



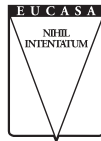
# CUADERNOS DE INGENIERÍA

PUBLICACIONES ACADÉMICAS

12

Nueva serie

Número XII / diciembre, 2020



EDICIONES  
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SALTA  
EUCASA

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SALTA  
(UCASAL)**

CUADERNOS DE INGENIERÍA  
N.º 12 | 2020

**CONSEJO EDITORIAL**

**DIRECTORA:**

Dra. Ing. Lía Orosco | Jefa del Departamento de Investigación, UCASAL

**MIEMBROS:**

Ing. Néstor Eugenio Lesser | Decano de la Facultad de Ingeniería, UCASAL, Argentina

Ing. Joan Carles Olmedillas Hernández | Consultor, España

Dr. Ing. Jorge Eugenio Crempien Laborie | Universidad de Piura, Perú

Dr. Ing. Horacio Colina | École Nationale des Ponts et Chaussées, Francia

Dr. José Germán Viramonte | CONICET, Argentina

Dr. en Ciencias Luis Antonio Olsina Santos | UNLP, Argentina

**ADMINISTRADOR PORTAL CI**

Ing. Matías N. Amor | Departamento de Investigación/Extensión, UCASAL

**COMITÉ CIENTÍFICO**

Dr. Ing. Mario Roberto Arrieta Paternina | Universidad Nacional Autónoma de México

Mg. Lic. Edith Cámpora | Universidad Nacional de Rosario, Argentina

Ing. Ana Haydeé di Ioro | Universidad FASTA, Mar del Plata, Argentina

Dr. Ing. Adolfo Escobar Ordóñez | Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín, Colombia

Dr. Ing. José González | Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina

Dr. Ing. Hugo Gregorio | Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina

Dr. Andrzej Kijko | Universidad de Pretoria, Sudáfrica

Esp. Lic. Julio César Liporace | Universidad de la Defensa Nacional, Buenos Aires, Argentina

Mg. Ing. Mario Raitelli | Universidad Nacional de Tucumán, Argentina

Dr. Ing. Hernán Santa María Oyadenel | Pontificia Universidad Católica de Chile

Dra. Silvana Karina Valdez | Universidad Nacional de Salta, Argentina

Msc. Petrus Johannes Vermeulen | Universidad de Pretoria, Sudáfrica

Dr. Ing. Vladimir J. Alarcón-Calderón | Universidad Diego Portales, Chile

Dr. Ing. Raúl Bertero | Universidad Nacional de Buenos Aires, Argentina

Dr. Ing. Oscar Möller | Universidad Nacional de Rosario, Argentina

Dr. Ing. Carlos Gastón Catalini | Universidad Nacional de Córdoba, Argentina

Dra. Ing. Mercedes Ruiz Carreira | Universidad de Cádiz, España.

Dr. Ing. Diego Alberto Godoy | Universidad Gastón Dachary, Argentina

Ing. Luis Perna | Universidad Tecnológica Nacional, Regional Delta, Argentina

e-ISSN 2545-7012

ISSN 2545-692X (hasta el núm. 10 - 2018, la revista se publicó en soporte papel)

Domicilio editorial: Campus Universitario  
Castañares - 4400 Salta - Argentina

Tel.: (54-387) 426 8607

e-mail: [cuadernosdeingenieria@ucasal.edu.ar](mailto:cuadernosdeingenieria@ucasal.edu.ar)

web: <http://revistas.ucasal.edu.ar/index.php/CI>

[www.ucasal.edu.ar/eucasa](http://www.ucasal.edu.ar/eucasa)



Imagen de tapa:  
Boceto. Leonardo da Vinci (1452-1519)

# CUADERNOS DE INGENIERÍA

Nueva serie

Publicaciones Académicas

12 | 2020



EDICIONES  
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SALTA  
SALTA - ARGENTINA

*Cuadernos de Ingeniería* es una publicación científica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Salta publicada bajo el sello EUCASA (Ediciones Universidad Católica de Salta). Es una revista de periodicidad anual, que contiene artículos científicos (productos de investigaciones científicas y desarrollos tecnológicos – I+D), de revisión, ensayos y reseñas de libros, todos de carácter original, sobre temas relacionados con el campo disciplinar de la ingeniería en todas sus ramas. Es una revista de acceso abierto publicada bajo licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual. Los autores retienen, sin embargo, el derecho a ser adecuadamente citados. Todos los artículos recibidos son objeto de evaluación. La responsabilidad sobre el respeto a la propiedad intelectual corresponde a los autores. Los *Cuadernos de Ingeniería* han sido incorporados al Catálogo Latindex (Sistema Regional de Información para las Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal), versión 2.0 - Folio 22986.

*Cuadernos de Ingeniería is a scientific journal published by Universidad Católica de Salta, Argentina. It has been printed by EUCASA (Ediciones Universidad Católica de Salta – Universidad Católica de Salta Editions). This annual publication contains scientific and technological development articles, review papers, essays and book reviews on topics related to the wide field of engineering sciences. Cuadernos de Ingeniería is Open Access published under Creative Commons licence Attribution-NonCommercial-Share Alike. All papers received are submitted to peer evaluation before their publication. Authors are responsible for compliance with copyright laws. Cuadernos de Ingeniería has been incorporated to the LATINDEX Catalog (Regional Information System for Scientific Publications from Latin America, the Caribbean, Spain and Portugal), version 2.0 - Folio 22986.*



## SUMARIO

Editorial	
Jorge E. Crempien Laborie.....	5
Identificación de emociones en textos de una red social	
<i>Identification of emotions in texts of a social network</i>	
Alejandra Carolina Cardoso, María Lorena Talamé, Matías Nicolás Amor y Agustina Monge .....	7
Aplicación de la técnica LSPIV en el diseño hidrológico de infraestructura hídrica	
<i>LSPIV application in the hydrological design of hydraulic infrastructure</i>	
Myriam Cecilia Botelli, Nicolás Federico Guillén, Carlos Marcelo García, Antoine Patalano y Marcelo Chalabe.....	21
Structure evaluation using output-only systems identification methods and dynamic model updating	
<i>Evaluación estructural usando métodos de identificación con base en la respuesta y actualización del modelo dinámico</i>	
Andrea Brasiliano, Maria Diciá D. Silva, Graciela N. Doz, José Luís Vital .....	39
Desarrollo de un ventilador mecánico de emergencia basado en turbocompresor axial	
<i>Development of a mechanical fan based on axial turbocharger</i>	
Roberto Breslin y Pablo Rodrigo Narváez .....	65



## EDITORIAL

Esta nueva entrega de los *Cuadernos de Ingeniería* trae consigo una gran noticia que nos llena de alegría y de ilusiones. Se trata de la inclusión de nuestra revista en el Catálogo 2.0 de Latindex. Esto es todo un logro que indica que se ha seguido un camino correcto.

Hemos podido cumplir la meta de completar la publicación a pesar de las complicaciones derivadas de la pandemia de COVID 19, una muestra de que la ciencia no puede detenerse y que, además, este tipo de problemas que tiene que enfrentar la humanidad pone a prueba nuestro intelecto y nos hace desarrollar proyectos que nos ayudarán a sortear las dificultades. De esta realidad surge el trabajo presentado por integrantes del Grupo de Telecomunicaciones, del Instituto de Estudios Interdisciplinarios de Ingeniería (IESIING) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Salta (UCASAL), para producir un ventilador mecánico de emergencia.

También se recoge en este volumen un texto que analiza la aplicación de técnicas LSPIV para el diseño de infraestructura hídrica, con el fin de lograr el mejor aprovechamiento de un recurso tan importante como el agua.

Desde la Ingeniería en Informática, otro artículo indaga en la identificación de emociones en las redes sociales, de una importancia notable sobre todo en épocas de crisis sociales.

Finalmente, otro tema tratado es la determinación de propiedades dinámicas de una estructura para su adecuado monitoreo, lo que resulta de gran importancia en las zonas sísmicas de Sudamérica donde la excitación sísmica pasa a ser un problema relevante por sus efectos devastadores en pérdidas materiales y de vidas humanas.

El crecimiento de propuestas, ideas y proyectos, de la ingeniería en todas sus ramas, con el fin de propiciar el desarrollo de nuestros países, necesita contar con revistas como esta para colaborar sistemáticamente con la divulgación científica, y *Cuadernos de Ingeniería* es un medio acreditado para transmitir a la comunidad internacional el resultado de nuestras investigaciones. Los invito a seguir contribuyendo con sus ideas a este esfuerzo de la Facultad de Ingeniería de la UCASAL.

*Jorge E. Crempien Laborie, Ph.D.  
Profesor, Universidad de Piura, Perú*



## Identificación de emociones en textos de una red social

### Identification of emotions in texts of a social network

Alejandra Carolina Cardoso<sup>1</sup>, María Lorena Talamé<sup>1</sup>, Matías Nicolás Amor<sup>1</sup> y Agustina Monge<sup>1</sup>

---

*Ingeniería en Informática / artículo científico*

Citar: Cardoso, A. C., Talamé, M. L., Amor, M. N. y Monge A. (2020). Identificación de emociones en textos de una red social. *Cuadernos de Ingeniería*, 12. Recuperado de: <http://revistas.ucasal.edu.ar>

*Recibido: febrero/2020*

*Aceptado: junio/2020*

#### Resumen

Las redes sociales se suelen utilizar para expresar opiniones sobre diferentes aspectos de la sociedad, como productos, servicios, política, celebridades, etc. Empresas, organizaciones y gobiernos han mostrado su interés en conocer las opiniones que los usuarios tienen sobre sus actividades o productos. Además de determinar si una opinión es positiva o negativa, resulta interesante establecer cuál es el sentimiento o emoción manifestada en la opinión. Identificar la emoción que un usuario expresa en un mensaje textual puede entenderse como clasificar o categorizar el mensaje según sus características.

En este trabajo, se desarrolló un método para clasificar textos breves u opiniones de la red social Twitter según la emoción que expresan. En primer lugar, fue necesario estructurar los textos descartando las partes irrelevantes y tratando de mantener la mayor cantidad de información posible. Luego se utilizaron técnicas de aprendizaje automático para la generación de un corpus de opiniones etiquetadas. Por último, se aplicó un método de clasificación por ponderación con diccionarios léxicos asociados a tres valores emocionales: valencia, activación y dominancia.

**Palabras clave:** emociones, Twitter, procesamiento de lenguaje natural, aprendizaje

#### Abstract

Social networks are often used to express opinions on different aspects of society, products, services, politics, celebrities, etc. Companies, organizations and governments have shown interest in knowing what users think about their activities or products. In addition to determining

---

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Salta (UCASAL), Argentina.

whether an opinion is positive or negative, it is interesting to determine what the feeling or emotion expressed in the opinion is. Identifying the emotion that a user expresses in a textual message can be understood as classifying or categorizing the message according to its characteristics.

In this work, a method was developed to classify short texts or opinions of the social network Twitter, according to the emotion they express. First, it was necessary to structure the texts by

discarding irrelevant parts, but trying to keep as much information as possible. Then, automatic learning techniques were used to generate a corpus of tagged opinions. Finally, a method of classification by weighting was applied with lexical dictionaries associated with three emotional values: valence, activation and dominance.

**Key words:** emotions, Twitter, natural language processing, learning

---

## 1. Introducción

Dado el aumento de los comentarios textuales en las redes sociales, donde los usuarios pueden expresar sus pareceres sobre un determinado producto, persona o suceso, hay un interés cada vez mayor en conocer y analizar estos comentarios. La detección automática de emociones en las opiniones de usuarios, clientes o alumnos puede ayudar a los responsables de distintas áreas a prevenir problemas o medir el nivel de satisfacción. Las redes sociales hacen posible conocer en tiempo real las opiniones que los usuarios expresan sobre una gran variedad de temas.

La identificación del sentimiento o emoción de un usuario, expresado en un mensaje textual, puede entenderse como la clasificación o categorización del mensaje según sus propias características.

Este trabajo se desarrolló en el marco de un proyecto de investigación de la Universidad Católica de Salta y tuvo como objetivo el aprendizaje de métodos para la clasificación de textos subjetivos según la emoción expresada en ellos. Los textos se obtuvieron de la red social Twitter y se clasificaron en cuatro categorías o sentimientos: ira, felicidad, asco y tristeza. Debido a las características de los textos de opinión, sin formato, informales, con errores de ortografía, o con imágenes, fue necesario realizar una serie de acciones a modo de limpieza y preparación con el fin de eliminar las características poco significativas y mantener la mayor cantidad de información posible.

Se experimentó con dos formas de clasificación textual: el aprendizaje automático, para el cual fue necesario construir un modelo que otorgara una etiqueta a un conjunto de textos sin etiquetar, y también el aprendizaje con diccionarios léxicos puntuados con tres valores asociados a las dimensiones afectivas.

## 2. Procesamiento de lenguaje natural

El procesamiento de lenguaje natural (PLN) es un área de la inteligencia artificial que estudia la interacción entre las personas y las computadoras utilizando lenguas naturales o humanas, de forma oral o escrita. Es un área de investigación y producción científica muy activa, con numerosas aplicaciones, por ejemplo, búsqueda de respuestas automáticas, corrección ortográfica,



reconocimiento de voz, generación de resúmenes, traducción automática y análisis de sentimientos, entre otras. Muchas de estas aplicaciones se realizan a partir de textos publicados en Internet y muy frecuentemente a partir de textos de redes sociales.

Las tareas básicas del PLN implican dividir los textos en piezas elementales como palabras u oraciones, entender las relaciones entre esas piezas y comprender su significado cuando se combinan en distintas formas. Estas tareas facilitan la «normalización» de los textos, de manera tal de obtener una representación estructurada de estos.

### **Herramientas para procesamiento de texto**

Existe una variedad de herramientas para el procesamiento de textos, para diversos idiomas, que facilita cualquier tipo de investigación en este campo. Python (<https://www.python.org>) y R (<https://www.r-project.org>) son los lenguajes de programación más utilizados por la comunidad científica para la ciencia de datos y PLN (Blog Master Data Science, 2019).

En este proyecto se utilizó Python y librerías Open Source no solo para las tareas propias del procesamiento de textos, sino también para las posteriores de aprendizaje y clasificación. En Talamé, Cardoso, & Amor (2019) se analizaron las características de algunas herramientas aplicadas al conjunto de textos de este proyecto y se concluyó que, entre las librerías disponibles, Freeling (Padró & Stanilovsky, 2012) y Stanford NLP (Qi, Dozat, Zhang, & Manning, 2018) resultaron las más convenientes para la segmentación, tokenización y lematización del corpus de este trabajo.

### **3. Análisis de sentimientos**

En el análisis de sentimientos, se avanzó notablemente en la detección de la polaridad de las opiniones, es decir, en determinar si son positivas o negativas (por ejemplo, Selva Castelló, 2015). Con frecuencia, también se considera la opinión neutra para diferenciar textos objetivos. Los estudios enfocados en la identificación de uno o más sentimientos en textos son escasos.

Los estudios más populares para la clasificación de sentimientos se basan en dos métodos: por un lado, el aprendizaje automático en el cual los algoritmos utilizados deben ser entrenados con un conjunto de datos suficientemente grande y previamente etiquetado con las categorías correspondientes, y por el otro, el uso de diccionarios léxicos, es decir, una lista de palabras con un determinado peso o categoría emocional. En Kolchyna, Souza, Treleanven, & Aste (2015) se combinan los dos enfoques para la clasificación de textos de opinión.

Respecto de los recursos lingüísticos, existe una variedad para el idioma inglés, entre ellos SentiWordNet (Baccianella, Esuli, & Sebastiani, 2010) que contiene más de 15000 palabras, entre sustantivos, verbos, adjetivos y adverbios; ANEW (Bradley & Lang, 1999) y Mohammad (2018) son colecciones de términos puntuados en función de las dimensiones emocionales: valencia, dominancia y activación. Con respecto a nuestro idioma, la adaptación de ANEW al español (Redondo, Fraga, Padrón, & Comesaña, 2007) contiene, aproximadamente, 1000 términos y, entre otros trabajos, fue utilizado en Miranda, Guzmán, & Salcedo (2016) para

analizar las opiniones de clientes de hoteles. En el trabajo de Díaz Rangel, Sidorov & Suárez Guerra (2014), se creó un diccionario de palabras asociadas a uno de seis sentimientos: alegría, enojo, miedo, tristeza, sorpresa y repulsión.

Usualmente los clasificadores usan datos etiquetados para ser entrenados (aprendizaje supervisado), sin embargo, los datos etiquetados y en grandes cantidades son difíciles de obtener o no existen repositorios que los contengan. El entrenamiento y aprendizaje semisupervisado intenta solucionar este problema usando grandes cantidades de datos no etiquetados junto con cantidades pequeñas de datos etiquetados para construir un modelo clasificador. Dharmadhikari, Ingle & Kulkarni (2012) realizaron un estudio de algoritmos semisupervisados y concluyeron que son aplicables para dominios multietiquetas.

## Emociones

Las emociones son estudiadas en muchos campos, por ejemplo, la psicología, filosofía, sociología, biología, etc. En el caso particular de la información textual, se refiere a la emoción que se produce en un individuo cuando escribe o lee una palabra o una frase.

Si bien no hay un conjunto de emociones básicas en las que coincidan los investigadores, en este trabajo se optó por la clasificación de emociones consideradas básicas por el psicólogo Paul Ekman (1972):

*Asco*: expresa una marcada aversión producida por algo fuertemente desagradable o repugnante.

*Ira*: se expresa a través del resentimiento, la irritabilidad y respuestas agresivas.

*Miedo*: incita la evitación y el escape ante una amenaza o peligro.

*Felicidad*: estado emocional agradable, engloba un amplio rango de sentimientos, desde la satisfacción hasta la euforia.

*Tristeza*: se experimenta ante una pérdida o un duelo.

*Sorpresa*: sensación de incertidumbre que se experimenta ante un evento inesperado o imprevisto.

Una forma de representar las emociones es mediante tres componentes o factores: la valencia, la activación y la dominancia.

*Valencia*: indica el nivel de agrado ante un estímulo; el rango de valoración está entre lo agradable y lo desagradable.

*Activación* (excitación): indica la intensidad de la emoción que provoca un estímulo, desde calmado hasta activado.

*Dominancia*: indica el grado de control que ejerce un estímulo sobre el individuo. Se establece entre dominante y sumiso.

Cada emoción se puede entender como una mezcla de los tres factores. Por ejemplo, felicidad es una emoción con alta valencia y baja dominancia; y, por el contrario, tristeza tiene baja valencia. Sin embargo, los niveles de activación son similares en ambas emociones.

## 4. Arquitectura

La solución propuesta para el problema de identificar emociones en opiniones textuales consistió en varias etapas (Figura 1). En la primera se recopilieron mensajes emitidos en la red social Twitter (llamados *tweets*), los cuales fueron seleccionados, preparados y luego transformados para normalizarlos. En la etapa siguiente, se utilizaron algoritmos de aprendizaje automático para generar un corpus suficientemente grande y clasificado que sirviera como base para evaluar el método de ponderación con diccionarios léxicos en la etapa final.



Figura 1: Arquitectura del sistema propuesto.

A continuación, se explican las etapas de la arquitectura propuesta.

### Recopilación de mensajes

Son escasos los corpus de opiniones textuales en idioma español disponibles para investigaciones, y los existentes suelen indicar la polaridad que expresan. Al no encontrar corpus etiquetados con emociones, fue necesario crear un conjunto de textos para realizar los experimentos. Se optó por la red social Twitter, como fuente de datos, por ser una de las más populares y con mayor tráfico textual. En el *ranking* de países con mayor interacción en las redes sociales durante el año 2019, la Argentina se encuentra entre los 20 con mayor cantidad de usuarios de Twitter, junto a otros 3 de América Latina (Kemp, 2019).

La primera etapa de la recopilación consistió en la captura de *tweets* utilizando la API de Twitter (Twitter, s.f.) durante cinco meses, a partir de una serie de *hashtags* relacionados con los temas tendencias de esos momentos. Los mensajes se almacenaron en una base de datos NoSQL para su posterior tratamiento. Este proceso se realizó bajo las siguientes condiciones:

- tweets* escritos en idioma español;
- generados en la Argentina, según el identificador de geolocalización;
- se descartaron mensajes que solo contenían imágenes o poco texto para el análisis posterior;
- se evitó la duplicidad de la información eliminando los *retweets* (*tweet* replicado por otro usuario).

## Preparación

En los comentarios de las redes sociales, por lo general, no se tienen en cuenta las reglas ortográficas, se utilizan abreviaturas y, algunas veces, se acentúan emociones con el uso de *emojis*, repetición de letras, palabras en mayúsculas o signos de exclamación. Por esta razón, se realizaron una serie de acciones a modo de limpieza y preparación de los textos con el fin de mantener la mayor cantidad de información y descartar las partes irrelevantes.

Se eliminaron las palabras vacías (*stopwords*), las URLs y nombres de usuarios; se sustituyeron las abreviaturas por sus palabras equivalentes; se reemplazaron los *emojis* por su traducción textual, entre otras acciones de transformación de *tweets* (Amor, Monge, Talamé, & Cardoso, 2019).

Para el etiquetado de los *tweets* se propusieron las seis categorías de emociones consideradas básicas, según Paul Ekman (1972): asco, felicidad, ira, tristeza, miedo y sorpresa. Además, se agregó otra categoría para indicar que el *tweet* no expresaba sentimiento (podría tratarse de una publicidad o noticia, es decir, el texto no era subjetivo) o este era confuso. Se seleccionaron al azar un conjunto de *tweets* para ser etiquetados manualmente por cuatro personas. Se consideró la categoría elegida por la mayoría como clasificación final de cada *tweet*. Es importante destacar que el etiquetado manual en muchos casos resultó difícil por la falta de orden en la escritura, sentimientos confusos o irregularidades lingüísticas, lo que muchas veces generó debate en el equipo, y se descartaron mensajes por no haber coincidencia en la mayoría de los etiquetadores. De esta forma se logró etiquetar más de 600 *tweets*.

## Creación del corpus inicial

La cantidad de mensajes etiquetados se consideró insuficiente para el aprendizaje de clasificación, por lo tanto, se procedió a generar un corpus mayor mediante una combinación de algoritmos de clasificación supervisados y semisupervisados.

Del corpus etiquetado se observó una marcada diferencia en las cantidades de *tweets* de las clases miedo, sorpresa y felicidad, por lo cual se decidió aplicar algunas acciones para asegurar un conjunto de datos balanceado para la etapa posterior. Los algoritmos de aprendizaje supervisado suelen tener mejor *performance* si los conjuntos de datos son balanceados; de otra manera, podrían catalogar erróneamente instancias de la clase minoritaria. Los *tweets* etiquetados con las emociones miedo y sorpresa representaban menos del 10 % entre ambos, por lo cual estos textos pasaron a formar parte de la categoría «SS/Otro», que también agrupó a los *tweets* que no expresaban sentimientos (podía tratarse de un aviso o noticia). Por otro lado, como la clase ampliamente mayoritaria fue felicidad, se realizó un submuestreo aleatorio, con el riesgo de perder información relevante, pero asegurando el equilibrio entre las categorías consideradas (Longadge & Dongre, 2013).

Finalmente, los *tweets* utilizados como base del aprendizaje fueron 498, categorizados según se observa en la Tabla 1.

Tabla 1: *Tweets* etiquetados

Sentimiento	Cantidad	Porcentaje
Asco	106	21,3%
Felicidad	108	21,7%
Ira	82	16,5%
Tristeza	101	20,3%
SS/Otro	101	20,3%
Total	498	

### Clasificación con aprendizaje automático

La representación de textos, frecuentemente utilizada, es el modelo vectorial, que consiste en caracterizar cada documento por las palabras y ocurrencias que aparecen en él. En este trabajo se utilizó el enfoque de ponderación *Term frequency – Inverse document frequency* (Tf-Idf) (Manning, Raghavan, & Schütze, 2008). Esta técnica deja de lado algunas combinaciones de palabras que pueden aparecer a menudo en el corpus y que tienen mayor significancia que si aparecieran en forma separada, por ejemplo, «*por favor*» o «*buen día*». Por esta razón también se consideró estructurar los textos con *n*-gramas, de tal forma de obtener no solo palabras, sino además secuencia de *n* palabras consecutivas que permiten mantener y respetar el orden en el que aparecen escritas. Se experimentó con *n*=1, *n*=2 y *n*=3. De esta forma cada mensaje (*tweet*) se convierte en una representación adecuada para los algoritmos de aprendizaje automático.

El aprendizaje semisupervisado es una técnica del aprendizaje automático que consiste en etiquetar un conjunto de datos no etiquetados a partir de otro conjunto menor de datos etiquetados (Witten, Hall, Frank, & Pal, 2017). Los ejemplos etiquetados se usan para aprender modelos que caractericen cada clase o categoría, y los ejemplos sin etiqueta se usan para refinar los límites entre las clases (Han, Kamber, & Pei, 2012). Los algoritmos semisupervisados son atractivos para utilizar en aquellos casos donde el etiquetado es muy costoso y requiera tiempo o intervención humana. En Abudalfa & Ahmed (2019), se evaluaron una serie de algoritmos semisupervisados aplicados a textos de micro-blogs y en idioma inglés, y se concluyó que este enfoque es relevante para la clasificación textual.

En esta etapa se aplicó el método *self-training*, que es una de las formas más simples de clasificación semisupervisada: primero se construye un clasificador usando los datos etiquetados y luego el clasificador categoriza los datos no etiquetados. Solo los nuevos ejemplos etiquetados con una confianza que supere cierto umbral se anexan al conjunto etiquetado y el proceso de aprendizaje se repite (Han *et al.*, 2012) hasta que no queden ejemplos sin etiquetar o ninguno supere el umbral estipulado.

En este trabajo, se usaron los 498 ejemplos etiquetados manualmente y 10000 ejemplos pre-procesados, como fue explicado en la sección Preparación. Como variante del método, en lugar

de un algoritmo clasificador, participaron dos. En la etapa iterativa, los ejemplos en los cuales ambos algoritmos asignaron la misma categoría y que además superaron el 80 % de confianza en la categorización se agregaron al conjunto de entrenamiento y se eliminaron del conjunto de datos no etiquetados.

Los algoritmos clasificadores fueron seleccionados previamente a partir de una serie de pruebas con un conjunto de algoritmos tradicionales de clasificación y distintas cantidades de atributos. Naive Bayes y Support Vector Machine (SVM) resultaron los de mejor *performance* entrenados con 500 atributos. Naive Bayes logró 0,76 de *recall* y 0,79 de precisión, y SVM logró 0,79 de *recall* y 0,82 de precisión. Para ambos algoritmos, la métrica F1, que combina ambas medidas, resultó la de mayor valor entre todas las pruebas.

Luego, en el proceso semisupervisado, fueron suficientes 16 iteraciones para clasificar 8403 ejemplos inicialmente no etiquetados. La distribución de las categorías asignadas por los modelos se observa en la Tabla 2. La validación del método se realizó inspeccionando los mensajes y se comprobó que alrededor del 5 % les fue asignada una etiqueta errónea.

Tabla 2: Resultados clasificación semisupervisada

Emoción	Cantidad	Porcentaje
Asco	134	0.2%
Felicidad	6286	79.5%
Ira	670	1.8%
Tristeza	516	1,0%
SS/Otro	797	17.5%
Total	8403	

De esta forma se obtuvo un corpus con una cantidad mayor de mensajes clasificados que el del corpus inicial.

### Clasificación con diccionarios léxicos

Para esta investigación se utilizaron dos diccionarios: el NRC VAD Lexicon (Mohammad, VAD, 2018) y el NRC Emotion Lexicon (Mohammad & Turney, 2013). El primero tiene más de 20.000 palabras y cada palabra tiene un puntaje de valencia (V), activación (A) y dominancia (D) que varía entre 0 (V, A o D más bajo) y 1 (V, A o D más alto). El segundo diccionario tiene más de 14.000 palabras con ocho emociones (ira, miedo, anticipación, confianza, sorpresa, tristeza, alegría y asco). Las palabras de ambos *datasets* están en inglés pero cuentan con traducción a varios idiomas, entre ellos el español. Se combinaron los dos diccionarios para los pasos siguientes.



Las palabras de los diccionarios se ubicaron en el espacio de dimensiones VAD, lo que determinó las zonas o grupos de cada emoción, y mostró así que las palabras asociadas a una misma emoción, en general, tienen valores VAD similares. Los puntos medios, en ese espacio de tres dimensiones, de cada agrupamiento de palabras de cada emoción fueron denominados centroides. La Tabla 3 detalla los valores medios de cada dimensión y los respectivos valores de desviación estándar.

Tabla 3: Centroides

	Valencia		Activación		Dominancia	
	M	D	M	D	M	D
Felicidad	0,640	0,229	0,526	0,177	0,595	0,159
Asco	0,229	0,170	0,627	0,172	0,410	0,149
Ira	0,242	0,177	0,676	0,166	0,477	0,162
Tristeza	0,226	0,175	0,591	0,183	0,393	0,156

M: media. D: desviación estándar

En la Figura 2 se muestra la ubicación de los centroides en el espacio de dimensiones VAD. El centroide (0.32, 0.32, 0.32) de la categoría SS/Otro, que representa textos sin emoción o con otro sentimiento no analizado, se obtuvo empíricamente. Este punto se considera aceptable si se tiene en cuenta que no solo representa textos sin emoción o neutros, sino que, además, no está

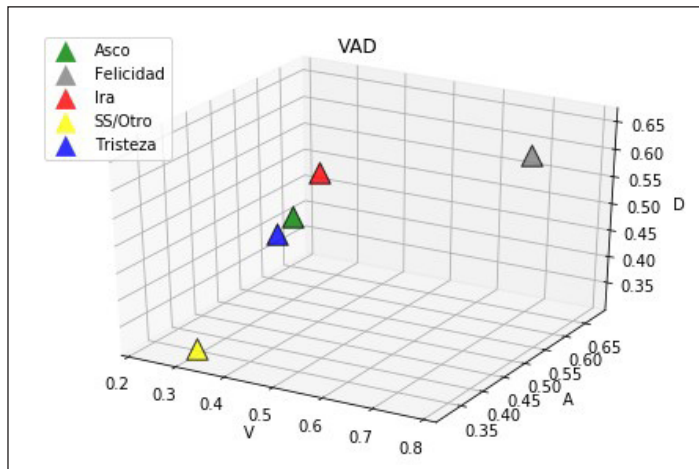


Figura 2: Centroides

tan lejano del punto (0.5, 0.5, 0.5), considerado como centroide neutro en algunos trabajos como Kim, Valitutti & Calvo (2010).

Para determinar la polaridad de las oraciones es común sumar o calcular el promedio de los puntajes de las palabras que componen el mensaje (Kolchyna, Souza, Treleanven, & Aste, 2015). Siguiendo un criterio similar, se optó por el cálculo del promedio para la clasificación de los *tweets*, pero teniendo en cuenta que las puntuaciones están formadas por tres valores. Es decir, el valor VAD de cada frase se calcula promediando los valores VAD de cada una de las palabras (Kim, Valitutti, & Calvo, 2010). De esta manera, cada *tweet* tiene también asociado los valores VAD y puede pensarse como un punto en el espacio de las tres dimensiones.

## 5. Resultados

Con los valores VAD asignados a cada *tweet* (un punto en el espacio) se calculan las distancias a cada uno de los centroides mediante la fórmula de cálculo de distancia Euclídea entre dos puntos (Witten, Hall, Frank, & Pal, 2017). Finalmente, la emoción del *tweet* la determina el centroide más cercano, es decir, se encuentra en el mismo grupo de palabras asociadas a la emoción.

En esta etapa se utilizaron 4612 mensajes clasificados automáticamente en la etapa previa, de los cuales 3446 coincidieron en la clasificación por aproximación a un centroide. Esto representa el 74,50 % de aciertos. En la Tabla 4 se puede observar la *performance* del método en cuanto a precisión y *recall*. Los mejores resultados los obtiene la emoción Felicidad.

Tabla 4: Resultados

Emoción	Precision	Recall
Ira	23,20%	16,73%
Felicidad	86,87%	95,37%
Asco	38,78%	9,05%
Tristeza	45,26%	21,88%
SS/Otro	7,52%	11,92%

Este enfoque presenta algunas debilidades, entre ellas se pueden detallar las siguientes:

- un gran número de palabras del corpus no se encontró en los diccionarios, por lo cual no fueron parte del cálculo VAD de los *tweets* donde aparecían.

- en el corpus existen palabras coloquiales o del lunfardo, y si bien algunas forman parte del diccionario NRC VAD, tienen una significación diferente o contraria a la emoción representada.

- algunas palabras del diccionario de emociones formaron parte del cálculo de más de un centroide por estar asociadas a más de una emoción.

## 6. Conclusiones

Los sentimientos o emociones expresados de manera textual pueden contener información importante para revelar el estado de ánimo, interés o desagrado de una persona ante un evento o producto. El aumento de comentarios y opiniones emitidas en redes sociales, blogs y portales de noticias incrementa el interés en el campo del análisis de sentimientos. Por la ambigüedad del lenguaje, el descuido en la escritura y las nuevas formas de lenguajes, el procesamiento de los datos textuales conlleva un trabajo arduo para obtener datos normalizados y apropiados para cualquier forma de aprendizaje o análisis.

En este trabajo se utilizaron textos extraídos de la red social Twitter, emitidos en la Argentina. Durante el procesamiento de los *tweets*, se observó que contenían características que dificultarían el análisis posterior, lo cual llevó a realizar un proceso de extracción y transformación de estos.

Ante la falta de un gran corpus de textos etiquetados con emociones fue necesario crear uno para los experimentos. La clasificación inicial y manual por parte de etiquetadores humanos resultó en un proceso arduo y complejo que produjo alrededor de 500 *tweets* asociados a una emoción. Las emociones consideradas fueron cuatro: ira, felicidad, asco y tristeza, y se agregó una quinta categoría para los *tweets* que no expresaban sentimientos o expresaban alguno no contemplado.

Estos textos fueron parte del método, primero supervisado y luego semisupervisado, que generó un corpus de textos etiquetado. Los algoritmos implementados se mantuvieron por encima del 90 % de efectividad, se lograron clasificar más del 80 % de los ejemplos sin categoría. En la etapa de aprendizaje con diccionarios se combinaron dos con más de 14000 palabras y con los puntajes de las dimensiones emocionales valencia, activación y dominancia. Se determinó el valor emocional de cada *tweet* a partir de la distancia al centroide más cercano o representativo. Se utilizaron 4612 *tweets* clasificados previamente y se obtuvieron alrededor de 75 % de aciertos, lo que demuestra que el método empleado es aceptable.

Del análisis de errores se concluye que el método de clasificación con diccionarios léxicos podría obtener mejores resultados si contuvieran palabras o expresiones usadas en nuestro país y que fueran frecuentes en el corpus utilizado, por lo cual desarrollar un diccionario VAD argentino queda propuesto para un trabajo futuro y eventuales investigaciones.

En este artículo se presentó la primera parte de la investigación en el área de análisis de sentimientos en textos. Se pretende continuar la línea de investigación en datos textuales, profundizando en el campo de la detección de emociones en redes sociales y posiblemente en otras fuentes de datos.

## Referencias

- Abudalfa, S., & Ahmed, M. (2019). Semi-Supervised Target-Dependent Sentiment Classification for Micro-Blogs. *Journal of Computer Science and Technology*, 19(1). doi:<https://doi.org/10.24215/16666038.19.e06>
- Amor, M., Monge, A., Talamé, L., & Cardoso, A. (2019). Clasificación de sentimientos en opiniones de una red social basada en dimensiones emocionales. *7º Congreso Nacional de Ingeniería en Informática/Sistemas de Información*. Buenos Aires: CONAIIISI.

- Baccianella, S., Esuli, A., & Sebastiani, F. (2010). SentiWordNet 3.0: An Enhanced Lexical Resource for Sentiment Analysis and Opinion Mining. *International Conference on Language Resources and Evaluation, LREC 2010*. Valletta, Malta.
- Blog Master Data Science. (Junio de 2019). *Universidad de Alcalá*. Recuperado de <https://www.master-data-scientist.com/lenguajes-programacion-data-science/>
- Bradley, M. M., & Lang, P. J. (1999). Affective Norms for English Words (ANEW): Instruction Manual and Affective Ratings. *Technical report C-1, the center for research in psychophysiology*, 30(1), 25-36.
- Dharmadhikari, S., Ingle, M., & Kulkarni, P. (2012). Analysis of semi supervised learning methods towards multi label text classification. *International Journal of Computer Applications*, 42(16), 15-20.
- Diaz Rangel, I., Sidorov, G., & Suarez Guerra, S. (2014). Creación y evaluación de un diccionario marcado con emociones y ponderado para el español. *Onomazein. Revista semestral de lingüística, filología y traducción*, 31-46.
- Ekman, P. (1972). *Emotion in the human face: guidelines for research and an integration of findings*. New York: Pergamon.
- Han, J., Kamber, M., & Pei, J. (2012). *Data Mining: Concepts and Techniques*. USA: Morgan Kaufmann Publishers.
- Kemp, S. (2019). *DataReportal*. Recuperado de <https://datareportal.com/reports/digital-2019-global-digital-overview>
- Kim, S. M., Valitutti, A., & Calvo, R. A. (2010). Evaluation of unsupervised emotion models to textual affect recognition. *Proceedings of the NAACL HLT 2010 Workshop on Computational Approaches to Analysis and Generation of Emotion in Text* (págs. 62-70). Los Angeles, California.
- Kolchyna, O., Souza, T. T., Treleanven, P. & Aste, T. (2015). Methodology for Twitter Sentiment Analysis. *arXiv preprint arXiv:1507.00955*.
- Longadge, R., & Dongre, S. (2013). Class imbalance problem in data mining review. *International Journal of Computer Science and Network (IJCSN)*. Recuperado de arXiv preprint arXiv:1305.1707
- Manning, C. D., Raghavan, P., & Schütze, H. (2008). *Introduction to information retrieval*. Cambridge University Press.
- Miranda, C. H., Guzmán, J., & Salcedo, D. (2016). Minería de Opiniones basado en la adaptación al español de ANEW sobre opiniones acerca de hoteles. *Procesamiento del Lenguaje Natural*(56), 25-32. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=515754423002>
- Mohammad, S. M. (2018). Obtaining reliable human ratings of valence, arousal, and dominance for 20,000 English words. *Proceedings of the 56th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics* (págs. 174-184). Melbourne, Australia: Association for Computational Linguistics. doi:10.18653/v1/P18-1017
- Mohammad, S. M. & Turney, P. D. (2010). Emotions evoked by common words and phrases: Using mechanical turk to create an emotion lexicon. En A. f. Linguistics (Ed.), *Proceedings of the NAACL HLT 2010 workshop on computational approaches to analysis and generation of emotion in text* (págs. 26-34). Los Angeles, CA: Association for Computational Linguistics.

Recuperado de <https://www.aclweb.org/anthology/W10-0204>

- Mohammad, S. M., & Turney, P. D. (2013). Crowdsourcing a word-emotion association lexicon. *Computational Intelligence*, 29(3), 436-465. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1467-8640.2012.00460.x>
- Padró, L., & Stanilovsky, E. (2012). FreeLing 3.0: Towards Wider Multilinguality. *Proceedings of the Language Resources and Evaluation Conference (LREC 2012)*. Istanbul, Turkey: ELRA.
- Qi, P., Dozat, T., Zhang, Y., & Manning, C. D. (2018). Universal Dependency Parsing from Scratch. *Proceedings of the {CoNLL} 2018 Shared Task: Multilingual Parsing from Raw Text to Universal Dependencies* (págs. 160-170). Brussels, Belgium: Association for Computational Linguistics. Recuperado de <https://nlp.stanford.edu/pubs/qi2018universal.pdf>
- Redondo, J., Fraga, I., Padrón, I. & Comesaña, M. (2007). The Spanish adaptation of ANEW (Affective Norms for English Words). *Behavior Research Methods*, 39(3), 600-605. doi:10.3758/BF03193031
- Selva Castelló, J. (2015). *Desarrollo de un sistema de análisis de sentimiento sobre Twitter*. Universitat Politècnica de València Escuela. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10251/55471>
- Talamé, L., Cardoso, A. & Amor, M. (2019). Comparación de herramientas de procesamiento de textos en español extraídos de una red social para Python. *Simposio Argentino de Inteligencia Artificial (ASAI)*. Salta.
- Twitter. (s.f.). *Developer*. Recuperado de <https://developer.twitter.com/>
- Witten, I., Hall, M., Frank, E., & Pal, C. (2017). *Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques*. Amsterdam: Morgan Kaufmann.

**Alejandra Carolina Cardoso**

Licenciada en Ciencias de la Computación (Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca). Máster en Informática (Universidad del Norte Santo Tomás de Aquino, Tucumán). Docente e investigadora de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Salta. Participa en proyectos de investigación sobre minería de datos y minería de textos. Coautora de artículos sobre la misma temática. Integra el Grupo de Análisis de Datos del Instituto de Estudios Interdisciplinarios de Ingeniería (I.Es.I.Ing.) de UCASAL.

Identificador ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3218-1072>

[acardoso@ucasal.edu.ar](mailto:acardoso@ucasal.edu.ar)

**María Lorena Talamé**

Licenciada en Análisis de Sistemas (Universidad Nacional de Salta). Máster Universitario en Ingeniería Informática de la Universidad Abierta de Cataluña. Se desempeña como docente de la carrera de Ingeniería en Informática de la Universidad Católica de Salta. Imparte cursos de robótica y es coautora de artículos sobre la temática. Pertenece al Grupo de Análisis de Datos del Instituto de Estudios Interdisciplinarios de Ingeniería (I.Es.I.Ing.) de UCASAL.

Identificador ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3224-0124>

[mltalame@ucasal.edu.ar](mailto:mltalame@ucasal.edu.ar)

**Matías Nicolás Amor**

Ingeniero en Informática, Universidad Católica de Salta, Salta. Investigador del Grupo de Análisis de Datos del Instituto de Estudios Interdisciplinarios de Ingeniería (I.Es.I.Ing) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Salta. Participa en proyectos de investigación sobre informática forense.

Identificador ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0561-1815>

[mnamor@ucasal.edu.ar](mailto:mnamor@ucasal.edu.ar)

**Agustina Monge**

Ingeniera en Informática, Universidad Católica de Salta. Desarrolladora en una empresa de *software*. Forma parte del Grupo Análisis de Datos del Instituto I.Es.I.Ing de la Facultad de Ingeniería

[agum\\_96@hotmail.com](mailto:agum_96@hotmail.com)



## **Aplicación de la técnica LSPIV en el diseño hidrológico de infraestructura hídrica**

### **LSPIV application in the hydrological design of hydraulic infrastructure**

**Myriam Cecilia Botelli<sup>1</sup>, Nicolás Federico Guillén<sup>2</sup>, Carlos Marcelo García<sup>2</sup>, Antoine Patalano<sup>2</sup> y Marcelo Chalabe<sup>1</sup>**

---

*Ingeniería Civil / artículo científico*

Citar: Botelli, M. C., Guillén, N. F., García, C. M., Patalano, A. y Chalabe, M. Aplicación de la técnica LSPIV en el diseño hidrológico de infraestructura hídrica. *Cuadernos de Ingeniería*, 12. Recuperado de <http://revistas.ucasal.edu.ar>

*Recibido: marzo/2020*

*Aceptado: julio/2020*

#### **Resumen**

En este trabajo se implementa una nueva técnica de medición de caudales en la provincia de Salta. Los flujos que ocurren durante crecidas repentinas en ríos de montaña, (como lo son la mayoría de los casos en Salta), presentan algunas características particulares que hacen que tecnologías intrusivas de velocimetría (tales como molinetes convencionales o correntímetros hidroacústicos Doppler - ADCP) habituales para medir caudales en cursos fluviales no puedan ser implementadas. En el presente estudio se evalúa la aplicación de la técnica experimental remota LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry) para medir velocidades de flujo en ríos de la provincia de Salta, Argentina. Para ello, se instalaron estaciones meteorológicas en zonas de interés y se estimaron recurrencias de los eventos de crecidas caracterizadas.

**Palabras clave:** LSPIV, crecidas, hidrología de diseño, hidráulica

#### **Abstract**

In this work, a new flow measurement technique is implemented in the province of Salta. The flows that occur during flash floods in mountain rivers, (as most of the cases in Salta), have some particular characteristics that make intrusive technologies of velocimetry (such as conventional hydraulic reels or Doppler hydroacoustic flowmeters

---

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Salta (UCASAL), Argentina.

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba (UNC), Argentina.

- ADCP) usual to measure flows in river courses cannot be implemented. In the present study, the application of the remote experimental technique LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry) to measure flow velocities in rivers of Salta province, Argentina, is evaluated. For this purpose,

meteorological stations were installed in areas of interest and recurrences of characterized flood events were estimated.

**Keywords:** LSPIV, flash floods, design hydrology, hydraulics

---

## 1. Introducción

El manejo sustentable del recurso hídrico requiere tener una cuantificación precisa de la disponibilidad de ese recurso. Sin esta información, los planes de gestión y manejo no serán eficientes. En la actualidad, la disponibilidad espacial y temporal de cuantificaciones del recurso hídrico superficial no es habitual en la República Argentina; en especial en áreas áridas y semiáridas del país, donde el recurso hídrico es escaso, se presentan falencias importantes en monitoreos realizados durante la ocurrencia de crecidas.

Los ríos de la provincia de Salta, Argentina, se caracterizan por la ocurrencia de inundaciones repentinas con gran volumen de escurrimiento durante la época de lluvias (octubre a abril). Debido a la naturaleza repentina de estas inundaciones, es muy poco probable que los técnicos e investigadores sean capaces de inspeccionar varios tramos fluviales de interés utilizando los instrumentos y las técnicas usuales (molinetes convencionales o correntímetros hidroacústicos Doppler) para el registro del caudal máximo y su evolución temporal durante la inundación. En caso de que sea posible llegar a tiempo a los sitios de estudio, las velocidades de flujo y los objetos flotantes en el río (por ejemplo, troncos) ponen en peligro tanto a los operadores como a los instrumentos.

En la actualidad, se encuentran en continuo desarrollo las técnicas experimentales denominadas técnicas de velocimetría no intrusivas por imágenes digitales, Particle Image Velocimetry (PIV por sus siglas en inglés). PIV ha sido ampliamente utilizada en experimentos de laboratorio en la hidráulica por más de 30 años (Adrian, 2005, 1991, 1984), y desde la década del 80, muchos investigadores intentaron adaptar la técnica para caracterizar flujos de mayores escalas a los presentes en laboratorio, incluyendo mediciones de campo, lo que generó la técnica Velocimetría por Imágenes de Partículas a Gran Escala (LSPIV por sus siglas en inglés Large Scale Particle Image Velocimetry) (Creutin *et al.*, 2003, Fujita *et al.*, 1998, Gunawan *et al.*, 2012, Le Coz *et al.*, 2014, Muste *et al.*, 2008).

LSPIV es una moderna técnica experimental con gran potencial para el monitoreo de diversos flujos superficiales en cauces naturales de manera remota (no intrusiva). Con esta técnica se puede analizar el desplazamiento de las partículas que flotan sembradas en el flujo, o determinados patrones que existen sobre la superficie del agua, generados por la turbulencia. El desarrollo de esta técnica en los últimos años ha permitido su aplicación en la caracterización de flujos complejos con avances notables en el campo de la mecánica de los fluidos e hidráulica. En este sentido, investigadores de la Universidad Nacional de Córdoba se encuentran trabajando perma-

mentemente en la mejora de los programas computacionales que permiten la aplicación de LSPIV y posibilitan cuantificar el caudal que escurre por un curso fluvial a partir del registro y análisis de un simple video de la superficie del agua y de algunos relevamientos topográficos que se realizan posteriormente al evento. Los nuevos medios de comunicación y los avances tecnológicos permiten que los ciudadanos generen una gran cantidad de material digital sobre las crecidas repentinas y las compartan a través de las redes sociales. Este tipo de información se presenta a menudo con autoría, fecha y, en unos casos, georreferenciada, antes de ser compartida.

El objetivo de este trabajo es aplicar la técnica LSPIV para cuantificar caudales en ríos de la provincia de Salta durante eventos extremos y estimar su recurrencia asociada.

## 2. Metodología

Las técnicas de velocimetría por imágenes digitales más conocidas son las técnicas de velocimetría por imágenes clásicas: la Velocimetría por Seguimiento de Partículas (PTV, por sus siglas en inglés), la Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV, por sus siglas en inglés) y su implementación a gran escala (LSPTV y LSPIV, respectivamente, por sus siglas en inglés). Estas técnicas podrían ser utilizadas para generar información que se requiere para el diseño hidrológico e hidráulico de medidas estructurales y no estructurales y así mitigar el riesgo hídrico.

Las técnicas de medición por imágenes permiten caracterizar el campo de velocidades de flujos con alta resolución temporal y espacial mediante un análisis de imágenes que ilustran los desplazamientos de trazadores (partículas sembradas o patrones superficiales) que caracterizan el flujo en el sector analizado. Una de esas técnicas denominada Velocimetría por Imágenes de

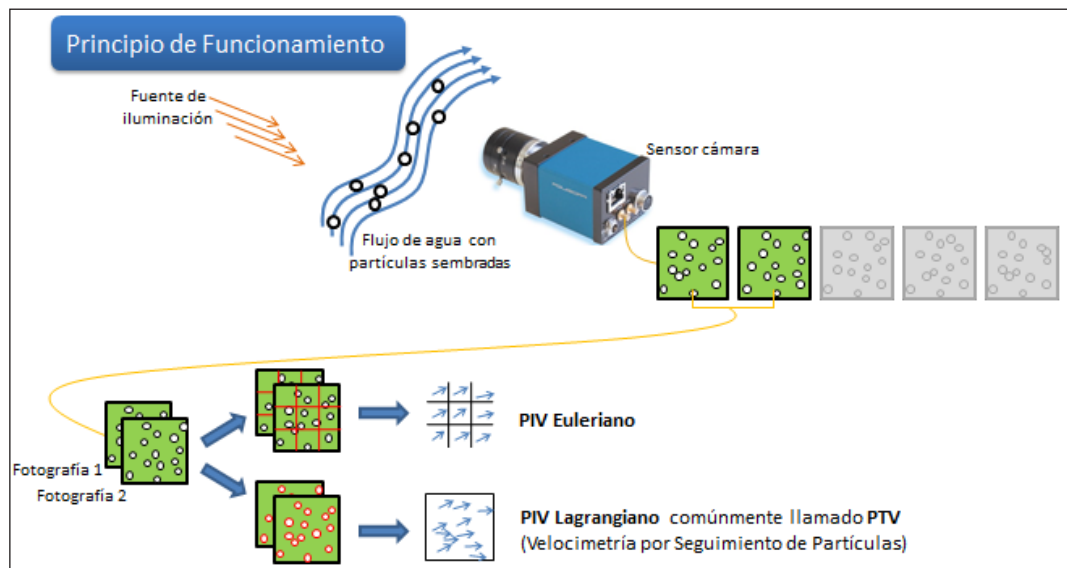


Figura 1: Esquema del conjunto de elementos para la aplicación de PIV/PTV clásico

Partículas PIV (Particle Image Velocimetry) prevé el análisis euleriano del desplazamiento de los trazadores, debido a que obtiene los campos de velocidades del flujo comparando el desplazamiento de patrones o grupos de partículas en un sector definido de una imagen; en cambio, la Velocimetría de Seguimiento de Partículas PTV (Particle Tracking Velocimetry) prevé el análisis lagrangiano, ya que analiza cada partícula en forma individual y determina su desplazamiento al comparar su posición en distintos momentos del tiempo. En la Figura 1 se muestra un esquema del funcionamiento de las técnicas PIV/PTV. La metodología experimental general consiste en obtener un video (con una longitud de registro suficiente para obtener parámetros estadísticos representativos) que permita evaluar el desplazamiento de trazadores dentro del flujo con una adecuada iluminación.

Para la estimación de las velocidades del flujo en gabinete se necesita una computadora con los siguientes programas instalados:

- PIVlab (se descarga de <http://pivlab.blogspot.com.ar/>, Thielicke y Stamhuis, 2014). Este software de código abierto permite la aplicación de PIV clásico.
- RIVeR (se descarga de <http://riverdischarge.blogspot.com.ar/>, Patalano *et al.*, 2017). Es una herramienta que ha sido desarrollada desde el 2013 por el Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA) de la Universidad Nacional de Córdoba (UNC) para la aplicación de LSPIV.

### **3. Resultados de la aplicación de la técnica LSPIV en la Provincia de Salta**

A continuación, se presentan diferentes aplicaciones y resultados alcanzados, producto de la implementación de la técnica experimental remota LSPIV en la provincia de Salta.

#### **3.1 Uso de LSPIV para cuantificar un evento hidrológico extremo con videos generados por colaboración abierta distribuida**

A continuación, se detalla la cuantificación del escurrimiento superficial extremo generado en el río Colorado, cercano a la localidad de Orán, durante el evento hidrometeorológico extraordinario del 28 de marzo de 2017. Esta cuantificación se hizo a partir del análisis de un video enviado por un ciudadano.

Entre la última semana de marzo y la primera de abril de 2017, según diferentes datos recopilados, cayeron en la zona del río Colorado unos 350 milímetros. En el proyecto de investigación anterior elaborado por el grupo de investigación autor de este trabajo, se estimaron las láminas de lluvia precipitadas en 15 días consecutivos en la estación Bermejo Pozo Sarmiento, muy cercana a la zona de estudio. Al analizar los resultados presentados en la Figura 2, se observa que el evento hidrometeorológico que se busca aquí caracterizar tiene una recurrencia mayor a los 10 años.

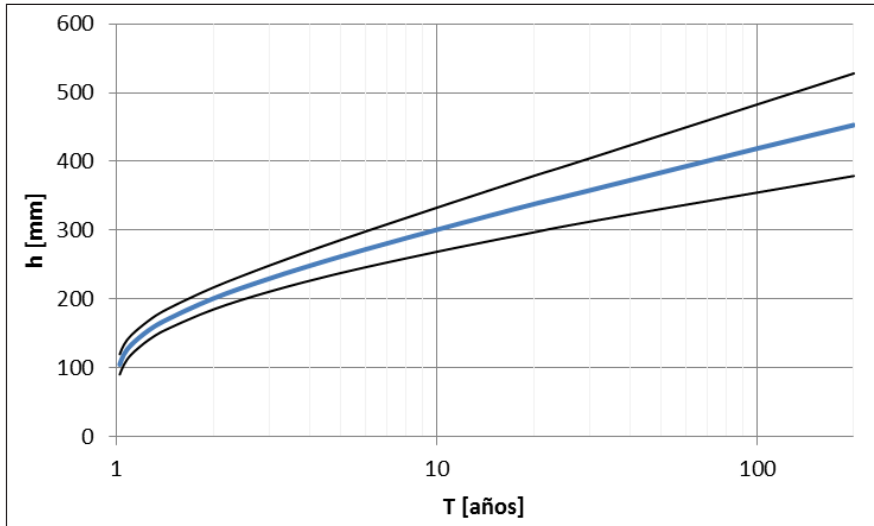


Figura 2: Láminas de lluvia precipitadas en 15 días consecutivos, asociadas a diferentes recurrencias en estación Bermejo – Pozo Sarmiento

Para caracterizar la crecida extraordinaria, se detallan las estimaciones realizadas a partir de la modelación numérica de la hidrodinámica del flujo del río cuando cruza el puente de la Ruta Nacional N.º 50, aplicando el programa HEC RAS. En las etapas de calibración e implementación del modelo numérico, se utilizaron datos relevados en la zona del estudio (velocidades superficiales del flujo, alturas de la superficie libre, etc.). Esta información fue utilizada para la calibración de modelos hidrológicos e hidráulicos; los resultados de este análisis son la única información hidrológica disponible para ese evento.

A partir de datos de relevamientos topográficos, se elaboró un modelo digital de elevación del terreno a partir del cual se determinó la geometría del dominio donde se implementó el modelo hidráulico HEC RAS. Se contaba con una serie de 5 perfiles transversales aguas arriba de la sección del puente y otros 5 perfiles aguas abajo. Las condiciones de borde empleadas en el modelo fueron las de tirante normal tanto aguas arriba como aguas abajo. Para la implementación del modelo fue necesario definir parámetros o coeficientes de rugosidad que se requieren para simular la resistencia al flujo del fondo y las márgenes. Los coeficientes de rugosidad adoptados en este estudio (coeficientes de rugosidad «n» definidos por Manning) se detallan a continuación:

- Se adoptó un valor de «n» de Manning de 0,035 para el cauce (valor extraído de la bibliografía para ríos similares al analizado).
- Para determinar el coeficiente de las planicies de inundación se implementó una metodología novedosa. En primer lugar, se analizó un video digital de la crecida, registrado por un vecino, en una sección conocida del tramo de estudio con el fin de estimar la velocidad superficial del flujo mediante la aplicación de LSPIV. Además, a partir de este video se determinaron las alturas de la superficie libre de flujo alcanzadas. A partir de la velocidad y la altura

del flujo estimadas del análisis del video digital se calibró el valor del «n» de Manning de la planicie (igual a 0,05). En las Figuras 3 y 4 se observan los principales resultados alcanzados con LSPIV y se presenta el campo de velocidad de flujo en la sección de control obtenido con los valores de los «n» de Manning estimados como se explicó. Se observa una velocidad en la margen derecha de 2,75 m/s y una altura de la superficie libre unos centímetros por debajo de la cota inferior de la viga del puente. La resolución de las imágenes digitales registradas no era óptima para aplicar la técnica de velocimetría LSPIV en la región central y la margen izquierda del cauce (alejada de la cámara).

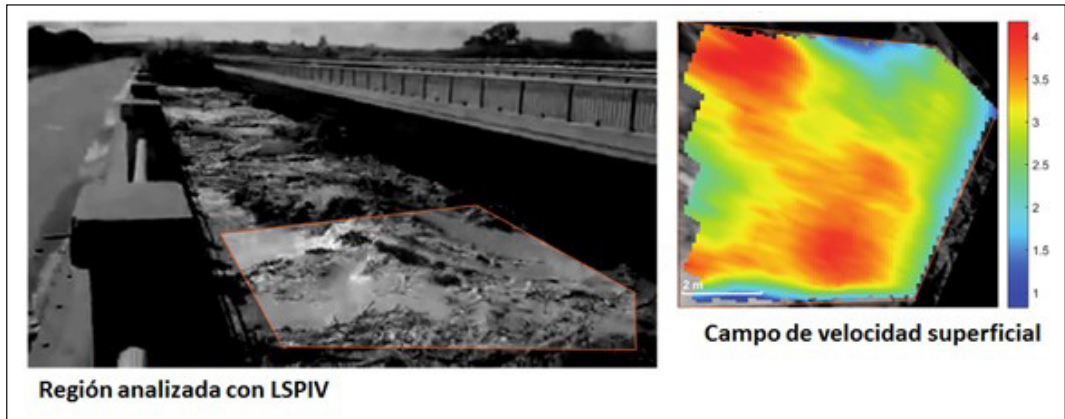


Figura 3: Región donde se estimaron velocidades y campo de velocidad media superficial estimada con LSPIV, en el video captado en el puente que cruza el río Colorado en la Ruta Nacional N.º 50, Orán, Salta

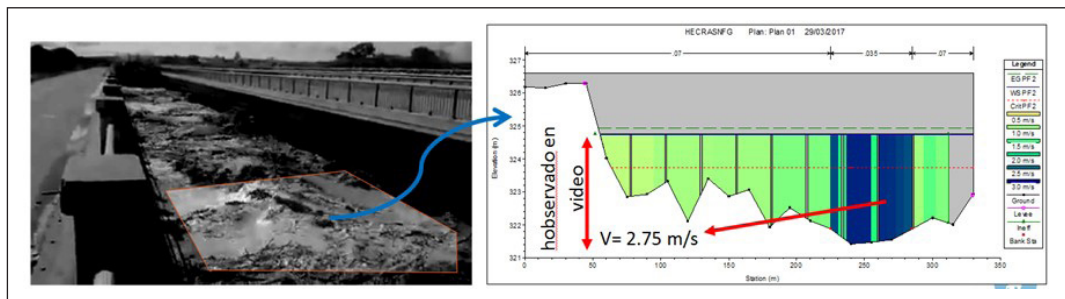


Figura 4: Sección de control para la calibración del «n» de Manning

Se procedió a la modelación hidrodinámica del tramo del cauce y se estimó un caudal escurrido durante el registro del video de 850 m<sup>3</sup>/s. En la Figura 5 se muestran las áreas inundadas obtenidas a partir de la simulación numérica realizada, y se observa claramente que el flujo escurre en todo el tramo simulado con régimen subcrítico (ya que el tirante alcanzado es superior al crítico —que se marca con línea punteada roja— en todo el tramo).



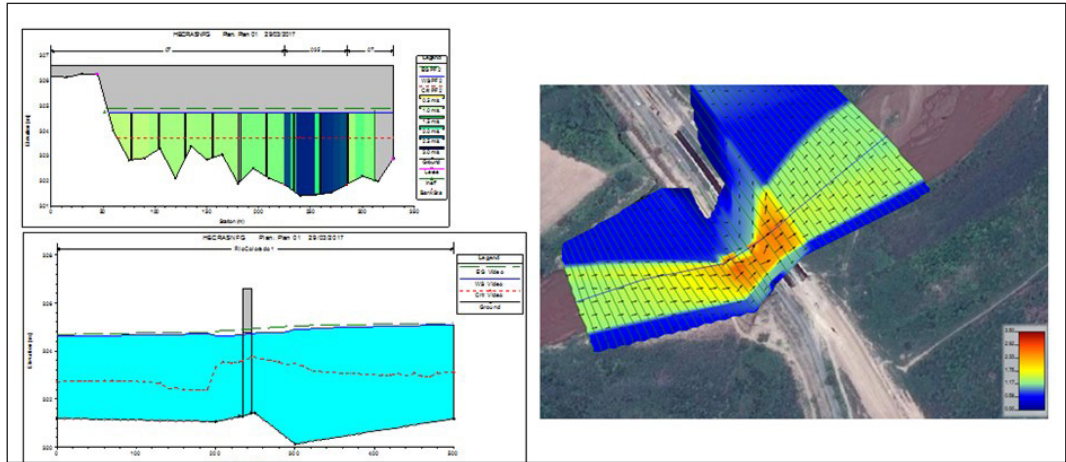


Figura 5: Áreas inundadas obtenidas a partir de la simulación numérica realizada para un caudal de 850 m<sup>3</sup>/s

Para contrastar los resultados alcanzados, posteriormente se ingresaron al modelo los caudales de diseño previamente calculados por el Ing. Néstor Ilvento, un profesional especialista en la temática y referente de la provincia de Salta. Los valores ingresados para evaluar el funcionamiento del puente corresponden a tiempos de retorno de 50 y 100 años, y son iguales a 1690 y 1940 m<sup>3</sup>/s, respectivamente. A continuación, se presentan los principales resultados:

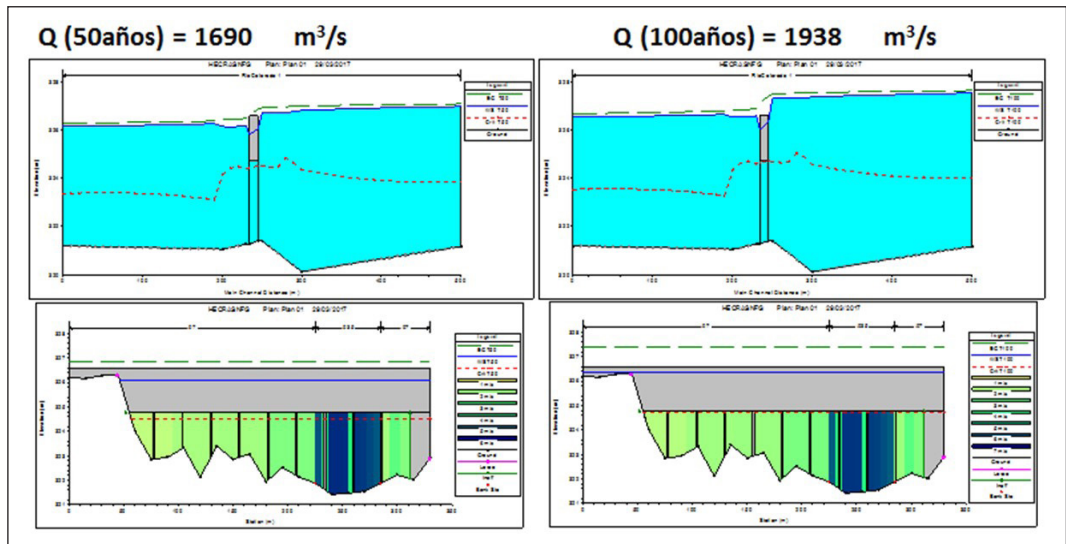


Figura 6: Modelación hidráulica de los caudales de diseño asociados a 50 y 100 años en el tramo del estudio del río Colorado

Al analizar los resultados alcanzados, se observa que la cota inferior de la viga del puente se ve ampliamente superada para los caudales de diseño.

Con la implementación de LSPIV se obtuvo información fundamental para la calibración del modelo hidrodinámico que simula el evento ocurrido, lo que se logró con la determinación del coeficiente de rugosidad, antes mencionado, a partir de la velocidad superficial del flujo obtenida por LSPIV.

Por otra parte, con este estudio se determinaron las alturas de la superficie libre de flujo alcanzadas y se pudo demostrar que el nivel de agua supera la cota de viga del puente para las crecidas de diseño, por lo que no fue debidamente diseñado.

A futuro, antes del diseño de una obra hídrica, sería fundamental contar con aforos de las crecidas extraordinarias de esa localización, y LSPIV es una técnica adecuada para casos como el aquí presentado.

### 3.2 Ajuste de curvas altura del nivel de agua – caudal (H-Q) en diferentes cauces fluviales de la provincia de Salta

Se realizaron múltiples campañas en diferentes cauces de la provincia de Salta, en el periodo 2019/2020, para la estimación de alturas H-Q. A continuación, se presentan a modo de ejemplo los resultados de una de las campañas de medición y las H-Q ajustadas.

El miércoles 29 de enero de 2020, se realizaron mediciones en los afluentes del dique Cabra Corral. Además de captar videos de alta resolución de cada uno de los cauces, se relevaron distancias entre puntos fijos que se observan en el video (para poder rectificar posteriormente los resultados) y también se relevó la cota del pelo de agua al momento del aforo. Seguidamente, se presentan los principales resultados alcanzados.

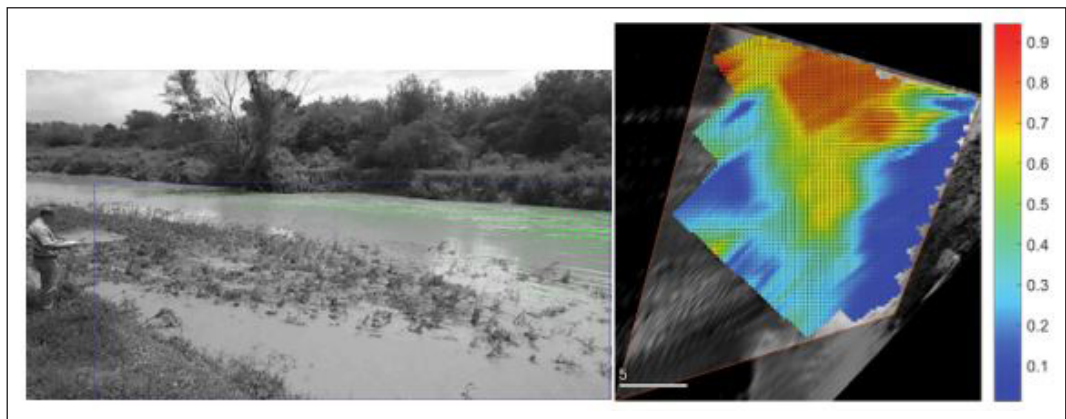


Figura 7: Vectores velocidad (a la izquierda) y campo de velocidades superficiales con su respectiva zona de medición (a la derecha) en la sección de control del río *Arenales*

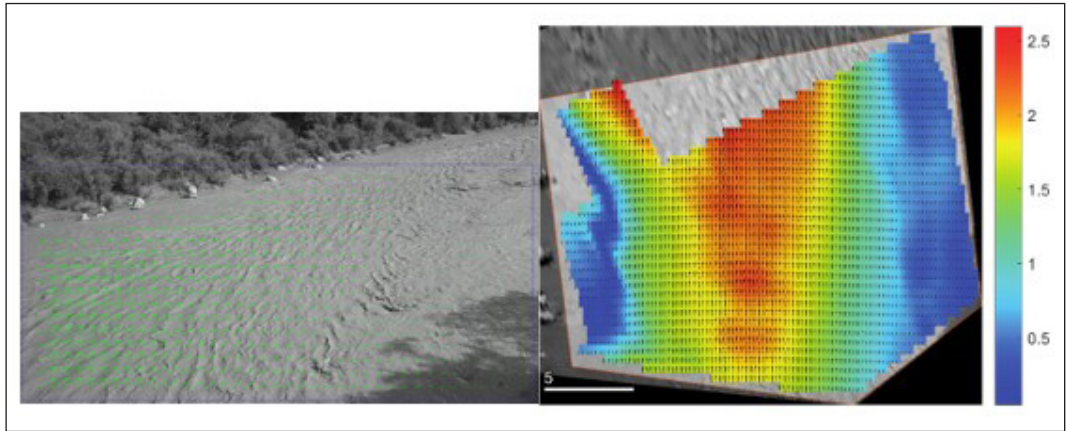


Figura 8: Vectores velocidad (izquierda) y campo de velocidades superficiales (derecha) en la sección de control del río *Guachipas*

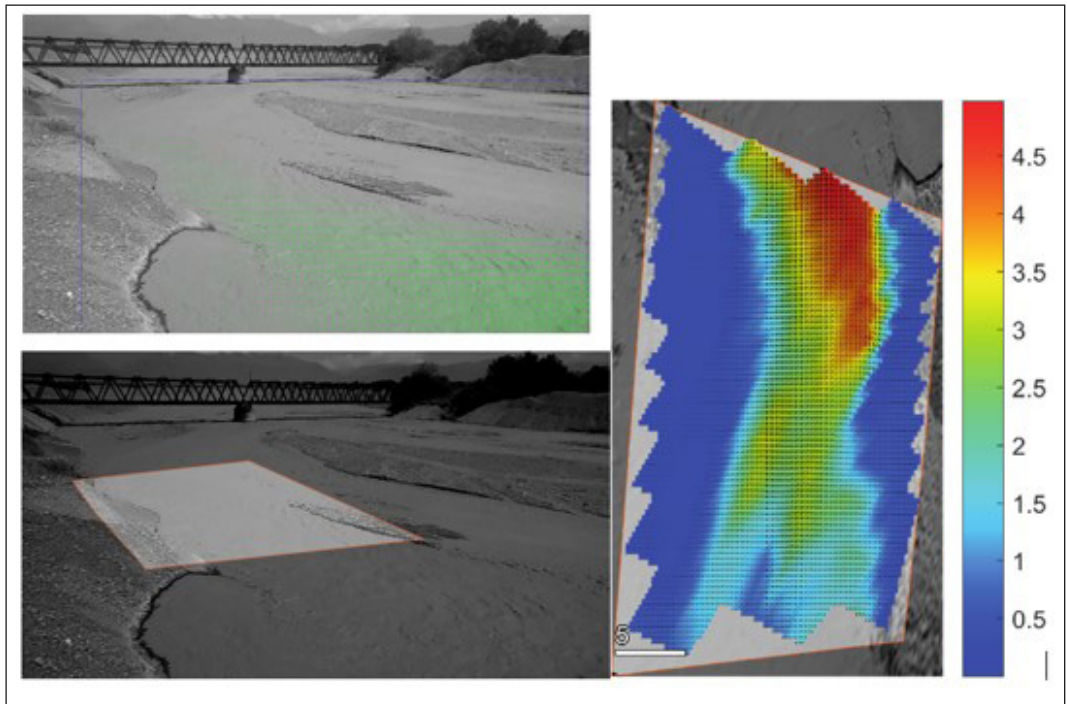


Figura 9: Vectores velocidad (arriba) y campo de velocidades superficiales con la zona rectificada (abajo) en la sección de control del río *Rosario*, filmado desde la margen derecha

Durante la campaña de medición, la técnica experimental de aforo funcionó muy adecuadamente en la detección de las velocidades superficiales del flujo.

Para la construcción de las curvas H-Q, posteriormente al aforo de algunos eventos en los cauces de estudio, se procedió al desarrollo de un modelo hidráulico calibrado en cada uno de los ríos de interés. Para ello se realizaron relevamientos topográficos de detalle y una serie de 10 perfiles transversales en cada uno de los sitios de estudio. Las condiciones de borde empleadas en el modelo fueron las de tirante normal tanto aguas arriba como aguas abajo.

Seguidamente, se presentan los modelos hidráulicos con los coeficientes de rugosidad calibrados, de tal manera que para las cotas de pelo de agua medidas en campo coincide la velocidad superficial medida *in situ* con la estimada por el modelo hidráulico HEC RAS:

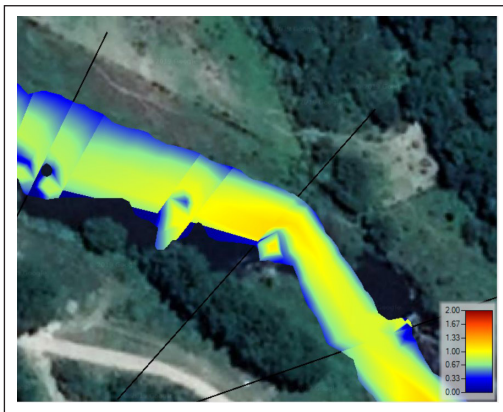


Figura 10: Campo de velocidades estimado con HEC RAS en el río Arenales

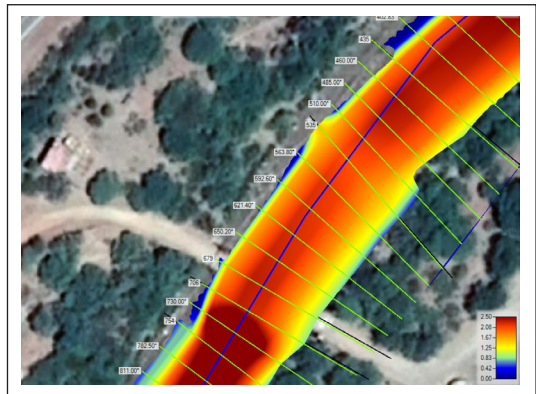


Figura 11: Campo de velocidades estimado con HEC RAS en el río Guachipas

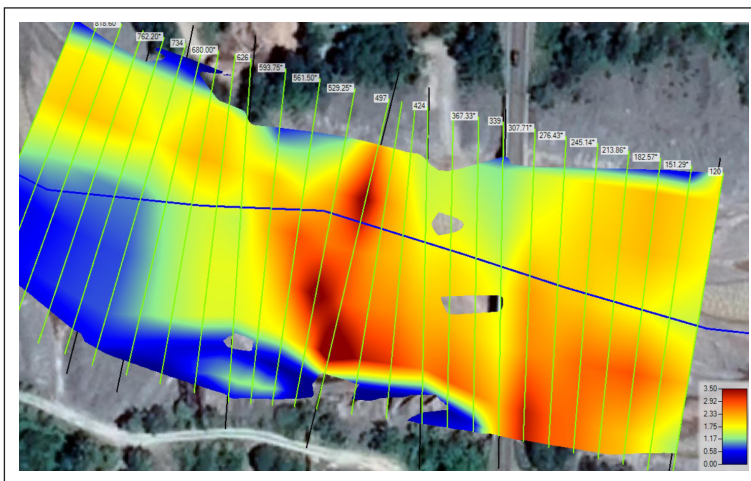


Figura 12: Campo de velocidades estimado con HEC RAS en el río Rosario



Los caudales escurridos estimados durante la campaña de medición en los diferentes cauces aforados son los siguientes:

- Río Arenales: 10 m<sup>3</sup>/s
- Río Rosario: 100 m<sup>3</sup>/s
- Río Guachipas: 50 m<sup>3</sup>/s
- Río Chuñapampa: 5 m<sup>3</sup>/s

Finalmente, luego de realizar múltiples campañas de aforo se ajustaron las siguientes relaciones H-Q en los cauces presentados:

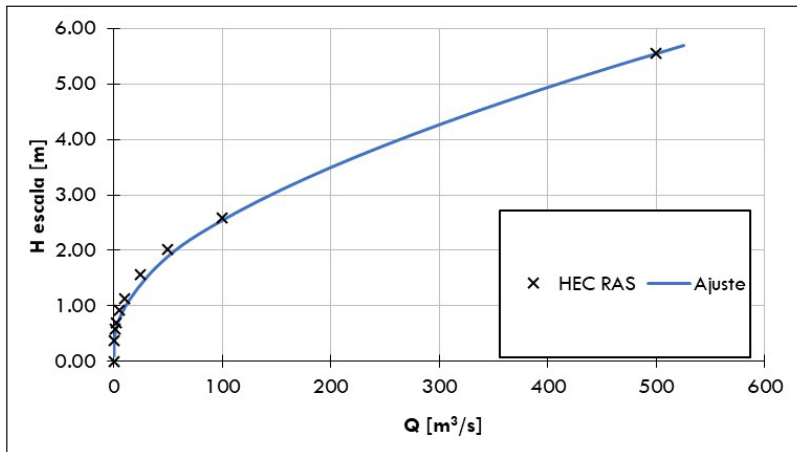


Figura 13: Curva H-Q en el río Rosario en el cruce con la Ruta Nacional N.º 68, provincia de Salta

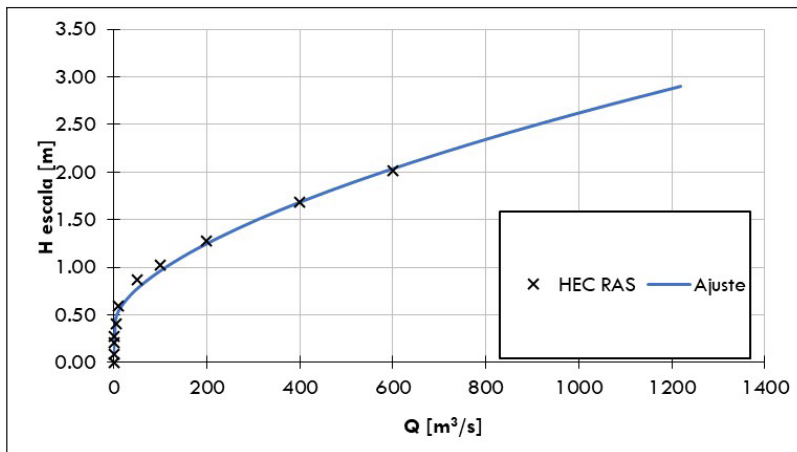


Figura 14: Curva H-Q en el río Arenales cercano a la localidad de San Agustín, provincia de Salta

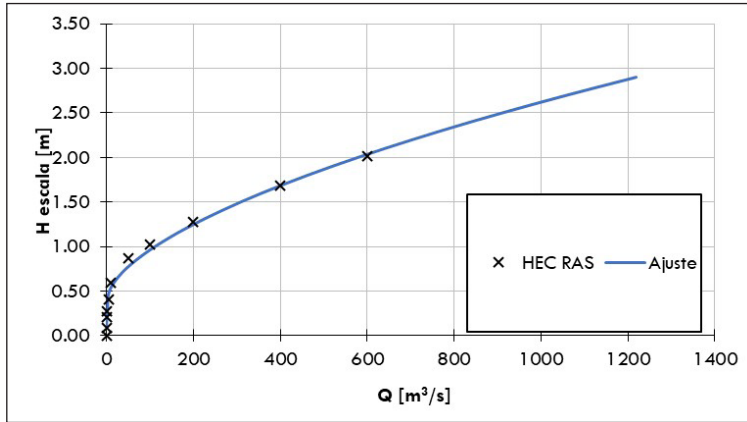


Figura 15: Curva H-Q en el río Guachipas en el ingreso a la localidad de Alemania, provincia de Salta

### 3.3 Evaluación de la velocidad y la concentración del flujo denso en el Río Chuscha, Provincia de Salta

En este punto se presenta el análisis realizado para caracterizar las condiciones de flujo denso presentes en la sección definida en el río Chuscha, en su intersección con la ruta nacional N.º 40, en la zona norte de la ciudad de Cafayate, provincia de Salta. El evento analizado corresponde a un evento de inundación repentina, ocurrido el 6 de enero de 2015. Durante el evento un vecino registró un video (una imagen se observa en la Figura 16) que se analiza en este apartado.



Figura 16: Campo de vectores desplazamiento medio al aplicar LSPIV

Utilizando las distancias relevadas *in situ* y el campo de desplazamiento medio, se estimó que la velocidad del frente media de la sección es de 3 m/s. Luego de la implementación de LSPIV para la estimación de las velocidades del frente del flujo denso, se busca estimar la concentración del sedimento del flujo mediante modelos existentes en la bibliografía.

Lo que estos modelos calculan es la velocidad del frente del flujo denso, por lo que se realizó el camino inverso: es decir, se buscó cuál era la concentración volumétrica del sedimento que hacía que la velocidad del frente fuera del mismo orden que la estimada con LSPIV previamente.

Al asumir una concentración volumétrica del sedimento del 10 %, se obtuvieron las siguientes velocidades de frente del flujo denso al aplicar los modelos descriptos en la Tabla 1.

Tabla 1: Velocidades de frente del flujo denso al aplicar los modelos propuestos por Takahashi (1981) al utilizar una concentración volumétrica del sedimento de 10 %.

Modelo	[m/s]
Bagnold (1954)	3,00
Yano y Daido (1965); Johnson (1970)	2,86

Al comparar la velocidad experimental obtenida en este trabajo a partir de la implementación de LSPIV con los valores calculados por las fórmulas propuestas por los diferentes modelos, se observa que los modelos aplicados estiman velocidades de frente de flujo denso muy cercanas a la medida experimentalmente con LSPIV al asumir una concentración volumétrica del sedimento del 10 %.

Lo que aquí se presenta cubre un área vacante, ya que en el pasado no ha sido posible medir *in situ* velocidades de frentes de flujos densos; de aquí en adelante mediante la aplicación de LSPIV podrá ser posible no solamente la medición de las velocidades de estos flujos, sino también la caracterización mucho más detallada (por ejemplo de concentraciones) que permitirá un entendimiento mayor de los flujos densos, uno de los fenómenos naturales más amenazantes en algunas regiones del mundo.

### 3.4 Uso de LSPIV para optimizar el funcionamiento de infraestructura hídrica en estructuras de descarga de presas

En el 2011, se utilizó por última vez el vertedero del dique Cabra Corral. Durante este año se registró con un video el momento en el cual se procedió a la apertura de sus compuertas.

En las siguientes figuras se presenta una imagen del video captado y el campo de velocidad superficial promedio estimado con la técnica experimental:

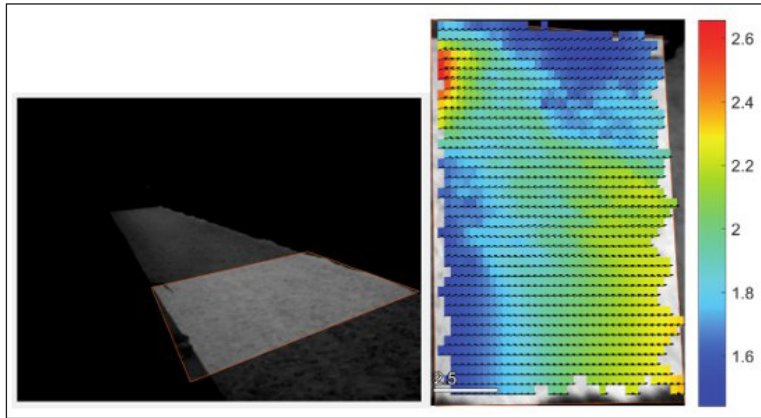


Figura 17: Imagen de la rápida de descarga del vertedero del Cabra Corral y campo de velocidades medias superficiales estimado durante la crecida del año 2011

La velocidad media superficial estimada en la rápida del vertedero fue del orden de los 2 a 2,5 m/s, y esta medición fue posible gracias a la implementación de la técnica experimental LSPIV, ya que de otra manera sería muy difícil (o imposible) poder medir en esta sección de interés.

Además, a la salida de la central hidroeléctrica del dique El Tunal existe un canal de descarga. Durante una visita a la central en el 2019 se procedió a la estimación de las velocidades superficiales aplicando LSPIV. A continuación, se presentan algunos de los resultados obtenidos:

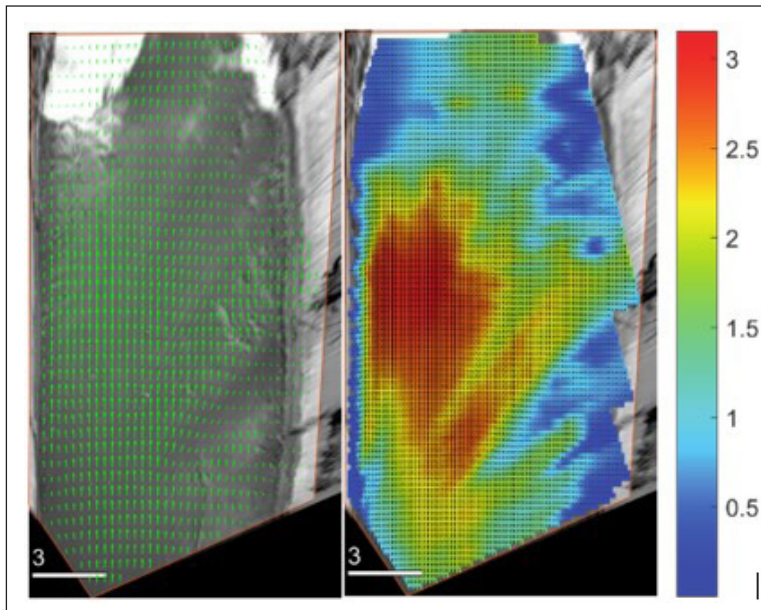


Figura 18: Campo de vectores y de velocidad media superficial en el canal de descarga del dique El Tunal al aplicar LSPIV



## 4. Conclusiones

Mediante la aplicación de LSPIV, se calibraron modelos hidráulicos y sus respectivos coeficientes de rugosidad durante crecidas en cauces fluviales. Con el registro de videos de crecidas puede estimarse al mismo tiempo las velocidades superficiales del flujo y los niveles alcanzados por el agua, y a partir de esa información calibrarse adecuadamente el modelo. También se ajustaron relaciones H-Q en diferentes ríos de la provincia.

Se demostró que LSPIV es una técnica muy adecuada para caracterizar flujos densos y estimar velocidades del frente de estos flujos. Con anterioridad a la realización de este trabajo no era posible medir adecuadamente las velocidades de flujos de este tipo ni siquiera en canales de laboratorio.

Se cuantificó y caracterizó de forma hidrodinámica el flujo escurrido en estructuras de descarga de presas. Es fundamental explicar la importancia de medir las velocidades en flujos de este tipo. Al poder mensurar este parámetro hidráulico se puede verificar el funcionamiento de las estructuras de descarga en prototipo. Esta caracterización experimental en prototipo provee información importante para evaluar el proyecto realizado.

Este trabajo ilustra el gran potencial de las iniciativas de ciencia con participación ciudadana para mejorar la evaluación del riesgo de inundación, ya que los datos hidráulicos, que son tan valiosos, se pueden calcular utilizando mensajes, fotografías y videos producidos por los ciudadanos. Hoy en día, las nuevas tecnologías de comunicación e imágenes digitales han permitido al público producir grandes cantidades de observaciones de inundaciones y compartirlas a través de las redes sociales.

## Referencias

- Adrian, R. J. (1984). Scattering particle characteristics and their effect on pulsed laser measurements of fluid flow: speckle velocimetry vs. particle image velocimetry. *Appl. Optar*: 23, 1690-1691 (1984). Recuperado de <https://www.osapublishing.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-23-11-1690>
- Adrian, R. J. (1991). Particle-imaging techniques for experimental fluid-mechanics. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 23, 261-304.
- Adrian R. J. (2005). Twenty years of particle image velocimetry. *Exp. Fluids* 39, 159-169.
- Bagnold, R. A. (1954). Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian Fluid under shear. *Proc. R. Soc. London Ser. A.* 225:49-63.
- Base de Datos Hidrológica Integrada – BDHI. Subsecretaría de Recursos Hídricos. Ministerio del Interior, Obras Públicas y Vivienda. Recuperado de <https://www.mininterior.gov.ar/obras-publicas/rh-base.php>
- Creutin, J. D., Muste, M., Bradley, A., Kim, S. C., and Kruger, A. (2003). River gauging using PIV techniques: a proof of concept experiment on the Iowa River. *Journal of Hydrology*, 277(3-4), 182-194.
- Fujita, I., Muste, M., and Kruger, A. (1998). Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications. *Journal of Hydraulic Research*, 36(3), 397-414.

- Gunawan, B., Sun, X., Sterling, M., Shiono, K., Tsubaki, R., Rameshwaran, Knight, Chandler, Tang, Fujita (2012). The application of LSPIV to a small irregular river for inbank and over-bank flows. *Flow. Meas. Inst.*, 24, 1-12.
- Johnson, A. M. (1970). *Physical Processes in Geology*. San Francisco: Freeman.
- Le Coz, J., Jodeau Magali, Hauet, A., Marchand, B., and Le Boursicaud, R. (2014). Image-based velocity and discharge measurements in field and laboratory river engineering studies using the free FUDAA-LSPIV software. *River Flow*, Lausanne, Switzerland.
- Ministerio del Interior, Obras Públicas y Vivienda. Base de Datos Hidrológica Integrada-BDHI. Subsecretaría de Recursos Hídricos. Recuperado de <https://www.mininterior.gov.ar/obras-publicas/rh-base.php>
- Muste, M., Fujita, I., and Hauet, A. (2008). Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments. *Water Resources Research*, 44, 1-14.
- Patalano, A., García, C. M., & Rodríguez, A. (2017). Rectification of Image Velocity Results (RI-Ver): A simple and user-friendly toolbox for large scale water surface Particle Image Velocimetry (PIV) and Particle Tracking Velocimetry (PTV). *Computers & Geosciences*, 109, 323-330.
- Takahashi, T. (1981). Debris flow. *Annual review of fluid mechanics*, 13(1), 57-77.
- Thielicke, W. and Stamhuis, E. J. (2014). PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB. *Journal of Open Research Software* 2(1):e30, DOI: <http://dx.doi.org/10.5334/jors.bl>.
- Yano, K., Daido, A. (1965). Fundamental study of mudflow. *Bull. Disaster Prev Res. Inst. Kyoto Univ.* 14:69-83.

**Myriam Cecilia Botelli**

Ingeniera Hidráulica, egresada de la Universidad Nacional de Salta. Especialista en Formulación y Evaluación de Proyectos de Inversión. Encargada del Gabinete de Hidráulica e Instalaciones Sanitarias de la Universidad Católica de Salta. Docente de las cátedras de Hidrología y de Hidráulica Aplicada en la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Católica de Salta. Investigadora del I.Es.I.Ing de la Facultad de Ingeniería de UCASAL, Consultora Independiente de Proyectos Hidráulicos, Evaluación de Impacto Ambiental y de Proyectos de Inversión.

cbotelli@ucasal.edu.ar

**Nicolás Federico Guillén**

Ingeniero Civil (Universidad Nacional de Córdoba). Doctor en Ciencias de la Ingeniería, Máster en Ciencias de la Ingeniería - Mención Recursos Hídricos (Universidad Nacional de Córdoba). Investigador Visitante del United States Geological Survey, Office of Surface Water (Estados Unidos). Profesor Asistente en la Universidad Nacional de Córdoba. Docente de posgrado en la Especialización en Hidráulica, Maestría en Ciencias de la Ingeniería - Mención Recursos Hídricos y Doctorado en Ciencias de la Ingeniería. Asesor del Secretario de Recursos Hídricos y Coordinador técnico del Plan Integral de Manejo de Embalses en el Ministerio de Servicios Públicos de la Provincia de Córdoba.

nfguillen@hotmail.com

**Carlos Marcelo García**

Ingeniero Civil de la Universidad Católica de Córdoba. Máster en Ciencias de la Ingeniería - Mención Recursos Hídricos de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba. PhD (Universidad de Illinois en Urbana, Champaign, Estados Unidos). Investigador independiente, Carrera del investigador científico y tecnológico del CONICET. Docente-Investigador de grado y posgrado de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba y otras universidades.

cgarcia2mjc@gmail.com

**Antoine Patalano**

Perfil académico-profesional.

Doctor en Ciencias de la Ingeniería. Investigador Asistente del CONICET. Desarrollador de RIVeR (<https://riverdischarge.blogspot.com/>). Docente de Hidrología en la Universidad Nacional de Córdoba.

antoinepatalano@gmail.com

**Marcelo Chalabe**

Ingeniero Civil (Universidad Católica de Salta). Docente de las cátedras de Hidrología y de Hidráulica Aplicada en la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Católica de Salta. Integrante del grupo de investigación Riesgo Hídrico del Instituto de Estudios Interdisciplinarios de Ingeniería (I.Es.I.Ing).

mchalabe@ucasal.edu.ar

## Structure evaluation using output-only systems identification methods and dynamic model updating

### Evaluación estructural usando métodos de identificación con base en la respuesta y actualización del modelo dinámico

Andrea Brasiliano<sup>1</sup>, Maria Diciá D. Silva<sup>1</sup>, Graciela N. Doz<sup>2</sup>, José Luís Vital de Brito<sup>2</sup>

---

*Ingeniería Civil / artículo científico*

Citar: Brasiliano, A., Silva, M.D., Doz, N. G., & Vital de Brito, J.L. (2020). Structure evaluation using output-only systems identification methods and dynamic model updating. *Cuadernos de Ingeniería*, 12. Recuperado de <http://revistas.ucasal.edu.ar>

*Recibido: marzo/2020*

*Aceptado: julio/2020*

#### Abstract

Identifying the dynamic properties of a structure with precision is an important point when trying to establish an adequate methodology for monitoring special structures, since the occurrence of structural damages modifies the original dynamic parameters. In this way, too, it is also possible to calibrate and subsequently work with a robust numerical model as a complement to evaluate structural integrity. Currently, there is no recommended procedure in Brazil to continuously monitor great structures. For this reason, this study aims to work on the proposal of a continuous structural monitoring system for the subsequent evaluation of structural “health”. Three identification methods based solely on structural response (Peak Picking, Reference-Based Data-Driven Stochastic Realization and the Reference-Based Covariance-Driven Stochastic Realization) are applied to the results of an experimental test on a three-story frame loaded with different excitation sources. Aspects such as computational effort, precision and processing velocity are analyzed. Subsequently, a method of model updating based on the measured frequencies is also evaluated. The results show that these methods can be an effective part of the intended monitoring methodology.

**Key words:** system identification, structural evaluation, modal parameters, model update

---

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil

<sup>2</sup> Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil

## Resumen

Identificar las propiedades dinámicas de una estructura con precisión es un punto importante cuando se pretende establecer una metodología adecuada para el monitoreo de obras especiales, ya que la ocurrencia de daños estructurales modifica los parámetros dinámicos originales. De esa forma también, es posible calibrar y trabajar posteriormente con un modelo numérico robusto como complemento para evaluar la integridad estructural. Actualmente, no existe un procedimiento recomendado en Brasil para evaluar continuamente grandes estructuras. Por ese motivo, este estudio tiene como objetivo trabajar en la propuesta de un sistema de monitoreo estructural continuo con vistas a la posterior evaluación de la “salud” estructural. Tres métodos de identificación con base solo en

la respuesta estructural (Peak Picking, Reference-Based Data-Driven Stochastic Realization and the Reference-Based Covariance-Driven Stochastic Realization) son aplicados a los resultados de un ensayo experimental de un pórtico de tres pisos sometido a diferentes fuentes de excitación. Son analizados aspectos como el esfuerzo computacional, la precisión y la velocidad de procesamiento. Posteriormente se evalúa también un método de actualización del modelo numérico basado en las frecuencias medidas. Los resultados muestran que estos métodos pueden constituir una parte efectiva de la metodología de monitoreo pretendida..

**Palabras clave:** identificación de sistemas, evaluación estructural, parámetros modales, actualización del modelo numérico.

---

## 1. Introduction

In general, structures must support permanent loads or environmental excitations, such as wind, traffic, earthquakes and impacts. Over the years, these structures may deteriorate under normal conditions of use. Not only can this affect its load capacity, but excessive cracks may form, producing vibrations which induce discomfort and insecurity for their users.

A reliable structure evaluation is necessary to detect the existence and location of structural damages in order to establish maintenance and repair procedures that will improve overall structural integrity. Doebling *et al.* (1998) and Zou *et al.* (2000) explain that the dynamic properties may be used for damage detection, since the occurrence of failures modifies the natural frequencies of the structure, and the modal shapes enable the location of possible damages. Thus, the use of efficient system identification methods is significant for a better structural evaluation, obtaining accurate results with minimum errors.

Great structures such as bridges, footbridges, stadiums and overpasses, are affected by environmental excitation. This kind of excitation cannot be easily measured because of its stochastic behavior, so the use of output-only system identification methods is necessary. For these methods, the input data are not needed to identify the dynamic properties of the structure, but only the output data such as acceleration records are required. Peeters and De Roeck (1999) and Peeters (2000) presented important studies about time domain output-only methods. In those works, the authors made improvements on the SSI-DATA and SSI-COV methods by considering only some of the structure’s response as reference outputs in order to identify the modal parameters. The methods studied by the authors correspond to stochastic ones and in this case the excitation is modeled by terms of white-noise. This present work shows that the

stochastic methods allow the identification of the modal parameters even though the excitations applied were not a white-noise.

On the other hand, having a robust numerical model is also essential for monitoring structural systems. With a numerical model updated with the dynamic characteristics experimentally identified, for example, it is possible to obtain more realistic results: it will be guaranteed that the model represents the behavior of the real structure as close as possible. The output-only system identification that obtains the dynamic properties of a structure is not able to identify its unknown parameters, such as physical and/or geometric properties. However, these parameters may be determined (or updated) by finite element model updating based on the dynamic characteristics identified experimentally. In general, the finite element model updating in structural dynamics is used to adjust numerical models to the experimental results by means of direct or iterative methods. Model updating using iterative methods based on dynamic characteristics provides the determination of unknown parameters such as stiffness, mass, or damping. Thus, it can be used as an important tool for evaluation of the behavior or condition of the structures. Brownjohn *et al.* (2001) described a finite element model updating method based on sensitivity analysis and its application on the evaluation of structural conditions. The authors also investigated the efficiency of the method in damage quantification.

The updated numerical model of a structure, from the measured data, such as frequencies and mode shapes, can be used as precise tool to foresee its dynamic behavior due to modifications suffered during its useful life. The monitoring of great structures is not considered to be as important as it should be in Brazil. This is evident from recent accidents with some overpasses caused by the lack of maintenance. In 2018, two structures collapsed under normal conditions of use. In Brasília (Federal District), an important overpass failed because of an undetected infiltration that caused a considerable deterioration of the structure leading it to the rupture (Carone, 2018). Later, in São Paulo another overpass subjected to a heavy traffic presented deterioration on its support which caused the fall of a part of the structure (Cerqueira, 2018).

In this sense, searching to establish a suitable methodology for the structure evaluation, this work presents an experimental study in which output-only system identification methods, in the time and frequency domains, and a numerical model update method based on penalty functions were applied and evaluated. The analyzed structure was a simple metallic frame with three degrees of freedom. The frame was submitted to vibration tests in which different types of excitations were applied. The Peak Picking, the Reference-Based Data-Driven Stochastic Realization (SSI-DATA/ref) and the Reference-Based Covariance-Driven Stochastic Realization (SSI-COV/ref) methods were applied in order to identify the natural frequencies and the mode shapes of the frame. The influence of excitation source in the identification of the modal parameters was also evaluated.

The choice of the mentioned methods considered some aspects. The Peak Picking method, for example, was chosen because of its simplicity, relative facility of implementation and also the fact that once it works at frequency domain, it would be faster to identify the natural frequencies observing the peaks of the signal spectrum. On the other hand, Peeters (2000) showed that this method provides better results when the structures present a spectrum with well separated natural frequencies. The identification of the respective natural mode shapes is not so simple

because in some cases it could require a manual procedure to search for the correct peaks that will form the mode shapes. The stochastic subspace methods (SSI-DATA/ref and SSI-COV/ref) only require the output signals of the structure to provide its dynamic properties and work in time-domain; they were also chosen for their robustness and precision, as demonstrated by Peeters (2000).

The finite element model of the frame was updated by the Penalty Function Method (Friswell and Mottershead, 1995) using the measured frequencies. It is an iterative method which permits the obtainment of updated parameters with physical meaning: it is believed that it can be used as a tool to evaluate structural conditions.

The results showed that the applied tools had a good overall performance, indicating that their choice would be succeed for the purpose of monitoring structural systems.

## 2. Peak Picking Method

According to Peeters (2000), the Peak Picking Method (PPM) is a classical technique and the simplest one to estimate modal parameters of structures under ambient vibration. This method works in frequency domain and has a great application in Civil Engineering, because of its simplicity and processing time. However, better results are found for structures that have well separated natural frequencies and low damping conditions.

The Peak Picking Method applies the Discrete Fourier Transform to the output data in the time domain to transform it to the frequency domain. Then, it obtains the Power Spectral Density Function (PSD) of the system output. To optimize the PSD acquisition, the Modified Welch Periodogram (Welch, 1967) is a computational alternative that divides the signal in segments and applies the *Hanning* window that removes any signal discontinuity. The natural frequencies of the structure are estimated by the peaks of the acquired output spectral density.

The modal configuration has the same direction as the one chosen for the sensors used in the test. The relation between the peak magnitude of each sensor and that related to the reference one indicates the modal amplitudes. For a mode  $i$ , the modal amplitude of each measured point  $j$  will be defined as follows:

$$A_{i,j} = \sqrt{\frac{\text{PSD}_{ij}}{\text{PSD}_{iref}}} \quad (1)$$

where  $\text{PSD}_j$  represents the peak of the spectral density that corresponds to mode  $i$  at point  $j$  and  $\text{PSD}_{iref}$  represents the peak of the spectral density that corresponds to mode  $i$  at reference point.

The signal of the modal amplitude is determined by the cross-spectral density function between the outputs of all sensors and the reference one. According to Palazzo (2001), the positive or negative signal will be defined from the phase of this cross-spectral density function according to the following ranges: if  $-70^\circ < \varphi < 70^\circ$ , the amplitude will be positive; if  $-250^\circ < \varphi < -110^\circ$  or  $110^\circ < \varphi < 250^\circ$ , the amplitude will be negative.



### 3. Reference-Based Data-Driven Stochastic Realization (SSI-DATA/ref)

The Reference-Based Data-Driven Stochastic Realization (SSI-DATA/ref) is a reformulation of the Data-Driven Stochastic Subspace Identification (SSI-DATA) (Peeters and De Roeck, 1999). This method identifies a stochastic state space model (Eq. 2) directly from the time records for a white noise excitation.

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \boldsymbol{\omega}_k; \mathbf{y}_k = \mathbf{C}\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (2)$$

where matrices  $\mathbf{A}$  and  $\mathbf{C}$  describe the relation between the input and the output vector,  $\mathbf{y}_k$ , of a system by a discrete time state vector  $\mathbf{x}_k$ ;  $\boldsymbol{\omega}_k \in \mathbf{R}^{n \times 1}$  is the process noise due to disturbances and modeling inaccuracies and  $\mathbf{v}_k \in \mathbf{R}^{l \times 1}$  is the measurement noise due to sensor inaccuracies. Consider  $k$  the index related to the response of the structure obtained in discrete time intervals,  $n$  is the system order identified by the method and  $l$  is the number of measuring points.

In an experimental test, the position and the number of sensors help to determine the mode shapes of a structure. All signals acquired by the sensors carry the same information about the modal properties, if none of them is placed at a node of a mode and it means that measures typically contain some redundancy. To improve the processing time and decrease this redundancy without losing accuracy, some signals may be partially omitted in the identification process and at the end, they are again included in order to obtain the “full” mode shapes. Assume that the  $l$  outputs are split in a subset of  $r$  well-chosen reference sensors and a subset of  $l - r$  other sensors. Some identification methods use the block Hankel matrix (Eq. 3) composed by  $2i$  block rows and  $N$  columns to gather the output measurements.

$$\mathbf{H}^{\text{ref}} \equiv \frac{1}{\sqrt{N}} \begin{bmatrix} \mathbf{y}_0^{\text{ref}} & \mathbf{y}_1^{\text{ref}} & \dots & \mathbf{y}_{N-1}^{\text{ref}} \\ \mathbf{y}_1^{\text{ref}} & \mathbf{y}_2^{\text{ref}} & \dots & \mathbf{y}_N^{\text{ref}} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \mathbf{y}_{i-1}^{\text{ref}} & \mathbf{y}_i^{\text{ref}} & \dots & \mathbf{y}_{i+N-2}^{\text{ref}} \\ \mathbf{y}_i & \mathbf{y}_{i+1} & \dots & \mathbf{y}_{i+N-1} \\ \mathbf{y}_{i+1} & \mathbf{y}_{i+2} & \dots & \mathbf{y}_{i+N} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \mathbf{y}_{2i-1} & \mathbf{y}_{2i} & \dots & \mathbf{y}_{2i+N-2} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{y}_{0|i-1}^{\text{ref}} \\ \mathbf{y}_{i|2i-1} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{y}_p^{\text{ref}} \\ \mathbf{y}_f \end{bmatrix} \begin{matrix} \updownarrow \text{ri} \\ \updownarrow \text{li} \end{matrix} \begin{matrix} \text{"past"} \\ \text{"future"} \end{matrix} \in \mathbf{R}^{(r+l) \times N} \quad (3)$$

where  $\mathbf{y}_k^{\text{ref}} \in \mathbf{R}^{r \times 1}$  are the reference outputs and  $\mathbf{y}_k \in \mathbf{R}^{l \times 1}$  are the others and  $i$  is the time lag. The terms *past* and *future* refer to the time instants in which the outputs were obtained. It means that the subset of all future outputs was obtained at time instants posterior to that corresponding to the reference outputs.

According to Peeters (2000) and Brasiliano (2005) and based on the concepts of Kalman Filter (Juang, 1994; Chen, 1999) a projection matrix  $\mathbf{P}_i^{\text{ref}}$  can be obtained from *QR decomposition* of the Hankel matrix. Then, the observability matrix  $\mathbf{O}_i$  and the Kalman filter state sequence  $\hat{\mathbf{X}}_i$  can be obtained by applying singular value decomposition (SVD) to the projection matrix  $\mathbf{P}_i^{\text{ref}}$  (Eq. 4):

$$\mathbf{P}_i^{\text{ref}} = \mathbf{U}_1 \mathbf{S}_1 \mathbf{V}_1^T \Rightarrow \mathbf{O}_i = \mathbf{U}_1 \mathbf{S}_1^{1/2} \Rightarrow \hat{\mathbf{X}}_i = \mathbf{O}_i^* \mathbf{P}_i^{\text{ref}} \quad (4)$$

where  $\mathbf{O}_i^*$  represents the pseudo-inverse of observability matrix.

The extended observability matrix  $\mathbf{O}_{i-1}$  can be simply obtained after deleting the last  $l$  rows of  $\mathbf{O}_i$  and  $\mathbf{P}_{i-1}^{\text{ref}} \in \mathbf{R}^{l(i-1) \times N}$  can be defined and also be represented by submatrices  $\mathbf{R}_{41}$ ,  $\mathbf{R}_{42}$ ,  $\mathbf{Q}_1^T$  and  $\mathbf{Q}_2^T$  obtained from the *QR decomposition* of the Hankel matrix (Brasiliano, 2005) (Eq. 5).

$$\mathbf{P}_{i-1}^{\text{ref}} = \frac{\mathbf{y}_f^-}{\mathbf{y}_p^{\text{ref}+}} = \mathbf{O}_{i-1} \hat{\mathbf{X}}_{i-1}; \quad \mathbf{P}_{i-1}^{\text{ref}} = [\mathbf{R}_{41} \quad \mathbf{R}_{42}] \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_1^T \\ \mathbf{Q}_2^T \end{bmatrix} \quad (5)$$

The system matrices can be determined by solving the following linear system equation for  $\mathbf{A}$  and  $\mathbf{C}$  in a least square sense (Eq. 6):

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{X}}_{i-1} \\ \mathbf{Y}_{i|i} \end{bmatrix} \hat{\mathbf{X}}_i^*; \quad \mathbf{Y}_{i|i} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{21} & \mathbf{R}_{22} & \mathbf{0} \\ \mathbf{R}_{31} & \mathbf{R}_{32} & \mathbf{R}_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_1^T \\ \mathbf{Q}_2^T \\ \mathbf{Q}_3^T \end{bmatrix} \quad (6)$$

In which  $\mathbf{Y}_{i|i}$  is a Hankel matrix with only one block row, and  $\hat{\mathbf{X}}_i^*$  represents the pseudo-inverse matrix of  $\hat{\mathbf{X}}_i$  defined in Eq. (4).

The discrete state matrix  $\mathbf{A}$  and the observation matrix  $\mathbf{C}$  solve the identification problem. Rahman (2012) and Schanke (2015) explain how to obtain the dynamic properties from these matrices. The dynamic behavior of the system is characterized by the eigenvalues and eigenvectors of continuous matrix  $\mathbf{A}$ .

The eigenvalues of continuous state matrix  $\mathbf{A}$  are obtained from the relation between the continuous and discrete systems (Eq. 7). Considering the continuous eigenvalues, the natural frequencies correspond to the imaginary part of them (Eq. 8) and the mode shapes are obtained by the product of the eigenvectors of matrix  $\mathbf{A}$  and the observation matrix  $\mathbf{C}$ .

$$\lambda = \frac{\ln(\mu)}{\Delta t} \quad (7)$$

$$f = \frac{\text{Im}(\lambda)}{2\pi} \quad (8)$$

where  $\lambda$  are the eigenvalues of continuous state matrix  $\mathbf{A}$ ;  $\mu$  are the eigenvalues of discrete state matrix  $\mathbf{A}$ ;  $\Delta t$  is the time interval between the measured records and  $f$  is the natural frequencies of the damped system, in *Hertz*.

Peeters and De Roeck (2001) also suggest the use of a stabilization diagram to the application of the SSI-DATA method. The order of the system is overestimated because of noises that may occur in the experimental data acquisition; it also creates nonphysical and mathematical poles next to the physical poles.

The purpose of the stabilization diagram is to separate the physical poles, which are stable, from the mathematical poles, which are not stable. The pole is stable when the differences between natural frequencies, damping ratios, and mode shapes are within the stabilization criteria defined by the user. The stable pole alignment identifies the natural frequencies of the vibration modes (Peeters and De Roeck, 2001; Schanke, 2015).

According to Shancke (2015), it is necessary to estimate an appropriated value for the maximal order ( $n_{\max}$ ). If the maximal order is smaller than the correct system order, incorrect results will be obtained. If the chosen value is too high then a lot of nonphysical poles will appear, making it difficult to find the correct results and increasing the computational time. The data matrix should be  $l \times N$ , where  $l$  is the number of measurement channels and  $N$  is the number of measurements. The magnitude of block rows,  $b$ , is chosen by the user.

#### 4. Reference-Based Covariance-Driven Stochastic Realization

The Reference-Based Covariance-Driven Stochastic Realization (SSI-COV/ref) is a reformulation of the Covariance-Driven Stochastic Subspace Identification (SSI-COV), both developed by Peeters and De Roeck (1999). The method identifies a stochastic state-space model using the output covariance matrices between all outputs and the reference ones, assuming a white noise excitation.

Considering the output-only data obtained from experimental tests, Eq. (9) calculates the covariances between all outputs and the reference ones:

$$\mathbf{R}_i^{ref} \equiv E \left[ \mathbf{y}_{k+i} \mathbf{y}_k^{refT} \right] \in \mathbf{R}^{l \times r} \quad (9)$$

where  $l$  is the number of outputs,  $r$  is the number of reference sensors and  $i$  is the time lag.

Considering that a finite number  $N$  of data is available and the important factorization property of stochastic systems  $\mathbf{R}_i^{ref} = \mathbf{R}_i \mathbf{L}_i^T = \mathbf{C} \mathbf{A}^{i-1} \mathbf{G}^{ref}$ , where  $\mathbf{G}^{ref}$  is the *next-state output covariance*

matrix, the output covariances  $R_i^{\text{ref}}$  may be gathered in a block Toeplitz matrix  $\mathbf{T}_{1|i}^{\text{ref}} \in \mathbf{R}^{li \times ri}$  (Eq. 10) that can be computed from the data block Hankel matrix (Eq. 3) defined previously. The *next-state output covariance matrix*  $\mathbf{G}^{\text{ref}}$  correspond to the last columns of controllability matrix  $\mathbf{C}_i^{\text{ref}}$  (Brasiliano, 2005). Then, the application of the *Singular Value Decomposition* (SVD) to the Toeplitz matrix (Eq. 11) allows the estimation of its rank,  $n$ , as the number of singular values other than zero.

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_{1|i}^{\text{ref}} = \mathbf{Y}_f \mathbf{Y}_p^{\text{ref}T} &= \begin{bmatrix} \mathbf{R}_i^{\text{ref}} & \mathbf{R}_{i-1}^{\text{ref}} & \dots & \mathbf{R}_1^{\text{ref}} \\ \mathbf{R}_{i+1}^{\text{ref}} & \mathbf{R}_i^{\text{ref}} & \dots & \mathbf{R}_2^{\text{ref}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{R}_{2i-1}^{\text{ref}} & \mathbf{R}_{2i-2}^{\text{ref}} & \dots & \mathbf{R}_i^{\text{ref}} \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{CA} \\ \mathbf{CA}^2 \\ \vdots \\ \mathbf{CA}^{i-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{A}^{i-1} \mathbf{G}^{\text{ref}} & \mathbf{A}^{i-2} \mathbf{G}^{\text{ref}} & \dots & \mathbf{A} \mathbf{G}^{\text{ref}} \end{bmatrix} \downarrow n = \mathbf{O}_i \mathbf{C}_i^{\text{ref}} \end{aligned} \quad (10)$$

$\vec{n}$

$$\mathbf{T}_{1|i}^{\text{ref}} = \mathbf{USV}^T = [\mathbf{U}_1 \quad \mathbf{U}_2] \begin{bmatrix} \mathbf{S}_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1^T \\ \mathbf{V}_2^T \end{bmatrix} = \mathbf{U}_1 \mathbf{S}_1 \mathbf{V}_1^T \quad (11)$$

where  $\vec{n}$  and  $\downarrow n$  are mathematical operators that indicate the number  $n$  of columns and rows,  $\mathbf{U} \in \mathbf{R}^{li \times li}$  and  $\mathbf{V} \in \mathbf{R}^{ri \times ri}$  are orthonormal matrices and  $\mathbf{S} \in \mathbf{R}^{li \times ri}$  is a diagonal matrix whose elements are the positive singular values in descending order. Splitting the SVD in two parts, the extended observability matrix  $\mathbf{O}_i \in \mathbf{R}^{li \times n}$  and extend stochastic controllability matrix  $\mathbf{C}_i^{\text{ref}} \in \mathbf{R}^{n \times ri}$  (Eq. 12) are computed and the identification problem may be solved.

$$\mathbf{O}_i = \mathbf{U}_1 \mathbf{S}_1^{\frac{1}{2}}; \quad \mathbf{C}_i^{\text{ref}} = \mathbf{S}_1^{1/2} \mathbf{V}_1^T \quad (12)$$

From Eq. 12, is possible to obtain the state matrix  $\mathbf{A}$ , the next-state output covariance matrix  $\mathbf{G}^{\text{ref}}$  and the observation matrix  $\mathbf{C}$ . The matrix  $\mathbf{A}$  can be obtained by the decomposition property of a shifted block Toeplitz matrix  $\mathbf{T}_{2|i+1}^{\text{ref}}$  which is composed of covariances  $\mathbf{R}_k^{\text{ref}}$  from time lag

2 to  $i+1$  but has a similar structure as  $\mathbf{T}_{|i}^{\text{ref}}$ . As described in the SSI-DATA/ref method, the modal parameters may be computed from matrices  $\mathbf{A}$  and  $\mathbf{C}$  and the stabilization diagram can also be applied.

## 5. Finite element model updating by the Penalty Function Method (Friswell & Mottershead, 1995)

The purpose of dynamic model updating is modifying parameters of the numerical model in order to improve the correlation between the measured data and the results from the analytical model. The model updating can be done using direct or iterative methods. The iterative methods obtain parameters with physical meaning and they can be used as a tool to evaluate structural conditions. Because of this, an iterative method based on penalty functions was applied in this paper.

According to Friswell & Mottershead (1995), the penalty functions are generally non-linear functions of the parameters, and the iterative procedure is required with the possible associated convergence problems. Thus, the penalty function determines the correlation involving the mode shape and eigenvalue data and normally uses a truncated Taylor series expansion of the modal data in terms of the unknown parameters (Eq. 13).

$$\delta \mathbf{z} = \mathbf{S}_j \delta \boldsymbol{\theta} \quad (13)$$

where  $\delta \boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}_j$  is the perturbation in the parameters;  $\delta \mathbf{z} = \mathbf{z}_m - \mathbf{z}_j$  is the difference between the measured and the estimated eigenvalue  $\mathbf{z}_m$  and  $\mathbf{z}_j$ , respectively, and  $\mathbf{S}_j$  is the sensitivity matrix. In Eq. (13)  $\boldsymbol{\theta}_j$  is the current parameter estimate after  $j$  iterations and  $m$  indicates the number of measured points. The sensitivity matrix can be obtained by several methods such as that proposed by Fox & Kapoor (1968) where the first derivative of the eigenvalues is computed as follows (Eq. 14):

$$\frac{\delta \lambda_i}{\delta \boldsymbol{\theta}} = \boldsymbol{\varphi}_i^T \left[ \frac{\delta \mathbf{K}}{\delta \boldsymbol{\theta}} - \lambda_i \frac{\delta \mathbf{M}}{\delta \boldsymbol{\theta}} \right] \boldsymbol{\varphi}_i \quad (14)$$

where  $\boldsymbol{\varphi}_i$  is the eigenvector corresponding to  $\lambda_i$ ,  $\frac{\delta \mathbf{K}}{\delta \boldsymbol{\theta}}$  and  $\frac{\delta \mathbf{M}}{\delta \boldsymbol{\theta}}$  are matrices obtained by the derivative of each element of the system stiffness matrix  $\mathbf{K}$  and the system mass matrix  $\mathbf{M}$ , respectively, according to the parameters that are being updated.

In practice, the number of unknown parameters frequently will exceed the number of measured data. In these cases, the problem consists of minimizing the following penalty function (Eq. 15):

$$\begin{aligned} J(\delta\theta) = & \delta\mathbf{z}^T \mathbf{W}_{\varepsilon\varepsilon} \delta\mathbf{z} + (\theta_j - \theta_0)^T \mathbf{W}_{\theta\theta} (\theta_j - \theta_0) - 2\delta\theta^T \{ \mathbf{S}^T \mathbf{W}_{\varepsilon\varepsilon} \delta\mathbf{z} - \mathbf{W}_{\theta\theta} (\theta_j - \theta_0) \} + \\ & \delta\theta^T [ \mathbf{S}^T \mathbf{W}_{\varepsilon\varepsilon} \mathbf{S} + \mathbf{W}_{\theta\theta} ] \delta\theta \end{aligned} \quad (15)$$

where  $\theta_0$  is the vector of the estimated initial parameters,  $\mathbf{W}_{\varepsilon\varepsilon}$  is a diagonal matrix whose elements are equal to the inverse of the variance of the corresponding eigenvalues. The matrix  $\mathbf{W}_{\theta\theta}$  is also a weighting matrix and its elements are the inverse of the estimated variance of the corresponding parameters.

Minimizing this function with respect to  $\delta\theta$ , one obtains (Eq. 16):

$$\theta_{j+1} = \theta_j + (\mathbf{S}_j^T \mathbf{W}_{\varepsilon\varepsilon} \mathbf{S}_j + \mathbf{W}_{\theta\theta})^{-1} \{ \mathbf{S}_j^T \mathbf{W}_{\varepsilon\varepsilon} (\mathbf{z}_m - \mathbf{z}_j) - \mathbf{W}_{\theta\theta} (\theta_j - \theta_0) \} \quad (16)$$

The weighting matrix  $\mathbf{W}_{\theta\theta}$  must be positive definite and is chosen so that parameters which are estimated accurately in the initial finite element model do not change as much as parameters whose initial estimates are poor.  $\mathbf{W}_{\theta\theta}$  is also a diagonal matrix whose elements are the reciprocals of the estimated variances (the squares of the standard deviations) of the corresponding parameters. Despite the variance may be difficult to estimate quantitatively, the ability to set level of uncertainty in the parameters is very powerful. The choice of these matrices,  $\mathbf{W}_{\varepsilon\varepsilon}$  and  $\mathbf{W}_{\theta\theta}$ , which allow the attribution of relative uncertainty in the parameters and measurements (eigenvalues) is based on the estimated standard deviations. According to Friswell and Mottershead (1995), an important feature in using penalty function methods is that the absolute value of the weighting matrices is of no consequence.

## 6. Experimental Analysis

This section will present the results obtained from the application of systems identification and model updating methods to experimental data. In the experimental analysis, vibration tests in a three-story shear frame (shear building model) were realized and the identification methods of dynamic properties (SSI-COV/ref, SSI-DATA/ref and the Peak Picking Method) was applied to the acceleration records obtained from the tested structure. Vibration tests considering three different types of excitation applied in different points were realized. With respect to the updating of the numerical frame model, the method based on penalty function and sensitivity analysis (Friswell and Mottershead, 1995) was applied.

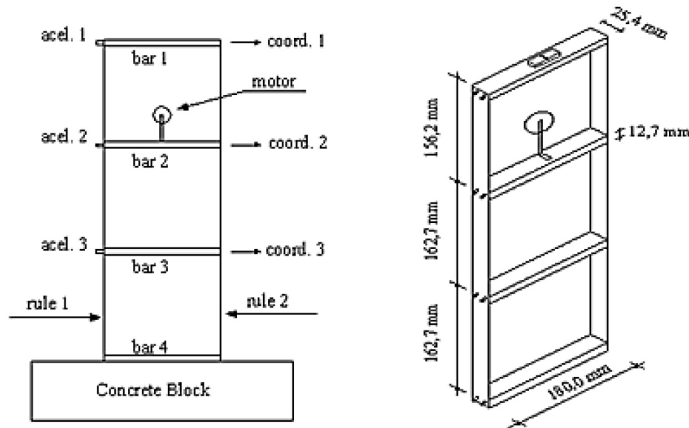
### 6.1 Characteristics of the frame and vibration tests

The frame was built with four aluminum bars and two steel rules. The steel rules were fixed to the aluminum bars by screws, as can be seen in Fig. 1. The values of the frame components masses are summarized in Table 1. There was also an electric motor fixed at the second floor.

Fig. 1 presents a scheme of the frame as well its dimensions and coordinates.

**Table 1.** Masses of the frame components.

	Mass (kg)
Bar 1	0.28063
Bar 2	0.15938
Bar 3	0.15903
Bar 4	0.15892
Rule 1	0.10503
Rule 2	0.10469
Electric Motor	0.15300
Accelerometer	0.02814



**Fig. 1.** Configuration of the tested frame.

For calculating the mass matrix, the masses of all frame elements showed in Table 1 were considered. The frame's stiffness matrix was built considering a shear building model once the bars' stiffness could be considered infinite compared to the rules' stiffness. According to Clough and Penzien (1993), the system identification methods work for shear building structures such as regular frames, the difference is that only the lower stiffness elements need to be considered in the methods, which improves the computational processing. As can be seen in Fig. 1, the bars represent the floors and the rules represent the columns of the experimental model. The mass and stiffness matrices were defined as follows (Eq. 17):

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 0,3500402 & 0 & 0 \\ 0 & 0,4196357 & 0 \\ 0 & 0 & 0,2677009 \end{bmatrix} \text{kg}; \quad \mathbf{K} = \begin{bmatrix} 24EI/l_1^3 & -24EI/l_1^3 & 0 \\ -24EI/l_1^3 & (24EI/l_1^3 + 24EI/l_2^3) & -24EI/l_2^3 \\ 0 & -24EI/l_2^3 & (24EI/l_2^3 + 24EI/l_3^3) \end{bmatrix} \text{N/m} \quad (17)$$

The Young's Modulus ( $E$ ) and inertia moment ( $I$ ) of the frame column were considered as:  $E = 2.06 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ ;  $I = 3.219 \times 10^{-12} \text{ m}^4$ . The frame was fixed in a concrete block with 50kg in weight and the block was put on a rubber plate in order to avoid base vibration. Three piezoelectric accelerometers with sensitivity equal to  $4,80 \text{ pC/ms}^{-2}$  were fixed to the three coordinates of the frame (Fig. 1).

The frame was submitted to the following tests: two free vibration tests and one forced vibration, named Test 1, Test 2, and Test 3. Tests 1 and 2 correspond to the free vibration tests produced by an impact at coordinate 1 (third floor) of the frame and by an initial displacement at this point, respectively. Test 3 corresponds to the forced vibration test produced by an electric motor fixed at the second floor of the frame. The acquisition equipment was configured to acquire the records with a sample time of  $5 \times 10^{-3} \text{ s}$  resulting in a sample frequency of 200 Hz ( $1/\Delta t$ ). The records were acquired during 25s.

Since the identification methods applied are output-only methods, they do not require information from the excitation sources, just the output signals (accelerations records, for example) are necessary to the identification of the dynamic properties and therefore no measure of the excitations has been considered. It is important to emphasize that the excitations have been applied observing the sensitivity of the used accelerometers in order to provide reliable acceleration records. Numerical simulations were performed by Brasiliano (2005) to validate the implemented computational algorithms.

## 6.2 Identification of the dynamic properties of the frame

The natural frequencies and mode shapes of the structure were identified from the acceleration records that were acquired in the vibration tests. This identification was done by the three methods already cited. Fig. 2 presents the acceleration records obtained from the accelerometer 1 in Fig. 1. The power spectral functions used in the Peak Picking Method, for tests 1, 2, and 3 are shown in Fig. 3.



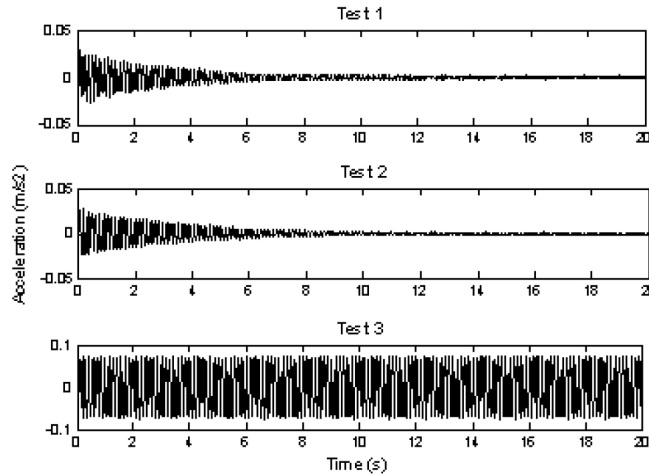


Fig. 2. Acceleration records from the coordinate 1.

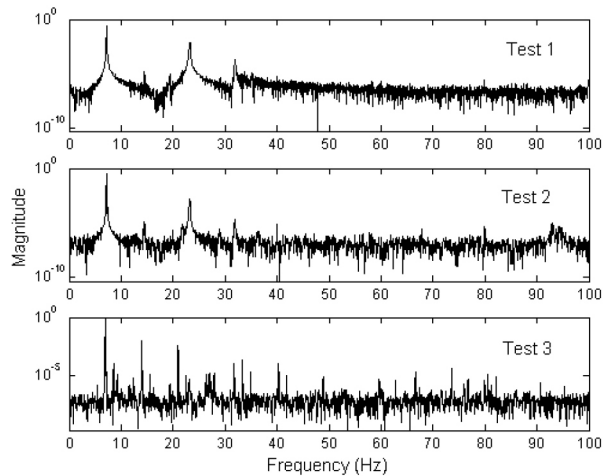


Fig. 3. Power spectral density of the acceleration records obtained at coordinate 1.

The Peak Picking Method enables the identification of the peaks which correspond to the natural frequencies in the PSD functions (Fig 3) for tests 1 and 2. However, for test 3 the peaks are not well defined; this is most likely due to the presence of frequencies of the electric motor, which required a manual analysis of the results. Following this analysis, and consideration of the

theoretical values obtained, it was possible to identify the natural frequencies of the frame for test 3. The theoretical results correspond to those obtained from the solution of the eigenvalue problem (Eq. 18).

$$\mathbf{K} \boldsymbol{\Phi} - (\mathbf{M} \boldsymbol{\Phi}) \boldsymbol{\Lambda} = \mathbf{0} \quad (18)$$

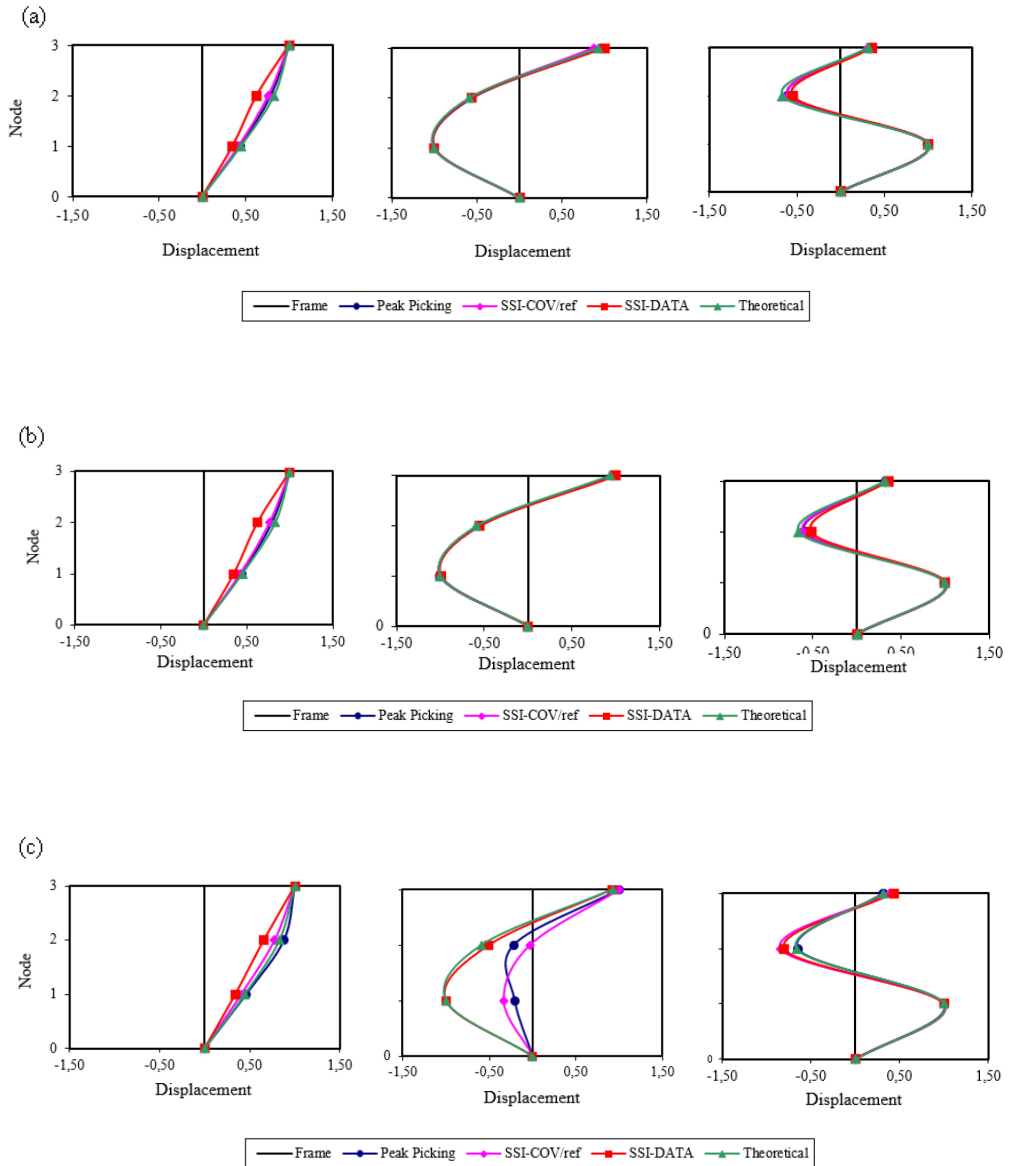
where  $\mathbf{K}$  and  $\mathbf{M}$  are the structure stiffness and mass matrices, respectively,  $\boldsymbol{\Phi}$  is the matrix which columns are the mode shapes and  $\boldsymbol{\Lambda}$  is a diagonal matrix which elements are the eigenvalues.

The frequencies, including their percentage difference relative to the theoretical frequencies, and the mode shapes identified by each method are presented in Table 2 and Figs. 4a to 4c, respectively.

About the results of the mode shapes, when the impact or the initial displacement was applied to coordinate 1 of the frame, tests 1 and 2, the three mode shapes can be identified by all methods correctly (Fig 4a and 4b).

**Table 2.** Natural frequencies identified by the methods.

		Test 1					
Mode Shapes	Theoretical Frequency (Hz)	Peak Picking		SSI-COV/ref		SSI-DATA/ref	
		Frequency (Hz)	Difference (%)	Frequency (Hz)	Difference (%)	Frequency (Hz)	Difference (%)
1 <sup>st</sup>	7.158	7.220	0.866	7.231	1.020	7.230	1.006
2 <sup>nd</sup>	22.219	23.220	4.505	23.207	4.447	23.183	4.339
3 <sup>rd</sup>	30.524	31.902	4.514	31.869	4.406	31.868	4.403
		Test 2					
Mode Shapes	Theoretical Frequency (Hz)	Peak Picking		SSI-COV/ref		SSI-DATA/ref	
		Frequency (Hz)	Difference (%)	Frequency (Hz)	Difference (%)	Frequency (Hz)	Difference (%)
1 <sup>st</sup>	7.158	7.220	0.866	7.225	0.936	7.222	0.894
2 <sup>nd</sup>	22.219	23.220	4.505	23.181	4.330	23.179	4.321
3 <sup>rd</sup>	30.524	31.805	4.197	31.861	4.380	31.859	4.374
		Test 3					
Mode Shapes	Theoretical Frequency (Hz)	Peak Picking		SSI-COV/ref		SSI-DATA/ref	
		Frequency (Hz)	Difference (%)	Frequency (Hz)	Difference (%)	Frequency (Hz)	Difference (%)
1 <sup>st</sup>	7.158	6.927	-3.227	7.666	7.097	6.983	-2.445
2 <sup>nd</sup>	22.219	20.878	-6.035	20.989	-5.536	21.176	-4.694
3 <sup>rd</sup>	30.524	31.707	3.876	32.924	7.863	32.730	7.227



**Fig. 4.** Mode shapes identified by the methods. (a) Test 1; (b) Test 2 and (c) Test 3.

The forced vibration test (Test 3) verified the three mode shapes were identified by all methods, but only the SSI-DATA/ref had a better matching with the theoretical mode shapes. The mode shapes identified by Peak Picking Method and the SSI-COV/ref presented different amplitudes, as shown in Fig 4c. With respect to the frequencies, the values presented in Table 2 indicate that all methods have identified this modal property correctly.

The stochastic system identification methods (SSI-DATA/ref; SSI-COV/ref) consider the hypothesis that the input or excitation can be represented by a white noise. However, despite this hypothesis had been violated, in Test 3, when the described type of excitation was applied to the frame, the dynamic properties of the structure were identified satisfactorily.

Fig. 5 and 6 present the stabilization diagram obtained by SSI-COV and SSI-DATA methods for all tests. The stabilization criteria are 0.5% for natural frequencies and 5% for damping ratios. For both methods, the maximal order estimated for the system is 60 and the computational program used is according to that one developed by Schanke (2015).

The results of tests 1 and 2 from the SSI-COV method (Fig. 5a and 5b), showed that the poles stabilized at the natural frequencies corresponding to the three vibration modes identified, with magnitude of block rows  $b=1$ . For the same tests in the SSI-DATA method (Fig. 6a and 6b),  $b=10$  was required to obtain better results. From this method it is possible to identify the natural frequencies, however there is a greater number of unstable and misaligned poles next to the physical poles of the three vibration modes. A possible reason is that these spurious poles appeared due to the high order value (number of block rows  $b = 10$ ), as mentioned by Schanke (2015).

Considering the test 3 (Fig. 5c and 6c), stabilization occurred with a magnitude of  $b=10$  for both methods and the diagrams obtained are similar. However, there are stable and aligned poles corresponding to other frequencies that do not correspond to the natural frequencies of the frame. The appearance of these poles may have been caused by the vibration of the electric motor used in the test. This motor was not isolated from the system. The dynamic action of the motor was not measured; however, it is known that its frequency was fixed and with a value nearly 7 Hz, that corresponding to the first natural frequency of the frame.

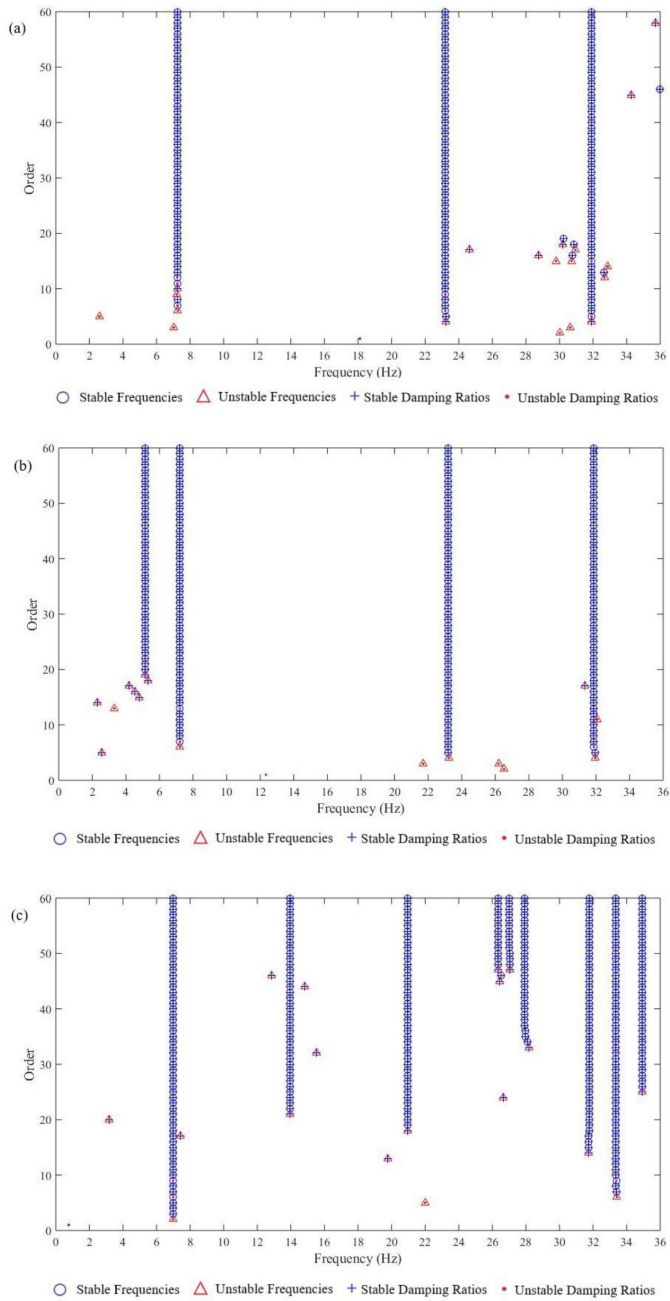
In order to distinguish the system's own frequencies, in Test 3, the values of the theoretical frequencies were taken into account, as well as the eigenvectors (modal forms) corresponding to the values identified in the stabilization diagram. The acquisition of the records during this test was done after the electric motor started, and before it stopped, disregarding, therefore, these two actions.

The Modal Assurance Criterion (MAC) (Allemang and Brown, 1982; Allemang, 2003; Miroslav Pastor *et al.*, 2012) measures the correlation between the experimental and the theoretical mode shapes. As result, a matrix is obtained and the values of the main diagonal indicate the correlation between the corresponding modes. The values vary between 0 and 1 and 1 indicates that there is a good agreement between the analyzed mode shapes. Fig. 7 presents a comparison between mode shapes identified by the Peak Picking Method (Fig. 7a), SSI-COV/ref (Fig. 7b) and SSI-DATA/ref (Fig. 7c) for all tests. Table 3 presents the values of the MAC diagonal obtained from the realized tests for all methods.

**Table 3.** MAC diagonal calculated between the experimental and theoretical modes.

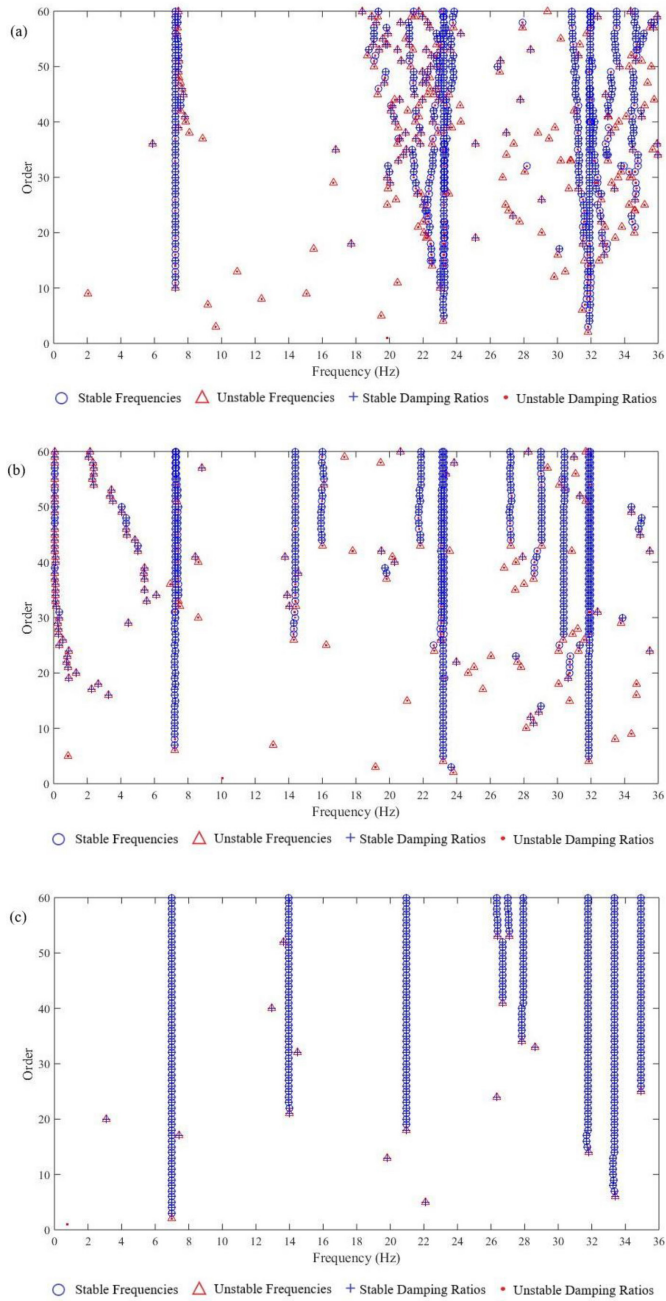
Peak Picking Method			
Mode Shapes	Test 1	Test 2	Test 3
1 <sup>st</sup>	0.9995	0.9995	0.9992
2 <sup>nd</sup>	0.9990	0.9991	0.6608
3 <sup>rd</sup>	0.9966	0.9975	0.9998
SSI-COV/ref			
Mode Shapes	Test 1	Test 2	Test 3
1 <sup>st</sup>	0.9984	0.9985	0.9985
2 <sup>nd</sup>	0.9993	0.9986	0.9986
3 <sup>rd</sup>	0.9982	0.9987	0.9987
SSI-DATA/ref			
Mode Shapes	Test 1	Test 2	Test 3
1 <sup>st</sup>	0.9820	0.9813	0.9857
2 <sup>nd</sup>	0.9980	0.9973	0.9972
3 <sup>rd</sup>	0.9913	0.9876	0.9884

The Peak Picking Method has a satisfactory correlation between the experimental and theoretical modes, except for the second mode, as identified from Test 3 (Fig. 7a). This value indicates a correlation of 66.08% calculated from MAC index. For SSI-COV/ref it can be verified that a good agreement between the experimental and theoretical modes exists. For SSI-DATA/ref the mode shapes identification was more uniform than that observed for the other methods.



**Fig. 5.** Stabilization diagrams by SSI-COV method.

Structure evaluation using output-only systems identification methods...



**Fig. 6.** Stabilization diagrams by SSI-DATA method.

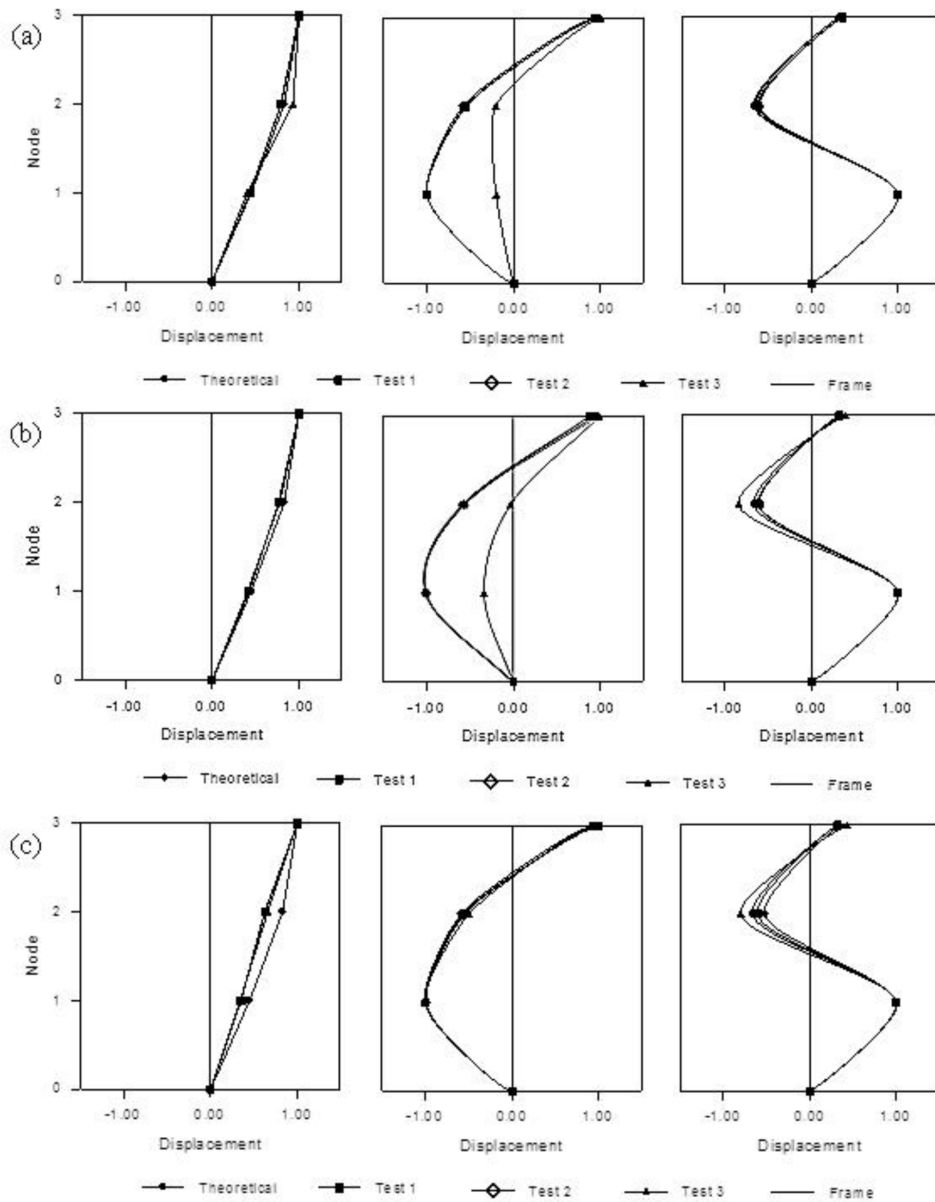


Fig. 7. Comparison between mode shapes identified by all methods for each realized test.



### 6.3 Frame finite element model updating

A numerical model of a structure can be very useful in the forecast of its behavior front to different configurations which can be produced by several load conditions or by modifications suffered along structure structure's life time. However, there are discrepancies between numerical predictions and experimental results, which may impose some restrictions for the use of this model. Updating the model is necessary in order to modify its parameters and improve the agreement or the correlation between the experimental and numerical results.

Although the experimental and numerical results have had a good approximation, the finite element model of the frame was updated in order to improve this approach much more. The update was made from the initial model shown in Fig. 8. The parameters K1, K2, K3, M1, M2 and M3 were updated and their initial values are summarized in Table 4. In this case, there were more parameters to be updated than measures (three natural frequencies), so the algorithm used was that defined by Eq. (16). It is important to note that in order to verify the confidence of the implemented algorithm, some simulations have been done and the results are presented in Brasiliano (2005).

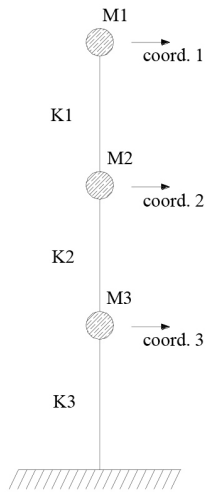
The frame experimental frequencies, identified by SSI-DATA/ref, were used in the update process. The values presented in the second column of Table 4 represent the vector of parameters  $\theta_0$ . The eigenvalues sensitivity matrix,  $\mathbf{S} \in \mathbb{R}^{3 \times 6}$  was calculated according to Eq. (14). For calculating the weighting matrix  $\mathbf{W}_{\text{se}}$ , a standard deviation of 0.25% was assumed for each experimental frequency. Thus, the standard deviation of the eigenvalues was approximately 0.50%.

**Table 4.** Model updating results.

Values of the parameters. Units: K (N/m) e M (Kg).							
	Initial Param.	Number of iterations					Updated Parameters
		3	10	19	28	35	
K1	4176.163	4217.984	4220.946	4220.971	4220.971	4220.971	4220.971
K2	3695.382	3623.679	3614.025	3613.947	3613.947	3613.947	3613.947
K3	3695.382	3687.678	3685.842	3685.828	3685.828	3685.828	3685.828
M1	0.350	0.326	0.327	0.327	0.327	0.327	0.327
M2	0.420	0.433	0.436	0.436	0.436	0.436	0.436
M3	0.268	0.226	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225

Frequency values. Units: Frequency (Hz).								
	Freq. Initial Model	Number of iterations					Frequency of updated model	Exp. frequencies
		2	7	10	20	35		
1 <sup>st</sup>	7.158	7.310	7.234	7.232	7.231	7.231	7.231	7.230
2 <sup>nd</sup>	22.219	23.260	23.180	23.179	23.178	23.178	23.178	23.182
3 <sup>rd</sup>	30.524	32.131	31.867	31.868	31.868	31.868	31.868	31.868



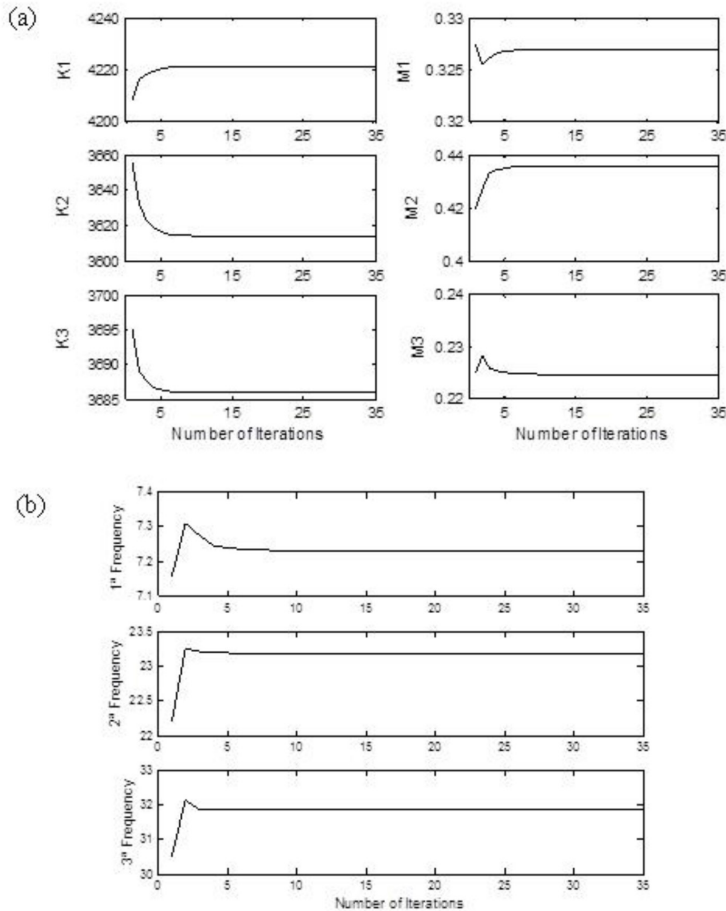
**Fig. 8.** Frame initial model.

For calculating  $\mathbf{W}_{00}$ , a standard deviation of approximately 3% and 20% were assumed for each initial stiffness and mass, respectively. It is relevant to point out that the values in the weighting matrices represent the reciprocals of the variances (the squares of the standard deviations). The weighting matrices were as follows (Eq. 19):

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_{00} &= \text{diag}\left[5.297 \times 10^{-5} \quad 6.765 \times 10^{-5} \quad 6.765 \times 10^{-5} \quad 2.040 \times 10^2 \quad 1.420 \times 10^2 \quad 3.488 \times 10^2\right] \\ \mathbf{W}_{\varepsilon\varepsilon} &= \text{diag}\left[9.391 \times 10^{-3} \quad 8.886 \times 10^{-5} \quad 2.488 \times 10^{-5}\right] \end{aligned} \quad (19)$$

Table 4 presents the obtained results of the updating process for the parameters and frequencies of the updated model, respectively. Despite the inherent errors in the measured data and the possible differences between the initial and real models, it can be verified that the updated model (constructed with the updated parameters) can reproduce the experimental frequencies accurately. Although iterative methods yield updated parameters with physical meaning it is difficult to affirm if the parameters obtained correspond to those of the real structure, even so their values seem to be representative of the reality.

Fig. 9a and 9b present the convergence of the parameters and frequencies, respectively. These figures verify that a fast convergence, about the tenth iteration occurs.



**Fig. 9.** Convergence of the updated parameters and frequencies.

## 7. Conclusions

About the free vibration tests (Tests 1 and 2), the Peak Picking Method, SSI-COV/ref and SSI-DATA/ref allowed the satisfactory identification of the three mode shapes of the structure. Small differences were observed, such as the displacement amplitude that, depending on the type of applied excitation, had a better matching with the theoretical ones.

Better results have been obtained for the first natural frequency considering all the applied methods. Compared with the theoretical frequencies, the values identified from the Peak Picking method presented a difference of 0.866%, and the other two methods yielded a difference of about 1%. For the second and third frequencies, the better results were obtained by the SSI-DATA/ref, except for the third frequency from Test 3.

Generally, the SSI-DATA/ref presented better results for the analyzed cases, since that even in the case of forced vibration test, the identification of second mode shape was less affected by the excitation induced by the motor. On the other hand, the Peak Picking and SSI-COV/ref presented a better processing velocity performance resulting in less computational effort.

Considering the model updating, the algorithm applied have presented a good performance in the parameters updating, which allowed matching the frequencies provided by the numerical model to those measured experimentally. A fast convergence could also be observed for the parameters and frequencies.

In order to establish a methodology for continuous monitoring structures the identification of modal properties and numerical model updating are necessary tools and some alternatives have been considered in this paper. Nevertheless, the results presented in this study could be complemented by a third step which would be the application of damage identification methods, based on the dynamic properties, considering the updated model and the natural frequencies and mode shapes identified by the output-only identification methods.

## Acknowledgments

This research work was partly supported by Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES and Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (Brazil). The authors are also grateful to the staff of the vibration laboratory of Department of Mechanical Engineering of the Brasilia University.

## References

- Allemang, R. J. (2003). The modal assurance criterion—twenty years of use and abuse. *Sound and Vibration*, 37(8), 14–23.
- Allemang, R. J., & Brown, D. L. (1982). A correlation coefficient for modal vector analysis. *In Proceedings of the 1<sup>st</sup> Int. Modal Analysis Conference*, Orlando, Florida, 8–10 November 1982.
- Brasiliano, A. (2005). Identificação de Sistemas e Atualização de Modelos Numéricos com Vistas à Avaliação da Integridade Estrutural. PhD thesis, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, Brazil.
- Brownjohn, J. M. W., Xia, P-Q, Hao, H., & Xia, Y. (2001). Civil Structure Condition Assessment by FE Model Updating: Methodology and Case Studies. *Finite Element and Analysis Design*, 37, 761–775.
- Carone, C. (2018). Laudo da PCDF aponta que queda de viaduto poderia ter sido evitada. *Metrópoles*. Available from <https://www.metropoles.com/distrito-federal/laudo-da-pcdf-aponta-que-queda-de-viaduto-poderia-ter-sido-evitada> [accessed 9 August 2019].
- Cerqueira, R. (2018). Problema em apoio pode ter provocado queda de viaduto em SP, diz especialista. *Globo G1*. Available from <https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2018/11/15/especialista-diz-que-problema-em-apoio-provocou-queda-de-viaduto-em-sp.ghtml> [accessed 9 August 2019].

- Chen, Chi-Tsong. (1999). *Linear System Theory and Design*. Oxford University Press, N.Y.
- Clough, R. W., & Penzien, J. (1993). *Dynamic of Structures*. Mc Graw-Hill, New York.
- Doebbling, S. W., Farrar, C. R., & Prime, M. B. (1998). A summary Review of Vibration-Based Damage Identification Methods. *The Shock and Vibration Digest*, 30(2), 91–105.
- Friswell, M., & Mottershead, J. E. (1995). *Finite Element Model Updating in Structural Dynamics*. Kluwer Academic Publishers Group, Dordrecht, Netherlands.
- Fox, R. L., & Kapoor, M. P. (1968). Rate of Changes of Eigenvalues and Eigenvectors. *AIAA Journal*, 6(12), 2426–2429.
- Juang, Jer-Nan. (1994). *Applied System Identification*. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, N.J.
- Pastor, M., Binda, M., & Harčarik, T. (2012). Modal assurance criterion. *Procedia Engineering*, 48, 543–548
- Palazzo, G. L. (2001). Identificación del Daño Estructural a través del Cambio en las Propiedades Dinámicas. M.Sc. thesis, Instituto de Estructuras, Universidad Nacional de Tucumán, Argentina.
- Peeters, B. 2000. System Identification and Damage Detection in Civil Engineering. PhD thesis, Departement Burgerlijke Bouwkunde, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium.
- Peeters, B., & De Roeck, G. (1999). Reference-Based Stochastic Subspace Identification for Output-Only Modal Analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 13(6), 855–878.
- Peeters, B., & De Roeck, G. (2001). Stochastic System Identification for Operational Modal Analysis: A Review. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 123, 659–667.
- Rahman, M. S. (2012). Comparison of System Identification Techniques with Field Vibration Data for Structural Health Monitoring of Bridges. M.Sc. thesis, Faculty of Graduate Studies and Postdoctoral, Carleton University, Ottawa, Canada.
- Schanke, A. S. (2015). Operational Modal Analysis of Large Bridges. M.Sc. thesis, Fakultet for Ingeniorvitenskap og Teknologi, Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet, Trondheim, Norway.
- Welch, P. D. (1967). The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: A Method Based of Time Averaging Over Short, Modified Periodograms. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, 15, 70–73.
- Zou, Y., Tong, L., & Steven, G. P. (2000). Vibraton-Based Model-Dependent Damage (Delamination) Identification and Health Monitoring for Composite Structures – A Review. *Journal of Sound and Vibration*, 230(2), 357–378.

**Andrea Brasiliano**

Ingeniera Civil (Universidad Federal de Paraíba - UFPB - 1998), Máster (2001) y Doctorado (2005) en Estructuras y Construcción Civil (Universidad de Brasilia). Es profesora asociada en el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, en UFPB desde 2009. Tiene experiencia en el campo de la Ingeniería Civil, con énfasis en Dinámica Estructural, trabajando en los siguientes temas: características dinámicas, estructuras, identificación de sistemas, integridad estructural y análisis experimental.

andrea.brasiliano@academico.ufpb.br

**Maria Dicia D. Silva**

Ingeniera Civil (Universidad Federal de Paraíba – 2018). Actuó en el “Programa de Monitoreo para las disciplinas del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la UFPB” (2017), investigación desarrollada en el área de identificación de propiedades dinámicas en estructuras reticuladas mediante análisis numérico y experimental en el Laboratorio de Ensayos de Materiales y Estructuras (LABEME/UFPB) (2018).

maria\_dicia@hotmail.com

**Graciela N. Doz**

Doctora en Ingeniería (Universidad Nacional de Tucumán, Argentina 1995). Actualmente es profesora asociada en la Universidad de Brasilia (UnB). Publicó artículos en revistas especializadas y más de 100 obras en anales de congresos. También fue Directora de Proyectos en el Recorado de la UnB y Coordinadora del Programa de Posgrado en Estructuras y Construcción Civil. Trabaja en el campo de la dinámica estructural, en particular en vibraciones inducidas en estructuras, control de vibraciones, evaluación de la integridad estructural y procesos de ruptura.

graciela@unb.br

**José Luís Vital de Brito**

Ingeniero Civil Universidad Estadual Paulista - 1974), Master en Ingeniería Civil (1979) y Doctor en Ingeniería Civil (Universidad Federal de Rio Grande do Sul-1995). Actualmente es profesor asociado en la Universidad de Brasilia. Actúa principalmente en estructuras, aerodinámica, efecto del viento en las estructuras, control de vibraciones e inestabilidad dinámica. Publica continuamente artículos en revistas indexadas y en congresos. Es también revisor de artículos para revistas nacionales e internacionales.

jlbrito@unb.br

## Desarrollo de un ventilador mecánico de emergencia basado en turbocompresor axial

### Development of a mechanical fan based on axial turbocharger

Roberto Breslin<sup>1</sup> y Pablo Rodrigo Narvárez<sup>1</sup>

---

*Ingeniería Electrónica*  
artículo científico

Citar: Breslin, R. D. y Narvárez, P. (2020). Desarrollo de un ventilador mecánico de emergencia basado en turbocompresor axial. *Cuadernos de Ingeniería*, 12. Recuperado de <http://revistas.ucasal.edu.ar>

Recibido: julio 2020  
Aceptado: noviembre 2020

#### Resumen

La pandemia de COVID-19 ha sido el motorizador de una serie de desarrollos en todos los ámbitos de la biotecnología en razón de la peligrosidad del virus, su alta tasa de contagio y su peligrosidad en relación a la letalidad de los pacientes. Estos trabajos han tenido varios objetivos, uno de los cuales ha sido el de proveer sistemas de atención a pacientes en situaciones de emergencia sanitaria. Ante la posibilidad de colapso de las salas de tratamiento intensivo, uno de los equipos más requeridos para poder atender a pacientes que no tengan espacio en las UTI es el ventilador de asistencia respiratoria.

El grupo de trabajo perteneciente al Instituto de Estudios Interdisciplinarios de Ingeniería (IESIING), de la Universidad Católica de Salta, se abocó al desarrollo de un modelo de ventilador de emergencia que pudiera ser replicado con mínimos conocimientos de electrónica, con componentes comunes y el uso de impresoras 3D. Así se produjo un prototipo que cumple con todas las expectativas basadas en el uso de un turbocompresor axial, como consecuencia del estudio de las diversas posibilidades de adaptación de sistemas para ventilación mecánica.

**Palabras clave:** ventilador, respirador, turbocompresor

#### Abstract

The covid-19 pandemic has been the driving force behind a series of developments in all areas of biotechnology due to the dangerousness of the virus, its high rate of contagion and its dangerousness in terms of patient mortality; these developments have had several objectives, one of which has been to provide patient care systems in health emergency situations. Given

---

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería. UCASAL. Argentina

the possibility of the collapse of intensive treatment rooms, one of the most required equipment to be able to attend patients who do not have space in the ICUs is the respiratory assistance ventilator.

In this sense, the development group belonging to IESIING, from the Catholic University of Salta, focused on the development of an emergency fan model that could be replicated with minimal

knowledge of electronics with common components and the use of 3D printers. Thus, a prototype was developed that meets these expectations based on the use of an axial turbocharger, as a result of studying the various possibilities of adapting systems for mechanical ventilation.

**Keywords:** fan, respirator, turbocharger

---

## 1. Introducción

A partir de la irrupción de la pandemia por coronavirus en todo el mundo, desde la Universidad Católica de Salta, surgió la inquietud en un grupo de docentes de desarrollar respiradores con la premisa de que los mismos puedan ser replicados en forma sencilla con componentes estandarizados de fácil accesibilidad en la mayoría de los mercados y con la posibilidad de construir partes aplicando la impresión 3D. A tal efecto el equipo de investigación adhirió a numerosos desarrollos en este mismo sentido que se realizaron en todo el mundo, los cuales, en su gran mayoría partieron de la posibilidad de usar un sistema con resucitador-manual o bolsa-autoinflable, es decir un dispositivo manual para proporcionar ventilación con presión positiva para aquellos pacientes que no respiran o que no lo hacen adecuadamente que se denomina Ambú (del inglés Airway Mask Bag Unit), para lograr un equipo que sea confiable de bajo costo y factible de ser usado y construido en situaciones de emergencia. Se usaron diseños de equipos que fundamentalmente hacen algún grado de presión sobre un Ambú y a los que se le puede controlar la frecuencia de la presión que se ejerce sobre el Ambú así como el grado de penetración de una leva que en teoría permite controlar también el volumen de aire que puede proporcionar el Ambú. Estos desarrollos fueron canalizados con diferentes tecnologías, algunas más económicas, pero siempre cumpliendo la premisa de que el material pueda ser factible de conseguir en el mercado local; por ello se implementaron con dos tecnologías. Una de ellas, con un motor paso a paso como elemento generador del movimiento, el cual permite regular efectivamente, todos los parámetros de presión y frecuencia de accionamiento en el Ambú. También se usó una tecnología con un motor de corriente continua que permite la variación por modulación de ancho de pulso de los mismos parámetros, usando la carrera total de una leva de presión sobre el elemento elástico emergencia tales como el proyecto Open Source COVID19 Medical Supplies (*Esta iniciativa española diseñará.....,2020*).

Un elemento de asistencia respiratoria de estas características conlleva a pensar que el mencionado equipo va a ser usado sobre todo fuera de las áreas de terapia intensiva ya que las mismas cuentan con respiradores de alta tecnología que contemplan todos los parámetros necesarios para el adecuado tratamiento y están en manos de terapeutas especializados en su manejo.

Se parte de la premisa que este equipo de ventilación mecánica asistida, no será necesariamente utilizado en un área de terapia intensiva sino, eventualmente, en áreas de primer nivel



de atención de emergencia, con pacientes que no revistan una extrema gravedad, pero que presenten dificultades respiratorias importantes.

Por lo tanto se debe caracterizar la operación de este equipo de emergencia dentro de las reales posibilidades de uso y es por ello que se debe especificar en primer lugar cuáles son los modos de operación que tiene un ventilador

El sistema basado en Ambú como método de ventilación mecánica asistida a largo plazo no es factible para la curación de un pulmón en un área hospitalaria que no sea una unidad de cuidados intensivos y aún en la unidad de cuidados intensivos no resulta la mejor opción para una estadía de largo plazo

## **2. Características adoptadas para el desarrollo de un ventilador mecánico**

Un ventilador debe contar con una estructura que comienza con un sistema mezclador, que permite utilizar una concentración de Oxígeno conocida y comprendida en un intervalo del 21 % hasta cerca del 100 % para el gas inspirado. Mediante una válvula proporcional y su rango de apertura se realiza la mezcla deseada, y para que esto ocurra de forma adecuada, la presión de los gases medicinales deberá ser constante y equivalente.

Además, cada conducción de gas debe disponer de válvulas unidireccionales para evitar la contaminación por retorno de un gas sobre el otro, evitando el flujo retrógrado de una tubería sobre la otra. En algunos ventiladores esta mezcla se acumula en reservorios o fuelles, que actúan como cámara de mezcla. Existen ventiladores que no precisan suministro de aire comprimido y éste se genera mediante una turbina que comprime el gas procedente del aire ambiente.

Es este último paradigma de provisión del gas necesario el que se decidió utilizar en el proyecto desarrollado, es decir, que una turbina sea la generadora del aire necesario.

Con base en las experiencias de la modulación de ancho de pulso, se aplicó este concepto para el manejo de turbina, tal que con la modulación de ancho de pulso se puede regular absolutamente todos los parámetros de operación en las distintas etapas del proceso, las que, según Buforn, Artacho y Torre Prados (2012) son:

- A- Insuflación: La turbina genera una presión sobre un volumen de gas y tras la apertura de la válvula inspiratoria lo moviliza insuflándolo en el pulmón (volumen corriente) a expensas de un gradiente de presión entre los alvéolos y el flujo inspiratorio. La presión alveolar va aumentando conforme los alvéolos se van insuflando hasta el final de la inspiración que se alcanza la presión alveolar máxima o presión de insuflación o presión pico que está en relación con la resistencia total respiratoria (al flujo y elástica)

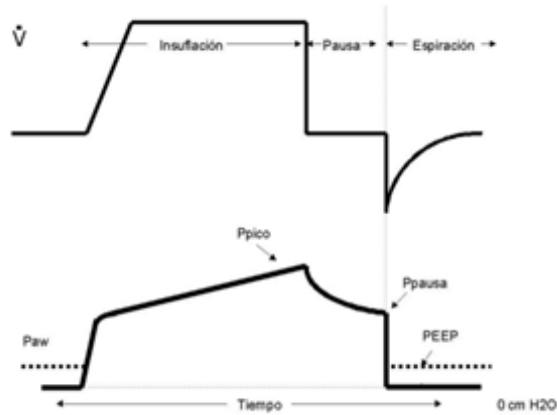


Figura 1: Curvas de Volumen (superior) y Presión alveolar (inferior), del ciclo Ventilación Mecánica (Buforn, Artacho, Torre Prados, 2012).

B- Meseta: El gas introducido se mantiene durante un tiempo regulable (pausa inspiratoria) en el interior del pulmón para facilitar su distribución por unidades alveolares. La presión medida en la vía aérea o presión meseta corresponde a la presión alveolar y depende de la compliance pulmonar.

C- Deflación: Se inicia con la apertura de una válvula espiratoria y ocurre de forma pasiva dependiendo sólo de la retracción elástica del pulmón insuflado

Si bien los respiradores incorporan una válvula que puede mantener una presión positiva al final de la espiración o PEEP (Positive End Expiratory Pressure), en el caso del desarrollo actual hay una única válvula denominada válvula bidireccional inspiratoria - espiratoria que hace el trabajo completo.

En el presente diseño se ha utilizado como elemento de propulsión del aire un turbocompresor axial, la razón de la selección es, su fácil construcción, a lo que se le suma la posibilidad de establecer una turbocompresión axial por etapas, lo que permite aumentar la presión del aire del turbocompresor. En el prototipo se usó una única etapa, permitiendo de esta forma el aumento de la presión del aire hacia los sistemas del paciente.

### 3. Diseño del ventilador por compresor de flujo axial

#### 3.1 Turbocompresor

Este tipo de compresor comprime su fluido de trabajo primero acelerándose mediante una corona giratoria de álabes y posteriormente desacelerándolo en una corona estática, a la vez esta desaceleración llevada a cabo en un estator convierte el incremento de velocidad obtenida en el rotor, en un incremento de presión.

La corona de álabes fijos es frecuentemente utilizada a la entrada del compresor para asegurar que el fluido entre al rotor en el primer paso con un ángulo determinado por la posición de éstos; en todos los casos se utiliza algún tipo de estator. En el caso del sistema utilizado, se ha empleado el estator como colector de presión en forma directa y conectado a las mangueras de paciente.

En un turbocompresor la reducción del área de flujo compensa el incremento de la densidad del fluido al ser comprimido, permitiendo así una velocidad constante en el eje axial

En la Figura 2 también se puede observar que la reducción del área de flujo compensa el incremento de la densidad del fluido al ser comprimido, permitiendo así una velocidad constante en el eje axial



Figura 2: Implementación 3D de Turbocompresor de flujo axial

En la Figura 2 se puede ver el tipo de turbocompresor axial de una etapa. El diseño está basado en tipo de turbocompresor axial de una etapa con salida de diámetro de media pulgada para la conexión a un sistema de sensado de caudal y de presión. Al haberse usado una hélice estandarizada, se adoptó el tipo de álabe curvo para turbina de impulso

La velocidad de rotación del rotor del turbocompresor axial está regulado mediante la técnica de modulación por ancho de pulso o PWM (Pulse Width Modulation); de esta forma se puede lograr:

- regular la frecuencia del ciclado completo mediante la variación del PWM de un valor alto a uno bajo siguiendo una rampa de duración regulable
- regular la velocidad de sus aspas con lo cual se regula la presión de inspiración
- regular mediante la velocidad de sus aspas la presión en el ciclo de pausa

Al tener el control total de la turbina, se regula el tiempo que dura cada una de las etapas del ciclado y de esta forma se puede controlar la etapa de inspiración, espiración y meseta.

La electrónica digital está basada en un microcontrolador y la electrónica de potencia está conformada por un sistema de Puente H para el control del motor de corriente continua que abastece de movimiento a la hélice del turbocompresor axial.

### 3.2 Válvula de inspiración- expiración

La siguiente etapa de un ventilador está conformada por la válvula mencionada de inspiración - expiración.

El objetivo de esta válvula es brindar un flujo de camino directo a la inspiración cuyos valores de flujo tiempo y presión están controlados por el turbocompresor axial en la primera fase de funcionamiento. En la segunda fase debe brindar un camino de retorno a la expiración con una presión positiva controlada por la propia turbina y por el grado de apertura que tiene la válvula, es decir, que la posición de inspiración de esta válvula brinda un camino de 100% del diámetro del pasaje del fluido en la fase 1 y en la fase 2 que es la de expiración tiene una regulación de presión variable en función a la apertura.



Figura 3: Válvula bidireccional servocontrolada

En la Figura 3 se puede apreciar uno de los modelos preliminares de la válvula bidireccional servocontrolada. La misma cumple una doble función, en una posición permite el pasaje del flujo de aire de inspiración con una máxima apertura de un canal destinado a la función inspiratoria y posee otro canal para función expiratoria; en el mismo se debe asegurar la presión positiva PEEP (Positive End Expiratory Pressure) mediante la posición del servomotor; es en esta posición donde el servomotor posibilita una restricción del canal de expiración para brindar presiones desde los 5 cm de H<sub>2</sub>O en adelante.

Para ello se diseñó una pieza especial que es accionada por un servomotor de 49.0333 Newtons de empuje

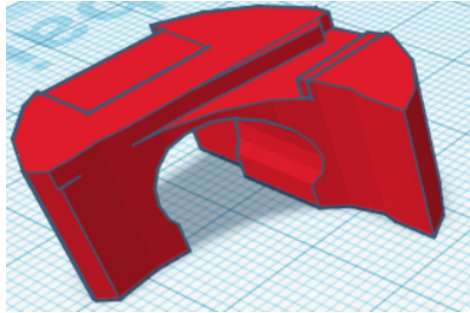


Figura 4: Pieza interna de la válvula bidireccional servocontrolada

Se puede observar en la Figura 4 el pasaje de aire franco en la zona central de la válvula y en el lateral derecho una zona curva, que es la que posibilita la obstrucción proporcional del pasaje de aire de expiración regulada por el ángulo que adopta la válvula controlada por el servomotor

Comprobada la viabilidad de hacer una válvula de este tipo se realizó otro prototipo de válvula bidireccional, accionado en este caso con motor paso a paso para el aprovechamiento de válvulas de tipo esférica estandarizadas, de forma de lograr una mayor precisión en el movimiento y una mayor hermeticidad.



Figura 5: Válvula bidireccional basada en motor paso a paso

Esta válvula tiene características muy mejoradas respecto a la válvula servocontrolada ya que permite que el paso del motor puede regular variaciones de ángulo de hasta 0,5 grados lo cual permite un control de mayor precisión de la presión de expiración a su vez tiene la ventaja de una absoluta hermeticidad respecto al flujo de aire de entrada. Al mismo tiempo permite un control muy detallado de las presiones tanto de inspiración como de la presión de expiración PEEP.

### 3.3 Acople sensor

En la etapa final se ha desarrollado una pieza fundamental para la medición de todas las circunstancias de presión que van a dar lugar al control de las válvulas correspondientes y de la hélice de turbocompresor axial, así como de las alarmas correspondientes a las situaciones de presión positiva excesiva, presión negativa excesiva y presión normal.

Para evitar la caída de presión en el tubo de conexión a la mascarilla en las situaciones de caída de presión se ha colocado la toma del sensor de presión en el punto más cercano al paciente es decir en las proximidades de la mascarilla hermética.



Figura 6: Sensor de presión y adaptador a mascarilla

### 3.4 Sensor de presión

Mediante el estudio de las características del sistema se optó por un sensor electrónico de presión del tipo Mpx100 el cual posee características ideales para el diseño actual, que debe considerar las mediciones desde valores bajos de presión, tal como 5 cmH<sub>2</sub>O, y superiores.

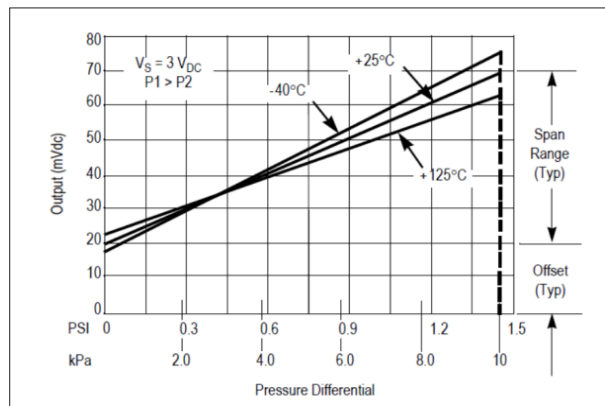


Figura 7: Características de linealidad del sensor de presión MPX100. Fuente MPX100 Datasheet (PDF) - Motorola, Inc

En la Figura 7 se puede ver la característica de presión versus salida de tensión del sensor y se puede observar que tiene una gran linealidad para diferentes temperaturas, especialmente para 25 grados centígrados. El rango de trabajo que se considerará estará entre los valores de 0,5 KPa correspondiente a 5 cm de agua y aproximadamente 3 kPa, por lo que el sensor resulta adecuado para las mediciones que se desean realizar.

### 3.5 Electrónica de Control y visualización

Para comprender el funcionamiento del sistema se debe tener en cuenta que hay una electrónica de control (Figura 8) que actúa sobre la válvula bidireccional cambiando la posición angular de la misma mediante un servomotor y sobre el motor del turbocompresor, cambiando la velocidad de giro.

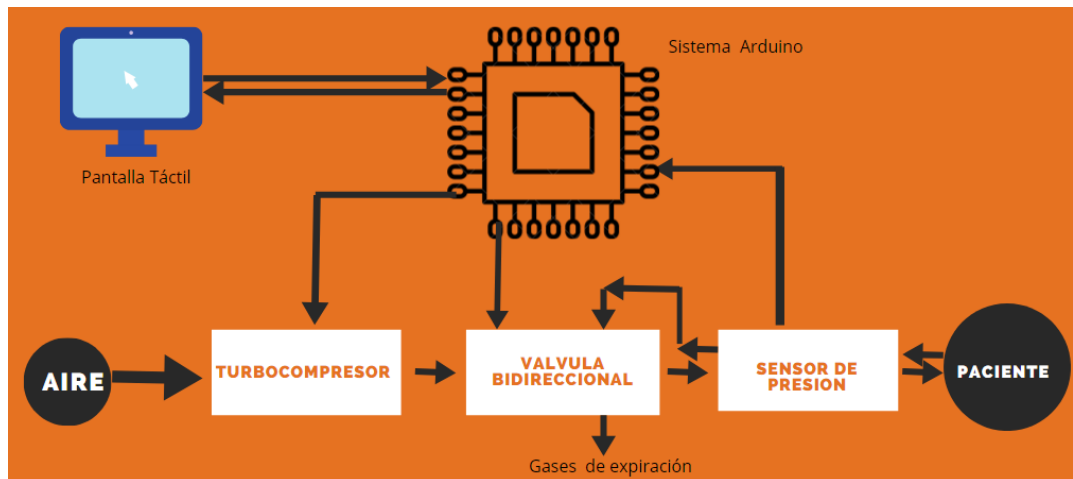


Figura 8 : Diagrama en bloques del sistema de control

Se ha diseñado un sistema electrónico de control y sensado para poder controlar la totalidad del sistema; de esta forma se incluye una pantalla táctil



Figura 9: Pantalla táctil de control y seteo

En la Figura 9 se aprecian los botones que permiten regular los siguientes parámetros

- Aumento y disminución de frecuencia
- Aumento y disminución de la frecuencia de parada meseta
- Aumento y disminución del tiempo de activación
- Aumento y disminución de tiempo de parada
- Encendido y parada

El software incorporado en el dispositivo permite ver los valores de presión y control, además permite visualizar la gráfica de presiones y las alarmas (Figura 10).

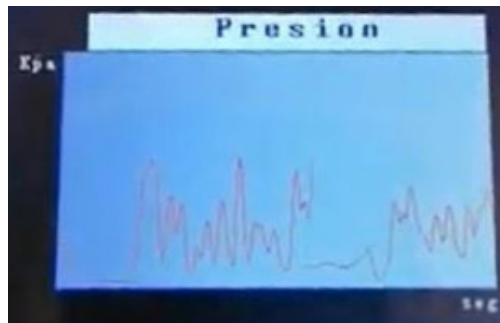


Figura 10: Gráficas de sensado de presión

De esta forma se completa un sistema integrado que permite el desarrollo de un modelo experimental de ventilador que tiene características de poder ser usado en situaciones de emergencia en áreas hospitalarias destinadas a la atención de pacientes que no presentan extrema gravedad, pero que sí necesitan algún tipo de asistencia ventilatoria para poder dar lugar a la curación de sus pulmones y tener una situación de mayor comodidad disminuyendo la angustia causada por el síndrome respiratorio. El equipo no tiene componentes críticos a excepción del amplificador operacional destinado al sensor de presión que debe tener las características de ser



un amplificador de instrumentación, con muy baja tensión de offset, alta impedancia y tener la posibilidad de variación de su ganancia; el AD623 N es aquel que mejor cumple estas especificaciones.

#### 4. Conclusiones y recomendaciones

Luego de un análisis pormenorizado de las posibilidades de implementación de sistemas de emergencia de asistencia ventilatoria a pacientes en salas de emergencia, no de terapia intensiva, se decidió por el desarrollo de un diseño de ventilador basado en turbocompresor axial, ya que este sistema permite una adecuada respuesta a la premisa inicial y se constituye como una plataforma de desarrollo para otras implementaciones asociadas con las enfermedades respiratorias, tal como EPOC.

Se juzga que uno de los objetivos principales de esta propuesta fue logrado satisfactoriamente, ya que todas las piezas y la electrónica desarrollada son sencillas de implementar y las piezas impresas con impresora 3D están disponibles para su reproducción

Este desarrollo es un diseño a nivel prototipo, que requiere una expansión posterior, pero fundamentalmente requiere la validación en todas sus etapas para hacer posible su utilización en pacientes reales en el ámbito para el que fue diseñado, por lo que se requieren realizar las etapas correspondientes de acuerdo a las normativas vigentes en el área de los sistemas de salud, generando de ser necesario las mejoras y adaptaciones requeridas.

#### Referencias

Bufo, A., Artacho, C y Torre Prados, M. (s.f.). Ventilación Mecánica. *Hospital universitario Virgen de la Victoria Málaga*. Recuperado de: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjok8WtgK\\_sAhWqIrkGHZKNCbcQFjAAegQIBBAC&url=http%3A%2F%2Ffiles.sld.cu%2Ffanestesiologia%2Ffiles%2F2012%2F06%2Fventmeca.pdf&usg=AOvVaw3fX-N7zYSzQhjCTòkfoq9y](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjok8WtgK_sAhWqIrkGHZKNCbcQFjAAegQIBBAC&url=http%3A%2F%2Ffiles.sld.cu%2Ffanestesiologia%2Ffiles%2F2012%2F06%2Fventmeca.pdf&usg=AOvVaw3fX-N7zYSzQhjCTòkfoq9y)

Esta iniciativa española diseñará respiradores artificiales baratos contra el coronavirus. (2020). *El Español*. Recuperado de: [https://www.elspanol.com/omicron/20200314/iniciativa-espanola-disenara-respiradores-artificiales-baratos-coronavirus/474454447\\_0.html](https://www.elspanol.com/omicron/20200314/iniciativa-espanola-disenara-respiradores-artificiales-baratos-coronavirus/474454447_0.html)

**Roberto Daniel Breslin**

Ingeniero Electricista con Orientación Electrónica, Magister en Dirección Estratégica de Telecomunicaciones y Especialista en Educación y TICS, Técnico Electrónico. Se desempeña como Jefe de la Carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones de la Universidad Católica de Salta y como Docente Adjunto en Sistemas de Conmutación y Auxiliar en Antenas. Docente de Electrónica, Bioelectrónica y Electrotecnia en UFIDET. Investigador del IESIING (Instituto de Estudios Interdisciplinarios de Ingeniería- UCASAL). Ex Director General de Educación Superior de la Provincia de Salta.

rbreslin@ucasal.edu.ar

**Pablo Rodrigo Narváez**

Ingeniero Electrónico, Especialista en Redes de Datos y doctorando de Ingeniería en la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología (FACET) de la U. N. T. Profesor Adjunto en Electrónica, Mediciones Eléctricas y Electrónicas, Técnicas Digitales, Análisis de Señales y Electrónica Aplicada a Plantas Transmisoras. Investigador del IESIING (Instituto de Estudios Interdisciplinarios de Ingeniería-UCASAL). Posee una extensa trayectoria en el ámbito privado a través de desarrollos de automatismos.

pnarvaez@ucasal.edu.ar

## UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SALTA

### AUTORIDADES

Rector	Ing. Rodolfo Gallo Cornejo
Vicerrectora Académica	Mg. Prof. Lilian Constanza Diedrich
Vicerrector de Investigación y Desarrollo	Dr. Federico Colombo Speroni
Vicerrector Administrativo	Dr. Darío Eugenio Arias
Vicerrector de Fomación	Pbro. Dr. Cristian Arnaldo Gallardo
Director General del Sistema de Educación a Distancia	Ing. Lic. Daniel Torres Jiménez
Secretaria General	Lic. Silvia Milagro Álvarez

### CONSEJO DE INVESTIGACIONES

Director	Dr. Federico Colombo Speroni
----------	------------------------------

### AUTORIDADES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Decano de la Facultad de Ingeniería	Mg. Ing. Néstor Eugenio Lesser
Secretario Académico	Ing. Mario Alfredo Ochoa
Secretaria Técnica	Sec. Tec. Andrea Burgos
Jefa del Departamento de Investigación	Dra. Ing. Lía Elizabeth Orosco Segura
Jefe del Departamento de Extensión, Graduados y Bienestar	Ing. Juan Francisco Linares
Jefe del Departamento de Ingeniería Industrial	Esp. Ing. Manuel Luis Zambrano Echenique
Jefe del Departamento de Ingeniería Civil	Ing. Fernando Javier Albarracín
Jefe del Departamento de Ingeniería en Informática	Mg. Ing. Gullermina Nieves
Jefe del Departamento de Ingeniería en Telecomunicaciones	Ing. Roberto Daniel Breslin
Jefe de Carrera Licenciatura en Higiene y Seguridad en el Trabajo	Lic. Néstor Alberto Valdiviezo
Coordinadora de Carrera Licenciatura Higiene y Seguridad Seguridad en el Trabajo	Esp. Ing. María Eugenia Soria
Coordinador Académico del Sistema de Educación a Distancia	Mg. Ing. Rafael F. Visa
Coordinador de Laboratorios	Esp. Ing. Myriam Cecilia Botelli

### EUCASA

Ediciones Universidad Católica de Salta

Directora	Lic. Rosanna Caramella
Edición	Prof. Soledad Martínez
Comercialización	Lic. Mariana Remaggi

## Sumario

### Editorial

Jorge E. Crempien Laborie

### Identificación de emociones en textos de una red social

*Identification of emotions in texts of a social network*

Alejandra Carolina Cardoso, María Lorena Talamé, Matías Nicolás Amor  
y Agustina Monge

### Aplicación de la técnica LSPIV en el diseño hidrológico de infraestructura hídrica

*LSPIV application in the hydrological design of hydraulic infrastructure*

Myriam Cecilia Botelli, Nicolás Federico Guillén, Carlos Marcelo García,  
Antoine Patalano y Marcelo Chalabe

### Structure evaluation using output-only systems identification methods and dynamic model updating

*Evaluación estructural usando métodos de identificación con base en la respuesta  
y actualización del modelo dinámico*

Andrea Brasiliano, Maria Diciá D. Silva, Graciela N. Doz, José Luís Vital

### Desarrollo de un ventilador mecánico de emergencia basado en turbocompresor axial

*Development of a mechanical fan based on axial turbocharger*

Roberto Breslin y Pablo Rodrigo Narváz