentro del modelo de tamaño  $L$ . Este fenómeno se repite sucesivamente a medida que se calculan frecuencias mayores durante el análisis modal, los patrones se van repitiendo pero en menor medida. Cada patrón es una curva que representa un modo de propagación, donde las frecuencias en las que aparece el mismo modo pertenecen a la curva.

### 2.5 Curvas de dispersión aplicadas en ensayos no destructivos (END)

La prevención de fallas es muy importante en la industria, además de ser costosa pueden causar enormes daños ambientales y personales. En el área de prevención de fallas se destacan los END, que se utilizan para examinar los defectos en busca de componentes de servicio sin dañarlos. Entre sus diversas técnicas, el más utilizado es el ultrasonido, en el que el uso de ondas guiadas tiene importantes ventajas sobre los END de ultrasonido convencional, donde se propaga una onda mecánica en largas distancias.

Alleyne y Cawley [1996] desarrollaron un sistema basado en un transductor piezoeléctrico de acoplamiento seco para la detección de

corrosión, en caños de 3 a 12 in de diámetro, usando ondas cilíndricas de Lamb, utilizando el modo axisimétrico  $L(0,2)$  a una frecuencia de aproximadamente 70 kHz. En las curvas de dispersión mostradas en la Figura 6, puede observarse que este modo no presenta un comportamiento dispersivo a ese rango de frecuencia.



**Figura 6. Curvas de dispersión para un caño de 3 in utilizadas por Alleyne y Cawley [1996]**

Este método de inspección, proporciona un sistema simple, liviano y fácilmente desmontable para la inspección de grandes distancias de cañería. El inconveniente ocurre que al excitar el modo  $L(0,2)$ , también se excitan modos no deseados (flexión y altamente dispersivos). En su trabajo, Alleyne y Cawley llegaron a la conclusión de que, para una óptima inspección por ondas guiadas no solo es necesaria la adecuada lectura de las señales recibidas, sino también la supresión de los modos no deseados producto del ensayo.

### 3. Resultados y Discusión

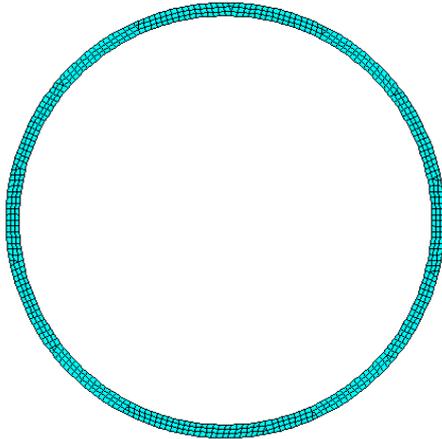
Se calcularon las curvas de dispersión de un caño de 3 in de diámetro externo y espesor de pared de 2,225 mm (Figura 7).

En la implementación del método basado en el modelo axisimétrico validado se ha dejado fijo el valor del radio, determinado por los parámetros de cálculo. Para el caso estudiado,  $R = 500$  m y los valores de  $k$  se variaron entre un valor mínimo de 0,01 rad/m y un valor máximo de 350 rad/m, siendo el intervalo de variación de  $k$  de 0,01 rad/m.

Los resultados de las frecuencias encontradas entre las frecuencias máximas y mínimas establecidas para cada valor de  $k$ , se grafican en

conjunto, permitiendo visualizar las curvas de dispersión.

El contorno del perfil es introducido como output de un archivo neutro, (\*.igs). De este modo, a través de este tipo de archivos, se puede importar directamente cualquier perfil que sea requerido para su estudio [Idzi, 2017].



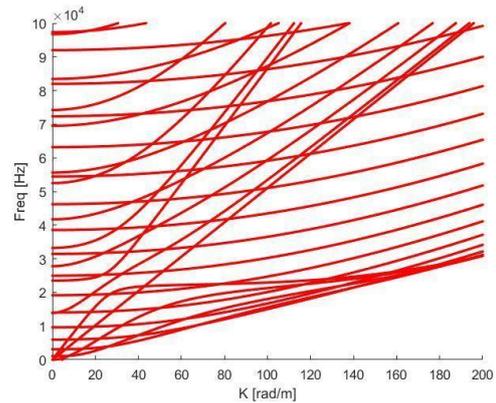
**Figura 7. Perfil mallado con el elemento PLANE83**

Los parámetros de cálculo utilizados para la confección de las curvas de dispersión mediante el método axisimétrico se detallan en la Tabla 1.

**Tabla 1. Propiedades y características utilizadas para generar las curvas de dispersión en el perfil del caño**

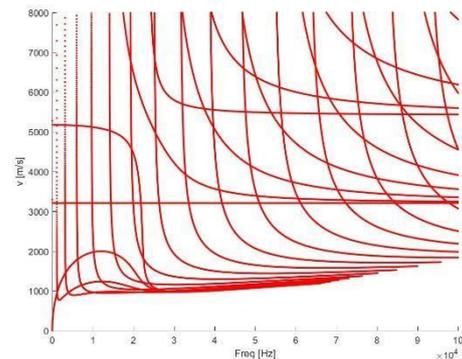
	Valor
Módulo de Young, en N/m <sup>2</sup>	2,10 x 10 <sup>11</sup>
Coefficiente de Poisson	0,30
Densidad, en N/m <sup>3</sup>	7850
Radio de simetría, en m	500
Tamaño característico del elemento, en m	0,001
Cantidad de modos calculados	100
Número de onda mínimo, en rad/m	0,01
Número de onda máximo, en rad/m	350
Intervalo de número de onda, en rad/m	0,01

A partir de los parámetros especificados se construyen las curvas de dispersión para una sección circular hueca de las dimensiones mencionadas. las curvas obtenidas se muestran en la Figura 8, donde se representa la frecuencia en función del número de onda.



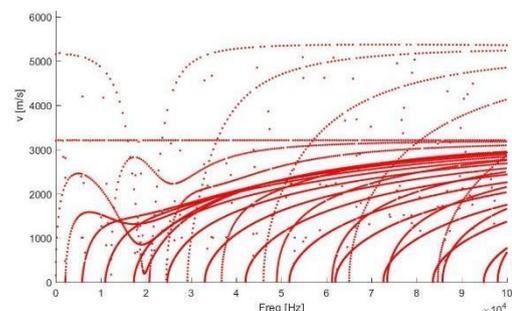
**Figura 8. Curvas de dispersión graficadas en frecuencia vs número de onda para la sección estudiada**

A partir de los datos obtenidos, se grafican las curvas representadas por la velocidad de fase en función de la frecuencia (Figura 9), donde cada par de puntos (k, f) se corresponde con un par de valores (C<sub>F</sub>, f), siendo C<sub>F</sub> la velocidad de propagación en función de la frecuencia para cada uno de los modos que se presentan en la gráfica.



**Figura 9. Curvas de dispersión graficadas en velocidad de fase vs frecuencia para la sección estudiada**

Partiendo de los puntos (k, f) obtenidos del método axisimétrico se pueden obtener las gráficas representadas como velocidad de grupo en función de la frecuencia (Figura 10).



**Figura 10. Curvas de dispersión graficadas en velocidad de grupo vs frecuencia para la sección estudiada**

Puede observarse que la velocidad del paquete de ondas está siendo excitada para cada frecuencia. De lo analizado, se observa que para valores de frecuencia inferiores a los 200 kHz existe un único modo torsional, conocido como T(0,1) y dos modos longitudinales, L(0,1) y L(0,2). Los modos restantes que aparecen en la gráfica se deben a modos de flexión que tienden a alguno de los modos longitudinales o torsional. Una vez confeccionadas las curvas de dispersión a partir del modelo axisimétrico, se analiza la sección estudiada con el modelo tridimensional por condiciones periódicas. En la Figura 11 se presenta, de manera tridimensional, la estructura estudiada, donde se muestra su comportamiento para los puntos (k, f) estudiados.

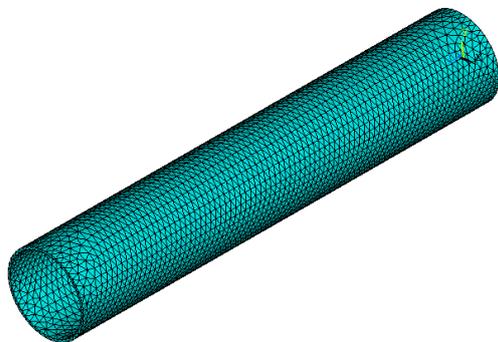


Figura 11. Vista tridimensional del perfil analizado utilizando el método por condiciones periódicas

En los gráficos anteriores (Figuras 8 a 10) se puede observar la gran cantidad de curvas de dispersión obtenidas para la estructura estudiada. A continuación se realiza un estudio para todo el rango (k, f), es decir, k entre 0 y 200 rad/m y f entre 0 y 100 kHz.

El modelo por condiciones periódicas permite obtener las imágenes de los puntos señalados en la Figura 12, pertenecientes a los modos longitudinales y torsional. La corroboración de esto se muestra en las Figuras 13 a 18, donde se observan las deformaciones de la estructura estudiada.

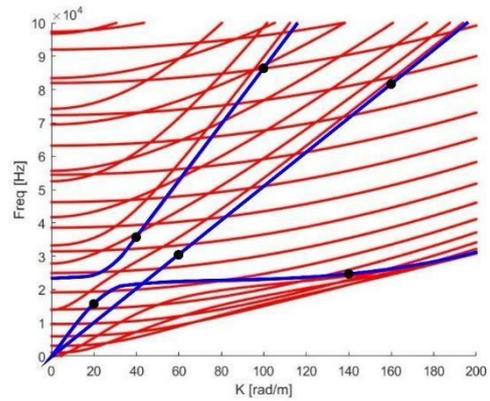


Figura 12. Puntos de control generados por condiciones periódicas

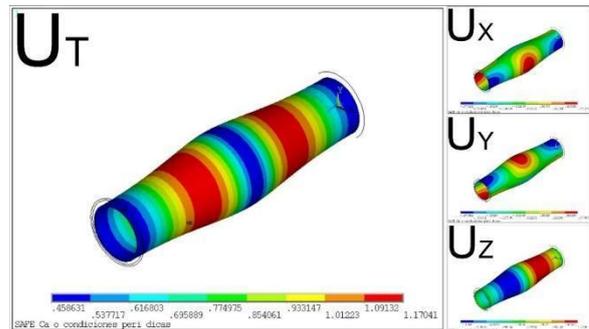


Figura 13. Punto de control por condiciones periódicas modo (k = 20; f = 15,68 kHz)

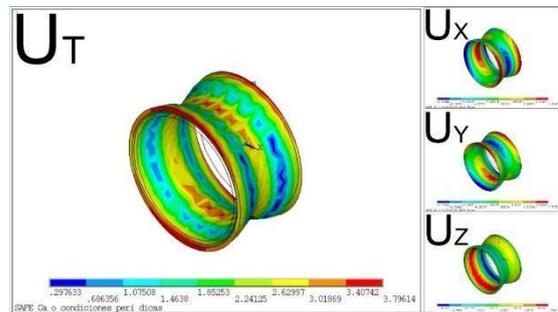


Figura 14. Punto de control por condiciones periódicas modo (k = 140; f = 24,44 kHz)

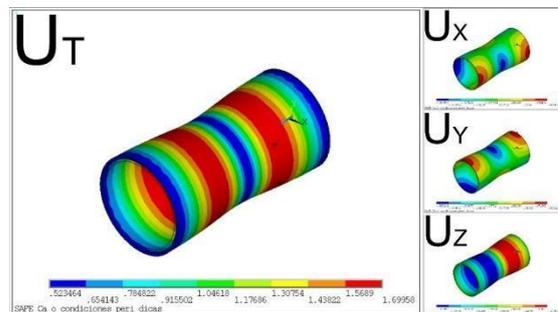


Figura 15. Punto de control por condiciones periódicas modo (k = 40; f = 35,38 kHz)

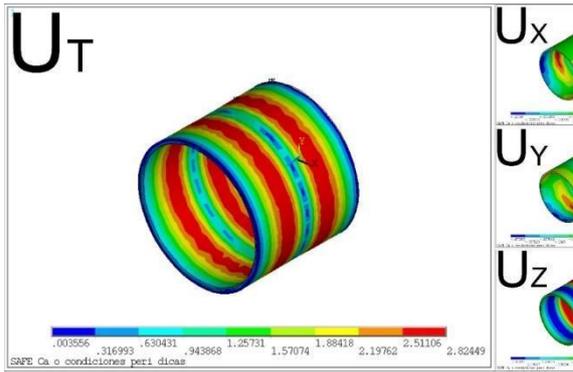


Figura 16. Punto de control por condiciones periódicas modo ( $k = 100$ ;  $f = 86,20$  kHz)

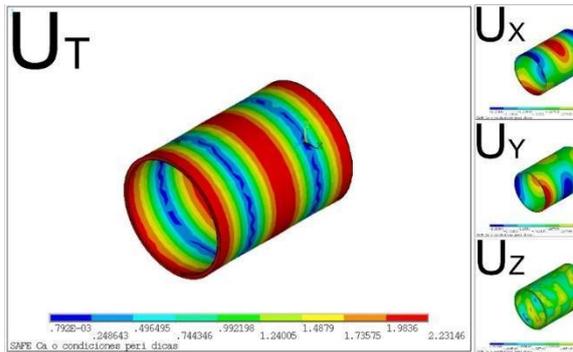


Figura 17. Punto de control por condiciones periódicas modo ( $k = 60$ ;  $f = 30,63$  kHz)

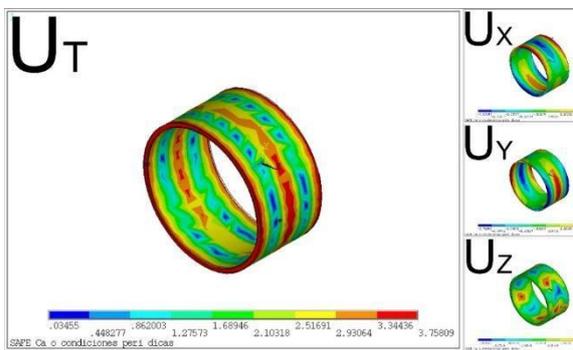


Figura 18. Punto de control por condiciones periódicas modo ( $k = 160$ ;  $f = 80,950$  kHz)

De acuerdo a lo analizado anteriormente, se encontraron puntos específicos dentro del rango de la gráfica ( $k, f$ ) de la Figura 8 que permiten reconocer los modos longitudinales y el modo torsional como se observa en las Figura 19 a Figura 21 en color azul.

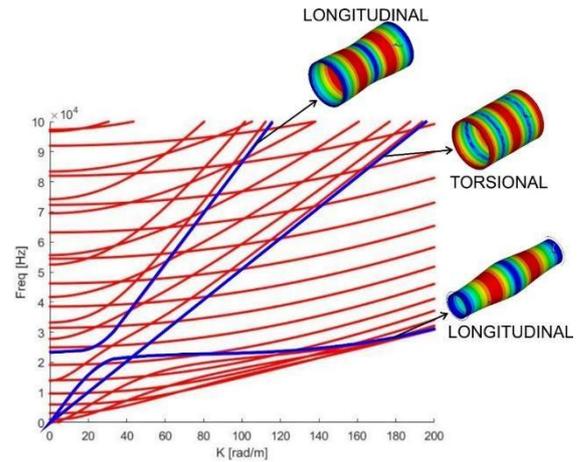


Figura 19. Gráfica ( $k, f$ ) con los modos de propagación L y T en el caño estudiado

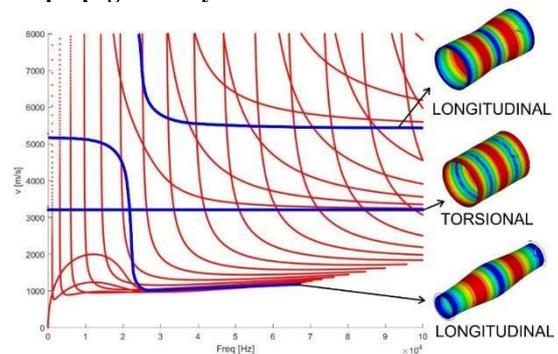


Figura 20. Gráfica ( $f, C_p$ ) con los modos de propagación L y T en el caño estudiado

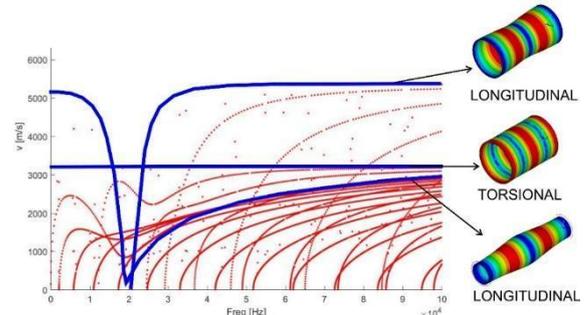


Figura 21. Gráfica ( $f, C_G$ ) con los modos de propagación L y T en el caño estudiado

Se puede observar que, ante la necesidad de utilizar ondas guiadas para realizar inspecciones en estructuras cilíndricas, el modo torsional no es dispersivo debido a que su velocidad es constante para todo el rango de frecuencias estudiado, lo que hace que el procesamiento de los datos recibidos luego de la reflexión y conversión de modo ocurrido en la propagación sea más simple. Esto significa que, definiendo la frecuencia de trabajo al momento de la inspección y la disposición de los transductores, se puede generar una onda puramente torsional que se propaga a lo largo de la estructura con la velocidad correspondiente calculada en las curvas de dispersión. Las señales recibidas generadas en los defectos presentes en la

estructura se procesarán de acuerdo al tiempo de arribo, permitiendo estimar la distancia aproximada a la cual se encuentra el defecto. Se puede observar que, las curvas de dispersión obtenidas, se verifican con las curvas encontradas por Alleyne y Cawley (Figura 6), quienes también utilizaron una sección circular hueca de 3 pulgadas de diámetro, identificando los modelos longitudinales, de flexión y torsión que se corresponden a lo analizado en el presente trabajo.

#### 4. Conclusiones

Mediante el análisis de los modos presentes en las curvas obtenidas, se logró verificar de manera tridimensional el tipo de excitación que polariza en cada uno de estos modos durante su propagación, pudiendo vincularlos con los modos disponibles en la bibliografía.

La utilización de ondas guiadas como método de inspección es importante debido a su gran utilidad para la predicción de la vida remanente de las estructuras estudiadas, agilizando los tiempos de inspección gracias a su capacidad de ensayar grandes distancias (de acuerdo a las condiciones donde la estructura se encuentre) y brindar datos de posibles defectos y una aproximación de su localización.

El modo torsional es el más útil para realizar una inspección por ondas guiadas, debido a que no es dispersivo para ningún rango de frecuencias visto. Por lo tanto, es primordial el desarrollo de técnicas de inspección en las que este modo pueda ser excitado para su implementación.

Las curvas fueron calculadas con un programa validado para cálculo de curvas de dispersión y verificadas con los resultados de otros autores.

#### 5. Referencias

Alleyne, D. and Cawley, P. (1996). *The excitation of Lamb waves in pipes using dry coupled piezoelectric transducers*. Journal of Nondestructive Evaluation, 15(1), p.11-20.

Ansys, I. (2009). *Programmer's Manual for Mechanical APDL*. Ansys, Inc.

Auld, A. B. (1973) *Acoustic Fields and Waves in Solids*. Vol. I. John Wiley and Sons Inc.

Bartoli, I., Marzani, A., Lanza di Scalea, F., and Viola, E. (2006). *Modeling wave propagation in*

*damped waveguides of arbitrary crosssection*. J. Sound Vib., 295, p 685–707.

Boeraeve, P. (2010). *Introduction to The Finite Element Method*. Institut Gramme. LIEGE.

Cegla, F. B. (2008). *Energy concentration at the center of large aspect ratio rectangular waveguides at high frequencies*. Journal of Acoustical Society of America, vol. 123, p. 4218–4226.

Dong, S. B., & Nelson, R. B. (1972). *On natural vibrations and waves in laminated orthotropic plates*. Journal of applied mechanics, 39(3), 739-745.

Gavrić, L. (1995). *Computation of propagative waves in free rail using a finite element technique*. Journal of Sound and Vibration. 185(3), 531-543.

Grosse, C. U., Ohtsu M. (2008) *Acoustic Emission Testing: Basics for Research - Applications in Civil Engineering*. Springer.

Hayashi, T, Kawashima, K, Rose, J. L. (2004). *Calculation for guided waves in pipes and rails*. Key Engineering Materials Vols 270-273 p 410-415.

Hayashi, T., Song, W, Rose, J. L. (2003). *Guided wave dispersion curves for a bar with an arbitrary crosssection, a rod and rail example*. Ultrasonics Vol. 41 No.3 p 175-183.

Idzi, J. L. (2017). *Estudio Numérico de la Propagación de Ondas Guiadas en Rieles*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Matt, H., Bartoli, I., & Lanza di Scalea, F. (2005). *Ultrasonic guided wave monitoring of composite wing skin-to-spar bonded joints in aerospace structures*. The Journal of the Acoustical Society of America, 118(4), 2240-2252.

Ohtsu & Groose (2009). *The history and development of acoustic emission in concrete engineering*. Magazine of concrete research, 48(177): 321–330

Rose, J. L. (2014). *Ultrasonic Guided Waves in Solid Media*. Vol. I. Cambridge University, Press.

## **03TCMC - Inversiones en tecnología valuadas mediante Opciones Reales. Nuevo software para pagos mediante dispositivos móviles.**

### **Investments in technology valued through Real Options. New software for payments through mobile devices.**

Alfredo Gabriel Rivamar

FCAI - UNCUYO. Bernardo de Irigoyen 375. San Rafael. Mendoza. Argentina. arivamar@gmail.com

#### **Resumen**

Se examina el caso empresarial de un gran operador europeo de telefonía móvil que desea desarrollar un sistema de pago (NFC) a través de teléfonos móviles. Utilizar opciones reales facilitará a la empresa tomar una decisión durante o al final del desarrollo del software mientras conoce más acerca de la viabilidad comercial de su proyecto. En primer lugar, la técnica DTA (Arboles de decisiones) determinará el flujo de fondos esperados por ramas del árbol considerando probabilidades "reales", básicamente considerando el riesgo tecnológico. Luego, se utilizará la técnica de Opciones Reales Binomial que valora la flexibilidad estratégica al emplear coeficientes neutrales al riesgo y tasa libre de riesgo en la actualización. Aunque no son el objeto del estudio de caso desarrollado, se podrían emplear dos técnicas más precisas en cuanto a la valoración de los riesgos a los que está sometido el proyecto de desarrollo de software propuesto en este caso. La técnica de Opciones Reales Multinomial es la primera de ellas y la otra técnica que podría utilizarse es Opciones Reales rejilla multinomial y volatilidad cambiante que reproduce con mayor fidelidad la dinámica de las opciones secuenciales.

Palabras clave: tecnología, telefonía móvil, valuación, opciones reales.

#### **Abstract**

The business case of a large European mobile phone operator wishing to develop a payment system (NFC) via mobile phones is examined. Using real options will make it easier for the company to make a decision during or at the end of software development while learning more about the commercial viability of its project. In the first place, the DTA technique (Decision Trees) will determine the expected flow of funds by branches of the tree considering "real" probabilities, basically considering technological risk. Then, the Binomial Real Options technique will be used, which values strategic flexibility by using risk-neutral coefficients and risk-free rate in the update. Although they are not the object of the case study developed, two more precise techniques could be used in terms of assessing the risks to which the software development project proposed in this case is subjected. The Multinomial Real Options technique is the first of them and the other technique that could be used is Real Options multinomial grid and changing volatility that reproduces the dynamics of sequential options with greater fidelity.

Keywords: Technology, Mobile Phone, Valuation, Real options.

## 1. Introducción

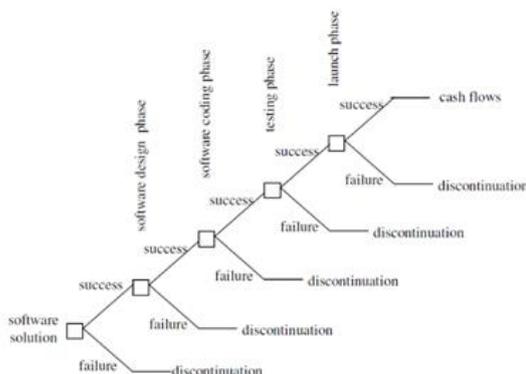
Se examina el caso empresarial de un gran operador europeo de telefonía móvil que desea desarrollar un sistema de pago (NFC) a través de teléfonos móviles.

Especialmente, en el mercado del comercio móvil de empresa a consumidor, el operador de telefonía móvil considera que el pago móvil se incrementará en los próximos años y que progresivamente reemplazará el pago en efectivo o con tarjeta de crédito. Así, espera que los consumidores utilicen cada vez más sus teléfonos móviles para realizar pagos y para ello propone lanzar un software que utilice dispositivos móviles y la tecnología de comunicaciones NFC incorporada en ellos.

Utilizar opciones reales facilitará a la empresa tomar una decisión durante o al final del desarrollo del software mientras conoce más acerca de la viabilidad comercial de su proyecto. En cada etapa del proceso, la empresa tiene un momento de decisión claro para decidir continuar o abandonar el proyecto y, así finalmente, lanzar el nuevo servicio de cobro.

## 2. Materiales y métodos

El desarrollo de una nueva aplicación de software consta de varias fases típicas: comienza con la fase de diseño del software, seguida de la fase de programación o codificación, una fase de prueba o testing y finalmente la fase de lanzamiento o comercialización (Sommerville 2011). Así, el desarrollo de software puede analizarse como una cadena de opciones, tal como se visualiza en la Figura 1.



**Figura 1. Fases típicas de opciones compuestas en el desarrollo de software (Cassimon, D. 2011)**

El proyecto inicial en el que una nueva herramienta de software se considera como una solución de negocio particular, es decir, la fase de concepción, puede verse como una opción en la fase de diseño de software. Si esta fase de concepción resulta exitosa, el diseño del software se inicia esta fase; de lo contrario, el proyecto se interrumpirá. El diseño de software implica realizar un plan para la solución empresarial, su objetivo, sus especificaciones y la arquitectura de la programación. Se centrará en elementos como la mantenibilidad del software, aplicación, la compatibilidad con otras aplicaciones de software dentro de la empresa, la extensibilidad para permitir futuras oportunidades de aplicaciones de software, la facilidad de uso y temas de seguridad.

La fase de diseño del software en sí es una opción en la fase de codificación. La codificación de software se refiere a el proceso de traducir los procesos a un lenguaje de programación de computadoras de una manera que esta pueda ejecutar órdenes específicas. Si la fase de codificación tiene éxito, el proyecto pasa a la fase de prueba; si no, el proyecto se abandona nuevamente. Durante la prueba de software, la nueva aplicación se analiza para determinar si funciona como se esperaba. Normalmente, durante esta fase los bugs y errores de software se detectan y se corrigen. Esta fase de prueba es, nuevamente, una opción en el lanzamiento del software.

Por lo tanto, analizar una aplicación de software como solución a un determinado caso de negocio se puede ver como una cadena de opciones, siendo estas las siguientes:

- Decisión de iniciar la fase de diseño - primera opción;
- Decisión de iniciar la fase de codificación - segunda opción;
- Decisión de iniciar la fase de prueba - tercera opción;
- Decisión de lanzar la nueva solución de software - cuarta opción.

Al considerar el proceso de desarrollo de software de esta manera, el análisis de opciones reales se puede utilizar para su valoración. Se proponen dos técnicas, DTA (Decision Tree Analysis) y enfoque binomial, ambas una aproximación a mejores resultados para la toma de decisiones que podrían obtenerse si se utilizara, por ejemplo, el enfoque cuadrinomial.

El objetivo final, aquí, es contribuir a la mejora en las decisiones gerenciales en una empresa, en particular, el operador de telefonía móvil.

Los costos de las fases de desarrollo y los flujos de caja netos de las fases de comercialización se estiman utilizando los datos internos de la empresa. La Tabla 1 proporciona una descripción general de los diferentes flujos de efectivo que los gerentes de proyecto que la empresa espera que el proyecto genere en cada fase de su desarrollo. Las dos primeras columnas proporcionan información de la fase y el año de ocurrencia. La columna tres presenta un resumen información de estos costos para las diferentes fases, con estimaciones calculadas al comienzo del período. La columna 4 presenta información sobre el valor esperado del proyecto, es decir, los flujos de efectivo operativos netos del proyecto para las diferentes fases y calculados al comienzo del período. Los flujos solo se generan a partir del lanzamiento de la fase de comercialización.

Fase	Año	Inversión (en M €)	NPV (en M €)
Concepción	1, 1T y 2T	-1.4	
Diseño del software	1, 3T	-12.4	
Codificación	1, 4T	-21.6	
Testing	2, 3T y 4T	-10.1	
Lanzamiento	3, 1T	-32.3	103.94

**Tabla 1. Características del proyecto (adaptado de Cassimon 2011)**

La empresa proporciona (Cassimon 2011) un costo de capital promedio (WACC) de 10%, una volatilidad (única) de 54% y una tasa libre de riesgo (risk free interest rate) de 3.5 %.

La operadora de telefonía móvil también informa acerca de volatilidades variables, las que podrían ser utilizadas para realizar una evaluación mediante otras técnicas. La estimación de la volatilidad del proyecto no resulta una tarea fácil en todo el ejercicio de valoración. Para obtener una estimación confiable para este proyecto, se utilizó (Cassimon 2011) una combinación de opiniones de expertos y emparejamiento de las características de riesgo del proyecto con proyectos anteriores del operador de telefonía móvil.

De acuerdo con la metodología desarrollada por Arnold y Shockley (2001) y Shockley (2007) y

descrita por Cassimon (2011) se solicitó al equipo de gestión del proyecto que proporcionara valores del proyecto para un conjunto de los escenarios y luego que adjuntaran probabilidades subjetivas para cada uno de estos escenarios, expresados como la probabilidad de que el valor del proyecto realizado sea mayor (para el mejor caso), o menor (para el peor de los casos) que el escenario particular. Estas probabilidades subjetivas se comparan con las probabilidades teóricas calculadas siguiendo una distribución normal, utilizando los parámetros del proyecto, para un rango de volatilidades. La volatilidad en particular seleccionada es la que proporciona la correspondencia óptima entre ambos conjuntos de probabilidades. Esta metodología se repite para cada una de las fases, proporcionando una volatilidad óptima para cada fase específica.

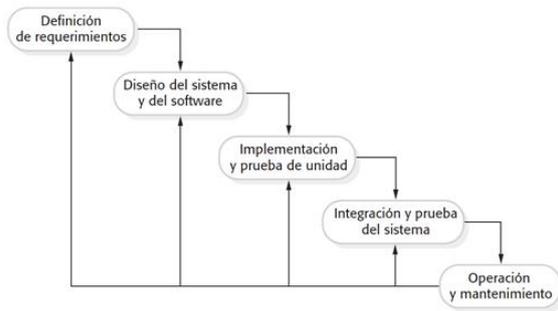
Una técnica que se considera adecuada en la Ciencia de la Administración, para aplicar opciones reales, es el estudio de casos. Se presenta un caso adaptado a partir del desarrollado oportunamente por Cassimon y otros (2011) relativo al proceso secuencial de desarrollo de un nuevo software y su valoración mediante opciones reales compuestas con volatilidad específica de fase. El método del caso permite entender las etapas en general, la secuencialidad, el tiempo involucrado, las profundas incertidumbres tecnológicas del proyecto y la exposición al riesgo de mercado (Milanesi 2011).

La empresa examinada es un gran operador de telefonía móvil que demanda evaluar el beneficio económico derivado de invertir en el desarrollo de un nuevo tipo de software para realizar pagos mediante dispositivos móviles, utilizando la red de comunicaciones de la cual es propietario, en detrimento de las opciones de pago realizadas mediante efectivo y/o tarjetas de débito y crédito.

El proceso secuencial descrito consta de cinco etapas y es, la primera de ellas, la que se encuentra condicionada a obtener un beneficio esperado positivo como condición para continuar con la etapa siguiente en el desarrollo del software. Al final del proceso se espera obtener un valor de probabilidad que posibilite avanzar en el lanzamiento y comercialización de la plataforma de software.

El proceso descrito en Cassimon (2011) se conoce como modelo de desarrollo en cascada (waterfall model) y consiste en el desarrollo de un proyecto de manera secuencial (Somerville 2011) tal como se observa en la Figura 2. Este modelo toma las actividades fundamentales del proceso de especificación, desarrollo, validación

y evolución y, luego, los representa como fases separadas del proceso, tal como especificación de requerimientos, diseño de software, implementación, pruebas, etcétera.



**Figura 2. El modelo en cascada (Somerville 2011)**

El modelo en cascada se ha adaptado a las particularidades del estudio de caso aquí presentado. Las siguientes son las etapas del proyecto:

**Etapa 1: Concepción del software.** Esta es la etapa en que se analizan y definen los requerimientos. definen los requerimientos del proyecto basados no solo en consultar las necesidades de los potenciales usuarios sino también con siguiendo todas las normas relacionadas con el diseño profesional de software (por ejemplo, las emanadas del IEEE entre otras instituciones especializadas). Luego, se definen con detalle y sirven como una especificación del sistema. La duración de esta etapa es de un trimestre durante el primer año de desarrollo del software y la inversión requerida es de 1.2 millones de euros. Del análisis del caso realizado por Cassimon (2011), se obtiene que la probabilidad de éxito para esta etapa es un 50 %.

**Etapa 2: Diseño del sistema y del software.** Superada la etapa anterior, corresponde realizar el diseño del software. Consiste en asignar los requerimientos para sistemas de hardware o de software, al establecer una arquitectura de sistema global. El diseño del software implica identificar y describir las abstracciones fundamentales del sistema de software y sus relaciones. La inversión requerida para esta etapa es de 12,40 millones de euros y la probabilidad de éxito asignada es 45 %.

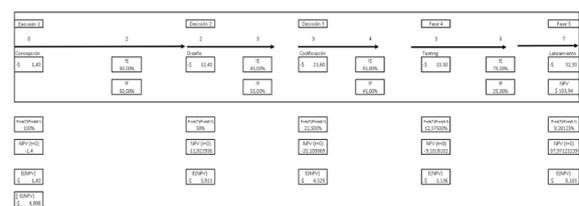
**Etapa 3: Codificación del software.** Se implementa y ejecuta la prueba de unidad. La codificación se realiza como un conjunto de programas o unidades del programa. La prueba de unidad consiste en verificar que cada unidad cumpla con su especificación de acuerdo con los

requerimientos del sistema (etapa 1). Esta etapa requiere una inversión de 21,60 millones de euros con una probabilidad de éxito del 55 %.

**Etapa 4: Testing.** Se realiza la integración y prueba de sistema. Las unidades del programa o los programas individuales se integran y prueban como un sistema completo para asegurarse que se cumplan los requerimientos de software. Después de probarlo, se libera el sistema de software al usuario. Requiere una inversión de 10,10 millones de euros con una probabilidad de éxito del 75%.

**Etapa 5: Lanzamiento.** Superadas las cuatro etapas anteriores, el software se lanza al mercado. Este momento requiere 32,30 millones de euros para su ejecución y el valor actual de los flujos de fondos esperados es 103,94 millones de euros, con una tasa de costo de capital del 10,00 % (información proporcionada por la empresa). La vida útil del software es 10 años. Durante este período se incluye una etapa conocida como de “operación y mantenimiento del software” donde se corrigen errores no detectados en etapas anteriores, se mejora la implementación de las unidades del sistema y se incrementan los servicios ofrecidos por el software en la medida en que se descubran nuevas necesidades de los usuarios y estas se traduzcan en nuevos requerimientos.

Cada una de las etapas es una opción secuencial donde la continuidad del proyecto se condiciona con el éxito de la etapa precedente. En la Figura 3 se presenta la forma expansiva del árbol de decisión.



**Figura 3. Diagrama del árbol de decisiones para el caso propuesto**

### 3. Resultados y Discusión

La primera herramienta a utilizar es el árbol de decisión (DTA - Decision Tree Analysis). En este árbol, la probabilidad de fracasar en cada etapa (o decisión) representa las incertidumbres tecnológicas (riesgo tecnológico). Para utilizar la herramienta, es necesario conocer las probabilidades de ocurrencia asociadas a cada evento decisorio. En la Figura 3 se observan cada

una de estas probabilidades y, también, que la probabilidad de éxito en cada fase está condicionada por la probabilidad de éxito de la etapa anterior. Estimadas estas probabilidades, el paso siguiente es determinar el flujo probable para, luego, actualizar los flujos probables esperados utilizando la tasa de costo de capital proporcionada por la empresa. La sumatoria de los flujos actuales permite obtener el valor esperado. El proceso y los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 2.

Etapas	Probabilidad éxito estado anterior	Probabilidad condicionada prob(i prob(i-1))	Flujo Fondos	Probabilidad x Flujos	(NPV)	Éxito	Fracaso	Estado	E*(t) (Final)	NPV acum	(NPV)
Concepción software	100%	100%	\$ 1,400	-1,400	\$ 1,400	0,5	0,5	30,000€		\$ 1,40	\$ 0,70
Diseño software	60%	60%	\$ 12,400	-4,200	\$ 5,815	0,48	0,52	22,500€		\$ 11,74	\$ 3,38
Codificación software	45,000%	22,500%	\$ 11,600	-4,850	\$ 4,547	0,55	0,45	10,125€		\$ 33,85	\$ 3,48
Testing software	55,00000%	12,37500%	\$ 10,100	-1,250	\$ 1,195	0,75	0,25	3,048€		\$ 41,81	\$ 1,29
Mercado	75,00000%	9,28125%	\$ 109,845	9,647	\$ 8,1648			9,281€		\$ 46,16	\$ 4,28
Resultados				(NPV)	\$ 4,7809			100,00%		(NPV)	\$ 4,8167

**Tabla 2. Árbol de decisión probabilidades condicionales de éxito-éxito**

En la Tabla 3 se muestra una alternativa de resolución del árbol consistente en estimar el valor actual acumulado en cada etapa hasta obtener, en la última, el valor actual acumulado total. Para ello, cada etapa se multiplica por la probabilidad de ocurrencia condicional de fracaso dado el éxito precedente.

Etapas	P(i) E(t-1)	P(i) E*(t) E(t-1)	FFL	P(i) x FFL	(NPV)
Concepción software	100%	100%	\$ 1,400	-1,400	\$ 1,4000
Diseño software	50%	50%	\$ 12,400	-6,200	\$ 5,9115
Codificación software	45%	22,500%	\$ 11,600	-4,850	\$ 4,5247
Testing software	55%	12,37500%	\$ 10,100	-1,250	\$ 1,1095
Mercado	75%	9,28125%	\$ 109,845	9,647	\$ 8,1648
Resultados				E(NPV)	\$ 4,7809

**Tabla 3. Árbol de decisión probabilidades condicionales de fracaso-éxito**

El valor esperado, E(NPV), alcanza -\$4,7809 millones de euros, lo cual implica el rechazo del proyecto. La evaluación realizada mediante DTA es inconsistente en cuanto a la tasa de actualización del flujo de fondos ya que se emplea la misma tasa de actualización, 10% en este caso particular, al evaluar cada rama del árbol (éxito – fracaso o lanzamiento-fracaso) cuando, en realidad, cada una de las ramas representan diferentes estrategias y, como consecuencia de ellas, distintos riesgos asociados (Milanesi 2011). Para resolver tal error es necesario apelar al enfoque de valuación con opciones reales permitiendo ajustar por riesgo los flujos de fondos empleando una tasa libre de riesgo para actualizar.

La segunda herramienta a utilizar es el enfoque de valuación mediante opciones reales. En un enfoque de este tipo, tasa libre de riesgo y volatilidad son las dos variables básicas para proyectar el proceso estocástico del activo. La empresa proporciona información acerca de la

tasa libre de riesgo y la volatilidad suponiendo que tal volatilidad resume todos los riesgos a los que el proyecto está expuesto. Así se tienen una volatilidad (única) de 54% y una tasa libre de riesgo (risk free interest rate) de 3.5 %.

La simplificación del modelo binomial constituye en resumir todos los riesgos del proyecto en un valor de volatilidad, constante a lo largo del tiempo. Matemáticamente, resulta necesario determinar los parámetros u, d, p y 1-p del modelo binomial a utilizar (Milanesi 2011).

Parámetros	Valor	Expresión matemática
u	1,46497424	$u = e^{\sigma\sqrt{t}}$
d	0,68260585	$d = \frac{1}{u}$
p	0,42824859	$p = (e^{rt} - d)/(u - d)$
1-p	0,57175140	1-p = 1 - 0,428248598 = 0,571751402
q	0,47121694	$q = (e^k - d)/(u - d)$
1-q	0,52878305	1-q = 1 - 0,52878305781 = 0,47121694219

**Tabla 4. Determinación de los parámetros del modelo**

Para construir la rejilla binomial, se comienza con el valor actual de los flujos de fondos, e, \$ 115.31 (en millones de euros) (valor esperado en t=10 y actualizado a t=0). A partir de este, se determina el valor esperado correspondiente a cada nodo mediante la ecuación 1:

$$V_t = \{p \times V_{t+1}^u + (1 - p) \times V_{t+1}^d\} \times e^{-rt} \quad (1)$$

La Tabla 5 muestra los cálculos necesarios para obtener la rejilla binomial.



puntos se observan que las probabilidades de continuar o lanzar son superiores a las de abandonar.

2	N	Pj	Qj	3	N	Pj	Qj	5	N	Pj	Qj	7	N	Pj	Qj
C	2	18,3%	22,2%	C	3	7,9%	10,5%	C	5	1,4%	2,3%	L	7	0,3%	0,5%
C	1	49,0%	49,8%	C	2	31,5%	35,2%	C	4	9,6%	13,0%	L	6	2,5%	4,1%
C	0	32,7%	28,0%	C	1	42,0%	39,5%	C	3	25,7%	29,3%	L	5	9,9%	13,6%
C		100,0%	100,0%	A	0	18,7%	14,8%	C	2	34,3%	32,8%	L	4	22,0%	25,5%
A		0,0%	0,0%	C		81,3%	85,2%	C	1	22,9%	18,4%	L	3	29,4%	28,6%
				A		18,7%	14,8%	C	0	6,1%	4,1%	L	2	23,5%	19,3%
								C		100,0%	100,0%	A	1	10,5%	7,2%
								A		0,0%	0,0%	L		87,5%	91,6%
												A		10,5%	7,2%

Tabla 8. Decisiones y probabilidades acumuladas

#### 4. Conclusiones

La técnica DTA (Arboles de decisiones) determinó el flujo de fondos esperados por ramas del árbol considerando probabilidades “reales”, básicamente considerando el riesgo tecnológico. Realiza el ajuste por riesgo con la misma tasa de costo del capital (10,00%) de la empresa sin reflejar la incertidumbre total a la que están sometidas todas las estrategias.

En el caso propuesto, se utilizó la técnica de Opciones Reales Binomial que valora la flexibilidad estratégica al emplear coeficientes neutrales al riesgo y tasa libre de riesgo en la actualización. La volatilidad (54%) es proporcionada por la empresa y supondría que es un valor suficiente para resumir, sin discriminar, todos los riesgos (mercados y tecnológicos) a los que se enfrenta la empresa de telefonía móvil. Esta técnica sobre dimensiona la volatilidad como cifra que engloba las fuentes de incertidumbre.

Aunque no son el objeto del estudio de caso desarrollado, se podrían emplear dos técnicas más precisas en cuanto a la valoración de los riesgos a los que está sometido el proyecto de desarrollo de software propuesto en este caso. La técnica de Opciones Reales Multinomial especifica los riesgos considerando dos fuentes, mercado y tecnológicos, con los valores también definidos por la empresa de telefonía móvil y se caracteriza por no sobre estimar los riesgos por las fuentes de incertidumbre.

La otra técnica que podría utilizarse es Opciones Reales rejilla multinomial y volatilidad cambiante que reproduce con mayor fidelidad la dinámica de las opciones secuenciales. Así, la volatilidad evoluciona en forma decreciente a medida que avanza el tiempo, existiendo disponibilidad de información (de acuerdo también con valores especificados por la empresa

operadora de telefonía móvil) y resolución tecnológica de etapas.

#### 5. Referencias

Burnstein, I. (2003). *Practical Software Testing*. Springer.

Cassimon, D., Engelen, P.J., Thomassen, L., Van Wouwe, M. (2004). *The Valuation of a NDA using a 6-fold Compound Option*. Research Policy, vol.33, no.1, 41-51.

Cassimon, D., Engelen, P.J., Yordanov, V. (2011). *Compound Real Option Valuation with Phase-Specific Volatility: a Multi-phase Mobile Payments Case Study*. Technovation, vol.31, 240-255.

Hsieh, C., Jones, C., Lin, B. (2008). *The new business potential with mobile commerce*. International Journal of Mobile Communications, vol. 6, no. 4, 436 – 455.

Keshta, I.M. (2017). *Software Cost Estimation Approaches: A Survey*. Journal of Software Engineering and Applications, 10, 824-842.

Meridji, K., Al-Sarayeh, K.T. (2005). *A Comprehensive Survey of Software Development Cost Estimation Studies*. Conference Paper · November 2015. ResearchGate.

Milanesi, G. (2013). *Teoría de opciones: modelos específicos y aplicaciones para valorar estrategias, activos reales e instrumentos financieros*. Bahía Blanca: Editorial de la Universidad Nacional del Sur. Ediuns.

Milanesi, G. (2020). *Riesgo tecnológico y mercado en inversiones de biotecnología. Opciones secuenciales cuatrinomiales con volatilidad cambiante*. 40 Jornadas Nacionales de Administración Financiera.

Milanesi, G. (2021). *Valuación de empresas en mercados emergentes e instrumentos para el análisis del riesgo en proyectos*. Thomson Reuters. La Ley. eBook.

Mum, J. (2003). *Real Options. Analysis Course. Business Case and Software Applications*. John Wiley & Sons, Inc. NJ.

Rittinghouse, J. (2004). *Managing Software Deliverables: A Software Development Management Methodology*. Elsevier Digital Press.

Shockley, R, Curtis, S, Jafari, J & Tibbs, K. (2003). *The Option Value of an Early-Stage Biotechnology Investment*. Journal of Applied Corporate Finance, 15(2), 44-55.

Sommerville, I. (2011). *Ingeniería de Software*. 9<sup>na</sup> Edición. Pearson Educación. México.

Stellman, A., Green, J. (2005). *Applied Software Project Management*. O'Reilly Media.

Wysocki, R. (2006). *Effective Software Project Management*. Wiley.

## **04TCMC - Geometría computacional y análisis biomecánico de una intervención endovascular en aneurismas cerebrales mediante láminas delgadas de Kirchoff-Love de espesor variable**

### **Computational geometry and biomechanical analysis of an endovascular intervention in cerebral aneurysms using Kirchhoff-Love shells of nonuniform thickness**

Nicolás Muzi<sup>1,2</sup>, Francesco Camussoni<sup>3,4</sup>, Luis G. Moyano<sup>3,4</sup>, Daniel Millán<sup>1,2,†</sup>

1. Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria - Universidad Nacional de Cuyo. C. P.: 5600. San Rafael, Mendoza, Argentina.
2. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). C1425FQB C.A.B.A, Buenos Aires, Argentina.
3. Instituto Balseiro - Universidad Nacional de Cuyo. C. P.: 8400. San Carlos de Bariloche, Río Negro, Argentina.
4. Grupo de Física Estadística e Interdisciplinaria (FiEstIn), Centro Atómico Bariloche, CNEA. C.P.: 8400. San Carlos de Bariloche, Río Negro, Argentina.

†E-mail: [dmillan@mendoza-conicet.gob.ar](mailto:dmillan@mendoza-conicet.gob.ar)

#### **Resumen**

En la actualidad, los mecanismos de ruptura de aneurismas intracraneales no han sido caracterizados en su totalidad. El riesgo de ruptura durante la intervención endovascular de oclusión podría incrementarse debido a cargas localizadas en regiones cercanas al cuello del aneurisma, una situación común durante el procedimiento. Como un primer acercamiento al desarrollo de un análisis aplicable a una gran cantidad de casos con relevancia estadística, describimos la cinemática de deformación mediante un modelo de láminas delgadas geoméricamente no lineales bajo la teoría de Kirchoff-Love, en conjunto con un modelo material hiperelástico de Kirchoff-St. Venant. Si bien este modelo no refleja la complejidad del tejido arterial, este enfoque nos permite considerar la aplicación de una carga localizada en múltiples ubicaciones de la arteria para una base de datos con número significativo de casos, imitando el efecto de un microcatéter utilizado en el tratamiento endovascular. Realizamos simulaciones numéricas en 4 casos de la base de datos AneuriskWeb, y presentamos resultados preliminares considerando un espesor variable entre la arteria y el domo del aneurisma, poniendo el foco en la construcción de las mallas de superficie y en los experimentos realizados.

Palabras clave: Aneurismas intracraneales, Biomecánica de arterias cerebrales, Mecánica computacional, Procesamiento de mallas de superficie.

#### **Abstract**

The mechanism of aneurysm rupture is still not fully understood. The rupture risk of the intervention may increase during endovascular occlusion of cerebral aneurysms due to a localized load in the parent vessel close to the neck, a common day-to-day situation. As a first attempt on the road towards developing a plausible analysis capable of dealing with many cases in a statistical sense, we describe the deformation kinematics using a geometrically nonlinear thin shell model under Kirchoff-Love's assumptions in conjunction with a simplistic Kirchoff-St. Venant's hyperelastic material model. Though it cannot assess the artery's complexity, this more straightforward yet not trivial approach enables us to statistically study the application of a concentrated load in many locations, which mimics the action of an instrument during the endovascular treatment. We performed numerical simulations on 34 cases from the AneuriskWeb Database. We present preliminary results considering a smoothly varying thickness between the parent vessel and the aneurysm dome, focusing on the mesh construction process and loading.

Keywords: Intracranial aneurysms, Cerebral artery biomechanics, Computational mechanics, Mesh surface processing

## 1. Introducción

Cuando se diagnostica un aneurisma intracraneal no roto (UIA, por sus siglas en inglés) la respuesta más común es la oclusión. Sin embargo, el tratamiento endovascular muestra índices de morbilidad (5%-7%) y mortalidad (1%-2%) no despreciables (Lindgren *et al.*, 2016) Adicionalmente, dado que los UIAs son relativamente comunes, con una prevalencia de hasta el 6% (Wardlaw y White, 2000; Vlak *et al.*, 2011), y que muchos de ellos nunca se rompen (sólo  $\frac{1}{3}$  en una cohorte con seguimiento de por vida (Lindgren *et al.*, 2016)), los médicos frecuentemente se encuentran en la dicotomía de tratarlos o no (Van Rooij y Sluzewski, 2006). Particularmente, además de factores hemodinámicos, quimo-mecánicos y morfológicos asociados a la ruptura de aneurismas saculares (Radaelli *et al.*, 2015; Kayembe *et al.*, 1984; Forget Jr *et al.*, 2001; Costalat *et al.*, 2011; Millán *et al.*, 2007), el riesgo de ruptura durante la intervención puede incrementarse debido a las fuerzas externas aplicadas cerca del cuello del aneurisma por los instrumentos utilizados por los profesionales, alterando su estabilidad estructural. Un incremento en la tensión del microcatéter durante la intervención puede llevar a un súbito “salto” de éste hacia adelante (Orrú *et al.*, 2013), generando complicaciones tales como la ruptura de la arteria, daño en la *tunica intima*, complicaciones tromboembólicas (Lee *et al.*, 2011) o perforaciones del domo del aneurisma, causando efectos mucho más graves que al perforarse por la acción del *coil* (Pierot y Wakhloo, 2013; Cloft y Kallmes, 2013). El estudio de este problema presenta grandes desafíos dada la necesidad de modelar la biomecánica de la pared arterial, la cual implica considerar una estructura multicapa de materiales compuestos altamente complejos, cada uno con un comportamiento mecánico diferente (Humphrey y Canham, 2000; Savastano *et al.*, 2018; Frösen, 2014; Tulamo *et al.*, 2018). Además, la pared del aneurisma muestra grandes variaciones en su estructura y comportamiento mecánico, lo que se traduce en una mayor fragilidad en el domo y en la zona de transición ubicada en el cuello.

Se han hecho grandes avances en el modelado de la biomecánica arterial. Por ejemplo, considerando modelos materiales no lineales incompresibles como un sólido de Mooney-Rivlin, materiales multicapa, o incluso considerando orientaciones de fibras (Watton *et al.*, 2009; Selimovic *et al.*, 2014). Desafortunadamente, estos trabajos consideran geometrías teóricas simples y una baja cantidad

de casos. Además, es notable la falta de un estudio sistemático en una población estadísticamente significativa, que puede estar relacionada ya sea con la alta demanda de recursos del modelo, con la imposibilidad de especificar una serie de parámetros para realizar simulaciones en pacientes, o ambas. Con el fin de desarrollar un análisis capaz aplicable a una gran cantidad de casos con relevancia estadística, describimos la cinemática de deformación mediante un modelo de láminas delgadas geoméricamente no lineales bajo la teoría de Kirchhoff-Love, en conjunto con un modelo material hiperelástico de Kirchhoff-St. Venant. Si bien estas suposiciones no reflejan la complejidad del tejido arterial, nos permiten estudiar la aplicación de una carga localizada en múltiples ubicaciones de la arteria para una base de datos con número significativo de casos (ver sección 2.1). Adicionalmente y como una “prueba de concepto”, consideramos un mayor espesor en la arteria respecto al domo del aneurisma, así como módulos de Young diferentes en ambas regiones, buscando representar la falta de uniformidad del problema real.

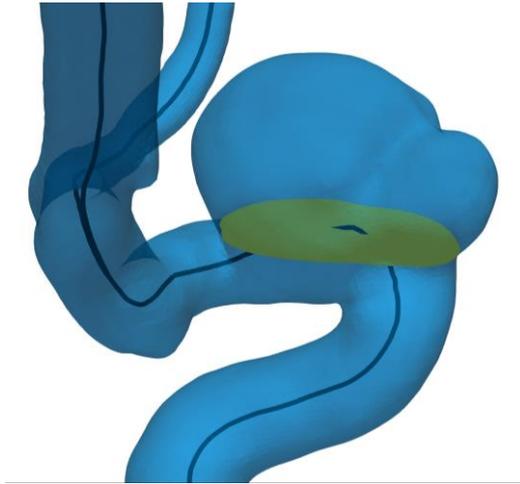
En la sección 2 se presenta la base de datos utilizada y se hace una breve descripción del modelo de láminas delgadas no lineal considerado, el modelo de la carga aplicada, la implementación numérica y la consideración de espesor variable. Además, se detalla el tratamiento de los modelos geoméricos de la base de datos para obtener las mallas necesarias para la simulación. En la sección 3 se analizan los resultados obtenidos para cuatro casos seleccionados. Finalmente, se muestran algunas conclusiones en la sección 4.

## 2. Materiales y métodos

En la sección 2.1 se describe la base de datos AneuriskWeb, de donde se obtuvieron los modelos geoméricos utilizados. En la sección 2.2 se presenta una breve descripción del modelo de láminas delgadas geoméricamente no lineales bajo la teoría de Kirchhoff-Love (tracción y flexión). El modelo de carga localizada se detalla en la sección 2.3, seguida de información acerca de la implementación numérica y la consideración de espesor variable como función de la distancia geodésica al cuello del aneurisma, en la sección 2.4. Finalmente, en la sección 2.5 se detalla el procedimiento utilizado en la generación y tratamiento de los modelos geoméricos necesarios para el cálculo de la biomecánica.

### 2.1. Base de datos AneuriskWeb

La base de datos consultada es un conjunto de imágenes médicas y datos de aneurismas obtenidos del proyecto Aneurisk entre 2005 y 2008, financiado por SIEMENS Medical Solutions en colaboración con múltiples instituciones médicas y llevado a cabo en el Laboratorio para Modelado y Cálculo Científico (MOX), del Departamento de Matemáticas del Politécnico de Milano (AneuriskWeb, 2012). La base de datos contiene 103 modelos geométricos (mallas de triángulos) de aneurismas intracraneales de 99 pacientes, obtenidos a partir de angiografías rotacionales 3D (23 de ellas están disponibles en la base de datos), con una resolución espacial de 0.3 mm (256 x 256 x 256) y segmentados a través de un proceso semi-automatizado validado por un experto. Para cada caso además se cuenta con el *ostium* (polígono describiendo el cuello), las líneas centrales del vaso sanguíneo (ver Figura 1) y algunos parámetros geométricos como la ubicación, clasificación (lateral o terminal) y estado de ruptura.



**Figura 1:** Modelo geométrico del aneurisma y el árbol arterial, líneas centrales (en negro) y polígono que describe el cuello (*ostium*).

### 2.2. Modelo elástico de láminas delgadas geoméricamente no lineales

En esta sección se describe brevemente la mecánica de láminas delgadas, basada en una formulación geoméricamente exacta (Simo y Fox, 1989). Se considera la teoría de láminas de Kirchhoff-Love, por lo que se desprecian los esfuerzos de corte y la deformación normal a la superficie media de la lámina delgada. En esta teoría el vector director de dicha lámina permanece normal a la superficie media durante la deformación (ver (Millán *et al.*, 2013) y sus referencias).

Se asume que el cuerpo puede describirse mediante el par  $(\boldsymbol{\varphi}, \mathbf{t})$ , donde el mapeo  $\boldsymbol{\varphi}$  corresponde a la superficie media  $\Omega$  de la lámina delgada, y  $\mathbf{t}$  es un campo de vectores unitarios (campo director). Se asume un espesor variable  $h$ , además de considerar despreciable el cambio de espesor luego de la deformación. El subíndice 0 hace referencia a la configuración de referencia; por ejemplo,  $\boldsymbol{\varphi}_0$  parametriza la superficie media de referencia. Se sigue la convención usual de índices latinos y griegos (es decir,  $i = 1, 2, 3$ ;  $\alpha = 1, 2$ ), la coma representa derivadas parciales, subíndices indican componentes covariantes y los superíndices componentes contravariantes.

El cuerpo de la lámina delgada  $\mathcal{S}$  está dado por

$$\mathcal{S} = \left\{ \boldsymbol{\Phi} \subset \mathbb{R}^3 \mid \boldsymbol{\Phi} = \boldsymbol{\varphi}(\xi^\alpha) + \xi \mathbf{t}(\xi^\alpha) \dots, -\frac{h(\xi^\alpha)}{2} \leq \xi \leq \frac{h(\xi^\alpha)}{2}, (\xi^1, \xi^2) \in \mathcal{A} \right\} \quad (1)$$

donde  $\mathcal{A} \subset \mathbb{R}^2$  es el espacio paramétrico para la superficie media. Por lo tanto, vemos una configuración  $\boldsymbol{\Phi}$  como un mapeo de un dominio paramétrico  $\mathcal{A} \times [-h/2, h/2]$  en  $\mathbb{R}^3$ . El dominio paramétrico se describe mediante las coordenadas  $\{\xi^1, \xi^2, \xi^3\}$  (donde identificamos  $\xi = \xi^3$ ), cuya base dual correspondiente es  $\{\mathbf{E}^i\}$ .

El elemento área de la superficie media deformada puede calcularse como  $d\Omega = \underline{j} d\xi^1 d\xi^2$ , donde  $\underline{j} = \|\boldsymbol{\varphi}_{,1} \times \boldsymbol{\varphi}_{,2}\|$ , y la normal unitaria es  $\mathbf{t} = (\boldsymbol{\varphi}_{,1} \times \boldsymbol{\varphi}_{,2})/\underline{j}$ . El tensor de deformación de membrana, que mide cambios en el tensor métrico sobre el plano, se define como  $\varepsilon_{\alpha\beta} = \frac{1}{2}(\boldsymbol{\varphi}_{,\alpha} \cdot \boldsymbol{\varphi}_{,\beta} - \boldsymbol{\varphi}_{0,\alpha} \cdot \boldsymbol{\varphi}_{0,\beta})$ . El tensor de deformación de flexión, que mide cambios en la segunda forma fundamental, está dado por  $\rho_{\alpha\beta} = \boldsymbol{\varphi}_{,\alpha} \cdot \mathbf{t}_{,\beta} - \boldsymbol{\varphi}_{0,\alpha} \cdot \mathbf{t}_{0,\beta}$ . Además, la deformación se expresa en términos de la cinemática de la superficie media. Para una lámina elástica, la energía potencial se expresa exclusivamente en función del mapeo  $\boldsymbol{\varphi}$  (superficie media), y se escribe como:

$$\begin{aligned} \Pi_{tot}[\boldsymbol{\varphi}] &= \Pi_{int}[\boldsymbol{\varphi}] - \Pi_{ext}[\boldsymbol{\varphi}] \\ &= \int_{\mathcal{A}} W(\boldsymbol{\varepsilon}, \boldsymbol{\rho}) d\mathcal{A} + \int_{\mathcal{A}} \mathbf{q} \cdot (\boldsymbol{\varphi} - \boldsymbol{\varphi}_0) d\mathcal{A}, \quad (2) \end{aligned}$$

donde  $W$  es la densidad de energía de deformación por unidad de superficie y  $\mathbf{q}$  es la carga externa por unidad de área. Se considera un modelo material isotrópico de Kirchhoff-St. Venant como modelo de material elástico.

### 2.3. Carga localizada

El efecto de la carga localizada se modela mediante una función *Plateau* que decae como función de la distancia geodésica sobre la

superficie media de referencia al punto de aplicación. Dicha función está dada como

$$\hat{q}(r) = \frac{\hat{C}}{2\pi\sigma^2} \frac{\exp\left[-\frac{1}{4}\left(\frac{r}{\sigma}\right)^4\right]}{1 + \exp\left[-\frac{1}{4}\left(\frac{r}{\sigma}\right)^4\right]}, \quad (3)$$

donde  $r$  es la distancia radial en una región circular infinita,  $\sigma$  es un parámetro que controla el ancho de la función y  $\hat{C}$  es una constante calculada de tal forma que la integral  $\hat{q}(r)$  sea igual a uno.

#### 2.4. Implementación numérica

Para el cálculo de la energía total es necesario obtener la derivada segunda de las deformaciones de la lámina  $\boldsymbol{\varphi}$ , lo que requiere una aproximación con continuidad  $C^1$  para aplicar una discretización de Galerkin. A causa de esto se usaron elementos finitos de superficies de subdivisión (Cirak y Long, 2011) para aproximar  $\boldsymbol{\varphi}$ . Se siguió un enfoque Lagrangiano con el mismo espacio de funciones tanto para la configuración deformada como para la de referencia. Sea  $\boldsymbol{\varphi}_0$  el mapeo de la configuración de referencia

$$\boldsymbol{\varphi}_{0h}(\xi^1, \xi^2) = \sum_{a=1}^N B_a(\xi^1, \xi^2) \boldsymbol{\varphi}_{0a}, \quad (4)$$

donde  $B_a(\xi^1, \xi^2)$  son funciones base de superficies de subdivisión,  $N$  es el número de nodos sobre la malla y  $\boldsymbol{\varphi}_{0a}$  la posición en el espacio del  $a$ -ésimo punto de control definiendo la superficie media de la lámina de referencia.

Es posible además considerar un espesor para la lámina, discretizado como

$$h_h(\xi^1, \xi^2) = \sum_{a=1}^N B_a(\xi^1, \xi^2) h_a, \quad (5)$$

donde  $h_a$  son valores predefinidos de espesor en los nodos de referencia. Se sabe que el espesor decae dramáticamente en el cuello del aneurisma; sin embargo, esta transición no ha sido caracterizada (Tulamo *et al.*, 2018; Kadasi *et al.*, 2013). En este trabajo se asume que el espesor de la lámina varía de acuerdo a una arcotangente de la distancia geodésica sobre el aneurisma desde el nodo hasta la curva definida por el *ostium*. La función considerada para asignar valores de espesor a cada nodo es

$$h_a = \frac{h_v - h_d}{\pi} \left( \tan^{-1}\left(\frac{d_{Ga}}{w}\right) + \frac{\pi}{2} \right) + h_d \quad (6)$$

donde  $h_v$  y  $h_d$  son valores reportados de espesor en la arteria y en el domo,  $w$  es el ancho de la zona de transición y  $d_{Ga}$  es el valor de la distancia geodésica entre el  $a$ -ésimo nodo y la

curva que define el cuello del aneurisma. Esta distancia es calculada por la biblioteca CGAL (CGAL, 2021), sobre la cual se provee más información en la sección 2.5.2.

Al utilizar la función de carga dada por la ecuación 3 para una superficie curva, la distancia  $r$  es reemplazada por la distancia geodésica  $d_G$ , mientras que la carga es  $\boldsymbol{q} = Q\hat{q}(d_G)\boldsymbol{t}_0$  donde  $Q$  es el valor de carga (100 mmHg),  $\sigma = 0.25$  mm, emulando el diámetro de un microcatéter de 1.5 Fr (0.5 mm) y  $\hat{C}$  es calculado de forma que la integral de  $\hat{q}(d_G)$  sobre la superficie media,  $\Omega_0$  es igual a uno. La energía total se expresa en función de las variables nodales  $\boldsymbol{\varphi}_a$ ,  $a = 1, 2, \dots, N$ , que se minimiza respecto a los grados de libertad dados por la deformación usando el método de Newton-Raphson, combinado con un método de búsqueda lineal dirigida por gradientes (Millán *et al.*, 2013). Esto se repite hasta alcanzar el criterio de convergencia, luego se selecciona otro punto de carga y se repite todo el proceso.

#### 2.5. Modelos geométricos

Este estudio se enfoca en efectos relacionados a la región cercana al cuello del aneurisma. Los modelos obtenidos de la base de datos incluyen una malla que describe el árbol arterial que contiene al aneurisma, la cual muestra una muy mala calidad de elementos en zonas de alta curvatura. A causa de esto resulta necesario someter a las mallas geométricas a un preproceso (Figura 2), a fin de realizar simulaciones numéricas eficientes. De los 46 casos de la arteria carótida interna se seleccionaron y procesaron 40 casos, obteniendo 34 mallas finales de cálculo (6 mallas presentaron algún tipo de problema durante el proceso). Para esto se desarrolló un marco computacional en C++ que permitió combinar las bibliotecas CGAL y VTK (*Visualization Toolkit*, (Schroeder *et al.*, 2006)) para el procesamiento de mallas.

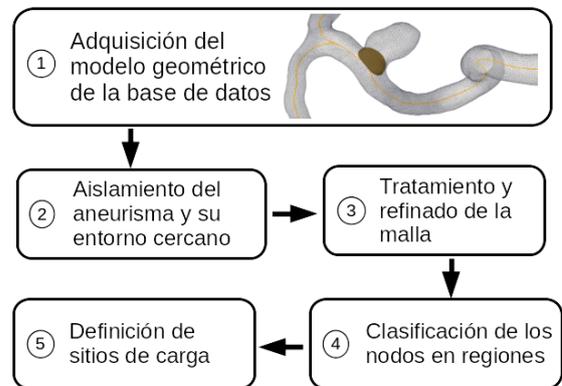
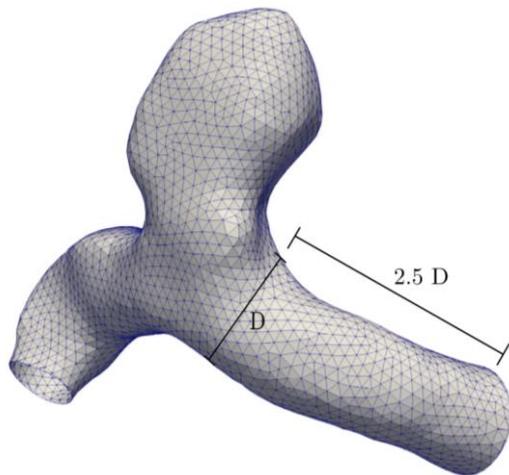


Figura 2: Pasos para el tratamiento de los modelos de aneurismas.

### 2.5.1 Aislamiento del aneurisma

Como primer paso se aisló cada aneurisma del árbol arterial cortando a una distancia determinada del cuello, descartando el resto de la arteria. Este procedimiento es llevado a cabo de manera semiautomática por una aplicación desarrollada en C++ que utiliza la biblioteca VTK, donde el usuario define la distancia de corte como un múltiplo del diámetro interno de la arteria a cada lado del cuello del aneurisma (Figura 3). Las entradas del algoritmo son el modelo geométrico, el *ostium*, las líneas centrales, la distancia deseada (como un múltiplo del diámetro) y una variable que indica si el aneurisma es lateral o terminal, de acuerdo a la clasificación aportada por la base de datos. Luego, para cada aneurisma el algoritmo selecciona puntos de referencia sobre las líneas centrales, mide el diámetro interior de la arteria, y se mueve la distancia deseada sobre la línea central, realizando el corte al alcanzar la distancia deseada.

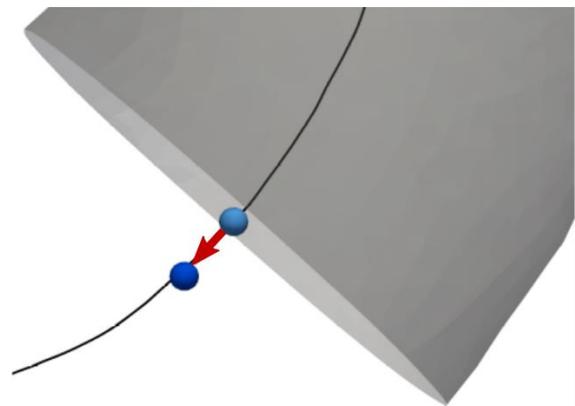


**Figura 3: Ejemplo de modelo aislado (C0005) a una distancia de 2.5 veces el diámetro interno (D).**

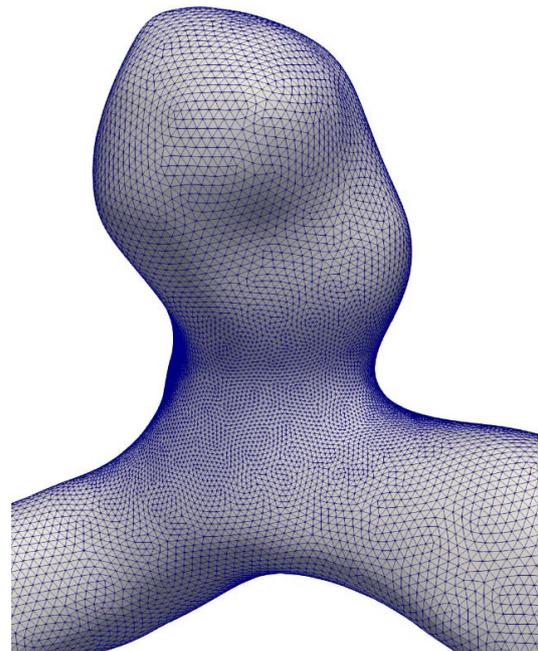
El corte es realizado por medio de un cilindro orientado de forma perpendicular a la línea central sobre el punto seleccionado (Figura 4). Luego del corte se descarta el árbol arterial, manteniendo sólo la componente conexas asociada al cuello. En este trabajo se consideró una distancia de corte de 2.5 veces el diámetro arterial, basado en un análisis no publicado del comportamiento del problema a diferentes distancias. Valores mayores (>3 veces el diámetro interno) presentaron una estabilidad mayor, pero causaban un efecto indeseado de flexión sobre el modelo y un movimiento excesivo del domo. El algoritmo de aislamiento realizó aproximadamente el 89% de los cortes de forma exitosa, permitiendo obtener el 70% de los modelos aislados de forma automática. El resto de modelos tuvo que ser aislado manualmente por un usuario entrenado, proceso que toma

aproximadamente entre 10 y 20 minutos por caso, según la complejidad del modelo, en contraste con los 3-4 segundos del aislamiento automático.

Luego de esto se hizo un remallado del modelo (CGAL, 2021), manteniendo el tamaño original de 0.25 mm de los elementos. Debido al alto impacto del cuello en las etapas siguientes, se utilizó el algoritmo de remallado isotrópico de la biblioteca CGAL para refinar el cuello del aneurisma. Finalmente, se aplicó una iteración del esquema de subdivisión de superficie de Loop (Figura 5), generando elementos de 0.0625 mm de longitud para la región refinada alrededor del cuello y 0.125 mm para el resto del modelo.



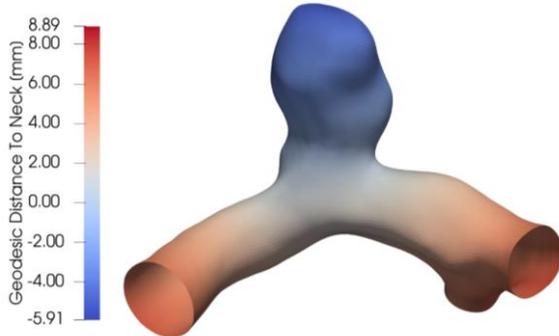
**Figura 4: Ejemplo de puntos de corte sobre la línea central (en negro) seleccionados automáticamente por el algoritmo. Sobre ellos se crean los planos perpendiculares a la superficie para efectuar el aislamiento. La flecha roja indica la dirección seguida para fijar el segundo punto de corte.**



**Figura 5: Detalle de la malla correspondiente al caso C0005 remallada y refinada en la zona del cuello.**

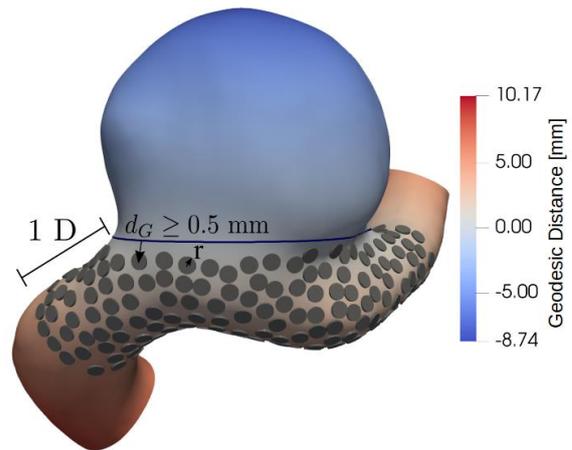
### 2.5.2 Distancia geodésica

Se desarrolló un algoritmo que aproxima la distancia geodésica de cada nodo al *ostium* y le asigna una “etiqueta” para distinguir entre nodos del domo y nodos de la arteria. En esta etapa se utilizaron algoritmos descritos en la sección “*Triangulated Surface Mesh Shortest Paths*” de la biblioteca CGAL (CGAL, 2021). Esta biblioteca calcula caminos geodésicos sobre una malla de triángulos, interpolando dentro de los elementos. Se calculó la distancia geodésica entre cada nodo y la curva del cuello (Figura 6) y se le asignó un signo dependiendo de la posición del nodo; positivo para nodos de la arteria y negativo para nodos del domo.



**Figura 6: Modelo C0005. El mapa de colores corresponde a la distancia geodésica. Se observa que los valores negativos corresponden al domo y los positivos a la arteria.**

El último paso consistió en la definición de un “chaleco” de carga en la región cercana al cuello. Esta zona fue definida a una distancia de 1 vez el diámetro interno de la arteria, con un algoritmo similar al de corte. En esta región se consideró una distribución de puntos de carga (Figura 7), donde sobre cada uno de ellos se simuló el efecto de un microcatéter presionando la arteria durante la oclusión endovascular. Estos puntos de carga se seleccionaron de tal manera que la distancia mínima entre ellos fuera de 0.5 mm, manteniendo la densidad tan regular como fuese posible. La carga aplicada corresponde a la función descrita en la sección 2.3.



**Figura 7: Detalle de los puntos de carga. Cada uno de ellos tiene un radio  $r$  de 0.25 mm (para visualización). Los puntos de carga están limitados a una región cercana al cuello (“chaleco”), definida con un algoritmo similar al de corte a una distancia de  $1 D$  ( $D$  = diámetro interno).**

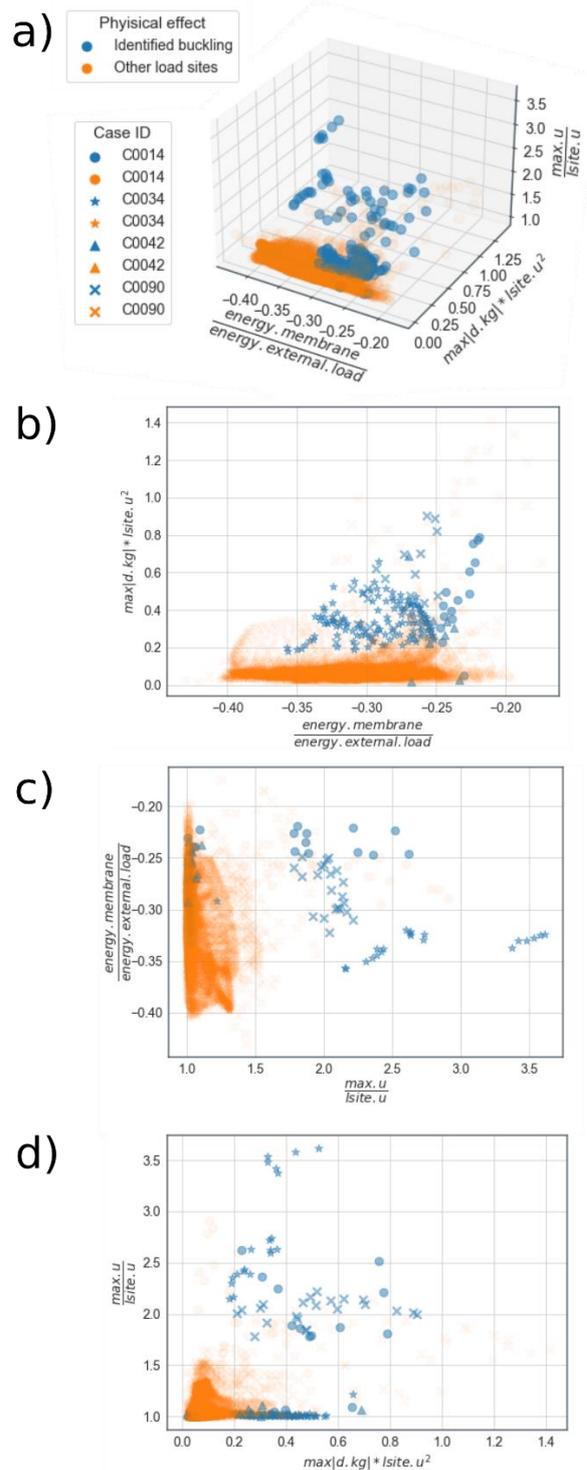
### 3. Resultados y Discusión

Se llevaron a cabo experimentos con el objetivo a largo plazo de determinar qué zonas del aneurisma poseen una mayor sensibilidad a cargas localizadas, pudiendo estar relacionadas con un evento de ruptura, siendo de interés para este primer estudio caracterizar la deformación. Un caso particular de grandes deformaciones es la presencia de fenómenos de pandeo (*buckling*), deformaciones de gran magnitud asociadas a pequeños incrementos en la carga. En este estudio, se buscó establecer qué variables biomecánicas están relacionadas con grandes perturbaciones estructurales del aneurisma cuando se aplica una carga. Para cada punto de carga se llevó a cabo un experimento independiente, midiendo diferentes parámetros en puntos específicos dentro de los elementos de la malla deformada final (puntos de Gauss). Estos incluyen la magnitud del desplazamiento, diferencias entre la curvatura Gaussiana de las configuraciones de referencia y deformada, la energía total, la energía de membrana y de flexión, entre otros. La Figura 8 muestra las relaciones adimensionales de algunas variables biomecánicas para todos los puntos de carga de cuatro casos seleccionados de la Arteria Carótida Interna (C0090, C0034, C0014 y C0042), coloreados según la presencia (azul) o ausencia (naranja) de fenómenos de pandeo, determinados por inspección visual. Se observa que los puntos de carga se agrupan en dos regiones diferenciadas con muy poca superposición, lo que sugiere que este método de visualización es una herramienta eficiente para capturar áreas específicas cercanas al aneurisma relacionadas con algún tipo de inestabilidad en el domo del

aneurisma, lo que podría estar relacionado con eventos de ruptura.

#### 4. Conclusiones

Este trabajo presenta resultados preliminares de simulaciones de biomecánica en aneurismas mediante un modelo de láminas delgadas considerando un espesor variable entre el domo y la arteria. Se desarrolló un proceso semi-automático implementado en C++ para aislar y remallar el domo del aneurisma y la vasculatura circundante, permitiendo el tratamiento de un gran número de casos y ahorrando tiempo y recursos. El algoritmo permite aislar cualquier tipo de aneurisma, ya que cada medida considerada en el proceso es relativa a las dimensiones de cada caso en particular. Además, se muestra que el análisis computacional de la biomecánica de aneurismas intracraneales puede ser útil para determinar áreas no triviales de interés para casos de estudio seleccionados. Como trabajo futuro se desea modificar el algoritmo de corte para mejorar su tasa de éxito, permitiendo no sólo expandir el presente estudio a toda la base de datos sino también aplicar dicha base de datos a otros problemas y situaciones. En cuanto a la biomecánica, se desea considerar un estado pretensionado de la estructura compatible con las condiciones fisiológicas del conjunto arteria-aneurisma en futuros análisis, a diferencia de la estructura libre de cargas considerada en el presente trabajo.



**Figura 8:** a) representación de atributos biomecánicos adimensionales para todos los puntos de carga de cuatro casos seleccionados de la ICA, coloreados a partir de la determinación visual de la presencia (azul) o ausencia (naranja) de pandeo. b-d) Proyecciones asociadas al gráfico 3D.  $\max.u$  = máximo desplazamiento,  $l_{site}.u$  = desplazamiento del punto de carga,  $\max|d.kg|$  = diferencia máxima de curvatura entre las configuraciones de referencia y deformada.

#### 5. Agradecimientos

Este trabajo fue parcialmente financiado por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y por los subsidios del Proyecto de Investigación PICTO-2016-0054 UNCuyo-ANPCyT y L028-2019 SIIP-UNCuyo.

## 6. Referencias

Aneurisk-Team, (2012). AneuriskWeb project website, <http://ecm2.mathcs.emory.edu/aneuriskweb>. Web Site.

Cirak, F.; Long, Q. (2011). *Subdivision shells with exact boundary control and non-manifold geometry*. Int J Numer Meth Eng, vol. 88, n. 9, pp. 897–923.

Cloft, H. J., Kallmes, D. F. (2002). *Cerebral aneurysm perforations complicating therapy with Guglielmi detachable coils: a meta-analysis*. Am. J. Neuroradiol., 23(10), 1706-1709.

Costalat, V. M. y otros veintiún autores, (2011). *Biomechanical wall properties of human intracranial aneurysms resected following surgical clipping (irras project)*. J Biomech, vol. 44, n. 15, pp. 2685–2691.

Forget Jr, T. R. y otros seis autores, (2001). *A review of size and location of ruptured intracranial aneurysms*. Neurosurgery, vol. 49, n. 6, pp. 1322–1326.

Frösen, J., (2014). *Smooth muscle cells and the formation, degeneration, and rupture of saccular intracranial aneurysm wall—a review of current pathophysiological knowledge*. Transl Stroke Res, vol. 5, n. 3, pp. 347–356.

Gültekin, O.; Dal, H.; Holzapfel, G., (2017). *Crack phase-field modeling of anisotropic rupture in fibrous soft tissues*. In proceedings of the XIV COMPLAS, pp. 139–150. CIMNE, 2017.

Humphrey, J.; Canham, P., (2000). *Structure, mechanical properties, and mechanics of intracranial saccular aneurysms*. J Elasticity, vol. 61, n. 1, pp. 49–81.

Kadasi, L. M.; Dent, W. C.; Malek, A. M., (2013). *Cerebral aneurysm wall thickness analysis using intraoperative microscopy: effect of size and gender on thin translucent regions*. J Neurointerv Surg, vol. 5, pp. 201–206.

Kayembe, K. y otros dos autores, (1984). *Cerebral aneurysms and variations in the circle of willis*. Stroke, vol. 15, n. 5, pp. 846–850.

Lee, J. Y., y otros cuatro autores, (2011). *Endovascular treatment of wide-neck intracranial aneurysms using a microcatheter*

*protective technique: results and outcomes in 75 aneurysms*. Am J Neuroradiol, 32(5), 917-922.

Lindgren, A. E. y otros seis autores, (2016). *Irregular shape of intracranial aneurysm indicates rupture risk irrespective of size in a population-based cohort*. Stroke, vol. 47, n. 5, pp. 1219–1226.

Millán, D.; Rosolen, A.; Arroyo, M., (2013). *Nonlinear manifold learning for meshfree finite deformation thin-shell analysis*. Int J Numer Meth Eng, vol. 93, n. 7, pp. 685–713.

Millan, R. D. y otros cuatro autores, (2007). *Morphological characterization of intracranial aneurysms using 3-d moment invariants*. IEEE T Med Imaging, vol. 26, n. 9, pp. 1270–1282.

Orrù, E., y otros cuatro autores, (2013). *Complications of endovascular treatment of cerebral aneurysms*. Eur J Radiol, 82(10), 1653-1658.

Pierot, L.; Wakhloo, A. K. (2013). *Endovascular treatment of intracranial aneurysms: current status*. Stroke, 44(7), 2046-2054.

Savastano, L. E. y otros tres autores, (2018). *Biology of cerebral aneurysm formation, growth, and rupture*. In Intracranial Aneurysms, pp. 17–32. Elsevier.

Schroeder, W.; Martin, K.; Lorensen, B., (2006). *The Visualization Toolkit*. Kitware.

Selimovic, A.; Ventikos Y.; Watton, P. N., (2014). *Modelling the evolution of cerebral aneurysms: biomechanics, mechanobiology and multiscale modelling*. Procedia IUTAM, vol. 10, pp. 396–409.

Simo, J.; Fox, D., (1989). *On a stress resultant geometrically exact shell model. Part I: Formulation and optimal parametrization*. Comput Method Appl M, vol. 72, pp. 267–304.

The CGAL Project, (2021). *CGAL User and Reference Manual*. CGAL Editorial Board, 5.2.2 edition.

Tulamo, R. y otros tres autores, (2018). *Inflammatory changes in the aneurysm wall: a review*. J Neurointerv Surg, vol. 10, n. Suppl 1, pp. i58–i67.

Van Rooij, W.; Sluzewski, M. (2006). *Procedural morbidity and mortality of elective coil treatment of unruptured intracranial aneurysms*. Am J Neuroradiol, vol. 27, n. 8, pp. 1678–1680.

Vlak, M. H. y otros tres autores, (2011). *Prevalence of unruptured intracranial aneurysms, with emphasis on sex, age, comorbidity, country, and time period: a*

*systematic review and meta-analysis.* Lancet Neuro, vol. 10, n. 7, pp. 626–636.

Wardlaw, J.; White, P., (2000). *The detection and management of unruptured intracranial aneurysms.* Brain, vol. 123, n. 2, pp. 205–221.

Watton, P. N. y otros dos autores, (2009) Y. Ventikos, and G. A. Holzapfel. *Modelling the growth and stabilization of cerebral aneurysms.* Math Med Biol, vol. 26, n. 2, pp. 133–164.

## **05TCMC - Estudio de durabilidad del acero al carbono aisi 1045 afectado por drenaje ácido**

### **Durability study of aisi 1045 carbon steel affected by acid drainage**

Ángel Mariano Rodríguez Pérez<sup>1</sup>, Aguasanta Miguel Sarmiento<sup>1</sup>, José Miguel Dávila Martín<sup>1</sup>.

1. Departamento de Ingeniería Minera, Mecánica, Energética y de la Construcción, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Campus El Carmen, Universidad de Huelva, 21007 Huelva (Spain), e-mail: angel.rodriguez@dcu.uhu.es

#### **Resumen**

En este estudio se han colocado una serie de probetas en drenaje ácido de minas (AMD). La Investigación ha consistido en dos partes: en la primera de ellas, se han depositado un total de 50 probetas en un arroyo afectado por AMD (Huelva, España), todas ellas de acero al carbono AISI 1045; en la segunda parte del estudio se ha cogido agua del mismo arroyo afectado y se ha vertido en unos recipientes. En estos recipientes se han colocado un total de 100 probetas de acero al carbono AISI 1045.

Las probetas se extrajeron de 25 en 25 para proceder a su caracterización. En nuestro caso, los análisis que hemos realizado han sido, el estudio de la variación del peso y las pérdidas mecánicas que se han obtenido, realizando la curva SN con una máquina de ensayo por fatiga.

Los resultados obtenidos al caracterizar las probetas de acero al carbono AISI 1045, indican que se ha producido una gran corrosión en las muestras que se colocaron en la rivera. Mientras que las que se depositaron en los recipientes, presentan un nivel de corrosión significativamente menor. Esto se debe a la corriente de la rivera que provoca un mayor desgaste por rozamiento en las probetas.

Palabras clave: Curva SN, corrosión, ensayo de fatiga

#### **Abstract**

In this study, a series of test tubes for acid mine drainage (AMD) have been introduced. The investigation consists of two parts: In the first of them, a total of 50 test tubes have been introduced in an AMD affected stream (Huelva, Spain), all of them made of AISI 1045 carbon steel. In the second part of the study, water was taken from the same affected stream Sour and has been poured into some containers. A total of 100 AISI 1045 carbon steel specimens have been placed in these containers.

The specimens have been extracted 25 by 25 to carry out a series of analyzes. In our case, the analyzes that we have carried out have been the study of the variation of the weight and the mechanical losses that have been obtained, carrying out the SN curve with a fatigue testing machine.

With regard to the results obtained in the AISI 1045 carbon steel specimens, it can be seen that great corrosion has been obtained in the specimens that have been introduced into the riverbank. While in those that have been introduced into the containers, the level of corrosion is much lower. This is due to the current that the bank has, which causes greater frictional wear on the specimens.

Keywords: SN curve, corrosion, fatigue test

## 1. Introducción

El proceso de drenaje ácido de mina (AMD) es un complejo mecanismo que se inicia con la oxidación de sulfuros para dar sulfatos. Este proceso libera hidrogeniones y genera con ello acidez extrema en el medio hídrico (Sarmiento et al., 2018), que permite la incorporación de los metales y metaloides presentes en el entorno, generalmente asociados a las explotaciones mineras orientadas al beneficio de paragénesis minerales de sulfuros polimetálicos, y en menor escala en la minería del carbón. Posteriormente, este proceso, se ve acelerado por procesos biológicos (Casiot et al., 2004; Grande et al, 2005, Grande et al 2003, Sarmiento et al, 2012; Younger et al, 2005), lo que conduce, en la mayor parte de los casos, a un medio altamente oxidante debido a la elevada acidez y a la importante concentración de metales disueltos cuyos potenciales normales de reducción son más negativos que el del par ( $Fe^{2+}/Fe^0$ ) (Sarmiento et al., 2009; 2011; 2016). El AMD es uno de los principales problemas que poseen las empresas mineras debido al alto poder de corrosión, disminuyendo considerablemente la vida útil de los materiales mecánicos empleados en sus instalaciones

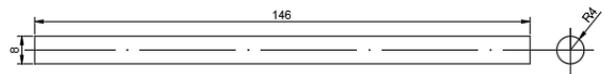
En lo que respecta a los ensayos mecánicos, se pueden encontrar numerosos estudios en los cuales se investigan los efectos del espesor del recubrimiento en la vida a fatiga de probetas de flexión de ejes de acero AISI 1045 con recubrimientos de combustible de oxígeno de alta velocidad (HVOF) WC-10% Co-4% Cr y recubrimientos galvanizados de cromo duro bajo condiciones de carga cíclica (Nguyen et al. 2020). En la mayoría de estos trabajos se desarrolla la curva S-N o curva de Wöhler para analizar sus pérdidas o ganancias de propiedades mecánicas para cualquier tipo de carga aplicada en el material.

En este trabajo se van a evaluar los efectos que tiene el drenaje ácido de minas sobre la degradación en los diferentes tipos de metales, así como las diferencias en la degradación en un medio estático (con la exposición de las probetas en un medio contaminado por AMD en laboratorio) y en otro dinámico (con la exposición de las probetas en un arroyo afectado por AMD, la Rivera de Aguas Agrias, en la provincia de Huelva, SO España). Para ello se evaluará sus propiedades mecánicas y su estado de corrosión mediante el método gravimétrico (Vonget al., 1991). El estudio mecánico se realiza haciendo un ensayo a fatiga, en el cual se realizan las curvas SN o curva de Wöhler para su posteriores comparación y análisis de estas. Con

ello, se podrá ver cómo afecta el drenaje ácido a diferentes cargas aplicadas sobre el acero al carbono AISI 1045, por otro lado, se analizan las variaciones de la resistencia a la tracción y distintos parámetros mecánicos derivados de este ensayo. Con esto se pretende dar una solución a la problemática actual que hay en la corrosión de metales en las maquinarias mineras. En este estudio se realizan ensayos tanto en laboratorio como ensayos en campo

## 2. Materiales y métodos

Las probetas que se han preparado para la realización del trabajo las podemos ver en la Figura 1. La geometría de estas probetas está condicionada por las dimensiones necesarias para hacer su posterior ensayo en la máquina de fatiga.



**Figura 1. Probeta para laboratorio y Rivera de Aguas Agrias, con sección cilíndrica en milímetros**

Las probetas se van a colocar en la Rivera de Aguas Agrias que se encuentra en Tharsis, Huelva. (Figura 2).



**Figura 2. Localización de la Rivera de Aguas Agrias**

Posteriormente se ha seleccionado la ubicación exacta donde se van a introducir en la rivera como podemos ver en la figura 3.



**Figura 3. Tramo de la Rivera de Aguas Agrias donde se han colocado las probetas**

La Rivera de Aguas Agrias nace en el embalse Grande, a partir de donde recoge los lixiviados de las escombreras y balsas de lodos de los alrededores. Después de recorrer 15 kilómetros hacia el sureste desemboca en el río Oraque. Las muestras analizadas en la Rivera de Aguas Agrias revelan concentraciones máximas de hasta 1.8 g/L de Fe, 24 g/L de sulfatos, 940 mg/L de Al, 377 mg/L de Zn, 200 mg/L de Mn y 83 mg/L de Cu. Otros elementos también han sido hallados en altas concentraciones tales como 4.3 mg/L de As, 1.3 mg/L de Cd, 12.5 mg/L de Co, 8.7 mg/L de Ni, etc. Los valores de la conductividad eléctrica son de hasta 16 mS/cm y el pH se mantiene siempre por debajo de 3 (Sarmiento, 2007).

Una vez seleccionado el tramo se pasa a preparar las muestras. En nuestro caso se ha hecho una serie de aparejos, para ello se ha utilizado un hilo de nylon de 0,3 mm con una resistencia de 12.4 kg. En cada aparejo se han colocado 5 probetas, con una separación entre cada una de ellas de 20 cm para que no puedan tocarse unas con otras como se puede ver en la Figura 4. En los extremos se ha dejado un mínimo de un metro y medio por cada lado para poder anclar los aparejos en los extremos de la rivera.



**Figura 4. Aparejo para introducir las probetas en la Rivera**

Todas las probetas han sido previamente pesadas en una balanza de precisión y numeradas. Esto es necesario para saber la pérdida de masa que han tenido cada una de ellas.

Antes de introducirlas en la rivera y para poder realizar el posterior ensayo en la máquina de fatiga, se recubren los extremos de cada probeta con cinta adhesiva como se puede observar en la Figura 5.



**Figura 5. Probetas con los extremos de estas recubiertas de cinta adhesiva.**

Por uno de los extremos se han recubierto 40 mm (trozo de la probeta que va introducido dentro de la máquina de fatiga) y por el otro extremo se recubren 20 mm que es lo correspondiente al trozo de probeta que va dentro del rodamiento que tiene la máquina de fatiga y con ello evitar vibraciones que podrían alterar los resultados. Hay que tener en cuenta que por donde se va a aplicar la carga sobre la misma, como se puede apreciar en la Figura 6, no está recubierta con la cinta adhesiva.

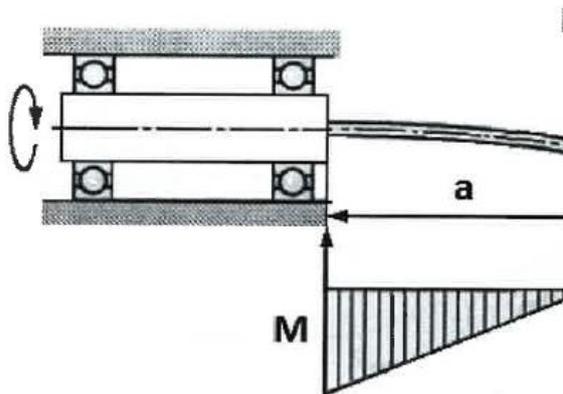


Figura 6. Carga que actúa sobre la probeta  
( $M_{max} = F \cdot a$ ).

Se introduce un total de 10 aparejos en la Rivera de Aguas Agrias, lo que supone un total 50 probetas. Se realiza una primera extracción a los 3 días y 12 horas, en la cual se sacan la mitad de las probetas, un total de 25. A los 7 días se realiza la segunda extracción, en la que se sacan las restantes 25 probetas que quedaban aun en la rivera.

Por otro lado, en lo que respecta a los ensayos que se han realizado en el laboratorio se ha utilizado un total de 4 recipientes con una capacidad de 6,4 litros. Estos recipientes se han llenado con el agua que se ha recogido del mismo lugar de la Rivera de Aguas Agrias donde se han depositado los aparejos en la Rivera.

Para la preparación de los recipientes se han realizado un total de 80 taladros de 8 mm en cada tapa de los recipientes, que es el mismo diámetro que tienen las probetas; los taladros sobrantes se han realizado para que entre el aire por ellos y así pueda sobrevivir las bacterias que podemos encontrar en el agua. Como podemos ver en la Figura 7, en los dos recipientes de color azul se han introducido las probetas de acero al carbono AISI 1045. Se han introducido un total de 50 probetas en cada uno de los recipientes.



Figura 7. Recipientes con las probetas introducidas.

Se ha efectuado extracciones de 25 probetas cada 20 días, es decir, a 20, 40, 60 y 80 días.

Para realizar el ensayo de fatiga, la máquina que hemos utilizado ha sido la WP 140 de la marca GuntHamburg (Figura 8). Esta máquina hace girar la probeta a una velocidad constante de 3000 rpm. Mientras el equipo gira a la velocidad constante se le aplica una fuerza en un extremo que aumenta desde los 10 N a los 300 N (Figura 6).

Para la realización de la curva S-N o curva de Wöhler se aplica una fuerza que disminuye de 10 en 10 N desde 300N hasta 240N y, posteriormente, baja de 5 en 5 N desde 240N hasta 150N.

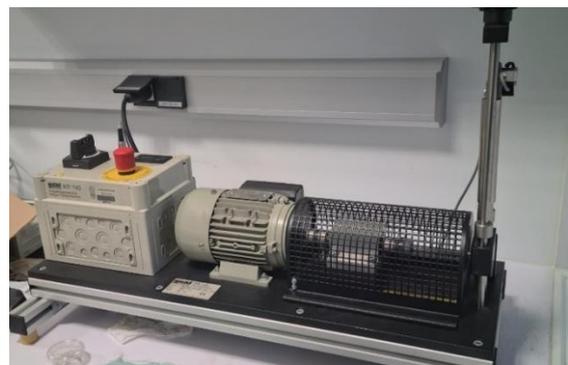


Figura 8. Máquina para la realización de los ensayos de fatiga.

### 3. Resultados y Discusión

Antes de comenzar el estudio se ha calculado el número de muestras necesarias, para ello se ha estimado un nivel de confianza del 85% y

margen de error del 15%. Para el cálculo del número de muestras se ha usado la fórmula estadística para el cálculo de muestras en una población infinita. (Lilia, 2015).

$$n = \frac{z^2 * p * q}{e^2} = \frac{1,44^2 * 0,5 * 0,5}{0,15^2} = 23,04 \text{ muestras} \quad (1)$$

Donde:

- n = tamaño de la muestra,
- z = parámetro estadístico que depende del nivel de confianza (1,44 para un nivel de confianza del 85%),
- p = probabilidad de éxito (50% al no haber estudios previos),
- q = probabilidad de no éxito (50% al no haber estudios previos) y
- e = margen de error

En nuestro caso se ha elegido realizar el estudio con 25 muestras y así alcanzaría un nivel de confianza mayor al 85% y un margen de error menor del 15%.

En la Figura 9 se pueden ver las probetas que han estado en los recipientes en el laboratorio, una vez que se ha realiza el ensayo de fatiga con ellas para la realización de la curva SN o curva de Wöhler.



**Figura 9. Probetas de laboratorio a las que se les ha realizado el ensayo de fatiga**

En la Figura 10 se pueden ver las probetas que han estado en la Rivera de Aguas Agrias una vez que se ha realizado el ensayo de fatiga.



**Figura 10. Probetas después de haber estado en la Rivera de Aguas Agrias, a las que se les ha realizado el ensayo de fatiga.**

En primer lugar, se han pesado las probetas extraídas para así poder calcular la pérdida o ganancia de masa que ha podido haber en cada una de las probetas. Para ello se va a utilizar una balanza con una precisión de 0.1 mg. En la tabla 1 se pueden ver las pérdidas de masa que se han obtenido en cada una de las extracciones, tanto de las probetas que han estado en la rivera, como de las que han estado en los recipientes en el laboratorio.

**Tabla 1. Valores medios de pérdidas de masa obtenidos en las experiencias**

	PM (%)
20 días laboratorio	0.129
40 días laboratorio	0.223
60 días laboratorio	0.304
80 días laboratorio	0.443
3.5 días río	24.303
7 días río	42.781

PM: pérdida de masa.

Una vez que se ha obtenido la pérdida de masa se puede determinar la velocidad de corrosión en m.d.d. es decir miligramos de material perdido por día transcurrido y dm<sup>2</sup> de área de material expuesto. Para el cálculo de la velocidad de corrosión se va a determinar la velocidad de corrosión de cada una de las probetas para, posteriormente, calcular la media de todas ellas teniendo en cuenta la pérdida de masa media de las 25 probetas (Tabla 1) siguiendo la Ecuación 11.

$$V_{\text{corrosión}} = \frac{m_i - m_f}{\rho A t} \quad (2)$$

Donde:

- V = velocidad de corrosión (mm/día),
- mi = masa inicial (miligramos),

mf = masa final (miligramos),  
 $\rho$  = la densidad del material (mg/mm<sup>3</sup>),  
 A = área de exposición (mm<sup>2</sup>) y  
 t = tiempo de exposición (días).

Ahora se calcula la velocidad de corrosión media teniendo en cuenta las 25 probetas después de 20 días de exposición en el laboratorio.

$$V_{Corr20Dias} = 1,234 * 10^{-7} \frac{mm}{día} \quad (3)$$

De igual forma, se obtiene la velocidad de corrosión media para las 25 probetas expuestas durante 40 días en el laboratorio, y las expuestas 60 y 80 días, también en laboratorio (ec. 4, 5 y 6 respectivamente)

$$V_{Corr40Dias} = 1,705 * 10^{-7} \frac{mm}{día} \quad (4)$$

$$V_{Corr60Dias} = 9,694 * 10^{-8} \frac{mm}{día} \quad (5)$$

$$V_{Corr80Dias} = 1,060 * 10^{-7} \frac{mm}{día} \quad (6)$$

La velocidad de corrosión media teniendo en cuenta las 25 probetas después de 3 días y 12 horas en la Rivera de Aguas agrias sería:

$$V_{Corr3,5Dias} = 1,564 * 10^{-4} \frac{mm}{día} \quad (7)$$

Adicionalmente, la velocidad de corrosión media para las 25 probetas expuestas durante 3 días y 12 horas en la Rivera de Aguas agrias se expresaría como:

$$V_{Corr7Dias} = 1,190 * 10^{-4} \frac{mm}{día} \quad (8)$$

Como se puede observar en los resultados, la velocidad de corrosión después de 20 días de exposición disminuye levemente y/o se mantiene prácticamente constante.

También se puede apreciar que la velocidad de corrosión ha sido parecida en todo el tiempo que han estado las probetas introducidas en la Rivera, pero mucho más alta que las que han estado en el laboratorio. Esto indica que el mineral neoforado, generalmente oxyhidroxisulfatos de Fe en medios contaminados por AMD (Sarmiento, 2007), no pasiva la oxidación haciendo que la velocidad de oxidación sea la misma independientemente del tiempo de exposición. Esto puede ser debido a que el mineral oxidado es muy poroso permitiendo la oxidación a través de los huecos de su estructura.

Una vez calculada la pérdida de masa y su velocidad de corrosión, se procede a realizar los ensayos de fatiga de las diferentes extracciones que se han efectuado, tanto en el laboratorio como en el río. Como se puede ver en las Figuras 11 a 16, se ha comparado la curva SN o curva de Wöhler con la curva de la probeta de referencia (sin contacto con el drenaje acido)

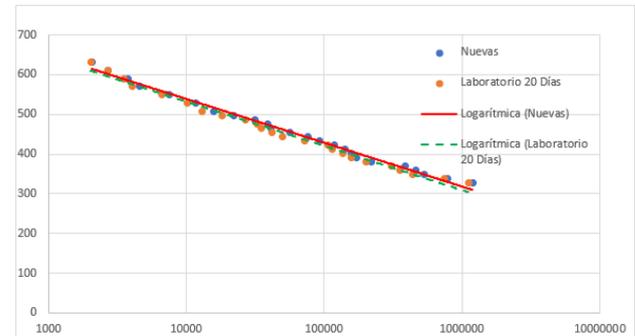


Figura 11. Curva SN o curva de Wöhler después de 20 días en el agua acida de minas (Newton-Ciclos)

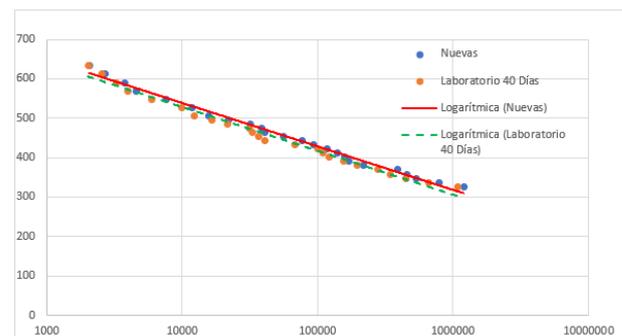


Figura 12. Curva SN o curva de Wöhler después de 40 días en el agua acida de minas (Newton-Ciclos)

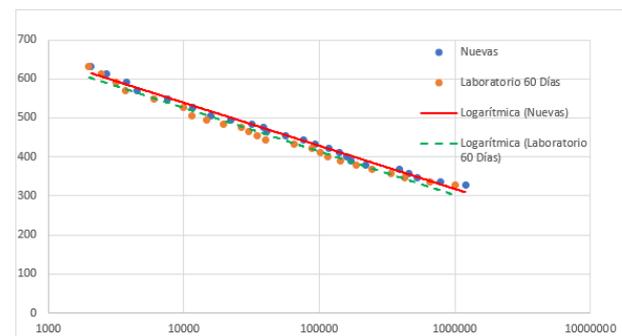
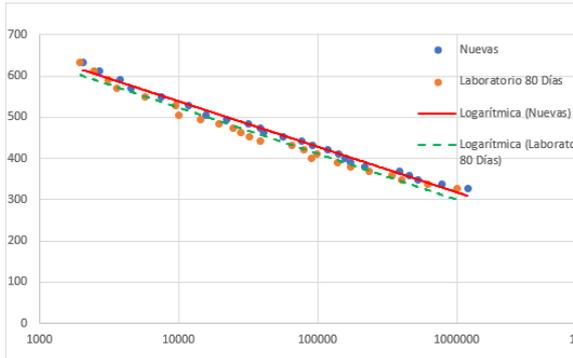
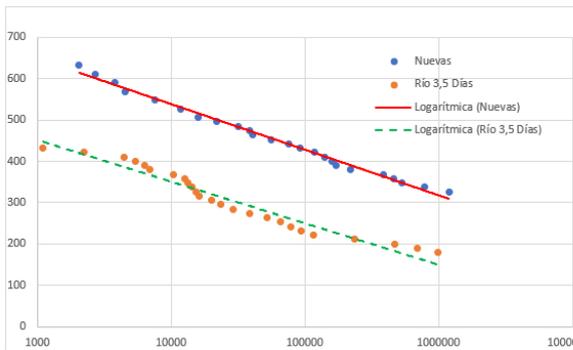


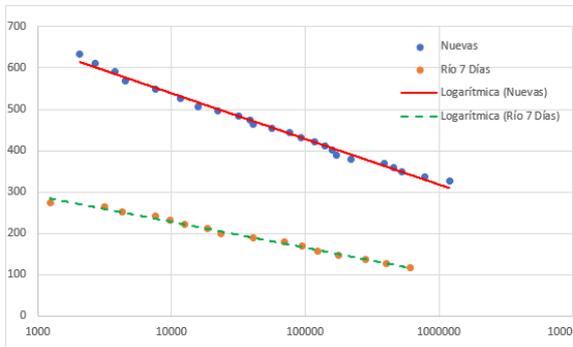
Figura 13. Curva SN o curva de Wöhler después de 60 días en el agua acida de minas (Newton-Ciclos)



**Figura 14. Curva SN o curva de Wöhler después de 80 días en el agua acida de minas (Newton-Ciclos)**



**Figura 15. Curva SN o curva de Wöhler después de 3 días y 12 horas en la Rivera de Aguas Agrías (Newton-Ciclos)**



**Figura 15. Curva SN o curva de Wöhler después de 7 días en la Rivera de Aguas Agrías (Newton-Ciclos)**

En la Tabla 2 podemos ver el porcentaje de pérdidas mecánicas que hemos obtenido después de comparar las curvas obtenidas en las probetas que han estado en contacto con el drenaje ácido de minas con la curva de las probetas de referencia.

**Tabla 2. Valores medios de pérdidas de mecánica obtenidos en las experiencias**

	PPMF (%)
20 días laboratorio	13.502

40 días laboratorio	18.866
60 días laboratorio	23.493
80 días laboratorio	26.721
3.5 días río	> 100

PPMF: pérdida de propiedades mecánicas ensayo de fatiga

#### 4. Conclusiones

En primer lugar, se ha obtenido una gran diferencia entre las probetas que se han introducido en la Rivera de Aguas Agrías (medio dinámico) y las que han quedado sumergidas en el recipiente con agua proveniente del mismo medio en el laboratorio (medio estático). La velocidad de corrosión en la Rivera ha sido mucho mayor. Esto es debido a la corriente acuosa y el desplazamiento del fluido. En ambos casos se ha observado pérdida de resistencia mecánica y pérdida de masa según ha ido transcurriendo el tiempo, pero mucho más acentuado en las probetas expuestas a un ambiente AMD dinámico. Como se ha podido observar comparando las curvas SN con la obtenidas en las muestras de referencia, la pérdida mecánica ha sido muy alta en tan solo 7 días en las probetas que han estado en la Rivera de Aguas Agrías, mientras que la pérdida mecánica en las probetas que han estado en el laboratorio se ralentizó tras un máximo de 80 días de exposición.

Los resultados en las curvas SN presentan un buen ajuste estadístico. Por lo tanto, el número de probetas que se ha seleccionado para la realización de los ensayos ha sido el idóneo.

#### 5. Referencias

- Casiot, C., Bruneel, O., Personne, J. C., Leblanc, M. y Elbaz-Poulichet, F. (2004). Arsenic oxidation and bioaccumulation by the acidophilic protozoan, *Euglena mutabilis*, in acid mine drainage (Carnoulés, France). *Science of the Total Environment*, 320, 259-267.
- Grande, J.A., Beltran, R., Sainz, A., Santos, J.C., de la Torre, M.L., Borrego, J. (2005). Acid mine drainage and acid rock drainage processes in the environment of Herrerías Mine (Iberian Pyrite Belt, Huelva-Spain) and impact on the Andevalo DAM. *Environmental Geology*, 47, 185-196.

- Grande, J.A., Borrego, J., Morales, J.A., de la Torre, M.L., (2003). A description of how metal pollution occurs in the Tino-Odiel Rías (Huelva-Spain) through the application of cluster analysis. *Mar Pollut Bull.* 46(4), 475–480
- Lilia, C. F. A. (2015). Población y muestra.
- Nguyen, V. P., Dang, T. N., Le, C. C., & Wang, D. A. (2020). Effect of coating thickness on fatigue behavior of AISI 1045 steel with HVOF thermal spray and hard chrome electroplating. *Journal of Thermal Spray Technology*, 29(8), 1968-1981.
- Sarmiento, A.M., Bonnail, E., Nieto, J.M., Del Valls A. (2016). Bioavailability and toxicity of metals from a contaminated sediment by acid mine drainage: Linking exposure–response relationships of the freshwater bivalve *Corbicula fluminea* to contaminated sediment. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 22957-22967
- Sarmiento AM, MA Caraballo, D Sánchez-Rodas, JM Nieto, A Parviainen. (2012). Dissolved and particulate metals and arsenic species mobility along a stream affected by acid mine drainage in the Iberian Pyrite Belt (SW Spain). *Applied Geochemistry*, 27, 1944-1952
- Sarmiento, A.M. J. M. Nieto, C. Casiot, F. Elbaz-Poulichet & M. Egal. (2009). Inorganic arsenic speciation at river basin scale: the Tinto and Odiel Rivers in the Iberian Pyrite Belt, SW Spain. *Environmental Pollution*, 157, 1202-1209
- Sarmiento, A.M., Grande, J.A., Luís, A.T., Dávila, J.M., Fortes, J.C., Santisteban, M., Curiel, J., de la Torre, M.L., Ferreira, E. (2018). Negative pH values in an open-air radical environment affected by acid mine drainage. Characterization and proposal of a hydrogeochemical model. *Science of the Total Environment*, 644, 1244-1253.
- Sarmiento, AM, A Del Valls, JM Nieto, MJ Salamanca, MA Caraballo. (2011). Toxicity and potential risk assessment of a river polluted by acid mine drainage in the Iberian Pyrite Belt (SW Spain). *Science of the Total Environment*, 409, 4763-4771
- Vong, Y. M., González, W. L., López, P. R., Mendoza, J. A., & Llongueras, L. G. (1991). Tres métodos para evaluar una velocidad de corrosión. *Tecnología y ciencias del agua*, 21-35.
- Younger P. L., Banwart S. A. y Hedin R. S. (2002). Mine water. *Hidrology, Pollution, Remediation. Environmental Pollution*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. Vol. 5, 442 pp.
- Younger P. L., Coulton R. H. y Froggatt E. C. (2005). The contribution of science to risk based decision making: lessons from the development of full scale treatment measures for acidic mine water at Wheal Jane, UK. *Science of the Total Environment*, 338, 137-154.