



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

Tesis de Doctor en Ingeniería

**Dinámica estocástica de cables tensos con aplicaciones  
a torres arriostradas y líneas de transmisión de energía**

Bruno Javier Rango

BAHÍA BLANCA

ARGENTINA

2020



# Prefacio

“Esta Tesis se presenta como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Doctor en Ingeniería de la Universidad Nacional del Sur y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad u otra. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en el Área de Estabilidad, dependiente del Departamento de Ingeniería, durante el período comprendido entre el 21 de octubre de 2014 y febrero de 2020, bajo la dirección de la Dra. Marta B. Rosales, y la co-dirección el Dr. Marcelo T. Piovan (Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Bahía Blanca)”.

**Bruno J. Rango**

Bahía Blanca, febrero de 2020

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR  
Secretaria General de Posgrado  
y Educación Continua

La presente tesis ha sido aprobada el .../.../..., mereciendo la calificación de ..... (.....)



# Agradecimientos

Al Departamento de Ingeniería de la Universidad Nacional del Sur.

Al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

A los miembros del Jurado de Tesis: Dra. Bibiana Luccioni, Dr. Oscar Möller, y Dr. Víctor Cortinez.

A Rubens Sampaio y a Roberta Lima.

A Tulio por su predisposición y colaboración en la codirección de mi tesis, y por su aporte en relación al estudio de Líneas de Transmisión de Energía en el plan de trabajo.

A Marta, por su predisposición e interés para guiarme cada vez que lo necesité, por permitirme trabajar libremente y por el tiempo invertido en la búsqueda y elaboración de proyectos. Trabajar con Marta todos los días ha sido para mi un privilegio.

A mis papás, Graciela y Roberto, les agradezco por todo; pero quiero aprovechar esta ocasión para dejar constancia de mi gratitud por el esfuerzo y valor que siempre han puesto por mi educación, y por haber *insistido* en que estudiara inglés. Y a mi hermano Iván, por los todos los momentos compartidos, por su ejemplo, y por estar conmigo siempre.

Finalmente, le agradezco a Julia, por su apoyo que fue y es fundamental; por la complicidad, y principalmente por ser parte de mi vida.

# Resumen

Debido a su gran flexibilidad, los cables suspendidos presentan un comportamiento dinámico complejo producto de la no linealidad geométrica característica, con alta sensibilidad al nivel de tensión mecánica. Asimismo, en torres arriostradas de telecomunicaciones y de transmisión de energía, la tensión de las riendas presenta un considerable nivel de incertidumbre, en cuanto puede verse afectada en el tiempo debido a eventos ambientales, acciones accidentales o deliberadas sobre la estructura. En ciertas configuraciones de torres arriostradas de comunicación, las riendas poseen un arreglo de aisladores que interrumpen su longitud en segmentos menores. En esos casos, la aplicación de los métodos existentes basados en frecuencias naturales para la determinación de la tensión podría conducir a errores significativos. En el presente trabajo se desarrollan dos metodologías para la estimación de la tensión en cables con complejidades. Por un lado, a través de un enfoque probabilístico se propone un esquema Bayesiano de inferencia. Adicionalmente, se aborda la resolución del problema a través de la implementación de una Red Neuronal Artificial. Ambas metodologías son evaluadas a través de ensayos físicos y computacionales. En el contexto del estudio dinámico de cables y estructuras con cables, se incluye un análisis probabilístico de líneas de transmisión de energía eléctrica (LTEE). En estos sistemas, la carga asociada al viento constituye usualmente el factor más relevante en el diseño estructural. Se aborda el análisis probabilístico de LTEE mediante un enfoque Monte Carlo de propagación y cuantificación de incertidumbre, considerando a la carga de viento como un campo dinámico estocástico con correlación espacial y temporal, y a la tensión de las riendas como variables aleatorias. Por medio de este enfoque, se deriva una representación robusta de la respuesta estructural. A través de la aplicación de la carga estática de reglamento, se definen umbrales de referencia que sirven de base para un análisis de confiabilidad estructural de la respuesta estocástica.

# Abstract

Due to its great flexibility, suspended cables exhibit a complex dynamic behavior associated to their characteristic geometrical nonlinearity, and high sensibility to their pretension level. At the same time, in guyed power and telecommunication towers, the mechanical tension of the guys presents a significant uncertainty level, since it could be affected in time due to environmental or deliberated human actions against the structure. In some configuration of guyed communication towers, an arrangement of insulators is attached to the guys, breaking its total length in minor sub-spans. In those cases, the application of the existing vibration-based methods for the estimation of the tension force could lead to significant errors. Therefore, two separate methodologies are developed in the present investigation for the estimation of the tension force in cables with complexities. On one side, through a probabilistic approach, a Bayesian framework is proposed. Additionally, the problem is approached through the implementation of an Artificial Neural Network (ANN). Both methodologies are evaluated through physical and simulated tests. Additionally, the application of cables in Power Transmission Lines (PTL) is studied. In these systems, the load due to wind acting on the structure usually defines the structural design. In the present investigation, the probabilistic analysis of a PTL is performed by means of a Monte Carlo approach for uncertainty quantification and propagation, considering the wind-related load as a dynamical stochastic field with spatial and temporal correlation. Moreover, the uncertainty in the guys tension is included in the study through the definition of a statistical model for the tension in the four guy wires of the supporting structure. This approach allows the derivation of a robust representation of the system response. Moreover, through the application of the static-equivalent wind load suggested in an international design code, reference thresholds are defined and used in a reliability analysis of the stochastic dynamical structural response.