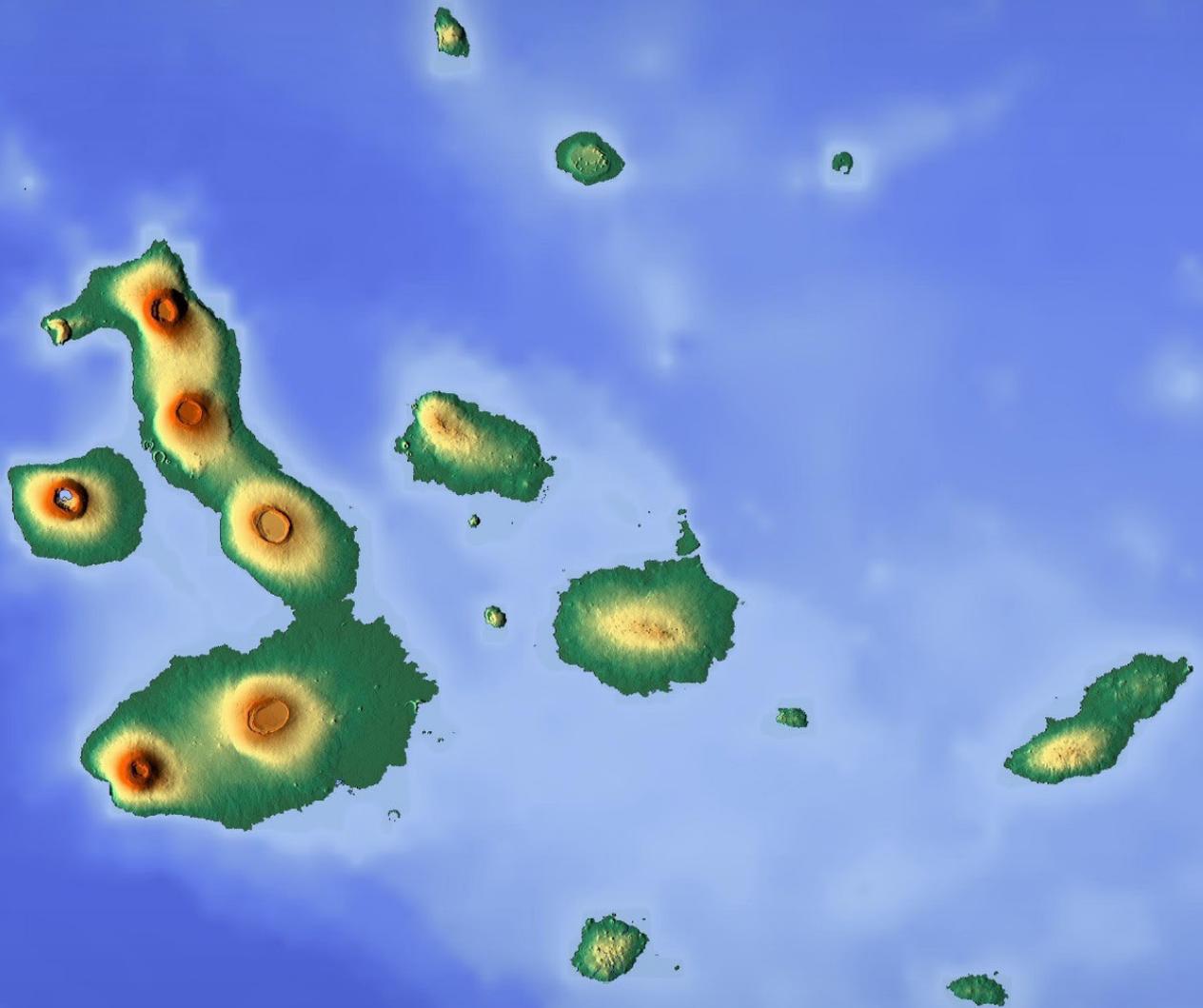




REVISTA POLITÉCNICA



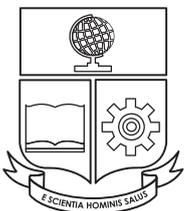
ESCUELA
POLITÉCNICA
NACIONAL

ISSN: 1390-0129
eISSN: 2477-8990

Volumen 50, Nro. 1, Agosto · Octubre 2022



REVISTA POLITÉCNICA



ESCUELA
POLITÉCNICA
NACIONAL

ISSN: 1390-0129
eISSN: 2477-8990

Volumen 50, Nro. 1, Agosto - Octubre 2022

TEMÁTICA Y ALCANCE

La Revista Politécnica es una publicación periódica trimestral, editada por la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador, cuyo objetivo es contribuir al conocimiento científico y tecnológico, mediante la publicación de estudios científicos relacionados a las áreas de ciencias básicas (Física, Química, Biología y Matemática) e ingenierías (Química y Agroindustria, Civil y Ambiental, Eléctrica y Electrónica, Geología y Petróleos, Mecánica, y Sistemas). La Revista Politécnica está dirigida a profesionales e investigadores que trabajan en estos campos del conocimiento.

EDITORORA

Jenny Gabriela Torres, Ph.D.
Escuela Politécnica Nacional
editor.rp@epn.edu.ec

CO-EDITOR

Benjamin Bernard, Ph.D.
Escuela Politécnica Nacional
coeditor.rp@epn.edu.ec

CONSEJO EDITORIAL

Ph.D. José Aguilar
Universidad de los Andes, Venezuela

Ph.D. Víctor Hugo Hidalgo
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. José Luis Paz
Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú

Ph.D. Hernán Álvarez
Universidad Nacional Colombia, Colombia

Ph.D. Majid Khorami (C)
Universidad Tecnológica Equinoccial, Ecuador

Ph.D. Nelson Pérez
Universidad de los Andes, Venezuela

Ph.D. Santiago Arellano Chalmers
University of Technology, Suecia

Ph.D. Hugo Leiva
Yachay Tech University, Ecuador

Ph.D. Franklin Rivas
Universidad Técnica Federico Santamaría, Chile

Ph.D. Carlos Ávila
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Francisco León
Universidad de los Andes, Venezuela

Ph.D. Andrés Rosales
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Leonardo Basile
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Orestes Llanes
Universidad Tecnológica de la Habana, Cuba

Ph.D. Gabriel Salazar

Organización Latinoamericana de Energía, Ecuador

Ph.D. Silvia Calderón
Finnish Meteorological Institute, Finlandia

Ph.D. Wilfrido A. Moreno
University of South Florida, Estados Unidos

Ph.D. Gustavo Scaglia
Universidad Nacional de San Juan, Argentina

Ph.D. Eduardo F. Camacho
Universidad de Sevilla, España

Ph.D. Diego Ordóñez
Universidad Tecnológica Equinoccial, Ecuador

Ph.D. Hebertt Sira-Ramirez
Center for Research and Advanced Studies of the National Polytechnic Institute, México

Ph.D. Juan Carlos De los Reyes
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Rui Pedro Paiva
University of Coimbra, Portugal

Ph.D. Sebastián Taco
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Pamela Flores
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

La Revista Politécnica está incluida en SCOPUS, Scientific Electronic Library Online (SciELO), Catálogo 2.0 de Latindex, Directory of Open Access Journals (DOAJ), Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico (REDIB), Matriz de Información para el Análisis de Revistas (MIAR), Bielefeld Academic Search Engine (BASE), CiteFactor, PKP Index, Google Scholar, ResearchBib, International Institute of Organized Research (I2OR) e ICI Journals Master List 2020.

Se autoriza la reproducción total o parcial de su contenido siempre y cuando se cite la fuente. Los conceptos expresados son de responsabilidad exclusiva de sus autores.

Coordinador Técnico Operativo

Ing. Ricardo Villarroel
ricardo.villarroel@epn.edu.ec

Ing. Katherine Aro
katherine.aro@epn.edu.ec

Proofreader

MSc. María Eufemia Torres

Diseño de Portada

Cristian Basurto
Diseñador Gráfico

AUTORIDADES

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**Vicerrectora de Investigación,
Innovación y Vinculación**
Alexandra Alvarado, Ph.D.

Rectora
Florinella Muñoz, Ph.D.

Vicerrector de Docencia
Iván Bernal, Ph.D.

Editorial

La Revista Politécnica es una revista científica generalista, disponible gratuitamente para lectores y sin costo para los autores. En este nuevo número, la Revista Politécnica propone en esta ocasión, una selección de artículos de alto nivel que abarcan una amplia variedad de temas.

En el trabajo “Análisis de las condiciones de oleaje extremo en el archipiélago de Galápagos” (Jácome, 2022), el autor utiliza previsiones y estadísticas para analizar el tamaño máximo de las olas en Galápagos en un periodo de retorno de 100 años. Un análisis retrospectivo de tres tormentas recientes permite comprender mejor la formación y el desarrollo temporal de estos eventos.

El segundo artículo titulado “Ramp metering strategies: A literature review” escrito por Cazorla et al. (2022) es una revisión práctica de la literatura sobre el uso de rampas como estrategia para controlar el flujo vehicular en las autopistas. Al hacer esta revisión de la literatura, los autores aportan soluciones concretas a problemas recurrentes de la movilidad.

El desperdicio de recursos y energía es un problema creciente en la sociedad actual. Acurio et al (2022) abordan el problema de la eficiencia y la obsolescencia de los dispositivos electrónicos estudiando el comportamiento de diodos en condiciones de estrés. El trabajo titulado “Estudio de confiabilidad en diodos basados en AlGaIn/GaN durante el estado de encendido” presenta soluciones para mejorar la fiabilidad de estos dispositivos.

En la misma línea filosófica, Oscullo y Pilaquina (2022) proponen el uso de algoritmos inspirados en la naturaleza para optimizar el funcionamiento de la red eléctrica. El trabajo “Despacho económico de unidades térmicas con funciones de coste lineales utilizando el algoritmo de la luciérnaga” aprovecha un algoritmo basado en el comportamiento de las luciérnagas para determinar la solución al problema de despacho de unidades térmicas en un sistema hidrotérmico y analiza su eficacia cuando se aplica al Sistema Nacional Interconectado.

En el quinto trabajo titulado “Semigrupos dinámicamente gradientes en un espacio métrico”, Gavilán (2022) estudia la dinámica interna de un compacto invariante utilizando varias estrategias como el atractor local, el repulsor y la pareja atractor-repulsor. La estabilidad de las soluciones encontradas se analiza con ejemplos ilustrativos.

Finalmente, el último artículo de este número de la Revista Politécnica trata de la vulnerabilidad sísmica en Ecuador. En su artículo titulado “Estado del arte de estudios de vulnerabilidad sísmica en Ecuador”, Cunalata y Caiza (2022) analizan las diferentes metodologías utilizadas para estudiar el grado de vulnerabilidad de las edificaciones existentes y concluyen que el uso de al menos tres de ellas permite una estimación fiable al ser complementarias.

El Comité Editorial de la Revista Politécnica desea agradecer una vez más a los autores que han presentado sus artículos y a los revisores que han velado por la calidad científica de estos documentos. Esperamos que la comunidad científica y politécnica disfrute de este nuevo número y lo utilice como referencia para sus estudios.

Editorial

The Revista Politécnica is an open access general scientific journal free of charge to authors. In this new issue, the Revista Politécnica on this occasion, offers a selection of high-level articles covering a wide variety of topics.

In the paper “Analysis of extreme wave conditions in the Galápagos Archipelago” (Jácome, 2022), the author uses forecasts and statistics to analyze the maximum wave size in Galapagos over a 100-year return period. A retrospective analysis of three recent storms provides a better understanding of the formation and temporal development of these events.

The second article entitled “Ramp metering strategies: A literature review” by Cazorla et al. (2022) is a practical review of the literature on the use of ramps as a strategy to control vehicular flow on highways. In doing this literature review, the authors provide concrete solutions to recurring mobility problems.

Waste of resources and energy is a growing problem in today's society. Acurio et al (2022) address the problem of efficiency and obsolescence of electronic devices by studying the behavior of diodes under stress conditions. The work entitled “Reliability study on diodes based on AlGaN/GaN during the on state” presents solutions to improve the reliability of these devices.

In the same philosophical line, Oscullo and Pilaquina (2022) propose the use of nature-inspired algorithms to optimize power grid operation. The paper “Economic dispatch of thermal units with linear cost functions using Firefly Algorithm” takes advantage of an algorithm based on the behavior of fireflies to determine the solution to the problem of dispatching thermal units in a hydrothermal system and analyzes its effectiveness when applied to the National Interconnected System.

In the fifth paper entitled “Dinamically gradient semigroups in a metric space”, Gavilán (2022) studies the internal dynamics of an invariant compact using several strategies such as the local attractor, the repeller and the attractor-repeller pair. The stability of the solutions found is analyzed with illustrative examples.

Finally, the last article of this issue of the Revista Politécnica deals with seismic vulnerability in Ecuador. In their article entitled “State of the art of seismic vulnerability studies in Ecuador”, Cunalata and Caiza (2022) analyze the different methodologies used to study the degree of vulnerability of existing buildings and conclude that the use of at least three of them allows a reliable estimation as they are complementary.

The Editorial Board of the Revista Politécnica would like to thank once again the authors who have submitted their articles and the reviewers who have ensured the scientific quality of these papers. We hope that the scientific and polytechnic community will enjoy this new issue and use it as a reference for their studies.

Contenido
Vol. 50, No. 1
Agosto – Octubre 2022

7

Jácome Edwin

Análisis de Condiciones Extremas de Oleaje en el Archipiélago de Galápagos

Analysis of Extreme Wave Conditions in the Galápagos Archipelago

15

Cazorla Patricia; Calderón Francisco; Avila-Ordóñez Elina

Ramp Metering Strategies: A Literature Review

Control de Flujo en Rampas: Una Revisión de Literatura

27

Acurio Eliana; Trojman Lionel; De Jaeger Brice; Bakeroot Benoit

Estudio de Confiabilidad en Diodos Basados en AlGa_N/Ga_N Durante el Estado de Encendido

Reliability Study on Diodes Based on AlGa_N/Ga_N During the On State

35

Oscullo José; Pilaquina Santiago

Despacho Económico de Unidades Térmicas con Funciones Lineales de Costo utilizando el Algoritmo de la Luciérnaga

Economic Dispatch of Thermal Units with Linear Cost Functions using Firefly Algorithm

43

Gavilán Maruja

Semigrupos Dinámicamente Gradiente en un Espacio Métrico

Dynamically Gradient Semigroups in a Metric Space

55

Cunalata Fabiana; Caiza Pablo

Estado del Arte de Estudios de Vulnerabilidad Sísmica en Ecuador

State of the Art of Seismic Vulnerability Studies in Ecuador

Análisis de Condiciones Extremas de Oleaje en el Archipiélago de Galápagos

Jácome, Edwin^{1,2,*} 

¹Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica, Quito, Ecuador

²Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Riobamba, Ecuador

Resumen: El presente trabajo tiene como finalidad realizar un análisis de las condiciones extremas de oleaje en el Archipiélago de Galápagos. Para lo cual, se utilizaron datos de oleaje y viento del Centro Europeo de Predicción del Tiempo a Mediano Plazo (ECMWF). Primero, se realizó una caracterización del espectro de oleaje, luego se utilizó el Análisis de Valor Extremo EVA, con el método de pico sobre umbral (POT). Para encontrar los eventos extremos y sus periodos de retorno a 100 años. Finalmente, se realizó el análisis físico de las tres mayores tormentas registradas en el periodo de 1979 a 2015. En las cuales se determinó que sus trayectorias ascendentes (de sur a norte) y su gran intensidad, generan el oleaje de fondo (swell) que contribuye con la producción de valores extremos en las Islas Galápagos. Además, la máxima altura significativa de ola es de 3,8 m para un periodo de retorno de 100 años.

Palabras clave: Oleaje Galápagos, Análisis de Valor Extremo, pico sobre umbral.

Analysis of Extreme Wave Conditions in the Galápagos Archipelago

Abstract: The aim of this work is to carry out an analysis of the extreme wave conditions in the Galápagos Archipelago. For which, Wave and wind data from the European Center for Medium-Range Weather Prediction (ECMWF) were used. First, we do a characterization of the wave spectrum, then we use the Extreme Value Analysis (EVA), with the peak over threshold method (POT). After that, we found the extreme events and their return periods to 100 years. Finally, the physical analysis of the three largest storms recorded in the period from 1979 to 2015 was carried out. In which we determined that their upward trajectories (from south to north) and their great intensity generate the bottom swell, that contributes to the production of extreme values in the Galapagos Islands. Furthermore, the maximum significant wave height is 3.8 m for a return period of 100 years.

Keywords: Galápagos Swell, Extreme Value Analysis, peak over threshold.

1. INTRODUCCIÓN

Las islas Galápagos se encuentran en el pacífico ecuatorial, a unos 1000 km de la costa del Ecuador. Su condición de oleaje se ve afectado principalmente por oleaje y vientos provenientes del sureste (Trueman & d'Ozouville, 2010). El clima se encuentra dividido en dos zonas a lo largo del año, de enero a mayo la estación cálida y de junio a diciembre la estación fría. (Hamann, 1979; Itow, 2003). Durante la estación cálida, se presenta mayor cantidad de precipitación por la temperatura elevada de la superficie. Provocando grandes olas que dificultan el desarrollo de las actividades marítimas en las islas. Además, el clima de Galápagos se ve afectado por el fenómeno del Niño, o “El Niño Oscilación del Sur” (ENOS) por sus siglas en inglés. La fase fría de ENOS se conoce como La Niña y la fase cálida como El Niño (Sachs, 2011). Durante los eventos de El Niño, el Pacífico oriental experimenta una

alta temperatura de la superficie del mar, lo que debilita los vientos alisios del sureste incrementando aún más la temperatura asociada con el desplazamiento hacia el sur de la Zona de convergencia intertropical (ZCIT). Los eventos más fuertes registrados de El Niño en Galápagos incluyen: 1975–6, 1982–3, 1986–7, 1993–4 y 1997–8 (Snell & Rea, 1999). Lo que ha provocado situaciones de riesgo y malestar para la comunidad. Más aún, considerando que muchas actividades de la población (transporte, turismo, pesca, entre otras) están directamente vinculadas al mar. Entre los diversos eventos de riesgo están los de oleaje, marea, viento, tsunamis, entre otros. De estos, el que históricamente ha estado asociado al mayor número de incidentes es el oleaje, debido a su naturaleza variable.

A lo largo de los últimos años, el problema del oleaje se ha notado mucho más debido al incremento del tráfico marino en

*angel891611@hotmail.com
Recibido: 29/03/2021
Aceptado: 12/04/2022
Publicado en línea: 25/05/2022
10.33333/rp.vol50n1.01
CC 4.0

las islas y no solo ha llevado a producir daños materiales si no también riesgo a las personas. Como sucedió en junio del 2014, donde los fuertes oleajes provocaron que dos embarcaciones de pesca artesanal se hundieran y otras dos quedarán dañadas. Además, se instalaron banderas rojas en varios puntos de la playa para que alertar del peligro y se realizó recomendaciones a los capitanes de las embarcaciones y exigir con mayor énfasis el uso de chalecos salvavidas entre los pasajeros (El Universo, 2014). Otro evento de gran magnitud sucedió en mayo del 2015, el cual destruyó parte del Malecón de San Cristóbal, en Galápagos, y hundió una lancha anclada frente a las costas, además tuvieron que retirar del mar a niños y jóvenes que practicaban surf (El Comercio, 2015). También se han reportado accidentes de embarcaciones de transporte de bienes, los mismos que han dejado a las islas en condiciones de desabastecimiento. Por ejemplo, el carguero “Floreana” encalló frente a la isla de San Cristóbal el 28 de enero del 2015. En el mismo sector, el carguero “Galapaface I”, que transportaba combustibles fósiles, encalló el 9 de mayo del 2014. Los dos barcos quedaron fuera de circulación luego del accidente y fueron hundidos.

Existen instancias nacionales responsables de suministrar información y establecer protocolos en situaciones de riesgo. Sin embargo, dicha información es de poca utilidad, actualmente ya sea porque es demasiado vaga, demasiado técnica, o simplemente porque la comunidad no está familiarizada con ella. El objetivo principal de este trabajo es realizar un análisis de condiciones extremas de oleaje en el archipiélago de Galápagos, para lo cual primero se realizará la revisión de las características espectrales de oleaje que afectan al archipiélago, luego se aplicará la teoría del valor extremo (EVA) por sus siglas en inglés, con datos de altura significativa (Hs) de ola desde 1979 hasta 2015. Con esto se tiene el valor Hs para periodos de retorno de 100 años, que son muy útiles y se utilizan como parámetros de diseño en estructuras marinas y finalmente se analizarán eventos extremos por su condición física.

2. CARACTERÍSTICAS ESPECTRALES

El oleaje en el pacífico ecuatorial ha sido estudiado en los últimos años. Sosa y Portilla (2014) presentaron la caracterización espectral a largo plazo de tres localidades en aguas profundas: Islas Galápagos, Esmeraldas y Guayas. En los cuales se caracterizó cuatro regímenes de olas: dos de ellos se propagan al norte, dos al sur. En otro estudio (Portilla, 2016), se presentó la estadística a largo plazo de oleaje al pacífico ecuatorial en el cual se determinó, que en este sector dominan cuatro sistemas de olas. El primero que fluye principalmente a 40° , tiene origen en la tormenta del cinturón antártico en el Pacífico meridional hasta Australia y Nueva Zelanda. El segundo, que va desde 120° , se asocia a tormentas del Atlántico Norte en un cinturón entre 15° N y 30° N . El tercero fluye en el mismo cuadrante direccional del primero (10°), pero la frecuencia característica es más alta. El cuarto está conectado al chorro de Panamá.

Las características espectrales en las Islas Galápagos no varían demasiado de estos estudios. Para el presente estudio se utilizarán datos de Portilla (2018), en el cual se puede obtener datos estadísticos de oleaje a largo plazo. Los resultados se

presentan en función de la frecuencia y utilizando la técnica de partición espectral (Portilla et al., 2009), se puede visualizar los diferentes sistemas de los que está compuesto el espectro. Se ha dividido tres puntos distribuidos a lo largo de las Islas Galápagos los cuales son: (ver Figura 1) el punto A localizado en longitud 270° y latitud -2° (S 2° O 90°) el punto B localizado en longitud 268° y latitud -1° (S 1° O 92°) y el punto C localizado en longitud 271° y latitud -1° (S 1° O 89°).

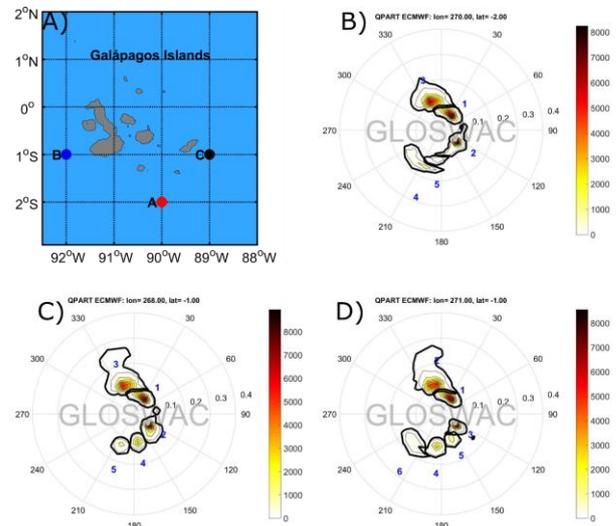


Figura 1. Características espectrales de la región insular del Ecuador (Islas Galápagos): Panel A) localización geográfica de los puntos de análisis, B) Punto A localizado en S 2° O 90° , C) Punto B localizado en S 1° O 92° , D) Punto C localizado en S 1° O 89°
Información tomada de: (Portilla-Yandún & Jácome, 2020; Portilla, 2018)

El punto A presenta 5 sistemas: El primero se propaga hacia 30° (desde el suroeste) y su pico de frecuencia esta alrededor de $0,07 \text{ Hz}$. El segundo sistema fluye a 120° y su frecuencia está cercana a $0,08 \text{ Hz}$. El tercero es el más amplio y está relacionado con el viento local con una dirección de 135° y una frecuencia de $0,1 \text{ Hz}$. El cuarto tiene una dirección de 200° con una frecuencia de $1,4 \text{ Hz}$ y proviene del Norte. El quinto es despreciable. En cambio, el punto B presenta 5 sistemas: El primero se propaga hacia 30° (desde el suroeste) y su pico de frecuencia esta alrededor de $0,075 \text{ Hz}$ (Similar al punto A y C). El segundo sistema fluye a 130° y su frecuencia está cercana a $0,09 \text{ Hz}$. El tercero es el más amplio y está relacionado con el viento local con una dirección de 135° y una frecuencia de $0,1 \text{ Hz}$ (Similar al punto A y C). El cuarto tiene una dirección de 175° con una frecuencia de $1,3 \text{ Hz}$. El quinto tiene una dirección de 200° y una frecuencia pico de $1,4 \text{ Hz}$ (Similar al cuarto del punto A). Por último, para el punto C presenta 6 sistemas. El primero se propaga hacia 30° (desde el suroeste) y su pico de frecuencia esta alrededor de $0,07 \text{ Hz}$ (Similar al punto A y B). El segundo sistema fluye a 125° y su frecuencia está cercana a $0,09 \text{ Hz}$ (Similar al punto B). El tercero es el más amplio y está relacionado con el viento local con una dirección de 140° y una frecuencia de $0,1 \text{ Hz}$ (Similar al punto A y B). El cuarto tiene una dirección de 185° con una frecuencia de $1,3 \text{ Hz}$. El quinto tiene una dirección de 160° y una frecuencia pico de $1,1 \text{ Hz}$. El sexto es despreciable.

3. ANÁLISIS DE VALOR EXTREMOS EVA

En los procesos de diseño, por ejemplo, de estructuras oceánicas como rompeolas u otras estructuras expuestas a factores medioambientales, uno de los parámetros fundamentales es el valor de las cargas máximas a las que serán expuestas. Estas cargas definen su requerimiento de resistencia y por lo tanto están directamente relacionadas a los costos de fabricación. El diseño bajo parámetros inferiores a los requerimientos involucra riesgo de falla, mientras que el sobre-dimensionamiento implica costos elevados, probablemente no factibles (Jácome, 2017). Sin embargo, las variables medioambientales (e.g., viento, caudal hidrológico, oleaje, entre otros) son variables esencialmente aleatorias, por lo que la metodología para la determinación de las cargas de diseño, debe ser necesariamente de carácter estocástico, incurriendo en un problema donde no siempre se tienen registros estadísticos de estas variables y si existen no suelen ser muy extensos. En general, el tiempo de vida útil considerado para el diseño siempre las supera, por lo que es necesario estimar la probabilidad de ocurrencia de un evento extremo en el futuro.

La metodología para abordar este tipo de problemas está bien especificada y se basa en la teoría de valores extremos (EVA por sus siglas en inglés), que consiste en proyectar o “extrapolar” a partir de una serie limitada de datos observados, la probabilidad de ocurrencia de un valor futuro extremo (Holthuijsen, 2007). Las condiciones estadísticas necesarias para la aplicación de esta teoría son: 1) Los eventos deben ser estadísticamente independientes. Por ejemplo, en el oleaje, el valor de altura significativa comúnmente no es independiente, un valor alto de la altura significativa de ola es por lo general precedido y seguido por otro alto valor. 2) Los eventos deben estar idénticamente distribuidos en cuanto a su naturaleza. Esto generalmente no ocurre porque los datos pueden tener orígenes diferentes (Jácome, 2017).

La contribución del presente trabajo es realizar una evaluación de EVA, a series de tiempo separadas según su origen. Para ello, mediante el uso de la técnica de partición espectral (Portilla, 2009) se identifica y separa los eventos según su génesis física para obtener proyecciones estadísticas independientes que en principio son más robustas en el cálculo de valores extremos. Así mismo, los valores de periodo de retorno obtenidos de esta manera serán también más precisos para el diseño. Para realizar este análisis se utilizarán series de oleaje del Pacífico Ecuatorial Oriental, de la base de datos de REANALISIS ERA-INTERIM del Centro Europeo de Predicción del Tiempo a Mediano Plazo (ECMWF por sus siglas en inglés) (Dee et al., 2011). Estos datos cubren el período desde 1979 hasta el 2018, discretizados espacialmente en una malla Gaussiana reducida con una resolución espacial de aproximadamente 110 km. La variable principal es el espectro de oleaje, disponible en intervalos de 6 h, haciendo para un punto un total de más de 54.000 espectros con una resolución de 30×24 en el espacio (f- θ). Con esto se espera obtener periodos de retorno para valores extremos, series totales y separadas, con el fin de estimar los parámetros estadísticos (eg. periodo de retorno), y determinar casos en los cuales pueda existir subestimación o sobrestimación de los mismos (Portilla-Yandún & Jácome, 2020).

Para la extrapolación se utiliza la distribución que mejor se ajusta a los valores. Con la finalidad de facilitar la capacidad de juzgar un ajuste, es conveniente usar la función de distribución acumulada, en lugar de la función de densidad de probabilidad (Holthuijsen, 2007), porque cuando se representa en el papel las escalas adecuadas, la función de distribución acumulativa aparecerá como una línea recta alrededor de la cual los datos deben agruparse como se puede observar en la Figura 2.

La elección de las distribuciones es bastante arbitraria, pero la experiencia basada en la literatura ayuda a limitar la elección a sólo unas pocas funciones. Una de ellas es la que se deriva del pico sobre umbral o Peaks Over Threshold (POT), la cual considera sólo el valor máximo de H_s en un espacio temporal conocido como tormenta. Una tormenta se define como una secuencia ininterrumpida de valores de H_s , que superan un cierto valor y este debe ser bastante alto (umbral), precedido y seguido por un valor menor. El valor elegido para este umbral depende en gran medida de las condiciones locales (Coles & Walshaw, 1994).

El método de pico sobre umbral (POT) permite seleccionar de una mejor manera los eventos extremos de una serie de datos, este valor de umbral o también conocido como valor de tormenta, es un dato empírico a partir del cual se puede considerar como extremo a un evento. Sin embargo, en la selección de este umbral reside la complejidad de este método ya que un valor muy bajo infringiría las condiciones básicas del modelo. En cambio, mientras más alto sea este valor se trabajará con una cantidad menor de datos, por ende, se perdería confiabilidad en el ajuste (Holthuijsen, 2007). Hay que mencionar que no existe un criterio unificado para definir estrictamente lo que se considera un evento pico o evento extremo (Coles et al., 2001), la característica fundamental presente en este método, es conseguir una población de valores elevados y estadísticamente independientes. Una forma de garantizar esta condición estadística es seleccionar un valor dentro de la variable tiempo, cuya duración debe ser determinada por las características del fenómeno ambiental, en el caso del oleaje un valor recomendado es de 48 horas, este valor de duración de evento se justifica, ya que es el tiempo medio que suelen durar las perturbaciones atmosféricas causantes del oleaje (González, 2013; Simiu & Heckert, 1996; Walton, 2000), de esta forma cada valor de máximo seleccionado pertenecerá a perturbaciones diferentes. En este análisis, se utilizará una separación de 24 horas, seleccionando en dicho intervalo el mayor valor. La distribución del máximo en una secuencia de valores que ocurren encima de un umbral se ajusta a la distribución generalizada de Pareto (Castillo, 2012; Coles et al., 2001; Holthuijsen, 2007). Este enfoque POT tiene dos ventajas importantes: (a) Seleccionar únicamente los valores elevados en la altura significativa de ola. La eliminación de eventos menores tiende a concentrar el análisis en el régimen que domina a los extremos; y (b) las tormentas son estadísticamente eventos independientes, que proporcionan una base teórica más sólida y simplifican la interpretación de los resultados del análisis (por ejemplo, la estimación de los errores de muestreo involucrado).

Para la estimación del umbral, se utilizará la técnica descrita en Portilla-Yandún & Jácome (2020). La cual sugiere que para

datos de oleaje un valor de tormenta se puede obtener a partir de la siguiente ecuación:

$$\sigma^* = \sigma_\mu - \kappa_\mu \quad (1)$$

En dónde σ^* parámetro de normalización modificado, σ_μ es el parámetro de normalización para un determinado umbral y κ_μ es el parámetro de forma para un determinado umbral. En base a la estabilidad mostrada por σ^* y el periodo de retorno para el máximo número de años del estudio (Hs_{37}) se determina el valor del umbral óptimo para cada punto de análisis de la serie de datos seleccionada.

3. RESULTADOS

3.1 Análisis de valor extremo EVA en Galápagos

Al realizar el análisis de valor extremo es necesario obtener las series separadas en el espacio temporal, para lo cual se utiliza la técnica de separación espectral (Ver Portilla, 2009) y el método de selección de umbral descrito en Portilla-Yandún & Jácome (2020). Los resultados de este análisis se presentan en las Figuras de la dos a la cinco.

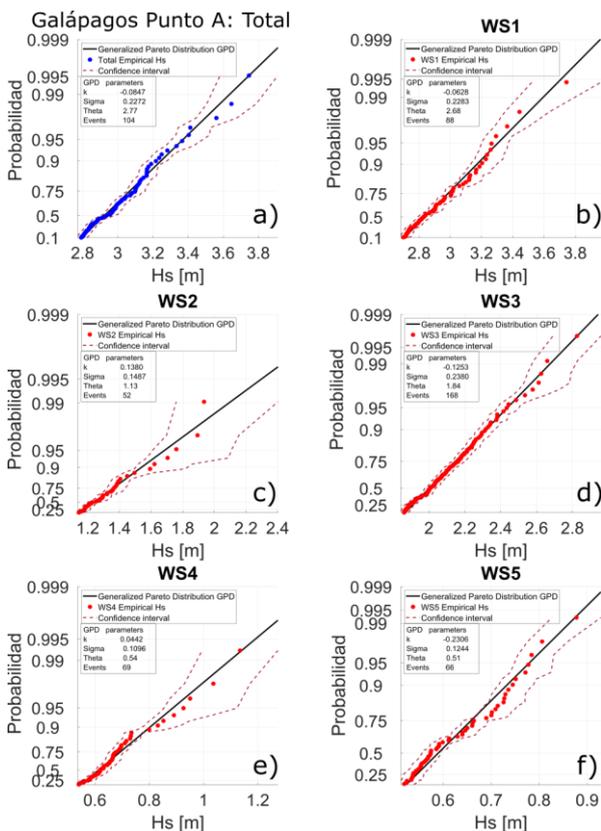


Figura 2. Gráficos Q-Q resultado de EVA, para el punto A ubicado en Lon: 268° y Lat: -2°. Panel A serie total, Panel B – F, Series particionadas WS1, WS2, WS3, WS4, WS5, respectivamente

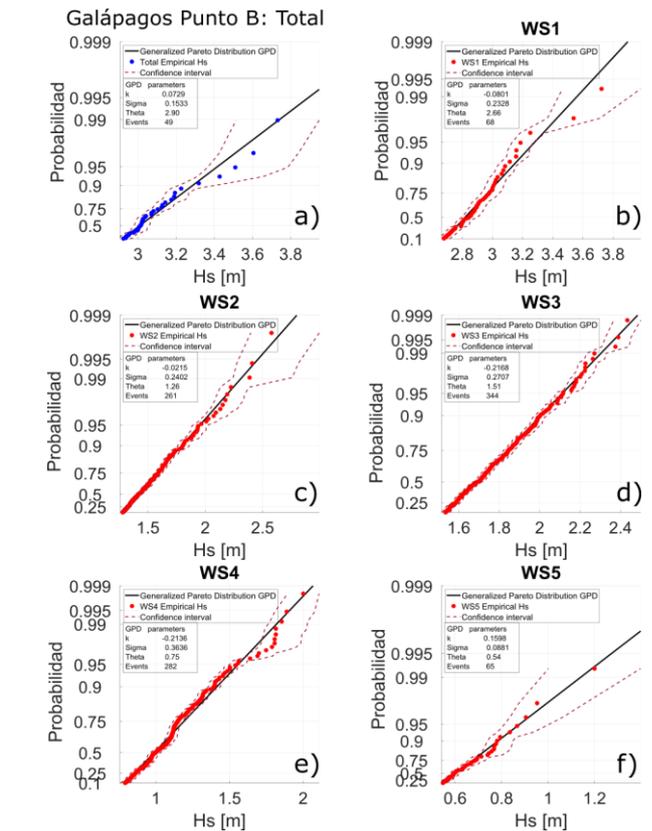


Figura 3. Gráficos Q-Q resultado de EVA, para el punto B ubicado en Lon: 268° y Lat: -1°. Panel A serie total, Panel B – F, Series particionadas WS1, WS2, WS3, WS4, WS5, respectivamente

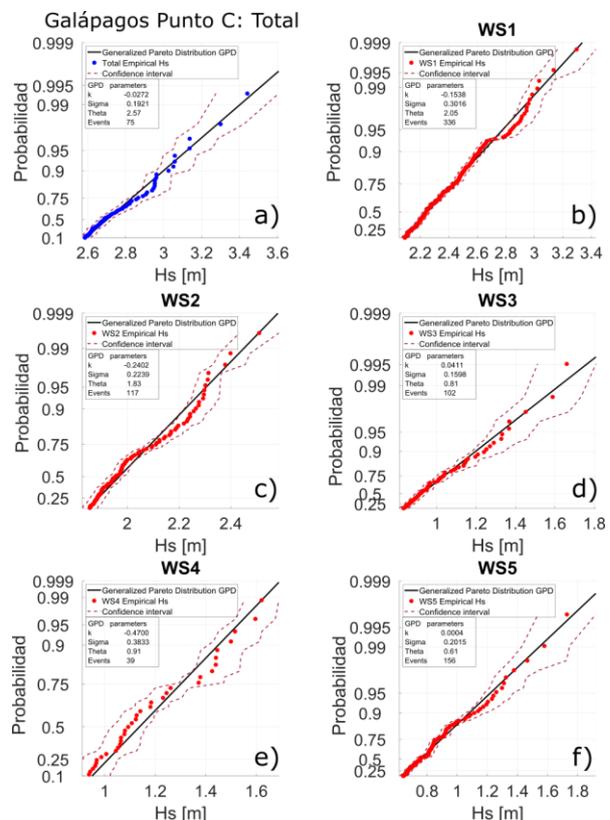


Figura 4. Gráficos Q-Q resultado de EVA, para el punto C ubicado en Lon: 271° y Lat: -1°. Panel A serie total, Panel B – F, Series particionadas WS1, WS2, WS3, WS4, WS5, respectivamente

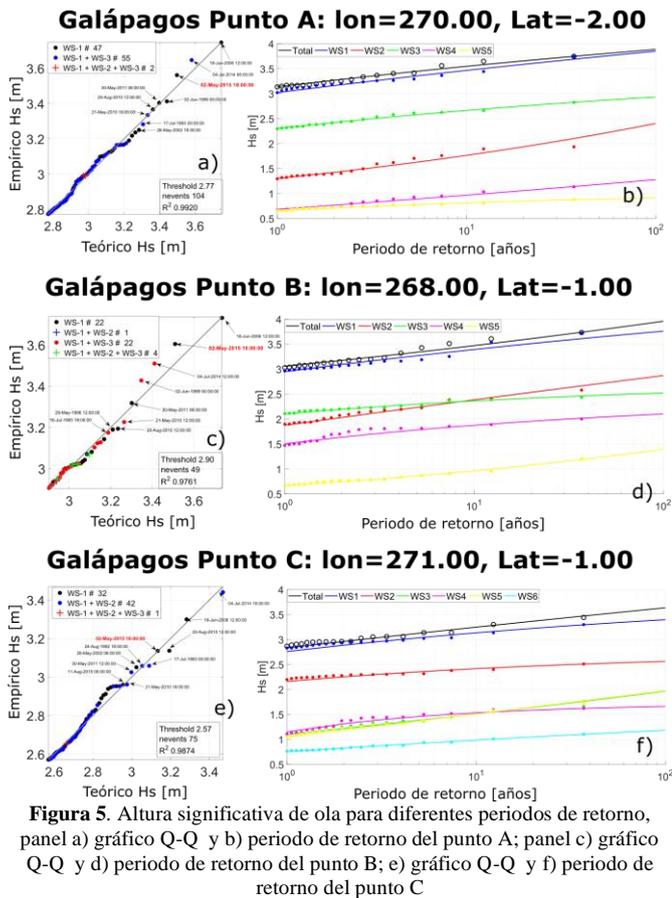


Figura 5. Altura significativa de ola para diferentes periodos de retorno, panel a) gráfico Q-Q y b) periodo de retorno del punto A; panel c) gráfico Q-Q y d) periodo de retorno del punto B; e) gráfico Q-Q y f) periodo de retorno del punto C

En la Figura 2, se muestra el análisis EVA para el punto A (Lon: 268° y Lat: -2°), en el cual se observa que, para la serie total el parámetro de forma κ es negativo, es decir, que tiene un límite para su valor extremo, mientras que en las series particionadas SW2, SW4 el parámetro de forma κ es positivo, esto es, que no tiene un límite superior. En este ejemplo se muestra que tres de las series presentan un comportamiento estadístico similar a la serie total (SW1, SW3 y SW5), mientras que las otras dos (SW2 y SW4) por su condición estadística podrían superar a la total, en la proyección de extremos.

En la Figura 3, se muestra el análisis EVA para el punto B (Lon: 268° y Lat: -1°), a diferencia del anterior, para la serie total el parámetro de forma κ es positivo, es decir que sus extremos pueden crecer de manera infinita, mientras que en las series particionadas SW1, SW2, SW3 y SW4 el parámetro de forma κ es positivo, es decir tiende a converger en un valor máximo (límite). En este ejemplo, a pesar de que cuatro de sus componentes se comportan diferente estadísticamente hablando predomina la serie SW5 con un parámetro de forma positivo.

En la Figura 4, se muestra el análisis EVA para el punto C (Lon: 271° y Lat: -1°), en el cual se visualiza que para la serie total el parámetro de forma κ es negativo (igual al punto 1), es decir, que tiene un límite para su valor extremo, mientras que en las series particionadas SW3, SW5 el parámetro de forma κ es positivo, es decir que no tiene un límite superior. En este ejemplo se muestra que tres de las series presentan un

comportamiento estadístico similar a la serie total (SW1, SW2 y SW4), mientras que las otras dos (SW3 y SW5) por su condición estadística podrían superar a la total, en la proyección de extremos.

En el panel a) de la Figura 5, se muestra el ajuste estadístico del punto A ubicado en: Lon: 268° y Lat: -2°, los valores extremos de la serie total se componen en su mayoría por los extremos de la partición WS1 (con color negro), pero existe una cantidad de eventos combinados WS1+ WS3 (color azul). Lo que contrasta en el panel b) se observa que la serie total presenta el valor más alto de periodo de retorno (3.8 m) y se comporta de una manera similar a la partición SW1, que se puede considerar como la dominante de la serie. Ambas con parámetro de forma κ negativo. La partición SW3 es la siguiente y de menor valor las demás particiones (SW2, SW4, SW5).

En el panel c) de la Figura 5, en cambio se muestra el ajuste estadístico del punto B ubicado en Lon: 268° y Lat: -1°, en este caso los valores extremos de la serie total se componen en su mayoría de la partición WS1, seguidos de la combinación de WS1 + WS3. Existen pocos datos trimodales (WS1+WS2+WS3). Al comparar con el panel d) se observa que los periodos de retorno de la serie total tienen un comportamiento diferente al de la partición SW1, ya que la primera presenta un parámetro de forma κ positivo y la segunda un parámetro de forma κ negativo. A pesar de que sus extremos los domina la serie SW1, su comportamiento estadístico es diferente.

En el panel e) de la Figura 5, se muestra el ajuste estadístico del punto C ubicado en Lon: 271° y Lat: -1°, en este caso al igual que en los anteriores, en los extremos domina una partición la SW1, pero a diferencia de los otros dos, la segunda es la combinación bimodal de SW1 +SW2. Al observar el panel f) se nota que al igual que el punto A el comportamiento estadístico de la serie total es similar al de la partición dominante con un parámetro de forma κ negativo.

El valor de proyección para 100 años de periodo de retorno es de 3.8 m de altura significativa de ola. En base al análisis de EVA se ha determinado que los eventos extremos a ser analizados por su condición física serán: 19 de junio del 2006, 04 de julio del 2014 y 02 de mayo del 2015.

3.2 Análisis físico de los valores extremos

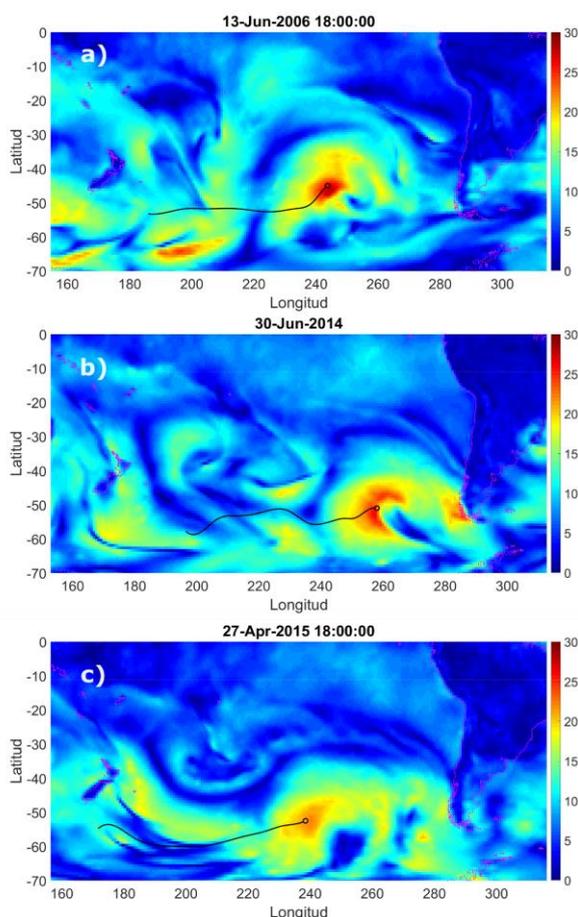


Figura 6. Tormentas y trayectorias en su punto de máxima intensidad

Para realizar el análisis físico de los valores extremos se tomará los tres máximos valores del análisis EVA, que se repiten en los tres puntos A, B, y C. Se procede a estimar las trayectorias de las tormentas al sur este del archipiélago que provocaron este oleaje, para caracterizarlos por su condición física. Para esto se utiliza datos de viento del REANALISIS ERA-INTERIM del Centro Europeo de Predicción del Tiempo a Mediano Plazo (Dee et al. 2011). Al analizar las condiciones físicas de los extremos, se determina que el oleaje de fondo que provocó los eventos extremos se produjo días antes el pacífico sur. Ahí se generaron grades tormentas, que en su trayectoria superaron la zona de la Isla de Pascua, provocando grande oleaje en las Islas Galápagos. En la Figura 6, se muestra las tormentas en el panel a) la tormenta que generó el oleaje de fondo para el evento del 18 de junio del 2006, tuvo su pico el 13 de junio del 2006 a las 18:00:00, entre una latitud de -25 y -40° , con una intensidad máxima de viento de 28 m/s. Lo que provocó un evento extremo en las costas del Archipiélago de Galápagos.

En cambio, en el panel b) de la Figura 6, se puede observar la tormenta que generó el oleaje de fondo del evento del 04 de julio del 2014, tuvo su pico máximo el 30 de junio del 2014, con un valor de 30 m/s, entre una latitud de -30 a -50° . Esta tormenta se produjo más al sur que la anterior, pero debido a su trayectoria ascendente y su gran magnitud generó grandes olas en el Archipiélago de Galápagos.

Por último, en el panel c) de la Figura 6, se muestra la tormenta que contribuyó para generar el evento extremo del 02 de mayo del 2015. Esta tormenta tuvo su pico más alto el 27 de abril, con una velocidad del viento de 27 m/s. Entre una latitud de -35 y -60° , esta tormenta generó oleaje de fondo.

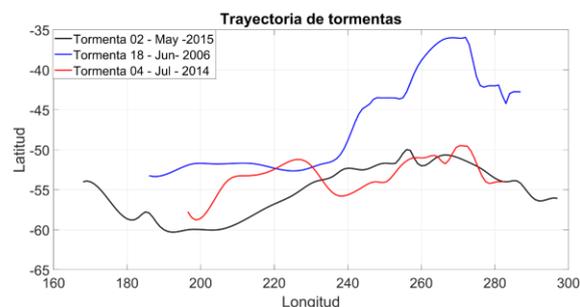


Figura 7. Trayectoria de las tormentas

En la Figura 7, se puede observar la trayectoria de las tormentas, las cuales se generan en longitudes cercanas a los 170° y latitudes de -60° , pero tiene un comportamiento ascendente, en ciertos casos como en el de la tormenta de junio del 2006 (línea azul), llega hasta -37° de latitud el centro de la tormenta.

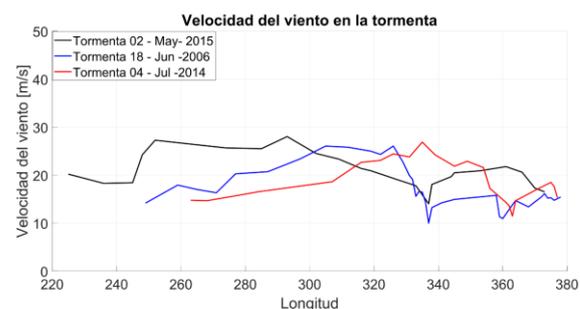


Figura 8. Trayectoria de las tormentas

En la Figura 8, en cambio se puede observar las intensidades de las tormentas, las cuales en su mayoría llegan hasta los 30 m/s de velocidad de viento, lo que se puede ver es que su intensidad no es relevante pero su trayectoria si lo es, ya que al llegar a latitudes cercanas al Ecuador generan oleaje de fondo que provoca daños en las Islas Galápagos.

3. CONCLUSIONES

Al realizar el análisis de valores de extremos (EVA) para el Archipiélago de Galápagos, utilizando métodos estadísticos robustos se logró determinar una altura significativa de ola de $3,8$ m para un periodo de retorno de 100 años.

Se analizó físicamente tres tormentas: el 19 de junio del 2006, 04 de julio del 2014 y 02 de mayo del 2015. En las cuales se determinó que sus trayectorias ascendentes (de sur a norte) y su gran intensidad, generan el oleaje de fondo (swell) que contribuye con la producción de valores extremos en las Islas Galápagos. Además, esas tormentas se producen días antes de que el oleaje llegue a la costa del Archipiélago.

Al tener datos de largos periodos de tiempo, se puede realizar estadísticas más robustas y determinar ajustes estadísticos más confiables.

REFERENCIAS

- Castillo, E. (2012). *Extreme value theory in engineering*. Elsevier.
- Coles, S., Bawa, J., Trenner, L., & Dorazio, P. (2001). *An introduction to statistical modeling of extreme values* (Vol. 208). Springer.
- Coles, S. G., & Walshaw, D. (1994). Directional modelling of extreme wind speeds. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 43(1), 139–157. <https://doi.org/10.2307/2986118>
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., ... Vitart, F. (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656), 553–597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>
- El Comercio. (2015). Oleaje hunde una lancha y afecta el Malecón de San Cristóbal. Retrieved from <https://www.elcomercio.com/actualidad/oleajes-galapagos-sancristobal-danos-mar.html>
- El Universo. (2014). Fuerte oleaje motiva a aumentar la seguridad en Galápagos. Retrieved from <https://www.eluniverso.com/noticias/2014/07/04/nota/3187606/fuerte-oleaje-motiva-aumentar-seguridad-galapagos/>
- González, F. (2013). *Modelización estadística de eventos extremos de oleaje y nivel del mar*. [Tesis doctoral]. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- Hamann, O. (1979). On climatic conditions, vegetation types, and leaf size in the Galápagos Islands. *Biotropica*, 11(2), 101–122. <https://doi.org/10.2307/2387785>.
- Holthuijsen, L. H. (2007). *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Delft University of Technology and UNESCO-IHE (Vol. 20). <https://doi.org/10.5670/oceanog.2007.42>
- Ito, S. (2003). *Zonation pattern, succession process and invasion by aliens in species-poor insular vegetation of the Galapagos Islands*.
- Jácome, E. (2017). Identificación y Separación de Eventos Medioambientales en el Análisis de Valores Extremos para la Proyección de Periodos de Retorno, 110. [Tesis Maestría] Escuela Politécnica Nacional. Retrieved from <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/18777/1/CD-8166.pdf>
- Portilla-Yandún, J., & Jácome, E. (2020). Covariate extreme value analysis using wave spectral partitioning. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 37(5), 873–888. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-19-0198.1>
- Portilla, J. (2016). *The Global Signature of Ocean Wave Spectra | Global Spectral Wave Climate (GLOSWAC)*. Retrieved September 7, 2017, from <http://improlife.xyz/>
- Portilla, J. (2018). *Open Access Atlas of Global Spectral Wave*, (8), 1–9.
- Portilla, J., Ocampo-Torres, F. J., & Monbaliu, J. (2009). Spectral partitioning and identification of wind sea and swell. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26(1), 107–122. <https://doi.org/10.1175/2008JTECHO609.1>
- Sachs, L. (2011). *Climate and Oceanography of the Galapagos in the 21st Century*. I. Larrea and G. Di Carlo.
- Simiu, E., & Heckert, N. A. (1996). Extreme wind distribution tails: a “peaks over threshold” approach. *Journal of Structural Engineering*, 122(5), 539–547. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1996\)122:5\(539\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:5(539))
- Snell, H., & Rea, S. (1999). The 1997-98 El Niño in Galápagos: can 34 years of data estimate 120 years of pattern? *Noticias de Galápagos*, 60, 111–120.
- Sosa Moreno, Jeison Ebert; Portilla, J. (2014). *Wave modelling in the Ecuadorian Pacific using WAVEWATCH III and SWAN*. [Tesis ingeniería] Quito: USFQ.
- Trueman, M., & d'Ozouville, N. (2010). Characterizing the Galapagos terrestrial climate in the face of global climate change. *Galapagos Research*, 67, 26–37. Retrieved from http://datazone.darwinfoundation.org/darwin_weather/pdf/trueman_dozouville2010_vol67pp26-37.pdf%5Cnpapers2://publication/uuid/EC3E489C-7997-4635-B74D-3A68BA180A77
- Walton, T. L. (2000). Distributions for storm surge extremes. *Ocean Engineering*, 27(12), 1279–1293. DOI: 10.1016/S0029-8018(99)00052-9

BIOGRAFÍA



Edwin Jácome, Ingeniero Mecánico (Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2013), maestría en Eficiencia Energética (Escuela Politécnica Nacional, 2017) y doctorado en Ciencias de la Mecánica (Escuela Politécnica Nacional, en curso). Profesional con experiencia en el área de eficiencia energética,

termodinámica, turbo maquinaria y energías alternativas. Docente de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la ESPOCH, docente del Departamento de Ingeniería Mecánica de la EPN, impartiendo más de 10 cátedras en pregrado. Miembro de un proyecto de investigación en la ESPOCH, y dos proyectos en desarrollo en la EPN. Autor y co-autor de varias publicaciones en las áreas de energía y análisis estadístico de fenómenos estocásticos.

Ramp Metering Strategies: A Literature Review

Cazorla, Patricia ^{1,*} ; Calderón, Francisco ¹ ; Avila-Ordóñez, Elina ¹ 

¹*Models, Analysis and Simulation of Transport Systems (MAS), Research Group, University of Cuenca, Ecuador*

Abstract: Ramp metering (RM) is a control tool that allows keeping the flow in freeways main stream stable (occupancy below critical values), in order to delay the onset of congestion. A proper application guarantees a lower Total Travel time Spent in the network (TTS) (travel time in the main stream and waiting time at on-ramps), to varying degrees depending on the application. The benefits of RM arise from preventing congestion and/or from preventing queue spillback. In this paper, the state of the art is surveyed, ultimately selecting twenty-one relevant documents reporting case studies that compare the performance of two or more RM strategies. These documents are classified by the strategy used and reported gains (reduction in TTS). Regardless of the strategy, the authors recommend applying RM to highly congested freeways with similar TTS among ramps. Bottlenecks should be clearly identified to establish the place where the control must be carried out. Control parameters should be set using historical and real-time data and updated according to a receding horizon. Detrimental factors that could exacerbate initial conditions of congestion and spillback include: incorrect input parameters, reactive instead of proactive approaches, and queue formation only on some coordinated ramps.

Keywords: Ramp metering, Dynamic traffic control, Freeway bottlenecks.

Control de Flujo en Rampas: Una Revisión de Literatura

Resumen: Los sistemas de control de flujo en rampas (RM) permiten estabilizar el flujo vehicular en las autopistas (ocupación vehicular inferior al valor crítico) con el fin de evitar congestión. Una adecuada aplicación de RM asegura un menor tiempo total de viaje en la red (TTS) (tiempo de viaje en la autopista y el tiempo de espera en las rampas de ingreso) con respecto al escenario sin control. Las ganancias en TTS pueden resultar de prevenir el inicio de la congestión o de limitar el despliegue de colas. En este artículo, el estado del arte es analizado por veintiún documentos relevantes que comparan el desempeño de dos o más estrategias de RM utilizando un caso de estudio. Estos documentos se clasificaron según el tipo de estrategia y la reducción reportada en TTS. Independientemente de la estrategia, los autores concuerdan con que RM debe aplicarse a autopistas congestionadas con similares TTS entre rampas. Los cuellos de botella deben estar claramente identificados para establecer el lugar en el cual debe realizarse el control. Los parámetros de control deben establecerse utilizando datos históricos y en tiempo real y ser actualizados paulatinamente. Por otro lado, parámetros de entrada incorrectos, reacción en lugar de anticipación y la formación de colas solo en algunas rampas coordinadas podrían empeorar la situación inicial del flujo.

Palabras clave: Ramp metering, Sistema dinámico de control de tráfico, Beneficios, Contra indicadores.

1. INTRODUCTION

Due to population and economic growth, road networks have been increasingly bearing higher loads of people and goods transportation. Globally, road network capacity is overloaded by congestion at the very time when it is needed most (during peak hours). Despite detrimental effects associated with congestion (pollution, casualties, capacity drop, spillback, gridlock formation, travel time variability; etc.), car ownership is steadily increasing every year (European Environment Agency, 2019). The traffic pressure faced by road networks on a daily basis is an important issue for road authorities, policy makers, and traffic engineers, who should provide solutions to eliminate congestion.

Since network expansion (building more infrastructure) is not always possible, a branch of research focuses on developing operational solutions that increase the performance of the system, which can be achieved by implementing dynamic traffic control measures. The main goal is maintaining efficiency and reliability of road networks within certain parameters, considering variations in traffic conditions. This can be achieved by several metering or buffering strategies (Papageorgiou et al., 1991; Lu et al., 2011; Butakov and Ioannou, 2015; Abadi et al., 2016; Zhang and Ioannou, 2016).

Ramp metering has been successfully applied in European countries such as the UK, Germany and the Netherlands, and has shown that proper control of on-ramps can improve traffic conditions in the mainstream and throughout the network

*patricia.cazorla@ucuenca.edu.ec

Recibido: 19/03/2019

Aceptado: 12/04/2022

Publicado en línea: 25/05/2022

10.33333/rp.vol50n1.02

CC 4.0

(Caltrans District7, 2006; Horton et al., 2016); however, its application has been limited due to technical limitations and political concerns. Belgium offers an example where congestion levels increase every year, yet there is no active bottleneck management to control the increase of congestion on the network – 2017 was a record year with more than 1400 hours per day of travel time lost, due to more than 100 km of daily queues (VRTNWS: Laenen and De Roy, 2017).

In Latin America, literature is scarce on RM applications or comparison between RM strategies using a case study. Some applications were found in previous research (Günther et al., 2012; Noreña-Moreno, 2017; Cutipa and Lozano, 2020).

In Ecuador, Intelligent Transportation Systems (ITS) have been used to improve the safety of road users, especially those who use motorized vehicles on the roads. The ITS applications described in the literature focus on: information and communication technologies (ICTs) to aid routing decisions of heavy goods vehicles accessing the city of Quito (Zambrano et al., 2020); tracking public transport vehicles and transmitting their location and speed in real time to a control center (Calle Heredia et al., 2019); exploiting city-wide smartphone data as the main source of information to stabilize traffic in road networks (Zambrano et al., 2019). In Zambrano and Senti (2016), the authors describe ITS applications to control accident rates and improve safety in road transportation. The need to improve user information systems is obvious. However, there is a dearth of research and/or applications regarding the use of ITS for managing traffic flows on roads and highways.

The aim of this paper is to recommend the most adequate ramp metering strategy for a given situation, based on the case studies surveyed from the literature. Factors considered include road geometry, queue length, and the nature of the bottleneck. The benefits of a given strategy are shown in terms of gains (reduction of) in total travel time (TTS) spent in the network.

This paper is organized as follows: Section 2 discusses the basics of ramp metering strategies, classifies them, and concludes with a chronology. Section 3 reports findings from twenty-one ramp metering case studies, concluding with a graph showing reported gains in terms of TTS reduction. Concluding remarks are provided in Section 4.

2. RAMP METERING

Ramp Metering (RM) relies on a traffic light located at the on-ramp of a highway, which controls the inflow of vehicles onto the highway. Inflow is controlled by managing red and green phases of the traffic light through different strategies, such as fixed green times, one-car-per-green, two-cars-per-green, adaptive traffic conditions, etc.

When the demand at the on-ramp is greater than the allowed inflow of vehicles onto the highway, a queue forms at the on-ramp. The length of the queue must not be greater than the storage capacity of the on-ramp, otherwise queue spillback would disturb the surrounding network. When the metering rate is properly defined, the RM system ensures a reduction in

the total travel time (travel time through and waiting time at on-ramps). Thus, the objective of RM is maintaining traffic flow on the highway under stable conditions, i.e., occupancy (ρ) below the critical value (ρ_{cr}) to avoid the occurrence of traffic breakdown.

RM can be used to maintain the capacity flow on the main stream and prevent blockages of upstream ramps, reducing the total time spent on the network by up to 50% (Papageorgiou and Kotsialos, 2002). In addition, RM can be used to enforce operationally desired traffic flow distribution, improve traffic safety and reduce emissions of pollutants to the environment (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018).

2.1 Ramp metering strategies

Technological advances, especially in ITS and ICTs, have allowed the development of RM strategies that increasingly consider more parameters for the dosage of traffic flow in the mainstream. RM strategies can be divided into fixed time, reactive, proactive and hierarchical structure or integrated highway network traffic control (Zhang et al., 2001; Papageorgiou and Kotsialos, 2002).

2.1.1 Fixed time strategies

They are used in offline applications. Their settings are based on historical data rather than real-time data.

2.1.2 Reactive strategies

These are based on real-time measurements collected by sensors installed on the highway network. They can be local or coordinated.

Examples of local reactive strategies are:

- Demand-Capacity. This strategy sets the ramp flow based on the difference between capacity downstream and upstream of the ramp, if the downstream occupancy of the highway is below the critical value; otherwise, a predetermined minimum ramp flow is used (Wattleworth, 1967).

- Occupancy-Capacity. If the mainstream occupancy (on the highway) at a point downstream of the merge area is below the critical occupancy, the metering rate is equal to the capacity minus the upstream demand; otherwise, a minimum metering rate is used (Wattleworth, 1967).

- ALINEA, is a feedback control strategy that uses real-time measurements of a given output to calculate appropriate values for input in real time, and then maintain output as close as possible to a given reference or target value. The objective of ALINEA is to keep traffic density on the highway equal to a given value $\hat{\rho}$. If full capacity of the infrastructure is targeted, $\hat{\rho}$ can be set equal to ρ_{cr} . In discrete time, the ALINEA control law is then as follows:

$$r(k) = r(k-1) + KR(\hat{\rho} - \rho(k)) \quad (1)$$

Where,

k = time interval.

$r(k)$ = ramp metering rate.

KR = ramp metering gain.

$\hat{\rho}$ = preset traffic density.

$\rho(k)$ = traffic density in interval k .

When traffic density on the highway becomes too high, the metering rate is reduced and vice versa. As Equation (1) shows, the control system responds to the changes in demand, but it does not anticipate them. This is an acknowledged limitation of ALINEA (Papageorgiou et al., 1991).

Coordinated reactive strategies are more efficient when there are multiple bottlenecks on the highway or when the storage capacity of the ramp is limited. These include multivariable control and optimal control strategies. Some examples are:

- ALINEA extensions, UP-ALINEA, PI-ALINEA, Queue control, Queue override, etc. (Papamichail et al., 2010).

- HERO (HEuristic Ramp metering coordination) is a reactive coordinated strategy for highways developed in 2006. It uses an extended version of the ALINEA feedback controller at the local level. HERO identifies active mainstream bottlenecks starting at a certain on-ramp, then creates a cluster with a master ramp and some slave ramps needed to meet the required storage capacity. This cluster is resolved when the occupancy of the master ramp is below a predetermined value (Papamichail et al., 2010).

- The Stratified Zone Algorithm consists of a three-layer hierarchical control structure: ramp, zone and system layer design. The strategy involves defining zone layers along the highway route from 0,5 km to approximately 5 km in length, calculating the metering rates for a confluence location according to the particular zone to which it belongs, and then selecting the most restrictive rate. This rate value is set as the rate for the location. In addition, the maximum allowed waiting times at on-ramps are set to a given value. The metering rule applied in this strategy is carried over to the ZONE metering concept, where the total inflow of vehicles onto a zone is balanced to the total outflow of vehicles from the section to avoid congestion (Zhang et al., 2001).

2.1.3 Proactive strategies

They are based on the prediction of traffic conditions within a determined period. These can be local or coordinated. Some examples are:

- Model Predictive Metering (MPC) is a proactive strategy that can be applied local or coordinated. It optimizes an objective function (such as TTS in the network) by using a highway traffic model to predict future behavior of the system for a given input sequence, by means of a receding horizon framework. Any parameter can be chosen for control and constraints can be considered as well. In a receding horizon framework, a prediction horizon is defined and metering rates are determined for each sample step by minimizing an objective function over that time period. Only the first calculated metering rate is applied to the ramp metering set-up, while the remaining are discarded and recalculated in a subsequent iteration (Bellemans et al., 2006).

- Nonlinear Optimal Metering can also be local or coordinated. It computes in real time an optimal and fair set of values for

control, given current freeway and on-ramp traffic conditions, demand forecasts, on-ramp capacity storage, infrastructure capacity, current incidents, etc. AMOC was developed to implement this strategy (Mangeas et al., 2000).

AMOC is an Advanced Motorway Optimal Control tool that combines a second-order macroscopic traffic flow model to simulate the load on the network, with a coordinated ramp metering control strategy formulated as a dynamic optimal control problem with constrained control variables that is solved numerically for given demands and turning rates over a time horizon (Benmohamed and Meerkov, 1994).

- Sperry Algorithm is a coordinated proactive strategy that was introduced in Arlington (TX, USA). It is based on the demand-capacity strategy (Kotsialos et al., 2004).

- Linear programming algorithm is a coordinated proactive strategy that formulates the control problem as a linear optimization problem, where the objective function is the maximization of the weighted sum of ramp flows. The weight parameter indicates the importance of every ramp (Kotsialos et al., 2004).

- METALINE is a coordinated proactive strategy that manages control measures with the same goal as local strategies. As a generalization and extension of ALINEA, it uses all available mainstream measures to compute the ramp metering rate of all controllable on-ramps along the same route. Experimental results show that METALINE offers no advantage over ALINEA for recurrent congestion (urban freeways with a high density of on-ramps). However, for non-recurrent congestion (due to incidents), METALINE performs better than ALINEA (Papageorgiou and Kotsialos, 2002).

2.1.4 Hierarchical Structure or Integrated freeway network traffic control.

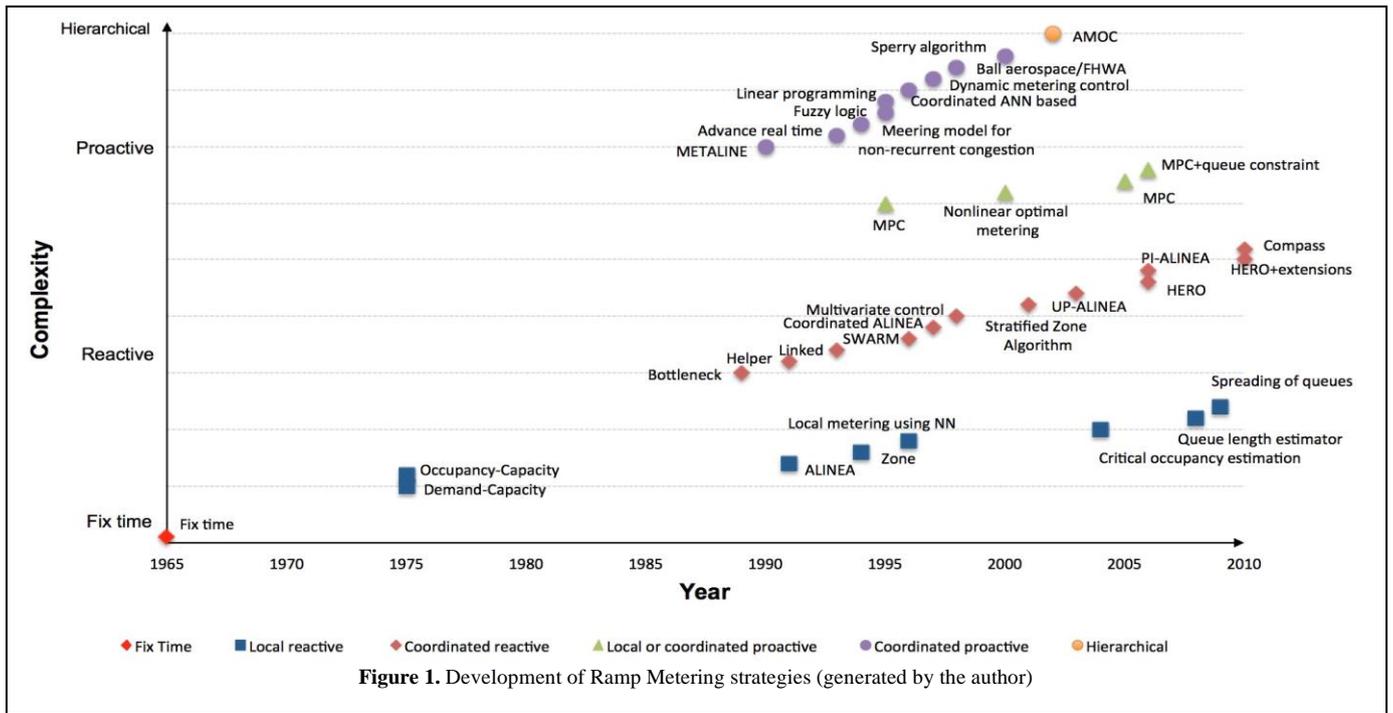
These complex structures combine different metering strategies and exploit the synergistic effects that exist among them. It consists of three basic layers:

- The estimation/prediction layer, which uses historical and real time information from sensors installed on the freeway network. It provides the current state estimation and future predictions of the disturbances.

- The optimization layer, which uses the information from the previous layer as input to solve the optimal control problem, giving as a result the optimal on-ramp outflows and its corresponding optimal state trajectory.

- The direct control layer, which uses a pre-specified control algorithm to realize the suggested policy on a local level (Srivastava, 2011).

Figure 1 shows a chronology of the various ramp metering strategies that have been developed. They have been classified according to the year of publication (x-axis) and the complexity of the ramp metering strategy (y-axis). As Figure 1 shows, existing research responds to a learning process in the development of ramp metering strategies, starting with fixed



time strategies that evolved into reactive strategies that showed some improvement in traffic conditions but had the disadvantage of becoming obsolete in a short period of time as traffic conditions changed. Then, the RM strategies evolved into proactive strategies which are able to anticipate the traffic changes through the control law due to their higher complexity and finally, the hierarchical structures take advantage of the progress of proactive strategies and also the synergy that can be achieved when different strategies are combined.

Moreover, there is a diversity of variants within the coordinated strategies (reactive or proactive), because there is evidence that local strategies are useful in cases where the traffic conditions of one ramp are independent of the traffic conditions of the other, but this is almost never the case in reality. Besides, the development of powerful computers has facilitated the development of algorithms for proactive strategies that are able to predict the occurrence of congestion and take measures to avoid it.

3. SELECTED LITERATURE

A total of 21 documents from articles, dissertations and manuals were analyzed, classified according to the ramp metering strategy analyzed and the year of publication. Since the goal of this work is to find out which ramp metering strategy achieves the highest gain in TTS in a given situation considering geometry, queue span, and type of bottleneck, almost all selected articles refer to at least two types of strategies that are compared in a case study. A brief description of each article is listed by RM strategy in a chronological order.

3.1 Fixed time strategies

In Papageorgiou et al. (1991), five different control strategies are compared with the no control scenario: static control (restriction in the flow entering from the ramp by physical

elements), demand-capacity INRETS (demand-capacity strategy using measurements from three mainstream detectors), demand-capacity, percent-occupancy and fixed time strategy. Traffic data were collected on 13 days per strategy. The stretch consists of 1 km, which includes an on-ramp and an off-ramp on the inner side of the southern part of BP Périphérique in Paris. Although the divergent effect is mentioned, it was not considered in the evaluation of each strategy. The divergent effect refers to the re-routing that some drivers make to avoid congestion or the control system.

3.2 Reactive strategies

3.2.1 Local

Wu and McDonald (2003) present an experiment in the South East of England to determine the influence of ramp metering on driver behavior. This was done by switching off the operating ramp metering system (ALINEA) in the study area for four weeks in 2001 and then switching it back on for the same period. To quantify this impact, various indicators such as the difference in travel time, speed, headway, acceleration and deceleration, number of lane changes, speed distribution, headway distribution, traffic flow distribution, distance to merge, accepted gap size, accepted deceleration size, and merge speed were quantified. Data were obtained from instrumented vehicles (instruments provide quantitative information on driver behavior upstream and downstream of merging roadway segments), video cameras (11 cameras provide quantitative information on merging vehicles and interactions with the main traffic), and loop detectors (located upstream of merging segments, they provide speed and headway in the zone upstream of the merge). As expected, the only statistically significant difference found in the study is the number of lane changes (from the merging lane to the other) is when the ramp metering system is in operation.

Kerner (2006) introduces an approach to congestion control labelled ANCONA, which is based on the fundamentals of

three-phase traffic flow theory (free flow, synchronized flow, and wide moving jam). Considering that the spillback effect of queues could block not only the upstream off-ramp but also the upstream on-ramp, ANCONA applies spatial confinement of congestion and uses the relatively high speed and larger discharge rate of synchronized flow to prevent the upstream propagation of congestion and reduce the waiting time at the traffic light in the on-ramp lane. Thus, the principle of ANCONA is to locate congestion arising at the bottleneck. The author tested the strategy on a two-lane highway section with a downstream bottleneck created by an off-ramp and an upstream bottleneck created by an on-ramp. The on-ramp and off-ramp merging sections are 0,5 and 0,6 km long, respectively. Traffic data were collected via two sets of detectors on the main highway control road.

Yasar et al. (2006) present the problem of the critical occupancy value, pointing out that if this value is lower than its actual value, the control law becomes overly conservative and leads to excessive waiting times at the on-ramps. On the other hand, if the value is set higher than the actual value, congestion on the freeway increases. To solve this problem, the authors developed C-MIXCROS and D-MIXCROS. These are two local feedback ramp metering strategies based on online estimates of critical occupancy. In the article, the authors use two methods proposed by Ozbay et al. (2006) for online critical density estimation using the Extended Kalman Filter and Kalman Filter techniques. These techniques take critical density as a state variable determined by downstream measurements of highway traffic. Through a simulation on an 11-mile corridor of the I- 295 highway in South Jersey, under various demand conditions, the authors show that MIXCROS strategies are very effective in reducing congestion on the isolated ramp system while keeping the on-ramp queue at an acceptable level.

Demiral and Celikoglu (2011) evaluate the performance of ALINEA at the approaches to the Bosphorus Strait bridges, for a time interval of one hour, and according to four demand patterns: constant, time-varying, sinusoidal, and real flow measurements. The findings supported decision-making regarding whether or not to build a third link between Europe and Turkey, due to excessive congestion on the existing O-1 and O-2 expressways. It was shown that the application of ramp metering enabled regulating the traffic pattern and maintaining traffic flow below the critical capacity of the existing road infrastructure. Moreover, after a brief description of various ramp management strategies, the authors argue for ramp metering as the best alternative. The study also reports some ramp metering algorithms as well as evaluation studies showing that the reduction of travel time in the mainstream can be counteracted by the increase of on-ramp delays by applying the algorithms HELPER, ZONE and BOTTLENECK within the microsimulation tool WATSIM. On the other hand, the evaluation of ALINEA, ZONE and BOTTLENECK with the PARAMICS microsimulation tool in this study yielded better results when the local occupancy control algorithm of ALINEA is replaced with the ZONE and BOTTLENECK algorithms. Further, ramp metering control is found to become less efficient during incidents. Finally, when evaluating METALINE, ALINEA and MIXCROS using micro and

macro simulation tools, D-MIXCROS and C-MIXCROS performed better than the rest.

Wang et al. (2014) explore the ramp metering capability of the Proportional Integral ALINEA (PI-ALINEA) variant. This variant is designed for cases where ALINEA does not perform well, such as bottlenecks not being activated by the merging ramp due to lack of capacity far downstream of the metering point. In this particular case, occupancy should be measured downstream at the congestion point rather than in the merge area. To avoid this, and given the location of the actual bottleneck downstream, PI-ALINEA uses an extended structure that allows the downstream occupancy measured in the merge area to be used. It is shown in Equation (2):

$$r(k) = r(k-1) - KP [O_{out}(k) - O_{out}(k-1)] + KR[\hat{o} - O_{out}(k)] \quad (2)$$

Where k is the time interval, KP and KR are regulator parameters. The value of k should be larger than the free flow travel time between the merge area and the real bottleneck. To this end, three distinct bottlenecks were considered: an uphill road section (insufficient lane capacity causing a bottleneck), a lane drop (while capacity of the other lanes is held constant) and an uncontrolled on-ramp (uncontrolled entering flow activates a bottleneck). Bottlenecks take place on a freeway stretch (5,5 km) with 3 lanes; each bottleneck of 1 km starts 1,5 km downstream of the on-ramp. The upstream on-ramp is localized at 2 km from the start of the stretch. Simulations demonstrated that values of $KR = 4 \text{ km.lane/h}$ and $KP = 100 \text{ km.lane/h}$ in Equation (2) are universally applicable, and are not sensitive to the location of the downstream bottleneck.

3.2.2 Coordinated

Papamichail et al. (2010) demonstrate the advantages of HERO over other heuristics control strategies. Firstly, HERO allows taking coordinated actions even though the strategy is locally implemented. Therefore, HERO is a simple, generic and transparent algorithm. As HERO is feedback based, it is less perturbed by unexpected disturbances. The physical settings of HERO are as follows:

Mainstream and on-ramp data are processed in the Data Processing module, the outputs of which are inputs to the Queue estimation module, the Critical occupancy estimation module, the Queue override module, and the ALINEA core module, where flow at the ramp exit ramp is calculated. The output of the Queue estimation module becomes input to the Queue control and Minimum queue control modules. At the same time, outputs of these two modules, along with outputs of the ALINEA Core and Queue Override modules become inputs to the Final Ramp Flow Specification module, whose output is finally the input to the Implementation module. The Fail-Safe module makes decisions when the measurement system fails, and can enable/disable turns signal control based on preset traffic conditions on the main flow.

Yuan et al. (2009) conduct tests on HERO/RWS, a variant of the original HERO algorithm developed for and implemented at the Ramp Metering System in Netherlands, which seeks shifting congestion on motorways by an effective usage of upstream on-ramps storage space. HERO /RWS locally uses a

variation of the demand-capacity algorithm, as it relies on highway flow and speed to calculate ramp flow. Model calibration is conducted based on three parameters (activation/deactivation parameters of HERO /RWS, critical speed, and flow of the freeway system), whereby robustness is tested by 12 simulation scenarios. Tests concluded that HERO /RWS cannot cope with traffic demand variations in congested networks, nor it is sensitive to speed changes or robust to flow variations. With respect to the ramp metering system, the authors conclude that upstream on-ramp coordination yields a less congestion, a higher mean speed, and lower travel time spent in the network. Hence, the authors note that coordination of the ramp metering system could be useful for closely spaced on-ramps with queues of unequal length. A stretch of the A10 ring road in Amsterdam was chosen for the simulation, which includes four consecutive on-ramps from the S105 to the Coen tunnel. The VISSIM micro simulator is used for model calibration and validation, by leveraging traffic data collected with double inductive loops during the evening peak period (15:30-18:00 h). Every on-ramp in the study is controlled by a ramp metering system. The bottleneck modelled took place downstream of the S101 on-ramp, reaching the S105 on-ramp upstream. This condition persisted throughout the whole simulation period.

Srivastava (2011) introduces the Stratified Zone Metering algorithm (SZM). The Minnesota Department of Transportation (MnDOT) uses this algorithm to control the level of congestion on highways, to study bottlenecks, and to understand the behavior of traffic breakdown and the response of traffic states to the metering patterns. The authors develop a methodology based on solving the differential equation in order to maintain traffic flow after intervening freeway mainlines. This analysis shows that the capacity of the bottleneck depends on the ratio between traffic flow at the mainline traffic and at the on-ramp bottleneck. Based on this finding, the author proposes a next generation Stratified Zone Metering algorithm (DSZM). This is a dynamic, zone-definition-based algorithm focusing on density rather than traffic flow, which allows overcoming the randomness of the current version by exploiting the stability of occupancy values near capacity. The study focuses on a 12-mile section of Trunk Highway 169 northbound (TH -169 NB), which traverses the western Twin Cities metropolitan region beginning at the I-494 interchange and ending at 63rd Avenue North. The section includes 10 weaving sections, 4 High Occupancy Vehicles (HOV) bypass ramps, 24 entrance ramps (17 metered), and 25 exit ramps. The roadway was modeled using the AIMSUM microsimulation tool, based on traffic data from the evening peak period.

Agarwal et al. (2015) propose a new method to perform coordinated ramp control. It is based on the relationship between freeway density just before the first merging, freeway density of the section between two consecutive ramps, and freeway density after the second merging. The method aims at keeping the aggregate traffic density on the freeway section equal to the critical density. The authors perform a ramp inflow rate control action upon occurrence of four different cases:

1. When upstream and downstream densities are lower than half of the critical density ($\rho_l \leq 1/2 \rho_r \leq 1/2 \rho_c$)

2. When upstream and downstream densities are higher than the critical density ($\rho_l \geq \rho_r$ and $\rho_r \geq \rho_c$).
3. The upstream density is lower than the critical density and the downstream density is higher than the critical density ($\rho_l \leq \rho_r$ and $\rho_r \geq \rho_c$).
4. The upstream density is higher than the critical density and the downstream density is lower than the critical density ($\rho_l \geq \rho_r$ and $\rho_r \leq \rho_c$).

Ramp data at the intersection of I-15 NB and Tropicana and at the intersection of I-15 NB and Flamingo in Las Vegas were collected on a Thursday from 6 a.m. to noon. The on-ramps are controlled using data from the freeway sensors. The proposed control law allows a very close approximation to the target density, both at the freeway section between the two ramps, and after the second ramp as well.

3.2.3 Local and coordinated

Papageorgiou et al. (2007) highlight the importance of correctly estimating ALINEA parameters, pointing out that this strategy control variable consists of the on-ramp downstream occupancy (o_{out}), while a critical factor to consider is the location in which it is measured. Also, UP-ALINEA is presented as a solution to overcome the need for sensors downstream of the on-ramp to measure o_{out} . UP-ALINEA is able to use measurements of upstream occupancy (o_{in}) to estimate the downstream occupancy (o_{out}) required to apply the control strategy. The approach is based on the following equation:

$$\tilde{o}_{out} = \alpha o_{in} \left(1 + \frac{q_r}{q_{in}}\right) \frac{\lambda_{in}}{\lambda_{out}} \quad (3)$$

In Equation (3), α is a calibration parameter close to 1 and λ is the number of lanes (in=upstream, out= downstream of the on-ramp).

On the other hand, the authors warn about the inadequacy of microscopic models to simulate lane change behavior occurring in merged areas, which could lead to unexpected results.

Li and Ranjitkar (2013) rely on two performance indicators, total travel time and the Gini coefficient, to measure network efficiency and equity properties arising from the application of ramp metering and Variable Speed Limits (VSL). Considering that previous studies such as Zhang and Levinson (2004) and Shen and Zhang (2010) test the effect of control strategies on these properties without reaching consensus, the authors test ALINEA and HERO with the microsimulation tool AIMSUM to enhance previous results. The Gini coefficient is useful to analyze the degree of inequality in a given distribution. A value of 1 represents perfect equality, while 0 represents perfect inequality. This coefficient is calculated by the following expression:

$$G = \frac{1}{\bar{\tau}^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |\tau_i - \tau_j| \quad (4)$$

Where G is the Gini coefficient, $\bar{\tau}$ is the average delay time of all on-ramps, τ_i is the delay in on-ramp i , τ_j is the delay in on-ramp j and n is the number of on-ramps. Furthermore, VSL is

deployed in the mainstream by deploying a flow-based algorithm, which creates a buffer that allows safe merging for the traffic entering to the mainline.

The case study analyzed is a critical bottleneck section on State Highway 1 of the Auckland Motorway, connecting central Auckland to northern Auckland. This section has 5 on-ramps and 4 off-ramps towards Auckland city center. Traffic data is provided by the New Zealand Transport Agency (NZTA), including loop detector readings collected over 30-second periods at on-ramps, at off-ramps, and on the main road. Model calibration is conducted with the Geoffrey E. Havers (GEH) statistic based on data collected on Monday 12, March 2012, while model validation (also with GEH) is conducted with data collected on Friday 9, March 2012.

Donné (2015) studies buffering strategies to eliminate congestion on a ring road network through an application of optimal traffic management strategies that focus on avoiding Blocked Off-Ramps (BORs). Thus, ramp metering is applied to regulate the inflow that could trigger bottlenecks on the ring road. In addition, General Purpose Lanes (GPL) and Target Group Lanes (TGL – which allow free flow traffic) are utilized to improve traffic conditions for drivers that do not contribute to the creation of bottlenecks. The heavily congested Brussels Ring Road network is used to evaluate the proposed strategy, as a reasonable number of off-ramps are blocked on this ring road during peak hours. The inner and outer ring roads have a length of approximately 49 km, divided into individual links with an average length of 556 m. The length of the outer ring road is approximately 50 km. A total of 45 on-ramps and 46 off-ramps are directly connected to the inner and outer ring roads. Morning rush hour traffic data was used to test the control strategies.

Gains in total travel time spent on the network are determined from evaluation of 16 scenarios differing in the composition of the target groups, in the metering system, and with/without consideration of the capacity drop effect. When this effect is considered, 10% additional bottleneck capacity was considered for simplicity. Finally, the necessary infrastructure to establish the bypass for the TGL is outlined in general terms.

3.3 Proactive strategies

Papageorgiou and Kotsialos (2002) formulate in detail the problem of discrete-time optimal control (integrated in AMOC) considering ramp metering. This demonstrates the need for a proactive coordinated control strategy that utilizes all available storage capacity in the infrastructure (on-ramps and highways) to manage congestion in a more efficient and balanced manner.

The control strategy is tested by simulating the A10 ring road in Amsterdam. It consists of four main links and 2 tunnels. The simulation is conducted with traffic data from the evening peak, and only considers the counterclockwise direction of the A10, comprising 21 on-ramps and 20 off-ramps.

Papageorgiou et al. (2003) present some reasons for the theory-practice gap in the field of control networks. Among other, the authors highlight a bureaucratic and reactive

administrative system which is iron-clad in doing things in conventional ways, conflicting interests between stakeholders, the complexity of advanced control systems, and the lack of knowledge of competent authorities. Moreover, the control loop problem is presented to explain how the efficiency of the network can be improved through an appropriate application of control strategies. From a practical standpoint, a field application for an on-ramp in the southern part of Boulevard Périphérique in Paris is used to show the advantages of ALINEA over demand-capacity control and occupancy-capacity control strategies. Finally, a simulation of the network-wide application of optimal ramp metering on the A10 ring road in Amsterdam is used to demonstrate the performance of the proactive coordinated control AMOC.

The European Ramp Metering Project, in its deliverable D2.2, gives an overview of the application and development of ramp metering systems in Europe until 2004 (Kotsialos et al., 2004). Eight applications are described: An isolated ramp in the middle of the A94 inner-city motorway ring in Munich; a virtual site on the A9 motorway north of Munich, where local traffic performance measurements from the on-ramp and mainline are used as input for control; the S101 on-ramp before the Coen tunnel to the A10-West motorway (part of the motorway ring around Amsterdam); a Delft-Zuid on-ramp onto the A13 highway towards Rotterdam, causing disruption to motorway traffic due to the merging process; the A28-De Uithof, A2-Maarssen Oost and A2-Breukelen West ramps in Utrecht; five main motorway sections in the southern part of the "Ile de France" in Paris; two J10 and J9 ramps on the M6 motorway in the UK; and a section on the Ayalon Highway (Telaviv-Israel) comprising 16 on-ramps and 17 off-ramps in both directions. These sites tested ALINEA, the adaptive fuzzy system for traffic responsive and coordinated ramp metering, demand-capacity and occupancy-capacity approaches.

Kotsialos and Papageorgiou (2004) test AMOC on the A10 ring road in Amsterdam (21 on-ramps and 20 off-ramps) to see if this ramp metering strategy provides efficient and fair control. AMOC achieves an optimal trade-off between reducing delay due to the reduction of the amount of congestion (main road), and increasing delay due to the metering system (on-ramps and off-ramps) that allows vehicles to exit before reaching the bottleneck. In addition, AMOC also achieves equity as it imposes maximum queuing constraints to distribute the delays experienced by drivers in the controlled on-ramps in a balanced manner. On the other hand, the experiment shows that not using the storage capacity provided by the freeways leads to severe underutilization of the freeway infrastructure during congestion.

Bellemans et al. (2006) use ALINEA and a controller based on MPC to define appropriate on-ramp metering rates. The authors simulate a 9 km stretch of the E17 motorway Ghent-Antwerp to test the control strategy. This stretch has 4 off-ramps, 5 on-ramps, and a tunnel underneath the river Scheldt. Traffic data corresponds to the morning peak hour. After the simulation, the authors show that metering rates, the evolution of average speed, and traffic density are much smoother with the MPC application. MPC takes the queue constraint as a hard constraint, meaning it is strictly respected in the optimization problem, whereas ALINEA resorts to a minimum imposed

popular, not only because of its algorithmic simplicity, but also because it performs very well compared to other strategies.

The development of powerful computer systems has facilitated the use of proactive strategies, which have the advantage of overcoming weaknesses of reactive strategies, and therefore promise greater benefits over a long period of time. However, these strategies require more and higher-quality data sources for collecting input data. The limitation of proactive strategies is that they do not exploit synergies among different control systems.

Instead of proactive strategies, hierarchical structures can accommodate a mix of control strategies, strengthening their advantages and mitigating disadvantages as well. Deploying such structures requires more complex algorithms and systems for determining the input data required as well as for calculating and delivering the outputs sought.

It is important to note that coordination of upstream on-ramps should result in network benefits such as less congestion, higher average speed, and reduced travel time. In addition, not utilizing the storage capacity provided by freeway-to-freeway intersections could result in underutilization of freeway infrastructure during congestion, worsening traffic conditions in the system.

In addition to the type of strategy, improving traffic conditions through the use of ramp metering depends on correctly identifying the causes behind a bottleneck activation, as well as the location where congestion manifests. This information is also useful in determining the location where measurements should be taken for determining control parameters, such as occupancy upstream and downstream of the bottleneck.

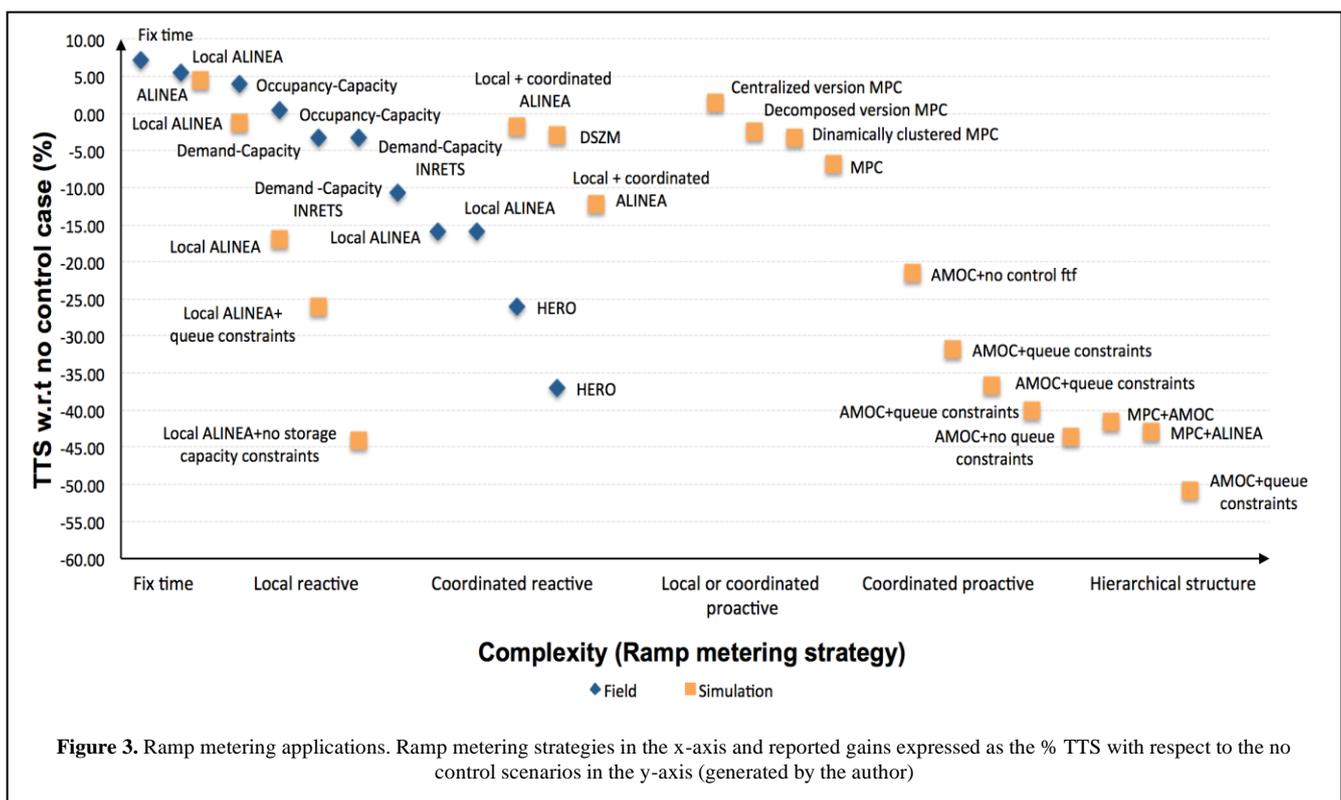
Finally, it is important to be aware that relying on models to simulate the performance of ramp metering strategies could lead to incorrect results, as they are not able to adequately represent some effects that occur in reality, such as lane change behavior. Therefore, it is advisable to complement simulation results with real observations. Figure 3 shows the gains reported in the selected literature (in terms of reduction of total travel time on the network compared to the scenario without control). They have been classified according to the ramp metering strategy applied.

4. CONCLUSIONS

The application of ramp metering achieves relevant gains on heavily congested freeways with many ramps, where a trade-off between reducing the travel time of the main traffic and the waiting time on the on-ramps can be efficiently achieved. In this sense, considering queuing constraints helps to achieve a balanced distribution of queues in the system.

Local strategies are useful on ramps whose traffic flow is not affected by other ramps, either because the distance between them is very large or because it is not possible to use another ramp to reach the same origin-destination pair.

The analysis of the case studies revealed that proactive, coordinated and hierarchical structures are the most appropriate ramp metering strategies for highways where bottlenecks are caused by excessive demand, combined with geometric features such as different lane configurations and many ramps within the route – all these congestion-generating features normally result in long queues and block upstream ramps. The mentioned strategies incorporate a control law based on historical and real-time data, while also being able to anticipate traffic response, since the control law updates



control parameters in each iteration. Moreover, they are able to predict the onset of congestion by anticipating queue formation and thus avoiding bottleneck activation. Further, these strategies allow consideration of additional constraints such as queue length or waiting time to limit the length of queues that could block upstream ramps. Finally, they are able to coordinate other ramps using all spare capacity (freeway-to-freeway intersections and urban on-ramps).

Developing algorithms to apply proactive coordinated and hierarchical structures in real time and in real networks is crucial, so it is essential that such algorithms are capable of achieving convergence within a few seconds.

Factors that deserve special attention when applying ramp metering strategies are quality of input data, the location where the data is collected, correct identification of bottlenecks, and the flow that contributes to the activation of the bottleneck.

The benefits of using ramp metering consist of an early identification of bottlenecks and the prevention or reduction of the capacity drop effect. Additional benefits come from the ability of ramp metering to decrease the spillback of queues, preventing blockage of upstream ramps. Other benefits include increased safety, efficient use of capacity, and increased network efficiency. Regarding the disadvantages of using RM, the authors highlight the spill back of queues onto the local road network, the need for enforcement, and the displacement of bottlenecks in the network.

Aspects that should be analyzed are the impact of the change in the split fraction between the main stream and off-ramp flow, on the allocated gains, as a consequence of the application of ramp metering; and the impact of ramp metering on travel behavior in terms of adjustment of departure times and driver awareness of changes in the traffic regime.

ACKNOWLEDGEMENTS

The author would like to thank SENESCYT for the financial support, without which this study would not have been possible.

REFERENCES

- Abadi A. Ioannou P.A. and Dessouky M.M. (2016). Multimodal dynamic freight load balancing. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 17(2),356–366. <https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2475123>
- Agarwal S. Kachroo P. Contreras S. & Sastry S. (2015). Feedback-coordinated ramp control of consecutive on-ramps using distributed modeling and Godunov-based satisfiable allocation. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(5), 2384–2392. <https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2398453>
- Bellemans T. De Schutter B. and De Moor B. (2006). Model predictive control for ramp metering of motorway traffic: A case study. *Control Engineering Practice*, 14(7):757–767. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2005.03.010>
- Benmohamed L. & Meerkov S. (1994). Feedback control of highway congestion by a fair on-ramp metering. *Proceedings of the 33rd IEEE Conference on Decision and Control*, 3, 2437–2442. DOI: 10.1109/CDC.1994.411448
- Butakov V. & Ioannou P. (2015). Personalized driver/vehicle lane change models for adas. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, , 64(10),4422–4431. doi: 10.1109/TVT.2014.2369522.
- Calle Heredia X. C. Barriga C. H. Piedra D. I. Oleas G. D. & Flor A. (2019). Monitoring system for intelligent transportation system based in zigbee. *2019 UNSA International Symposium on Communications (UNSA ISCOMM)*, 1-6. IEEE.
- Caltrans District7. (2006). *Ramp Metering Annual Report*. Technical report, Los Angeles and Ventura Counties.
- Cutipa Luque J. P. and Lozano Laffore E. (2020). *Optimización del Comportamiento Operacional de una Intersección Tipo Trébol aplicando SemafORIZACIÓN Inteligente con la Metodología Ramp Metering*. Tesis de pregrado. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC).
- Demiral C. and Celikoglu H. B. (2011). Application of aline ramp control algorithm to freeway traffic flow on approaches to bosphorus strait crossing bridges. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 20:364–371.
- Donné J. (2015). *Exploring buffer strategies to prevent ring road congestion*. KU Leuven . Master Thesis, KU Leuven.
- European Environment Agency. (2019, December). *Size of the vehicle fleet*. Retrieved December 8, 2021, from <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/size-of-the-vehicle-fleet/size-of-the-vehicle-fleet-10>
- Günther G. Coeymans J. E. Muñoz J. C. and Herrera J. C. (2012). Mitigating freeway off-ramp congestion: A surface streets coordinated approach. *Transportation research part C: emerging technologies*, 20(1), 112-125.
- Horton G. Hitchcock G. Chiffi C. Martino A. Doll C. Zeidler V. BruhovaFoltynova H. Sperat Z. Jordova R. Roumboutsos A. and Skinner I. (2016). *Research Theme Analysis Report-Urban Mobility*. Technical report, European Union.
- Kerner, B. S. (2006). Probabilistic nature of breakdown phenomenon and on-ramp metering in three-phase traffic theory. *IFAC Proceedings*, 39(12), 273-278. Doi: 10.3182/20060829-3-nl-2908.00048
- Kotsialos A. and Papageorgiou M. (2004). Efficiency and equity properties of freeway network-wide ramp metering with amoc. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 12(6):401–420.
- Kotsialos A. Kosmatopoulos E. and Papageorgiou M. (2004). *Deliverable d2.2: Current status of ramp metering/european ramp metering project*. . EURAMP IST-2002-23110, contract n. 507645.
- Kotsialos A. Papageorgiou M. and Middelham F. (2005). Local and optimal coordinated ramp metering for freeway networks. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 9(4):187–203. DOI: 10.1080/15472450500237296
- Li D. and Ranjitkar P. (2013). Assessing ramp metering and variable speed limits strategies for Auckland

- motorway. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 10(0):1856–1871.
- Lu X.Y. Varaiya P. Horowitz R. Su D. and Shladover S. (2011). Novel freeway traffic control with variable speed limit and coordinated ramp metering. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2229),55–65. <https://doi.org/10.3141/2229-07>
- Mangeas M. Haj-Salem H. Kotsialos A. and Papageorgiou M. (2000). Application of a nonlinear coordinated and integrated control strategy to the ile-de-france motorway network. . *Transportation Research*.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). (2018). *Manual de Carreteras: Diseño Geométrico DG*. Perú. Retrieved from https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual.de.Carreteras.DG-2018.pdf
- Noreña-Moreno L. (2017). *Control jerárquico para redes de tráfico urbano*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín Facultad de Minas Escuela de Ingeniería Eléctrica y Mecánica.
- Ozbay K. Yasar I. & Kachroo P. (2006). Development and Evaluation of On-Line Estimation Methods for Feedback Based Freeway Ramp Metering Strategy. *85th TRB Annual Meeting*.
- Papageorgiou M. and Kotsialos A. (2002). Freeway ramp metering: An overview. . *IEEE Transactions on Intelligent Transportation systems*, vol. 3, No. 4, 271–281. Doi: 10.1109/TITS.2002.806803.
- Papageorgiou M. Diakaki C. Dinopoulou V. Kotsialos A. and Wang Y. (2003). Review of road traffic control strategies. *Proceedings of the IEEE*, 91(12):2043–2067. Doi: 10.1109/JPROC.2003.819610.
- Papageorgiou M. Hadj-Salem H. and Blossville J.M. (1991). Alinea: A local feedback control law for on ramp metering. *Transportation Research Record*, 1320.
- Papageorgiou M. Kosmatopoulos E. Papamichail I. and Wang Y. (2007). Alinea maximises motorway throughput an answer to flawed criticism. *Traffic Engineering and Control*, 48(6):27.
- Papamichail I. Papageorgiou M. Vong V. and Gaffney J. (2010). Heuristic ramp metering coordination strategy implemented at monash freeway, Australia. . *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2178):10–20. <https://doi.org/10.3141/2178-02>
- Rinaldi M. Himpe W. and Tampère C. M. (2016). A sensitivity-based approach for adaptive decomposition of anticipatory network traffic control. . *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 66, 150-175. Doi: 10.1016/j.trc.2016.01.005
- Shen W. and Zhang H. M. (2010). Pareto-improving ramp metering strategies for reducing congestion in the morning commute. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 44(9), 676-696. DOI:10.1016/j.tra.2010.07.002
- Srivastava A. (2011). *Development of next generation ramp metering algorithm based on freeway density*. Master Thesis, University of Minnesota.
- VRTNWS: Laenen W. and De Roy L. (2017, December 30). *vrt.be*. Retrieved 2021, from <https://www.vrt.be/vrtnws/nl/2017/12/29/2017-was-een-recordjaar-voor-files/>
- Wang Y. Kan Y. Papageorgiou M. and Papamichail I. (2014). Local ramp metering with distant downstream bottlenecks: A comparative study. *IEEE 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, (pp. 768–773).
- Wattleworth J. A. (1967). Peak period analysis and control of a freeway system/with discussion. *Highway Research Record*, 157.
- Wu J. & McDonald M. (2003). Ramp metering: How does it impact the traffic on motorway intersections? *10th World Congress on Intelligent Transport Systems and Services, 16 - 20 Nov 2003*. Madrid. Retrieved from <http://eprints.soton.ac.uk/id/eprint/53738>
- Yasar I. Ozbay K. and Kachroo P. (2006). Evaluation of the system-wide effects of online estimation methods on feedback-based coordinated ramp. *Control in Transportation Systems, volume 11,*, (pp. 113–118).
- Yuan Y. Daamen W. Hoogendoorn S. and Vrancken J. (2009). Coordination of agent-based control in a freeway network. *2009 Chinese Control and Decision Conference, IEEE*, (pp. 2273–2279).
- Zambrano A. Calderon X. Ortiz E. & Zambrano O. (2019). Intelligent Heterogeneous Transportation System in Quito city under the paradigm SWE-SOS standard and IoT notifications. . *2019 14th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*, 1-6- IEEE.
- Zambrano A. Zambrano M. Ortiz E. Calderón X. & Botto-Tobar M. (2020). An intelligent transportation system: The Quito city case study. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 10(2), 507-519.
- Zambrano G. R. and Senti V. E. (2016). Framework for designing an ITS architecture in Ecuador that improves the interoperability and deployment of vehicular traffic control systems. *International Journal of Innovation and Applied Studies* 14(4), 886.
- Zhang L. and Levinson D. (2004). Optimal freeway ramp control without origin–destination information. *Transportation Research Part B: Methodological*, 38(10), 869-887. DOI:10.1016/j.trb.2003.11.003
- Zhang M. Kim T. Nie X. Jin W. Chu L. and Recker W. (2001). Evaluation of on-ramp control algorithms. *California Partners for Advanced Transit and Highways (PATH)*.
- Zhang Y. & Ioannou P.A. (2016). Combined variable speed limit and lane change control for highway traffic. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18(7), (pp. 1812-1823). Doi: 10.1109/TITS.2016.2616493

BIOGRAPHIES



Patricia Cazorla, Master in logistics, transit and intelligent transport systems from KU Leuven, Belgium, she is a Civil Engineer from the University of Cuenca, has a diploma in Sustainable Urban Transport Systems from the International Center for Interdisciplinary Studies, Peru, has 6 years of experience in preparing pre-contractual and contractual documents for public works

and 10 years of experience in mobility systems. She previously worked as coordinator of the integrated transport system in the Department of Mobility of the GAD Cuenca. Since 2017 she is a full-time research professor at the University of Cuenca.



Francisco Calderón, currently works for the University of Cuenca (Ecuador), as a contract-based expert-level researcher for the “Models, Simulation and Analysis of Transport Systems (MAS)” group. He holds a PhD in Transportation, and a Master of Engineering in Cities Engineering and Management (CEM) – Transportation Specialization; both from the University of Toronto (Canada). He holds a bachelor degree in Civil Engineering from the University of Cuenca.

His current research focus covers transportation emissions, transportation&COVID-19, and shared mobility. His doctoral work focused on agent-based microsimulation of: mobility services, Mobility as a Service (MaaS), service provision and operations, ridehailing, and ridehailing drivers’ behavior.



Elina Avila-Ordóñez, Systems Engineer graduated from the University of Cuenca, she developed her master’s studies at the National University of La Plata in Argentina, obtaining a Master’s degree in Software Engineering. She works as Professor-Researcher at the University of Cuenca.

Previously, she has directed the School of Computer Science and has worked as director of research projects and specialized consulting in the area of mobility. She is completing her doctoral studies at the KU Leuven University in Belgium in the area of Transportation Engineering. Her areas of interest are mathematical modeling, software and mobility.

Estudio de Confiabilidad en Diodos Basados en AlGaN/GaN Durante el Estado de Encendido

Acurio, Eliana^{1,2,*} ; Trojman, Lionel^{2,3} ; De Jaeger, Brice⁴ ; Bakeroot, Benoit^{4,5} 

¹Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Física, Quito, Ecuador

²Universidad San Francisco de Quito, IMNE, Quito, Ecuador

³Instituto de Electrónica de París ISEP, LISITE, París, Francia

⁴imec, Lovaina, Bélgica

⁵Universidad de Gante, Gante, Bélgica

Resumen: Este trabajo tiene como objetivo estudiar la degradación de los diodos de barrera Schottky (SBD) con una terminación de borde cerrado (GET) bajo condiciones de estrés en estado de encendido en tecnologías de 200V y 650V. Después de todos los experimentos de estrés, se observa un comportamiento recuperable, que indica el atrapamiento de cargas en defectos preexistentes y no creación de nuevas trampas. Un análisis estadístico amplio demuestra una mayor confiabilidad y una vida útil más larga en comparación con trabajos anteriores en una tecnología de 200 V. Para la tecnología de 650V, se analizaron variaciones en el ánodo como una doble capa GET y el uso de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ como dieléctrico. Se obtuvo una menor degradación total en el segundo caso gracias a la compensación entre los mecanismos de resistencia de encendido (R_{ON}) y voltaje de encendido (V_{TON}). Se observan algunas diferencias sistemáticas en la degradación de los parámetros según la ubicación de la oblea, probablemente causadas por variaciones relacionadas con el proceso. Mediante el uso de la técnica de pares coincidentes (MP), se ha demostrado que se pueden obtener distribuciones de probabilidad caracterizadas por pendientes de Weibull únicas sobre la oblea que podrían permitir una mejor caracterización de la confiabilidad intrínseca de estos dispositivos.

Palabras clave: AlGaN/GaN, barrera Schottky, confiabilidad, diodos, intrínseco.

Reliability Study on Diodes Based on AlGaN/GaN During the On State

Abstract: This work aims to study the degradation of Schottky Barrier Diodes (SBD) with a gated edge termination (GET) under On-state stress conditions in 200V and 650V technologies. After all the stress experiments, a recoverable behavior is observed, which indicates the trapping of charges in pre-existing defects and no creation of new traps. An extensive statistical analysis demonstrates higher reliability and longer lifetime compared to previous work on 200V technology. For 650V technology, variations in the anode as a double layer GET and the use of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ as dielectric were analyzed. Less total degradation was obtained in the second case thanks to compensation between the on-resistance (R_{ON}) and the turn-on voltage (V_{TON}) mechanisms. There are some systematic differences in the degradation of the parameters according to the location of the wafer, probably caused by variations related to the process. By using the matched pairs (MP) technique, it has been shown that probability distributions characterized by unique Weibull slopes on the wafer can be obtained and this could allow a better characterization of the intrinsic reliability of these devices.

Keywords: AlGaN/GaN, Schottky barrier, diodes, intrinsic, reliability.

1. INTRODUCCIÓN

Los dispositivos basados en Nitruro de Galio (GaN) son cada vez más atractivos en la electrónica de potencia ya que en combinación con el Nitruro de Aluminio y Galio (AlGaN) pueden formar heteroestructuras con un canal bidimensional de gas de electrones (2 DEG) evitando procesos de dopaje y aumentando la movilidad en el canal (Morkoç et al., 1994). Sin

embargo, hay requisitos necesarios que debe cumplir una nueva tecnología de semiconductores para su amplia adopción en los sistemas de conversión de energía.

El primero es la eficiencia, y GaN ha demostrado una completa superioridad sobre el silicio (Si) debido a sus notables características electrónicas, lo que resulta en dispositivos de rápida conmutación que permiten el diseño de convertidores

*eliana.acurio@epn.edu.ec

Recibido: 01/12/2020

Aceptado: 12/04/2022

Publicado en línea: 25/05/2022

10.33333/rp.vol50n1.03

CC 4.0

de alta eficiencia con baja pérdida de potencia (Alatawi, et al., 2018), (Hughes et al., 2011), (Wu et al., 2008).

El segundo es la rentabilidad. Si bien la comparación directa de costos entre las tecnologías de semiconductores es complicada debido a todos los elementos que influyen en el costo final (crecimiento epitaxial, fabricación de obleas y ensamblaje), podemos mencionar que uno de los inconvenientes de los dispositivos basados en esta tecnología es el costoso crecimiento homoepitaxial sobre sustratos de GaN. Por lo tanto, se han utilizado obleas más asequibles basadas en sustratos de silicio (GaN-on-Si) para hacerlo más competitivo en los rangos de bajo voltaje (~ 600V), pero esto hace que el dispositivo sea más vulnerable a la creación de defectos debido a la diferencia en los coeficientes de expansión térmica y al desajuste en la red (lattice) de ambos materiales (Marcon et al., 2015; Cheng et al., 2016).

El último requisito es la confiabilidad a largo plazo, es decir, la probabilidad de que el dispositivo opere correctamente en condiciones normales de funcionamiento para la vida útil prevista (Hartzell et al., 2011). La complejidad de los estudios de confiabilidad radica en que el rendimiento del dispositivo es altamente dependiente de los pasos de fabricación, el crecimiento epitaxial, las técnicas de caracterización y la variabilidad entre dispositivo y dispositivo, lo que dificulta tener una comprensión completa de los fenómenos de degradación y un consenso sobre la física detrás de los mecanismos de falla. De forma particular, los diodos de potencia basados en GaN requieren altos voltajes de ruptura (V_{BD}) en combinación con valores bajos de voltaje de encendido (V_{TON}), resistencia de encendido específica ($R_{ON,sp}$) y corrientes de fuga para reducir las pérdidas de energía y problemas potenciales de confiabilidad.

En los últimos años, se han intentado varios enfoques de procesamiento para mejorar el rendimiento del rectificador/diodo GaN-on-Si. Por ejemplo, se han adoptado estructuras usando placas de campo (field plates) simples y múltiples para aumentar el voltaje de ruptura en los diodos de barrera Schottky (SBD) y para evitar una ruptura prematura (Hori et al., 2009). Para disminuir las corrientes de fuga, se ha demostrado que el máximo campo eléctrico ubicado en la esquina del contacto de Schottky (zona del ánodo) se reduce al introducir una capa de Si_3N_4 para crear una terminación de borde cerrado (gated edge termination-GET) (Lenci et al., 2013).

Estudios recientes bajo estrés en estado de apagado en esta estructura han demostrado una falla relacionada a la concentración del campo eléctrico en áreas críticas como la esquina del dieléctrico que forma el GET y el borde del contacto Schottky. Se han obtenido mejoras de confiabilidad debido a una mejor distribución del campo eléctrico utilizando una capa de pasivación más delgada, una segunda capa GET, un mejor proceso de limpieza previo a la deposición en la región del contacto Schottky y una capa de cobertura de Si_3N_4 (Acurio et al., 2018; Acurio et al., 2019).

Si bien, los diodos de barrera Schottky con terminación de borde cerrado (GET-SBDs) han demostrado una buena confiabilidad del dispositivo bajo estrés en estado de

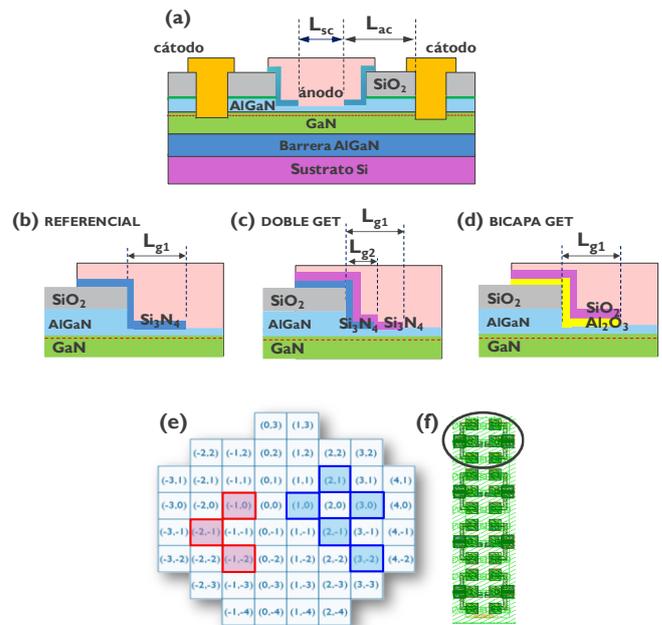


Figura 1. Esquemas simplificados de (a) los GET-SBDs utilizados para el análisis de estrés en estado de encendido. Estructura en la zona GET en (b) diodos referenciales, (c) diodos con una doble capa (Si_3N_4) y (d) diodos con una bicapa Al_2O_3/SiO_2 . (e) Distribución de matrices en la oblea mostrando en color azul la ubicación de los diodos medidos del lado derecho y en rojo los del lado izquierdo. (f) Diodos ubicados muy cerca dentro de una misma matriz para las mediciones de pares coincidentes

encendido utilizando diferentes condiciones y considerando una variedad de geometrías (Tallarico, Stoffels, et al., 2016), (Tallarico, Magnone, et al., 2016), la renovada estructura de GET-SBD, que permitió la mejora mencionada anteriormente en condiciones de estado de apagado (Acurio et al., 2018), aún no se ha verificado bajo estrés en estado de encendido. Por lo tanto, la relevancia de este trabajo radica en predecir correctamente la vida útil de GET-SBDs fabricados en una plataforma tecnológica GaN-on-Si de 200V y 650V. También, en este estudio se busca demostrar que los GET-SBDs exhiben variaciones lo suficientemente bajas para realizar un análisis estadístico y extraer un componente intrínseco que no varía mucho con la ubicación sobre la oblea, lo que permitirá futuros estudios de confiabilidad intrínseca.

El resto del artículo está organizado de la siguiente manera: en la sección 2, proporcionamos los detalles de los dispositivos bajo prueba (DUT); en la sección 3 se explica la metodología de caracterización; en la Sección 4, presentamos y discutimos los resultados del análisis experimental; finalmente, en la Sección 5 se resumen los principales logros de este trabajo.

2. FABRICACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS

La estructura simplificada de los diodos AlGaIn/GaN estudiados en este artículo se muestra en la Figura 1 (a). La estructura epitaxial de la oblea de diámetro se hace crecer sobre un sustrato de Silicio por medio de deposición de vapor químico orgánico metálico (MOCVD). Cuenta con un sustrato diseñado para dos diferentes tecnologías, 200V y 650V. Los dispositivos tienen un canal de GaN de 300 nm de espesor, un espaciador de AlN de 0,5 nm de espesor, una barrera de $Al_{0.25}Ga_{0.75}N$ de 10 nm de espesor, y una fina capa

de Si₃N₄ de 5 nm de espesor. A continuación, el sustrato se pasiva con una capa de SiO₂ y en la región del ánodo, esta capa de pasivación es removida para dar paso al proceso de grabado (etching) que reduce la barrera aproximadamente 6 nm. La estructura GET en las obleas referenciales de ambas tecnologías se obtiene depositando una capa de Si₃N₄ de 45 nm de espesor mediante deposición de capa atómica potenciada por plasma (PEALD) con una posterior apertura por grabado en la región central con una longitud L_{sc} = 5 μm, lo que da como resultado una longitud de terminación de L_{g1} = 1 μm y una distancia ánodo-cátodo de L_{ac} = 6 μm en la tecnología de 200 V y de L_{g1} = 2 μm y L_{ac} = 16 μm en la tecnología de 650 V (ver Figura 1 (b)). A continuación, se deposita y se graba metal a base de TiN sin Au para formar el contacto Schottky en la región del ánodo. Finalmente, los contactos óhmicos se fabrican utilizando una estructura de metal a base de Ti/Al. En el caso de la tecnología de 650 V, se tiene dos obleas adicionales con modificaciones en la zona GET. La primera variación es la deposición y grabación de una capa adicional de Si₃N₄ antes de la capa GET principal (ver Figura 1 (c)). En la segunda variación, se deposita una capa interfacial (IL) de 2,5 nm de espesor de Al₂O₃ seguida de una capa de SiO₂ de 35 nm de espesor (ver Figura 1 (d)).

3. METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN

Las curvas IV de varios diodos en diferentes ubicaciones de las obleas demostraron un excelente desempeño en la caracterización de corriente continua (CC) a 150 °C que es la temperatura usada para acelerar la degradación y considerar el peor de los escenarios para los dispositivos. La Tabla 1 resume los valores medios del voltaje de encendido V_{TON} (voltaje ánodo-cátodo V_{ac} extraído a 1 mA/mm), el voltaje directo V_F (V_{ac} a 100 mA/mm) y la resistencia de encendido R_{ON} que es la máxima pendiente de la curva IV.

Tabla 1. Valores medios de los parámetros de caracterización CC

Tecnología	Oblea	V _{TON}	V _F	R _{ON}
200V	Referencial (Si ₃ N ₄)	0,53 V	1,32 V	3,84 ohm.mm
	Referencial (Si ₃ N ₄)	0,60 V	1,83 V	9,02 ohm.mm
600V	Doble GET (Si ₃ N ₄ +Si ₃ N ₄)	0,56 V	1,98 V	10,41 ohm.mm
	Bicapa GET (Al ₂ O ₃ /SiO ₂)	0,61 V	1,74 V	8,67 ohm.mm

El estrés durante el estado de encendido se realizó con el analizador de parámetros Keithley 4200-SCS manteniendo el sustrato y el ánodo conectados a tierra mientras se aplicaba un voltaje negativo entre -4V y -7V en los cátodos durante 1000 s., con lo cual se obtiene un voltaje ánodo-cátodo de estrés positivo. Con el fin de monitorear la evolución de la degradación inducida por el estrés, las mediciones se interrumpieron a intervalos de tiempo fijos utilizando la técnica de medir-estresar-medir (MSM). Después de cada interrupción, se adquirió una curva I-V y se comparó con la curva de referencia medida al comienzo de la prueba para calcular el cambio de voltaje umbral ΔV_{TON}. Cabe señalar que se midieron un total de 64 GET-SBD con un ancho de W = 100 μm por cada oblea. Los experimentos se realizaron en grupos de diodos ubicados en el lado derecho e izquierdo de las obleas (separados 35 mm del centro de la oblea en

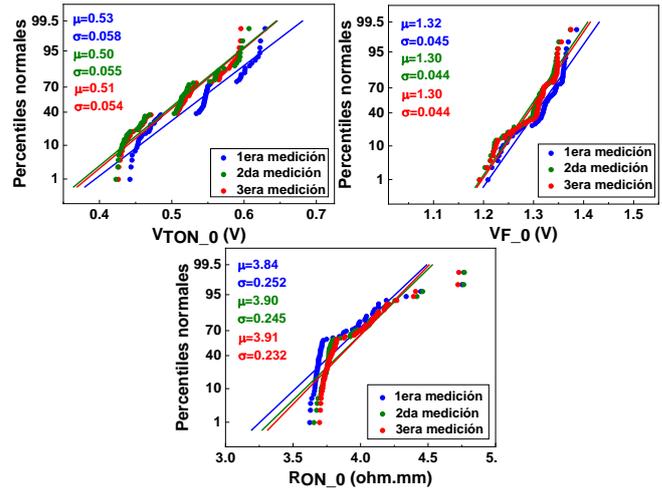


Figura 2. Parámetros iniciales V_{TON,0}, V_{F,0} y R_{ON,0} medidos al comienzo de tres experimentos bajo las mismas condiciones de estrés (V_{estrés} = 6 V, T = 150 °C) en la oblea referencial de 200 V. Se obtiene una curva IV repetible en los GET-SBDs solo después de la primera prueba de estrés, la cual se considera una fase inicial de liberación de cargas. Adaptado de (Acurio et al., 2020)

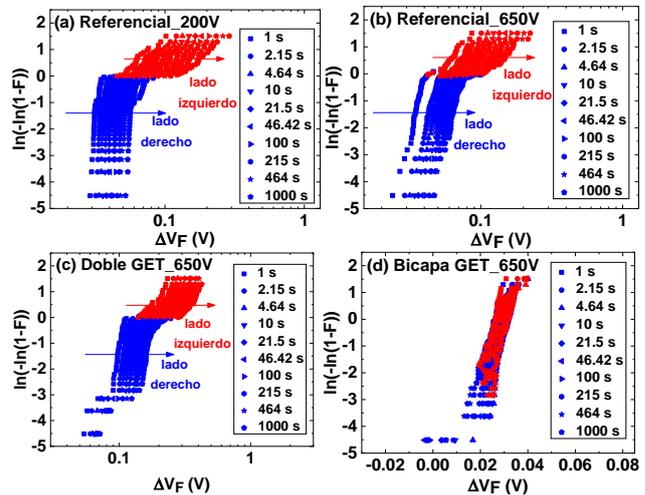


Figura 3. Degradación ΔV_F bajo V_{estrés}=6V a 150 °C. Se observa un comportamiento bimodal en los gráficos de Weibull, que muestra la dependencia de la degradación en la ubicación de la oblea, excepto en los dispositivos con una bicapa GET

promedio) para verificar la diferencia de degradación. Para recuperar las curvas iniciales una vez realizada la fase de estrés en todos los dispositivos, se han probado diferentes periodos de tiempo y altas temperaturas (150 °C, 200 °C y 300 °C) (no se muestran los resultados por brevedad). Sin embargo, solo se obtuvo una recuperación completa sometiendo la oblea a un tratamiento térmico a 300 °C durante al menos 30000 s (alrededor de 8 horas) para acelerar la liberación de cargas.

Se llevó a cabo también un análisis de repetibilidad en las obleas aplicando las mismas condiciones de estrés tres veces. Los resultados muestran que los parámetros iniciales V_{TON,0}, V_{F,0} y R_{ON,0} (parámetros extraídos de la curva IV inicial antes de que se ejecute la prueba de estrés) se vuelven repetibles justo después de la primera prueba de estrés seguida por el tratamiento térmico como se ilustra en la Figura 2 para la oblea de la tecnología de 200V. El mismo comportamiento se observa también en el resto de obleas. Por lo tanto, la primera

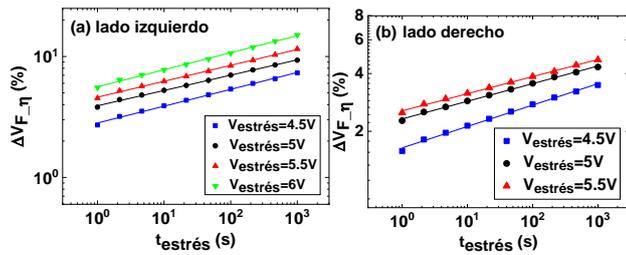


Figura 4. Degradación de V_F bajo diferentes voltajes de estrés usando el parámetro de escala (η) extraído de las distribuciones de Weibull de los dispositivos en el lado izquierdo (a) y derecho (b) de la oblea referencial en la tecnología de 200V. El mismo procedimiento se ha usado en las obleas referencial, doble GET y bicapa GET en la tecnología de 650V. Adaptado de (Acurio et al., 2020)

prueba de esfuerzo actúa como una fase inicial de eliminación de trampas donde el dispositivo virgen se estabiliza liberando las cargas contenidas originalmente en los centros de captura (Acurio et al., 2017).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis estadístico para la predicción de vida útil

Al analizar la degradación después de diferentes períodos de estrés, se encuentra que una distribución de Weibull caracterizada por una función acumulativa igual a $F(t) = 1 - \exp[-(t/\eta)^\beta]$, donde η y β son el parámetro de escala y forma, respectivamente, describe mejor los datos de degradación de ΔV_F como se muestra en la Figura 3. Se observa claramente un comportamiento bimodal de las mediciones a lo largo de las obleas, excepto en la oblea con una bicapa GET, lo cual será explicado más adelante. Los diodos ubicados en el lado derecho de la oblea se degradan de manera diferente a los dispositivos en el lado izquierdo en las mismas condiciones. Esto demuestra el impacto de la variación extrínseca cuando se aplica un fuerte voltaje de estrés (de 4V a 7V) que supera ampliamente los voltajes normales de operación de los dispositivos (Tabla 1).

Una distribución ΔV_F más estrecha se observa en los GET-SBDs ubicados en el lado derecho, lo que demuestra una mejor confiabilidad bajo condiciones de estrés en estado de encendido en comparación con los dispositivos en el lado izquierdo. Aunque el origen de la diferencia en la degradación puede ser de diversa naturaleza, podría atribuirse, por ejemplo, a cambios de espesor en las capas con centros de captura de cargas identificadas del dispositivo, como la barrera AlGaIn (Tallarico, Stoffels, et al., 2016) y el dieléctrico GET. Sin embargo, todavía es necesario realizar más investigaciones para comprender mejor este fenómeno.

Una vez separados los datos de las dos distribuciones para cada condición de estrés, se obtiene el parámetro de escala (o valor característico) de cada distribución de Weibull para caracterizar con un único valor la degradación de la población de dispositivos correspondiente. Luego, estos resultados se grafican en función del tiempo de estrés ($t_{\text{estrés}}$) y se ajustan linealmente en una escala logarítmica como se muestra en la Figura 4 para determinar cuándo ΔV_F alcanza el 5%, que es el criterio de falla adoptado en este trabajo. Cabe destacar que para la estimación de vida útil se ha considerado ΔV_F ya que

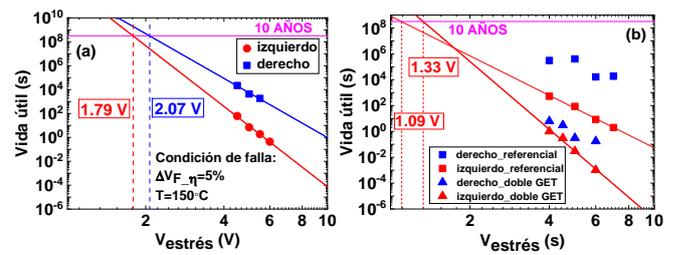


Figura 5. Extrapolación del tiempo de vida útil para los dispositivos del lado izquierdo y derecho de (a) la oblea referencial de 200V y (b) las obleas referencial y doble GET de la tecnología de 650V

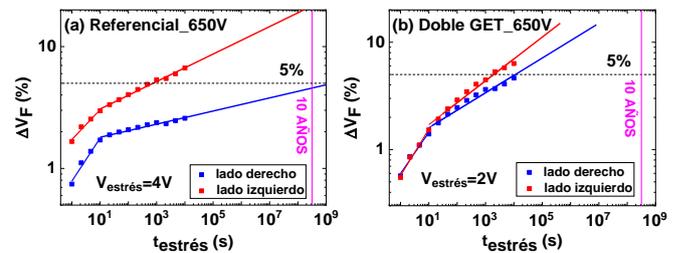


Figura 6. Extrapolación del tiempo de vida útil usando menores voltajes de estrés y tiempo más prolongado para los dispositivos del lado izquierdo y derecho de (a) la oblea referencial y (b) la oblea con doble GET de la tecnología de 650V

este parámetro considera tanto la degradación de V_{TON} como de R_{ON} a través de la expresión:

$$\Delta V_F = \Delta V_{TON} + (\Delta R_{ON} * I_{AC}) \quad (1)$$

La Figura 5 (a) ilustra la vida útil extrapolada de los GET-SBDs fabricados con la tecnología de 200 V, donde 1,79 V y 2,07 V son el voltaje máximo aplicable a los dispositivos del lado derecho e izquierdo, respectivamente, para tener una degradación de V_F del 5% en diez años. Para estos dispositivos, el voltaje directo nominal es de 1,32 V. Por lo tanto, la vida útil esperada es incluso superior a 10 años para todos los dispositivos de esta oblea, aunque se degraden de manera diferente. Esto demuestra que los esfuerzos para mejorar la confiabilidad en condiciones de estado apagado en esta tecnología (Acurio et al., 2018) no afectan el funcionamiento en estado encendido e incluso mejoran la vida útil esperada de estos dispositivos.

Para el caso de la oblea referencial en la tecnología de 650V, no se alcanza el tiempo de vida esperado usando las tres condiciones de voltaje y la ley de potencia tanto en el lado derecho como izquierdo de la oblea como se ilustra en la Figura 5 (b). Esto se debe a que, al aumentar el voltaje de estrés, la extrapolación de la vida útil es menos dependiente de este parámetro y se empieza a observar que los valores extraídos tienden a un comportamiento más horizontal con el $V_{\text{estrés}}$, esto es más notorio en el lado derecho de la oblea referencial (cuadrados azules), por lo que no se ha incluido la curva de ajuste. Sin embargo, usando voltajes menores y tiempos más prolongados de estrés (10000 s) es posible alcanzar una vida útil de 10 años, pero solo con los dispositivos en el lado derecho de la oblea como se muestra en la Figura 6 (a).

Al analizar el impacto en el tiempo estimado de vida cuando se modifica la estructura del ánodo en la tecnología de 650V cambiando desde una capa simple de Si_3N_4 (oblea referencial) en la estructura GET a una capa adicional de Si_3N_4 , las mediciones indican que la confiabilidad se ve comprometida al aumentar la capa adicional de Si_3N_4 . El tiempo en el que se alcanza el criterio de falla disminuye significativamente con respecto a la oblea referencial como se observa en la Figura 5 (b). Aunque la extrapolación para los diodos del lado izquierdo muestre un mejor resultado de la vida útil esperada para la doble capa GET, se debe considerar que la oblea referencial posee una menor dependencia del voltaje de estrés que le imposibilita mejorar el resultado en la extrapolación como se ha mencionado previamente. La Figura 6 (a) y (b) permiten observar una comparación más justa de las dos obleas analizando la degradación de V_F con valores de estrés más bajos y por lo tanto más próximos a los voltajes normales de operación. En esta comparación, se muestra una mayor degradación de la oblea con doble GET incluso cuando se usa voltaje de estrés menor al usado con la oblea referencial. Esto puede deberse a que el atrapamiento de cargas es más severo ya que los diodos poseen una capa adicional de dieléctrico en donde probablemente los centros de captura son mayores que con una sola capa.

En el caso de la oblea con una bicapa de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$, el tiempo de vida no ha podido ser extrapolado ya que la degradación de V_F presenta un comportamiento inusual. Al comienzo del estrés, V_F se degrada de manera normal. Sin embargo, a medida que aumenta el tiempo, este parámetro empieza a recuperarse indicando un punto de inversión. Esto imposibilita llegar al criterio de falla de 5% de desplazamiento en V_F y extrapolar el tiempo de vida útil usando la ley de potencia. Al analizar individualmente los componentes de V_F (R_{ON} y V_{TON}) se identifica que este comportamiento se debe a una recuperación de R_{ON} durante el estrés, mientras que V_{TON} continúa degradándose de manera habitual como se muestra en la Figura 7. El estudio de este punto de inversión está fuera del alcance de este trabajo, pero va a ser considerado para futuras investigaciones.

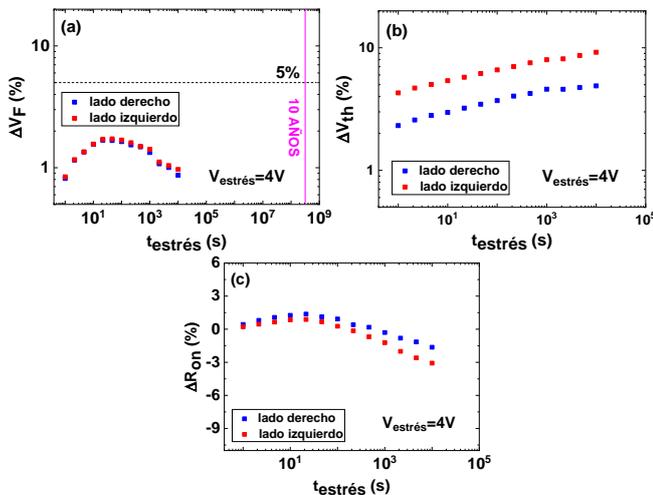


Figura 7. Degradación de los parámetros (a) V_F , (b) V_{TON} y (c) R_{ON} en los dispositivos del lado derecho e izquierdo de la oblea con bicapa GET en la tecnología de 650V. Se observa un punto de inversión en ΔV_F debido a una recuperación en el comportamiento de R_{ON}

4.2 Extracción de la degradación intrínseca de V_{TON}

Como se ilustra en la Figura 2, el voltaje de encendido inicial $V_{TON,0}$, que se extrajo de la curva I-V inicial antes de los experimentos de estrés, no muestra una distribución de probabilidad clara. Las distribuciones más comunes, la normal (ver Figura 2) y la Weibull (no mostrada), se utilizaron para ajustar los datos. Sin embargo, la agrupación de diodos ubicados en posiciones cercanas indica una variación de procesamiento extrínseco a través de las obleas, lo que sugiere un componente extrínseco en V_{TON} . Como resultado, V_{TON} se puede expresar mediante la siguiente relación:

$$V_{TON}(t_{stress}) = \Phi_{MS} + 2\Phi_F + \frac{Q_{OT}}{C_{OX}} + V_{TON_{ext}} \quad (2)$$

donde Φ_{MS} es la diferencia de la función de trabajo del semiconductor de metal, $2\Phi_F$ es el potencial de superficie, Q_{OT} es la densidad de defectos de carga en el óxido/dieléctrico, C_{OX} es la capacitancia del óxido y $V_{TON_{ext}}$ es el componente extrínseco. La degradación de V_{TON} inducida por el estrés puede ser dada por:

$$\Delta V_{TON}(t_{stress}) \approx \frac{\Delta Q_{OT}(t_{stress})}{C_{OX}} + V_{TON_{ext}} \quad (3)$$

El componente extrínseco se debe típicamente a variaciones relacionadas con el proceso, por ejemplo, por diferencias en los espesores de las capas o variaciones de estequiometría del material a través de la oblea. Por lo tanto, la diferencia extrínseca entre dos dispositivos ubicados lejos uno del otro en la oblea es relativamente grande, pero esta diferencia debería reducirse mucho en dos dispositivos muy próximos.

Basándonos en el principio de pares coincidentes normalmente utilizados en el tiempo cero y el análisis de variabilidad dependiente del tiempo en tecnologías VLSI de escala profunda (Kaczer et al., 2015), se selecciona pares formados por dispositivos en lado izquierdo (I) y derecho (D) dispuestos muy cercanamente en la misma matriz también conocida como *die* (Figura 1 (f)) para obtener las diferencias de los respectivos parámetros de la siguiente manera:

$$\delta V_{TON,0} \approx V_{TON,0,I} - V_{TON,0,D} \quad (4)$$

$$\delta \Delta V_{TON} \approx \Delta V_{TON,I} - \Delta V_{TON,D} \quad (5)$$

donde $V_{TON_{ext,I}} = V_{TON_{ext,D}}$ y consecuentemente la Ecuación (3) se puede simplificar a la siguiente expresión:

$$\delta \Delta V_{TON}(t_{stress}) \approx \frac{\delta \Delta Q_{OT}(t_{stress})}{C_{OX}} \quad (6)$$

que representa la variación intrínseca de ΔV_{TON} y donde no hay impacto del componente extrínseco. Por tanto, la degradación inducida por el estrés está directamente relacionada con el número de cargas atrapadas durante el estrés.

La Figura 8 muestra las distribuciones de probabilidad (normal) del cambio diferencial $\delta V_{TON,0}$, que indica claramente una mejor uniformidad en comparación con la distribución $V_{TON,0}$ de diodos individuales en todas las obleas.

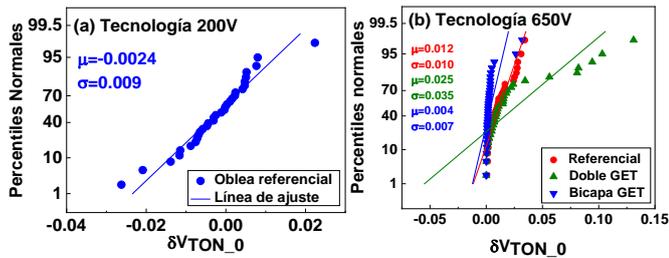


Figura 8. Distribución normal del cambio diferencial δV_{TON_0} en (a) la tecnología de 200V y (b) 650V, respectivamente. Una vez que se elimina el componente extrínseco (sistemático), los datos pueden adaptarse mejor a las líneas de ajuste

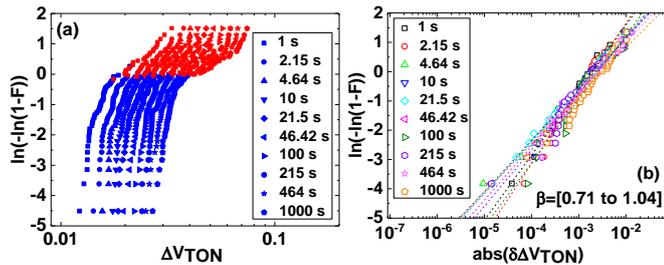


Figura 9. (a) Distribución de ΔV_{TON} para diferentes períodos de estrés (se observa dependencia en la ubicación de la oblea). (b) Distribución de Weibull del cambio diferencial $\delta \Delta V_{TON}$ para diferentes períodos de estrés en la oblea referencial de la tecnología de 200V cuando se aplica $V_{estrés}=6V$ y $T=150^{\circ}C$. Tomado de (Acurio et al., 2020)

Con esta métrica de pares coincidente la oblea con una doble GET, muestra mayor variabilidad con respecto a la oblea referencial en la tecnología de 650V como se muestra en la Figura 8 (b). Esto indica mayor variación en el proceso de fabricación, es decir, la deposición de la capa adicional no es uniforme en todos los dispositivos.

Por otro lado, la oblea con una bicapa GET, hasta el momento ha demostrado tener mayor uniformidad en el proceso de fabricación con respecto a la oblea referencial y la hace atractiva para futuras mejoras de confiabilidad de diodos Schottky basados en AlGaIn/ GaN.

De manera similar al análisis de V_{TON_0} , el concepto de pares coincidentes también se puede extender a las mediciones de ΔV_{TON} siguiendo la Ecuación (5). El comportamiento bimodal que caracteriza a cada lado de la oblea desaparece convergiendo en una sola pendiente de Weibull para cada período de estrés que casi se superponen entre sí. En la Figura 9, se demuestra este comportamiento tomando como ejemplo la oblea referencial en la tecnología de 200V. Los valores bajos de β de las distribuciones $\delta \Delta V_{TON}$ podrían estar relacionados con una mayor variación inducida por la reducción de las muestras en la técnica de pares coincidentes. Sin embargo, la ventaja de esta técnica para extraer distribuciones de Weibull sin la influencia de cambios de espesor u otras variaciones relacionadas con el proceso se puede utilizar para futuros estudios de confiabilidad intrínseca que permitan comparaciones directas entre nuevas arquitecturas y materiales en la región GET.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo, hemos analizado la degradación de diodos Schottky basados en AlGaIn/GaN bajo condiciones de estrés en estado de encendido. Observamos un comportamiento recuperable para todos los voltajes de estrés aplicados, lo que indica que el proceso de atrapamiento de cargas ocurre mayormente en defectos preexistentes. Los dispositivos se degradan de manera diferente dependiendo de la ubicación en la oblea debido principalmente a variaciones relacionadas con el proceso. Sin embargo, se demostró mediante el uso de estadísticas más amplias que los diodos actuales de la tecnología de 200 V tienen una mejor confiabilidad en el estado de encendido con una vida útil más prolongada que en trabajos anteriores. Además, con base en la metodología de pares coincidentes, es posible reducir la componente extrínseca y/o sistemática en V_{TON_0} y ΔV_{TON} para obtener distribuciones de probabilidad con pendientes de Weibull simples y bien definidas. La estructura más prometedora en la tecnología de 650 V considerando esta métrica, es aquella con una bicapa de Al_2O_3/SiO_2 ya que muestra una menor degradación de los parámetros y exhibe mayor uniformidad en el proceso de fabricación en comparación con las otras obleas.

REFERENCIAS

- Acurio, E., Crupi, F., Magnone, P., Trojman, L., Meneghesso, G., & Iucolano, F. (2017). On recoverable behavior of PBTI in AlGaIn/GaN MOS-HEMT. *Solid-State Electronics*, 132, 49–56. <https://doi.org/10.1016/j.sse.2017.03.007>
- Acurio, E., Trojman, L., Crupi, F., Moposita, T., De Jaeger, B., & Decoutere, S. (2020). Reliability Assessment of AlGaIn/GaN Schottky Barrier Diodes under ON-state stress. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 20(1):167-171. <https://doi.org/10.1109/TDMR.2020.2969638>
- Acurio, Eliana, Crupi, F., Ronchi, N., De Jaeger, B., Bakeroot, B., Decoutere, S., & Trojman, L. (2018). Reliability Improvements in AlGaIn/GaN Schottky Barrier Diodes With a Gated Edge Termination. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 65(5), 1765–1770. <https://doi.org/10.1109/TED.2018.2818409>
- Acurio, Eliana, Crupi, F., Ronchi, N., De Jaeger, B., Bakeroot, B., Decoutere, S., & Trojman, L. (2019). Influence of GaN- and Si 3 N 4 - Passivation Layers on the Performance of AlGaIn/GaN Diodes With a Gated Edge Termination. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 66(2), 883–889. <https://doi.org/10.1109/TED.2018.2888809>
- Alatawi, K., Almasoudi, F., Manandhar, M., Matin, M. (2018). Comparative Analysis of Si- and GaN-Based Single-Phase Transformer-Less PV Grid-Tied Inverter. *Electronics*, 7(3), 34. <https://doi.org/10.3390/electronics7030034>
- Cheng, J., Yang, X., Sang, L., Guo, L., Zhang, J., Wang, J., He, C., Zhang, L., Wang, M., Xu, F., Tang, N., Qin, Z., Wang, X., & Shen, B. (2016). Growth of high quality and uniformity AlGaIn/GaN heterostructures on Si substrates using a single AlGaIn layer with low Al composition. *Scientific Reports*, 6(1), 23020. <https://doi.org/10.1038/srep23020>
- Hartzell, A. L., da Silva, M. G., & Shea, H. R. (2011). Lifetime Prediction. In *World Wide Web Internet And Web Information Systems* (Vol. 52, pp. 9–42). https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6018-4_2
- Horii, T., Miyazaki, T., Saito, Y., Hashimoto, S., Tanabe, T., & Kiyama, M. (2009). High-Breakdown-Voltage GaN Vertical Schottky Barrier Diodes with Field Plate Structure. *Materials Science Forum*, 615–617, 963–966. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.615-617.963>

- Hughes, B., Yoon, Y. Y., Zehnder, D. M., & Boutros, K. S. (2011). A 95% Efficient Normally-Off GaN-on-Si HEMT Hybrid-IC Boost-Converter with 425-W Output Power at 1 MHz. *2011 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS)*, 1–3. <https://doi.org/10.1109/CSICS.2011.6062460>
- Kaczer, B., Franco, J., Roussel, P. J., Groeseneken, G., Chiarella, T., Horiguchi, N., & Grasser, T. (2015). Extraction of the Random Component of Time-Dependent Variability Using Matched Pairs. *IEEE Electron Device Letters*, 36(4), 300–302. <https://doi.org/10.1109/LED.2015.2404293>
- Lenci, S., De Jaeger, B., Carbonell, L., Hu, J., Mannaert, G., Wellekens, D., You, S., Bakeroot, B., & Decoutere, S. (2013). Au-Free AlGaIn/GaN Power Diode on 8-in Si Substrate With Gated Edge Termination. *IEEE Electron Device Letters*, 34(8), 1035–1037. <https://doi.org/10.1109/LED.2013.2267933>
- Marcon, D., Saripalli, Y. N., & Decoutere, S. (2015). 200mm GaN-on-Si epitaxy and e-mode device technology. *2015 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*, 2016-Febru, 16.2.1-16.2.4. <https://doi.org/10.1109/IEDM.2015.7409709>
- Morkoç, H., Strite, S., Gao, G. B., Lin, M. E., Sverdlov, B., & Burns, M. (1994). Large-band-gap SiC, III-V nitride, and II-VI ZnSe-based semiconductor device technologies. *Journal of Applied Physics*, 76(3), 1363–1398. <https://doi.org/10.1063/1.358463>
- Tallarico, A. N., Magnone, P., Stoffels, S., Lenci, S., Hu, J., Marcon, D., Sangiorgi, E., Decoutere, S., & Fiegna, C. (2016). Understanding the degradation sources under ON-state stress in AlGaIn/GaN-on-Si SBD: Investigation of the anode-cathode spacing length dependence. *2016 IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS)*, 2016-Sept, 4A-5-1-4A-5-6. <https://doi.org/10.1109/IRPS.2016.7574530>
- Tallarico, A. N., Stoffels, S., Magnone, P., Hu, J., Lenci, S., Marcon, D., Sangiorgi, E., Fiegna, C., & Decoutere, S. (2016). Reliability of Au-Free AlGaIn/GaN-on-Silicon Schottky Barrier Diodes Under ON-State Stress. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 63(2), 723–730. <https://doi.org/10.1109/TED.2015.2507867>
- Wu, Y., Jacob-Mitos, M., Moore, M. L., & Heikman, S. (2008). A 97.8% Efficient GaN HEMT Boost Converter With 300-W Output Power at 1 MHz. *IEEE Electron Device Letters*, 29(8), 824–826. <https://doi.org/10.1109/LED.2008.2000921>

BIOGRAFÍAS



Eliana Acurio, recibió el título en Ingeniería en Electrónica y Control de la Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, en 2011. También recibió el título de master en Mecatrónica y Sistemas Micro-Mecatrónicos por la Hochschule Karlsruhe, Karlsruhe, Alemania y la Universidad de Oviedo, Gijón, España en 2014. Obtuvo el Ph.D. en Tecnologías de la Información y Comunicación por la Universidad de la Calabria, Cosenza, Italia, en 2019. Actualmente se desempeña como profesora e investigadora en el Departamento de Física de la Escuela Politécnica Nacional. El enfoque principal de su trabajo es la confiabilidad de los dispositivos basados en GaN para aplicaciones energéticas eficientes.



Lionel Trojman, tiene un título en Física por la Universidad de Aix-Marsella, Francia, en 2002, Recibió el título de master en física aplicada a la micro y nanoelectrónica y en ingeniería eléctrica en microelectrónica y telecomunicaciones por la “Ecole Polytechnique Universitaire de Marseille”, Aix-Marseille University, en 2004. Recibió su título de Ph.D. en Ingeniería Eléctrica por KU Leuven en colaboración con imec, Bélgica, en 2009. Desde 2009, se desempeñó como profesor en el departamento de ingeniería eléctrica y electrónica de la USFQ, Ecuador. Actualmente trabaja como profesor para Isep, Francia, desde 2019. Sus intereses de investigación actuales incluyen los fenómenos de transporte para MOSFET ultraescalado (sub-100nm) con dieléctricos UTEOT high-k con arquitecturas convencionales y nuevas (FinFET, FDSOI o TFET) para Tecnologías CMOS, memorias (ReRAM, MTJ) y dispositivos electrónicos de potencia GaN.



Brice De Jaeger, recibió su título universitario y de maestría en ingeniería eléctrica de la Universidad de Gante, Gante, Bélgica, en 1994 y 1997, respectivamente. Ha sido ingeniero de investigación en diferentes departamentos en el instituto imec, Lovaina, Bélgica. Ha colaborado en el desarrollo tecnológico, integración y caracterización de interconexiones y transistores CMOS de germanio. Sus intereses de investigación actuales incluyen la tecnología GaN para aplicaciones de energía.



Benoit Bakeroot, recibió su título de maestría en Física en 1997 y el Ph.D. en Ingeniería Eléctrica en 2004, ambos en la Universidad de Gante, Bélgica. Desde 1998, Benoit Bakeroot trabaja en imec, donde ha estado involucrado en la investigación de dispositivos de potencia de Si y GaN con un enfoque en simulaciones de tecnología de diseño asistido por computadora (TCAD), modelado compacto, confiabilidad y física de dispositivos. Es autor y coautor de más de 80 artículos en revistas científicas internacionales y actas de congresos. También es profesor asociado a tiempo parcial en la Universidad de Gante.

Despacho Económico de Unidades Térmicas con Funciones Lineales de Costo utilizando el Algoritmo de la Luciérnaga

Oscullo, José^{1,*} ; Pilaquinga, Santiago¹ 

¹Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito, Ecuador

Resumen: Este artículo muestra el despacho de las unidades térmicas presentes en un sistema hidrotérmico por medio del uso del algoritmo de optimización que utiliza la inteligencia de las luciérnagas. Si bien el problema de despacho de las unidades térmicas ha sido tratado en otros trabajos, en el presente estudio se considera como función objetivo del despacho de las unidades térmicas mediante su costo de producción lineal con la consideración de restricciones binarias. El algoritmo de las luciérnagas ha probado tener una alta capacidad de optimización para determinar un punto óptimo en base a características de comportamiento de la naturaleza como los algoritmos genéticos, más se diferencia por la capacidad de ajustes pequeños cerca de la solución. El algoritmo de la luciérnaga se constituye en una herramienta heurística adicional para resolver este tipo de problemas de los métodos clásicos. Mediante la representación de un enjambre de luciérnagas cuya función objetivo es determinar la mayor intensidad luminosa en el punto de éste permite modificar la velocidad de convergencia siendo más rápida mientras más lejos esté de la solución. La metodología propuesta se implementa en Matlab y para mostrar su capacidad se la aplica al Sistema Nacional Interconectado (SNI) determinando el despacho económico de las unidades térmicas para días laborables, fines de semana y feriados.

Palabras clave: Despacho de generación, unidades térmicas, algoritmo de libélula, algoritmos heurísticos, inteligencia de enjambre.

Economic Dispatch of Thermal Units with Linear Cost Functions using Firefly Algorithm

Abstract: This paper shows economic dispatch of thermal units of a real hydrothermal system using the firefly algorithm. Although the problem of dispatch of thermal units has been dealt in other research, in the present study it is considered as an objective function of dispatch of thermal units through their linear production cost with the consideration of binary constraints. The firefly algorithm has proven to have a high optimization capacity to determine an optimal point based on behavioral characteristics of nature such as genetic algorithms, but it is differentiated by the ability to make small adjustments near the solution. The firefly algorithm is implemented as an alternative solution due to that the mathematics classic methods present limitations in searching of the optimal solution for this kind of problems. The firefly swarm algorithm associates the objective function with light intensity, this property based in the brightness modifies the behavior of fireflies and makes possible a more rapid convergence towards global solutions. The proposed methodology is implemented in Matlab and its performance is evaluated using the National Interconnected System of Ecuador (SNI) to determine the economic load dispatch of thermal units on weekdays, weekends and holidays.

Keywords: Power generation dispatch, thermal units, firefly algorithm, heuristic algorithms, swarm intelligence.

1. INTRODUCCIÓN

Los métodos de optimización inspirados en cualidades de la naturaleza han sido utilizados en la resolución de problemas de ingeniería, a través de modelos que representan el sistema analizado, estos modelos presentan de manera general una combinación de variables no lineales (Yang, 2010). Por medio de las cuales se puede optimizar los recursos del sistema en base al cumplimiento de un objetivo y observando las restricciones de cada elemento del mismo, a diferencia de los

métodos matemáticos convencionales, estos permiten considerar las restricciones dadas por las características operativas y físicas de cada uno de los elementos del sistema donde se encuentran las no-linealidades y discontinuidades de las cuales no es posible determinar una relación matemática explícita (Wood, 1996).

Esta característica de los métodos heurísticos ha permitido su utilización en sistemas físicos como: mecánicos, hidráulicos, eléctricos, etc., cuyas relaciones físicas son muy complejas de

*jose.oscullo@epn.edu.ec
 Recibido: 03/06/2019
 Aceptado: 12/04/2022
 Publicado en línea: 25/05/2022
 10.33333/rp.vol50n1.04
 CC 4.0

modelar matemáticamente y se caracterizan por presentar varios factores de operación es decir; la función a optimizar muestra una alta no linealidad, es en este escenario que los métodos de optimización heurística basado en el comportamiento de individuos de la naturaleza ha demostrado ser una técnica eficiente y superando en muchos casos a otras técnicas heurísticas (Yang, 2014).

Así, los algoritmos de optimización heurísticos de enjambre inspirados en el comportamiento natural de especies como aves, insectos, peces, etc., basan la búsqueda de la solución en tres reglas de interacción: (i) moverse en la misma dirección que su vecino, (ii) permanecer cerca de su vecino y (iii) evitar la colisión con el mismo. Por medio de estas reglas los individuos forman aglomeraciones en puntos específicos, en especial donde se hallan los recursos requeridos por la mayoría del grupo. Mediante las características indicadas, el algoritmo de enjambre basado en el comportamiento de las luciérnagas busca aprovechar la aglomeración del grupo de individuos para determinar la solución del problema, este esquema de búsqueda heurística se basa en el nivel de atracción dado por la luminosidad de cada individuo dentro de un grupo particular (Yang, 2014; Banabeau, 1999).

Un sistema hidrotérmico conformado por generadores hidráulicos y térmicos para determinar su despacho de las unidades disponibles se constituye en un problema de grande porte, en el cual es necesario considerar un elevado conjunto de variables tales como: la disponibilidad de las fuentes primarias de producción de energía, las restricciones operativas de las centrales hidroeléctricas y unidades de generación térmica por lo que al mismo se lo trata separando el problema en un despacho hidroeléctrico y un despacho de las unidades térmicas que están adecuadamente sincronizados para abastecer la demanda en cada periodo de análisis (Wood, 1996).

Dada la particularidad de que las unidades térmicas en un sistema hidrotérmico, por lo general, son el mayor número de unidades del sistema a pesar de que su capacidad sea menor, esto unido a la característica de que son el complemento en el despacho cumpliendo sus características económicas, operativas propias y operativas del sistema, han permitido modelarlo y aplicar diferentes técnicas matemáticas y heurísticas las cuales se han caracterizado por considerar la función objetivo del despacho de las unidades térmicas mediante funciones cuadráticas o cúbicas que permiten determinar la operación de las mismas en cada periodo de análisis al menor costo de producción para el sistema hidrotérmico (Conejo, 2010).

Más, cuando los costos de producción de las unidades térmicas son lineales, como sucede en algunos sistemas hidrotérmicos, como es el caso del sistema eléctrico ecuatoriano, los programas comerciales o la aplicación de técnicas deben ser adaptadas a fin de obtener el despacho de las unidades térmicas la cual no garantiza que sea la del menor costo de producción posible; si bien están consideradas las restricciones operativas.

Debido a esta situación y gracias a que el algoritmo de enjambre basado en el comportamiento de las luciérnagas, que por un lado, permite considerar una función objetivo

polinómica de cualquier grado, representar las restricciones no lineales y aplicarle a un elevado conjunto de individuos se constituye en una herramienta que permita resolver el despacho de las unidades térmicas en un sistema hidrotérmico, considerando que abastecerá la demanda remanente dado por condiciones operativas de la red eléctrica o económicas del despacho (Kennedy, 2001).

Este estudio presenta la factibilidad de utilizar el algoritmo de enjambre basado en el comportamiento de las luciérnagas para el despacho de las unidades térmicas y abastecer una demanda dada, considerando lo siguiente: costo lineal de producción, disponibilidad de la unidad, tiempo mínimo y máximo de operación. Su aplicación se la realizará al despacho de días laborables, fines de semana y feriados del sistema hidrotérmico ecuatoriano, comparándolo con los despachos obtenidos por el Operador Nacional de Electricidad CENACE.

2. FORMULACIÓN MATEMÁTICA

El despacho económico de las unidades térmicas tiene como objetivo minimizar el costo total de producción de energía eléctrica de las unidades térmicas participantes, las cuales deben operar dentro de sus límites de generación y en conjunto satisfacer la demanda del sistema más las pérdidas (Wood, 1996).

Tradicionalmente, el despacho económico de unidades térmicas en un sistema de potencia se ha modelado utilizando el costo de producción de generación de cada unidad, representado por funciones polinómicas cuadrática o cúbica, a través del cual determinar el costo para cada nivel de potencia. Para su solución se emplean técnicas de optimización deterministas como: punto interior, método de gradiente, método de Newton, programación dinámica entre otras (Yang, 2014).

Los programas comerciales y estudios utilizan esta función de costos para el despacho económico. Sin embargo, la generalidad de modelos aplicados en sistemas hidrotérmicos utiliza por facilidad de optimización ecuaciones polinómicas de segundo orden para representar el costo de producción de energía eléctrica de las unidades térmicas en lugar de ecuaciones lineales. Es así que, el costo de operación de cada unidad C_g^P , representa la relación entre la potencia de salida P_{gt} en el instante de tiempo t y su costo variable de producción CV_g , en la hora t [6]. Matemáticamente, el costo de operación de una unidad generadora térmica se expresa como en la ecuación (1):

$$C_g^P = CV_g \cdot P_{gt} \quad (1)$$

Así, el costo de producción del parque de generadores térmicos N_G , para un instante de tiempo t se expresa matemáticamente como en la ecuación (2):

$$C_t = \sum_g \sum_{g=1}^{N_G} C_g^P(P_{gt}) \quad (2)$$

Cuando la función de costo de generación de las unidades térmicas se representa mediante la ecuación (2), por un lado, no es posible aplicar las técnicas matemáticas convencionales

debido a que un costo de generación lineal representa un costo incremental operacional constante y por otro, si se selecciona la unidad térmica al despacho esta va a operar en su potencia máxima o mínima a fin de que permita cumplir las restricciones de: abastecimiento de la demanda, los límites de generación y los tiempos de operación. Estas características hacen que el problema de despacho de unidades térmicas presente no-linealidades como se muestra en las ecuaciones (3) a (6). (Wood, 1996; Yang, 2014).

$$\begin{aligned} & \text{Min } C_t \\ \text{sujeta a:} & \sum_{g=1}^{N_G} P_{g,t} = D_t \quad (3) \\ & (T_{g,t-1}^{enc} - T_{\min enc g})(E_{g,t-1} - E_{g,t}) \geq 0 \quad \forall g, \forall t \quad (4) \\ & (T_{g,t-1}^{ap} - T_{\min ap g})(E_{g,t} - E_{g,t-1}) \geq 0 \quad \forall g, \forall t \quad (5) \\ & P_g^{min} \leq P_g \leq P_g^{max} \quad \forall g \quad (6) \end{aligned}$$

Donde:

- C_t : Costo total de operación en la hora t en \$.
- D_t : Demanda térmica total en la hora t en MW.
- $P_{g,t}$: Potencia despachada la unidad térmica g en la hora t en MW.
- N_G : Número total de generadores térmicos.
- P_g^{min} : Potencia mínima del generador g.
- P_g^{max} : Potencia máxima del generador g.
- $T_{g,t-1}^{enc}$: Tiempo de funcionamiento de la unidad térmica g en la hora t-1.
- $T_{g,t-1}^{ap}$: Tiempo de apagado de la unidad térmica g en la hora t-1.
- $T_{\min enc g}$: Tiempo mínimo de funcionamiento de la unidad térmica g.
- $T_{\min ap g}$: Tiempo mínimo de apagado de la unidad térmica g.
- $E_{g,t}$: Estado de la unidad g en la hora t (encendida = 1, apagada = 0).

Para esta clase de problemas los algoritmos de enjambre utilizados como método de optimización busca la solución a pesar de la existencia de múltiples, máximos o mínimos en el espacio de búsqueda. A diferencia de los métodos tradicionales, estos realizan una búsqueda extensa dentro del espacio de solución, encontrando una óptima respuesta (Yang, 2014).

Los sistemas basados en la inteligencia de enjambre para la optimización del problema se basa en el comportamiento del enjambre de partículas (abejas, bacterias, pájaros, etc.) se componen de una población de agentes que siguen reglas simples y fijas para interactuar entre sí dentro de su entorno, de tal forma aunque sus individuos sean ignorantes de su naturaleza, el comportamiento colectivo conduce a un comportamiento global inteligente, mediante el cual la búsqueda de la solución se basa en tres reglas de interacción: (i) moverse en la misma dirección que su vecino, (ii) permanecer cerca de su vecino y (iii) evitar la colisión con el mismo (Azad, 2011; Basu, 2011; Apostolopoulos, 2011; Yang, 2009).

El algoritmo de luciérnaga publicado por primera vez en 2008 (Yang, 2009) representa un método heurístico efectivo para problemas de optimización, su comportamiento basado en la inteligencia de enjambre y la atracción por la intensidad de luz,

permite encontrar la mejor solución global. Debido a su efectividad ha sido utilizado para resolver problemas con alta no linealidad como el despacho de unidades térmicas, pero se consideró funciones de costo de producción de generación cuadráticas (Swarnkar, 2012).

En particular, aunque el algoritmo de la luciérnaga presenta similitudes con otros algoritmos heurísticos es más simple en el concepto y la aplicación. Las características principales del algoritmo son la atracción β y el movimiento guiado debido a la intensidad luminosa, las cuales permiten al algoritmo encontrar la solución óptima. La atracción luminosa es proporcional a la intensidad de luz observada por las demás luciérnagas y disminuye con la distancia desde su punto de emisión hasta el punto donde se encuentra ubicado el observador, así como varía significativamente por el grado de absorción de la luz del entorno, como se indica en la ecuación (7) (Azad, 2011; Banabeau, 1999; Lukasik, 2009).

$$I(r) = I_{fuente} e^{-\gamma r^2} \quad (7)$$

Donde:

- r : Distancia entre dos luciérnagas
- γ : Coeficiente de absorción de luz
- I_{fuente} : Intensidad de la fuente
- $I(r)$: Intensidad observada

La atracción es una función monótonamente decreciente, que se expresa como lo establece la ecuación (8) (Bin, 2013).

$$\beta(r) = \beta_{min} + (\beta_0 - \beta_{min}) \cdot e^{-\gamma r^2} \quad (8)$$

Donde:

- β_0 : Atracción inicial en $r=0$.
- β_{min} : Mínimo valor de β .

La distancia entre dos luciérnagas i y j son respectivamente x_i y x_j , se representa matemáticamente como la distancia cartesiana como lo indica la ecuación (9) (Bin, 2013).

$$r_{ij} = \|x_i - x_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_{i,k} - x_{j,k})^2} \quad (9)$$

Donde:

- $x_{i,k}$: posición de la luciérnaga i respecto a la luciérnaga k
- $x_{j,k}$: posición de la luciérnaga j respecto a la luciérnaga k
- d : Número de luciérnagas en la iteración

En el caso de dos luciérnagas, cuando la luciérnaga j es más brillante que la luciérnaga i , la luciérnaga i se moverá hacia la luciérnaga j , este movimiento determina la nueva posición, mediante la ecuación (10), se representa matemáticamente esta situación. (Bin, 2013; Waqar, 2016).

$$x_i^{nueva} = x_i^{antigua} + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (x_j - x_i^{antigua}) + \varepsilon_i^{antigua} \quad (10)$$

Donde:

- ε_i : Número aleatorio de una distribución uniforme $[-1,1]$.
- β_0 : Nivel de atracción inicial en $r = 0$.
- γ : Coeficiente de absorción de luz.

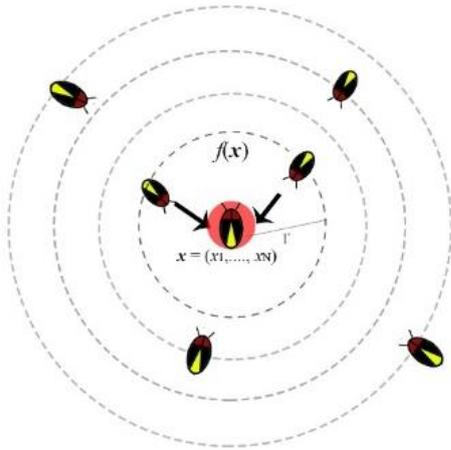


Figura 1. Atracción de las luciérnagas hacia la más brillante

El primer término de la ecuación (10) representa la posición inicial de la luciérnaga i , el segundo término representa la atracción de la luciérnaga i hacia la luciérnaga j y el tercer término representa el movimiento aleatorio de la luciérnaga i . En la Figura 1, se presenta la esquematización de la atracción de las luciérnagas hacia la luciérnaga más brillante.

3. METODOLOGÍA PROPUESTA

El problema de despacho a solucionar es el planteado en las ecuaciones (3) a (6), como se indicó el algoritmo de luciérnaga se caracteriza por presentar una heurística que facilita la búsqueda de la solución para problemas donde se presentan funciones de optimización polinómicas con restricciones enteras, lineales y no lineales encontrando soluciones satisfactorias en tiempos de cálculo razonables.

El algoritmo parte de una población inicial de luciérnagas x_i , $i=1,2, \dots, N_L$ y mediante números aleatorios determina la localización, que para el caso del despacho se constituyen en las potencias en la hora t y defino los parámetros $\beta_0, \beta_{min}, \gamma$, con los cuales evaluó la función objetivo que determina la intensidad de la solución. En el presente trabajo, se plantea una propuesta que se esquematiza en el pseudo código de la Figura 2, a fin de establecer las etapas propuestas para obtener el despacho diario de las unidades térmicas en un sistema hidrotérmico. La demanda a abastecer por las unidades térmicas constituye la demanda remanente entre la demanda total más las pérdidas del sistema y la producción de generación de las centrales hidroeléctricas y de las de energía renovable.

En cada iteración, existe una luciérnaga que tiene una mayor intensidad de brillo respecto a las demás, no necesariamente la misma, generando una atracción hacia las luciérnagas adyacentes las cuales modifican su posición para acercarse a ella. La luciérnaga más brillante de todas, a su vez se moverá aleatoriamente en búsqueda de la solución óptima, así, mediante un proceso iterativo se va a presentar una aglomeración de luciérnagas en la solución que satisface todas las restricciones de la función objetivo del problema analizado.

Es necesario tener cuidado con el valor del número aleatorio ϵ el cual debe ir decreciendo con el número de iteraciones; debido a que si es muy grande puede alejar de la solución para lo cual, se plantea que el mismo esté afectado por un parámetro α que decrezca con el número de iteraciones y debe estar en el rango de (0,1) como lo plantea Waqar (2016) en la ecuación (11).

```

Inicialización de parámetros
Algoritmo:  $\gamma, \beta_0$ , Iteraciones,
Unidades Térmicas:  $P_g^{min}, P_g^{max}, CV_g, D_T$ 

Iniciar el número de luciérnagas: NL

For t = 1 a 24

    Evaluar la intensidad de luz del conjunto de luciérnagas:
         $I(P,t) = \sum_t \sum_{g=1}^{NG} C_g^p (P_{gt})$ 
    Analizar las restricciones del problema.

    While (t < Iteraciones)
        For i = 1: NL
            For j = 1 : NL
                If (  $I_i < I_j$  )
                    Evaluar la distancia de las luciérnagas con la
                    ecuación (9)
                    Determinar las nuevas posiciones con la ecuación
                    (10).
                End
            Evaluar la intensidad de luz
        End

        Clasificar las luciérnagas y ordenarlas acorde a la mejor
        solución.
        Analizar las restricciones del problema
    End
    Determinar la mejor luciérnaga
End
Fin del algoritmo

Salidas: Presentar el costo del despacho y las  $P_g$ 
    
```

Figura 2. Pseudo código de la Metodología Propuesta

$$\alpha_{nueva} = \alpha_{antigua} \left[1 - \left\{ 1 - \left(\frac{10^{-4}}{9} \right)^{\frac{1}{N_{iteraciones}}} \right\} \right] \quad (11)$$

4. APLICACIÓN AL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO

El sistema hidrotérmico ecuatoriano es denominado como Sistema Nacional Interconectado, al año 2017 presenta una demanda de 23903,10 GWh de los cuales el 85,04% fue producido por centrales hidroeléctricas, el 1,69% de fuentes energía renovable, el 0,08% de las interconexiones con Colombia y Perú. Es decir, el 13,19% de la energía que permitió abastecer la demanda del 2017 proviene de 119 unidades de generación térmica basado en tecnologías de: turbo vapor, gas, diésel y motores de combustión interna.

Los despachos considerados para ver la respuesta del algoritmo de luciérnagas implementado en el software Matlab R2017a y los resultados obtenidos en una hoja de Excel 2013, corresponden a los despachos para: día laborable, sábado, domingo y un feriado a fin de poder determinar el menor costo de producción para abastecer la demanda asignada a las

Tabla 1. Despacho de Unidades Térmicas del SNI

	Día laborable 22/03/2017	Sábado 18/03/2017	Domingo 19/03/2017	Feriado 26/02/2017
Demanda (MWh)	10292,23	10841,43	9808,30	9467,03
Unidades despachadas	19	25	22	17
No. Luciérnagas	50	50	50	50
Iteraciones	440	500	350	450
Alfa (α)	0,8	0,8	0,8	0,8
Beta (β)	0,02	0,02	0,02	0,02
Gamma (γ)	1	1	1	1
Tiempo (s)	130	160	100	150
[USD] _{Luciérnaga}	42313,728	50249,326	40748,854	38178,483
[USD] _{CENACE}	42333,957	50642,961	40805,079	38190,346

Fuente: En base a datos de CENACE.

unidades térmicas. El mismo es comparado con el despacho obtenido para cada uno de los días respectivos por el Operador Nacional de Electricidad CENACE (CENACE, 2018), en el programa de despacho NCP desarrollado por PSR (PSR, 2018), el cual basa la solución del problema de despacho mediante programación dinámica, como se observa en la Tabla 1.

En las simulaciones se determinó que el número óptimo de luciérnagas que permiten resolver el problema de optimización corresponde a 50, es decir; existen 50 individuos que buscan la solución mediante la combinación de las unidades térmicas disponibles del total de unidades térmicas que posee el SNI.

La demanda a ser abastecida por las unidades térmicas es semejante de lunes a sábado y varía los días domingo y feriado. Como se muestra en la Tabla 1, el número de iteraciones es mayor en los días que se presenta un consumo mayor en el horario de demanda máxima, comparado al consumo de los otros períodos. Ya que esta demanda máxima requiere el ingreso de un mayor número de unidades para mantener el equilibrio oferta-demanda y observando la restricción de encendido y apagado de las unidades que en los otros períodos de consumo.

Si bien el número de unidades despachadas en los dos casos es el mismo, en todos los despachos de los días analizados se determina un costo inferior promedio para los despachos analizados de 0,25%, lo cual muestra el potencial del uso de este método de optimización heurística.

A continuación, se presenta la convergencia para el despacho del periodo de máxima demanda (19:00 a 20:00) del día sábado; en la Figura 3, se observa la convergencia cuando se varía únicamente el número de luciérnagas, donde se observa que para resolver una hora del despacho es conveniente 10 luciérnagas; más debido a las restricciones y al intervalo de despacho de 24 horas con la finalidad de alcanzar la convergencia en periodos de tiempo razonables se colocó 50 luciérnagas. Sin embargo, esto determina la necesidad de incrementar el número de iteraciones.

En la Figura 4, se muestra que a partir de un cierto número de iteraciones el costo no disminuye, es decir, se alcanzó el costo óptimo de la función objetivo. Y el número de iteraciones disminuye considerablemente cuando se incrementa el número

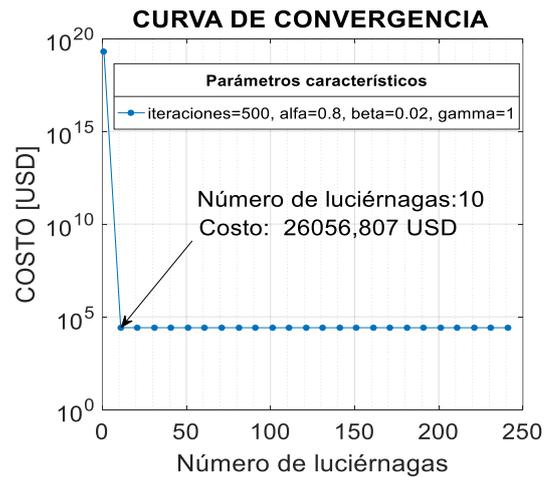


Figura 3. Variación del Número de Luciérnagas en la hora de demanda máxima del día sábado

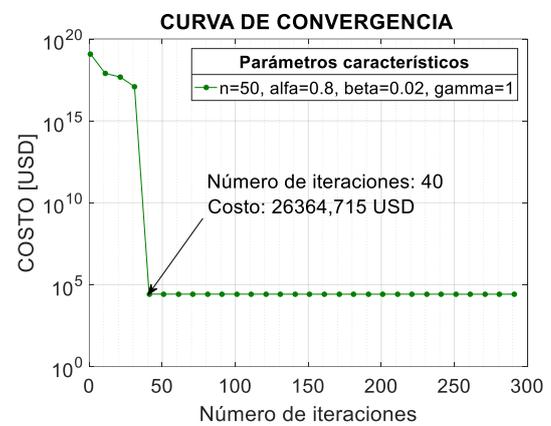


Figura 4. Variación del Número de Iteraciones en la hora de demanda máxima del día sábado

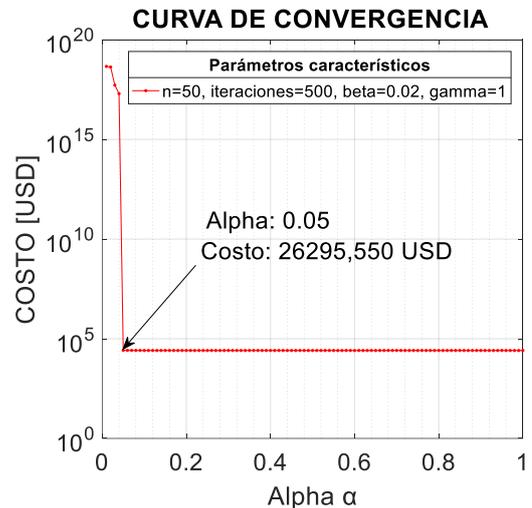


Figura 5. Variación de α en la hora de demanda máxima del día sábado

de luciérnagas para la búsqueda de la solución óptima; para el análisis de la demanda máxima se requiere de 40 iteraciones con 50 luciérnagas, comparadas con las 500 iteraciones requeridas de la Figura 3.

En las figuras siguientes, resulta interesante analizar la variación de los parámetros. En la Figura 5, se presenta la variación de α , a fin de observar su impacto se utilizó 500

iteraciones el valor menor a fin de alcanzar convergencia en tiempos razonables fue de 0,05.

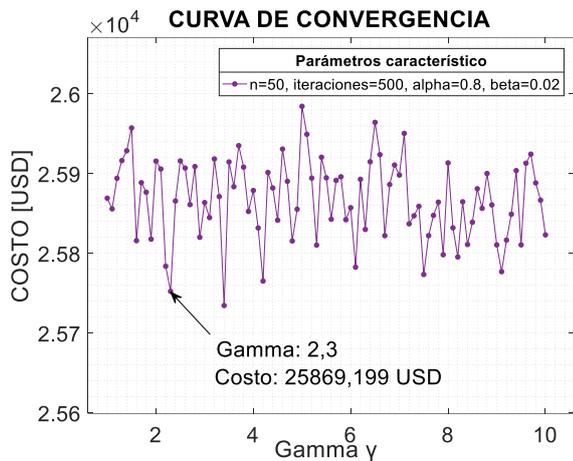


Figura 6. Variación de γ en la hora de demanda máxima del día sábado

En la Figura 6, se observa que la variación del coeficiente de absorción de luz de luciérnagas es el más sensible, ya que mediante el cual se discierne si la solución encontrada es el valor óptimo y con ello todas las luciérnagas van hacia el foco de luz que representa la solución.

La variación de los parámetros en la búsqueda de solución del algoritmo de las luciérnagas, muestra que tienden a la solución óptima que, en este caso, es el costo de operación de las unidades térmicas para abastecer la demanda.

5. CONCLUSIONES

El algoritmo heurístico basado en el comportamiento de las luciérnagas, aplicado al despacho de unidades térmicas de un sistema real ha demostrado su potencial de aplicación al obtener el despacho de mínimo costo observando las restricciones planteadas del problema y considerando como función objetivo la curva lineal de costos.

Los parámetros del modelo, si bien presentan variaciones en la convergencia en algunos casos de manera acelerada muestran que tienden a ubicar el óptimo global para cada hora del despacho y en global alcanzar el menor costo de operación del despacho diario. Mediante simulaciones se determina que el número adecuado de luciérnagas corresponde a las 50.

El problema analizado muestra que el algoritmo heurístico basado en el comportamiento de las luciérnagas, se comporta adecuadamente para obtener el despacho diario para satisfacer la demanda, se sugiere ampliar el estudio del mismo considerando la red eléctrica a fin de incluir las restricciones de calidad y seguridad de energía que en la práctica debe observar el mismo. Adicional es necesario analizar la aplicación del algoritmo al problema de coordinación hidrotérmica a fin de optimizar el despacho global de las centrales hidroeléctricas y de energía renovable lo cual permita ver el potencial del algoritmo, para lo cual se hace necesario observar la inclusión de las restricciones de cada elemento adicional a ser considerado y del tratamiento de la función objetivo.

REFERENCIAS

- Apostolopoulos, T., y Vlachos, A. (2011). Application of the Firefly Algorithm for Solving the Economic Emissions Load Dispatch Problem, *International Journal Combination*, vol. 2011, pp. 1–23. <https://doi.org/10.1155/2011/523806>
- Azad, A. (2011). Optimum Design of Structures Using an Improved Firefly Algorithm, *International Journal Optimization Civil Engineering*, vol. 1(2), pp. 327–340.
- Banabeau, E., Dorigo, M., y Theraulaz, G. (1999). *Swarm Intelligence from Natural to Artificial Systems*, 1st ed. New York: Oxford University Press.
- Basu, B., y Mahanti, G. (2011). Firefly and Artificial Bees Colony Algorithm for Synthesis of Scanned and Broadside Linear Array Antenna, *Prog. Electromagn. Res. B*, vol. 32, no. July, pp. 169–190. doi:10.2528/PIERB11053108
- Bin Mo, Ma, Y., y Zheng, Q. (2013). Optimal Choice of Parameters for Firefly Algorithm, *Proceedings - 2013 4th Int. Conf. Digit. Manuf. Autom. ICDMA 2013*, pp. 887–892.
- Conejo, A., Carrión, M., y Morales, J. (2010). *Decision Making Under Uncertainty in Electricity Markets*, 1st ed. New York: Springer Science.
- Kennedy, J., y Eberhart, R. (2001). *Swarm Intelligence*, 1st ed. San Francisco: Academic Press.
- Lukasik, S., y Zak, S. (2009). Firefly algorithm for continuous constrained optimization tasks, *Proceedings International Conference Computation Intelligence (ICCCI '09)*, vol. 5796, pp. 97–106.
- Operador Nacional de Electricidad (n.d.). Información sobre la operación del SNI, Obtenido de: <http://www.cenace.org.ec> (octubre, 2018).
- PSR (n.d.) Manual del Programador NCP, disponible: <https://www.psr-inc.com> (octubre, 2018).
- Swarnkar, K. (2012). Economic Load Dispatch Problem with Reduce Power Losses using Firefly Algorithm, *Journal Advanced Computation Sci. Nad Technol.*, pp. 42–56.
- Waqar, A., Nawaf, M., Surafel, L., y Jean, M. (2016). *A Review and Comparative Study of Firefly Algorithm and its Modified Versions, Optimization Algorithms-Methods and Applications*, B. Ozgur, Ed. InTech, p. 35.
- Wood, A., y Wollenberg, B. (1996). *Power Generation, Operation and Control*, Second., vol. 37. Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- Yang, X. (2014). *Firefly Algorithms*, 1st Ed. London: Elsevier.
- Yang, X. (2009). *Firefly Algorithms for Multimodal Optimization, Stoch. Algorithms Found. Appl.*, vol. 5792, no. March 2010, pp. 169–178.
- Yang, X. (2010). *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms Second Edition*, 2nd Ed. United Kingdom: Luniver Press.

BIOGRAFÍAS



José Antonio Oscullo recibió el título de ingeniero eléctrico de la Escuela Politécnica Nacional de Quito, Ecuador en 1996 y master en ingeniería eléctrica por la Universidad Estatal de Campinas, Sao Paulo, Brasil en 2002, es candidato a Doctor de Ingeniería eléctrica en la Escuela Politécnica Nacional en 2021. Su campo de investigación incluye el uso de minería de datos para la simulación y elementos de control en redes eléctricas inteligentes.



Santiago Pilaquinga recibió el título de ingeniero eléctrico de la Escuela Politécnica Nacional de Quito, Ecuador en 2018. Sus áreas de interés están relacionadas a la expansión del parque generador, técnicas de optimización de sistemas eléctricos y energías alternativas con fines de generación eléctrica.

Semigrupos Dinámicamente Gradiente en un Espacio Métrico

Gavilán, Maruja ^{1,*} 

¹Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Matemáticas, Lima, Perú

Resumen: Estudiamos la dinámica interna de un compacto invariante por medio de distintas nociones: atractor local, repulsor y pareja atractor–repulsor. Se describe la descomposición de Morse (en el sentido de Rybakowski (1987)) y para un atractor global probamos las equivalencias de los conceptos de atractor local y descomposición de Morse dados en los libros de Carvalho et al. (2013) y de Rybakowski (1987). Se presentan los resultados de Aragão et al. (2011) según los cuales existe una equivalencia entre el semigrupo gradiente (admite una función de Lyapunov) y el semigrupo dinámicamente gradiente (en el sentido de Carvalho et al. (2013)). Concluimos presentando la estabilidad de semigrupos gradientes bajo perturbaciones, vía ejemplos ilustrativos.

Palabras claves: Funciones de Lyapunov y estabilidad. Atractores. Repulsores. Semigrupo dinámicamente gradiente

Dynamically Gradient Semigroups in a Metric Space

Abstract: We study the internal dynamics of an invariant compact by using different concepts: local attractor, repeller and “pair attractor–repeller”. The “Decomposition of Morse” (in the sense of Rybakowski (1987)) is described, and on a global attractor we prove the equivalence of the concepts of local attractor and Decomposition of Morse given in the books of Carvalho et al. (2013) and of Rybakowski (1987). The results of Aragão et al. (2011) are presented according to which there exists an equivalence between the gradient semigroup (it has a Lyapunov function) and the dynamically gradient semigroup (in the sense of Carvalho et al. (2013)). We conclude by presenting the stability of gradient semigroups under perturbations, via illustrative examples.

Keywords: Lyapunov functions and stability. Attractors. Repellers. Dynamically Gradient Semigroup. 2020 Mathematics Subject Classification. 37B25 (35B41, 37C70, 37B55, 37L05).

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas dinámicos en dimensión infinita abarcan aquellos que en algún sentido son disipativos, por ejemplo, los semigrupos que admiten un atractor global: «un compacto invariante que atrae a todos los conjuntos acotados» (Raugel, 2002; Hale, 2004). En Rybakowski (1987), se exponen dos conceptos útiles en un compacto invariante: atractor local y descomposición de Morse. Ambas nociones fueron reexaminadas en Carvalho et al. (2013), pero en un atractor global. Con el objeto de comparar los resultados de Carvalho et al. (2013) con los de Rybakowski (1987) y así esclarecer el contexto, en el presente trabajo a las definiciones dadas en el libro de Rybakowski se les adiciona el adjetivo «débil» y se prueba su equivalencia cuando el compacto invariante es un atractor global. Las dos equivalencias están en la proposición 2.11 y el teorema 3.4, respectivamente. La tercera – aparece en el teorema 4.13 – es la equivalencia entre el semigrupo gradiente (los que poseen una función de Lyapunov) y el semigrupo dinámicamente gradiente (en el sentido de Carvalho et al. (2013)), tal como se prueba en Aragão et al. (2011). Se estudia finalmente la estabilidad de los semigrupos gradiente, por medio de algunos ejemplos que ilustran el teorema 5.3, demostrado en Carvalho et al. (2013).

1.1 Notaciones y definiciones previas

El dominio de las aplicaciones consideradas en este artículo es un espacio métrico (X, d) , denotado por X . La topología se construye por medio de la distancia $d : X \times X \rightarrow [0, +\infty)$ y haciendo uso de la ε -vecindad abierta generada por cada $\varepsilon > 0$ en cualquier subconjunto A de X , la cual viene dada por

$$\mathcal{O}_\varepsilon(A) = \bigcup_{a \in A} \{x \in X : d(x, a) < \varepsilon\} = \{x \in X : d(x, A) < \varepsilon\},$$

donde $d(x, A) = \inf\{d(x, a) : a \in A\}$. Específicamente, una familia $T(\cdot) = \{T(t) : t \geq 0\}$ que está formada por funciones continuas de X en X es un **semigrupo** en X , si $T(\cdot)$ satisface las tres condiciones siguientes:

- ◊ $T(0) = I_X$, donde I_X es la aplicación identidad en X .
- ◊ $T(s+t) = T(t)T(s)$ (composición), para todo $t, s \in [0, +\infty)$.
- ◊ $[0, +\infty) \times X \ni (t, x) \mapsto T(t)x \in X$ es continua.

La **órbita positiva** de un subconjunto E de X viene dada por

$$\gamma^+(E) = \bigcup_{t \geq 0} T(t)E.$$

*mgavilang@unmsm.edu.pe

Recibido: 12/08/2020

Aceptado: 12/04/2022

Publicado en línea: 25/05/2022

10.33333/tp.vol50n1.05

CC 4.0

Con la órbita se estudia el comportamiento asintótico de E bajo la acción del semigrupo, por ejemplo, cuando la órbita positiva es el propio conjunto. Se utilizan concretamente los subconjuntos **invariantes** bajo $T(\cdot)$, es decir, los conjuntos $A \subset X$ que cumplen

$$T(t)A = A, \quad \text{para todo } t \geq 0.$$

Para relacionar las propiedades dinámicas de un conjunto invariante con otras órbitas, se introduce el concepto de atracción para lo cual es necesario comparar conjuntos. Esto se logra haciendo uso de la semidistancia de Hausdorff entre dos subconjuntos del espacio métrico, la cual viene dada por

$$d_H(A, B) = \sup \{d(a, B) : a \in A\}; \quad A \subset X, \quad B \subset X.$$

De este modo, cuando

$$\lim_{t \rightarrow \infty} d_H(T(t)B, A) = 0; \quad A \subset X, \quad B \subset X$$

se dice que A **atrae** al conjunto B . Finalmente, al subconjunto \mathcal{A} de X se le denomina **atractor global** para $T(\cdot)$ cuando:

- ◊ \mathcal{A} es compacto.
- ◊ \mathcal{A} es invariante.
- ◊ \mathcal{A} atrae a cada subconjunto acotado de X .

Cabe mencionar que cada atractor global no solo es único, sino también está formado por todas las soluciones globales que son acotadas.

La exposición se organiza de la siguiente manera. En la sección 2 se definen los dos tipos de atractores locales y se describen las condiciones para obtener su equivalencia (proposición 2.11). En la sección 3 no solo se incluye el concepto de descomposición de Morse débil, sino también sus propiedades dinámicas. En este contexto, se usa la llamada familia invariante aislada para obtener el teorema 3.4, donde se establece la equivalencia del concepto de descomposición de Morse presentado por dos enfoques diferentes en los libros de Rybakowski (1987) y de Carvalho et al. (2013). En la sección 4, se introduce el concepto de semigrupo gradiente con respecto a una familia invariante aislada y se prueba que el semigrupo es dinámicamente gradiente con respecto a esa familia (proposición 4.8). Para la recíproca de esta afirmación se construye una función de Lyapunov generalizada, estableciéndose así la equivalencia entre los dos conceptos (teorema 4.13). En la sección 5, se presenta el teorema de estabilidad (teorema 5.3) como una aplicación de la teoría desarrollada en las secciones anteriores, mediante algunos ejemplos. Se concluye con el apéndice A, donde se describen las propiedades básicas de las soluciones maximales de una ecuación diferencial autónoma definida en un espacio de dimensión finita.

2. ATRACTORES EN UN COMPACTO INVARIANTE

El conjunto ω -límite, asociado a E es

$$\omega(E) = \bigcap_{s \geq 0} \overline{\gamma^+(T(s)E)} = \bigcap_{s \geq 0} \overline{\left(\bigcup_{t \geq s} T(t)E\right)}.$$

Este conjunto cerrado no solo verifica la siguiente igualdad $\omega(E) = \omega(T(t)E), \forall t \geq 0$, sino también es **positivamente invariante**: $T(t)\omega(E) \subset \omega(E), \forall t \geq 0$. Además

$$A \subset B \implies \omega(A) \subset \omega(B). \quad (1)$$

Por ejemplo, para un compacto invariante $A \subset X$ se cumple la igualdad $\omega(A) = A$. El ω -límite del conjunto unitario $E = \{z\}$ se denota por $\omega(z)$ y satisface

$$\omega(z) = \{y \in X : \exists 0 < t_k \xrightarrow{k \rightarrow \infty} +\infty \text{ con } \lim_{k \rightarrow \infty} T(t_k)z = y\}.$$

Cabe mencionar que si $E \subset X$ es un conjunto no vacío, puede ocurrir que

$$\omega(E) \neq \bigcup_{z \in E} \omega(z).$$

Esto sucede, por ejemplo, en el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales:

$$\begin{cases} \dot{x} = -y + (x^2 + y^2 - 1)(4 - x^2 - y^2)x, \\ \dot{y} = x + (x^2 + y^2 - 1)(4 - x^2 - y^2)y. \end{cases} \quad (2)$$

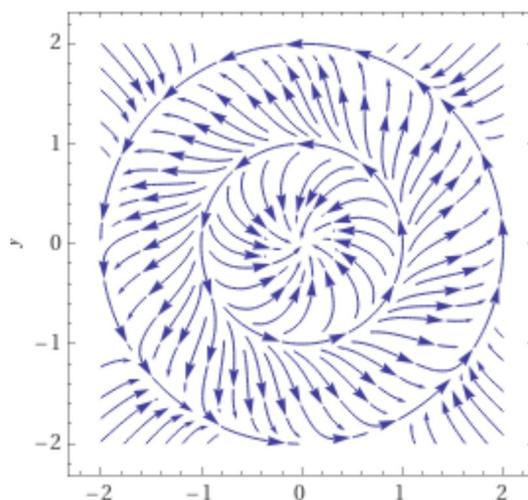


Figura 1. Retrato de fase del sistema (2) <https://www.wolframalpha.com/>

En el siguiente disco compacto $\bar{D}_1 = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : x^2 + y^2 \leq 1\}$, se obtiene que $T(t)\bar{D}_1 = \bar{D}_1$ para todo $t \geq 0$. Además

$$\bar{D}_1 = \omega(\bar{D}_1) \neq \{(0, 0)\} \cup \partial\bar{D}_1 = \bigcup_{z \in \bar{D}_1} \omega(z).$$

Observación 2.1. El sistema (2) es un caso especial del Ejemplo 6.3 y por tanto, definen adecuadamente un semigrupo. En coordenadas polares (r, θ) el sistema (2) induce naturalmente la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{dr}{d\theta} = (r^2 - 1)(4 - r^2)r.$$

En particular,

$$r > 2 \implies \frac{dr}{d\theta} < 0. \quad (3)$$

La desigualdad se preserva para $0 < r < 1$, y en $r = 1$ y $r = 2$ aparecen dos ciclos límite.

2.1 Pareja atractor-repulsor

La siguiente definición aparece en el libro de Rybakowski y no presupone la existencia de un atractor global para el semigrupo. Para evitar cualquier equivocación se habla de una pareja atractor-repulsor dentro de un compacto invariante. Este concepto es complementario al llamado par atractor-repulsor en un atractor global (definición 2.9).

Definición 2.2. Sea $S_{\mathcal{A}}$ un compacto invariante bajo $T(\cdot)$. El conjunto $A \subset S_{\mathcal{A}}$ es un **atractor local débil** (en $S_{\mathcal{A}}$) si existe una constante $\varepsilon > 0$ que satisface

$$\omega(\mathcal{O}_\varepsilon(A) \cap S_{\mathcal{A}}) = A.$$

El **repulsor** (relativo a $S_{\mathcal{A}}$) asociado al atractor local débil $A \subset S_{\mathcal{A}}$ es

$$A^* = \{x \in S_{\mathcal{A}} : \omega(x) \cap A = \emptyset\}.$$

Al par ordenado (A, A^*) se le dice: **pareja atractor-repulsor**, respecto a $S_{\mathcal{A}}$.

Ejemplo 2.3. En el semigrupo inducido por (2) y descrito por la Figura 1 el conjunto $S_{\mathcal{A}} = \overline{D_1}$ es un compacto, invariante bajo $T(\cdot)$. El conjunto $A = \overline{D_1}$ es un atractor local débil pues satisface $A = \omega(\mathcal{O}_\varepsilon(A) \cap S_{\mathcal{A}})$ para algún $\varepsilon > 0$ y su respectivo repulsor A^* es \emptyset .

En el estudio de las propiedades dinámicas de la pareja atractor-repulsor (A, A^*) en un compacto invariante $S_{\mathcal{A}}$ (teorema 2.4), aparece el concepto de **solución global**. La solución global para el semigrupo $T(\cdot)$ es una función continua $\xi : \mathbb{R} \rightarrow X$ que verifica

$$T(t)\xi(s) = \xi(t+s), \quad \forall s \in \mathbb{R} \quad y \quad \forall t \in [0, +\infty).$$

Si $x \in X$ admite una solución global ξ_x con $\xi_x(0) = x$ se dice que la solución global ξ_x **pasa por** x . Esta solución ξ_x verifica $\xi_x(t) = T(t)x$ para todo $t \geq 0$. Además, el conjunto α -límite es

$$\alpha(\xi_x) = \{y \in X : \exists 0 < t_k \xrightarrow{k \rightarrow \infty} +\infty \text{ con } \lim_{k \rightarrow \infty} \xi_x(-t_k) = y\}.$$

En este contexto, por la continuidad del semigrupo se obtiene $T(t)\alpha(\xi_x) \subset \alpha(\xi_x), \forall t \geq 0$. Análogamente, para cada elección del parámetro $t \geq 0$, la regla de correspondencia $s \mapsto \xi_x(t+s)$ define una solución global que pasa por $T(t)x$.

Teorema 2.4. Sea (A, A^*) una pareja atractor-repulsor para $T(\cdot)$, respecto a $S_{\mathcal{A}}$, entonces

- (a) Los conjuntos A y A^* son disjuntos, compactos e invariantes.
- (b) Sea $\xi_x = \xi : \mathbb{R} \rightarrow S_{\mathcal{A}}$ la solución global que pasa por $x \in S_{\mathcal{A}}$; las siguientes implicaciones son válidas:
 - (i) Si $x \in A^*$ o la intersección $\omega(x) \cap A^* \neq \emptyset$, entonces $\xi(\mathbb{R}) \subset A^*$.
 - (ii) Si $\alpha(\xi) \cap A \neq \emptyset$ entonces $\xi(\mathbb{R}) \subset A$.
 - (iii) Si $x \notin A \cup A^*$, entonces $A^* \supset \alpha(\xi)$ y $\omega(x) \subset A$.

Demostración. La prueba de este teorema aparece en el último capítulo del libro de Rybakowski (1987). □

Corolario 2.5. Sean $x \in S_{\mathcal{A}}$ y A el atractor local débil en $S_{\mathcal{A}}$.

Si $\omega(x) \cap A \neq \emptyset$, entonces $\omega(x) \subset A$.

Demostración. Se observa inicialmente que si $x \in A$, entonces por la propiedad (1) y la invarianza de A se obtiene directamente que el conjunto $\omega(x)$ está incluido en A . Si por el contrario $x \notin A$ y la intersección $\omega(x) \cap A \neq \emptyset$, la definición del repulsor A^* implica directamente que $x \notin A^*$. En otras palabras, $x \notin (A \cup A^*)$. Por el teorema 2.4, se obtiene $\omega(x) \subset A$. Por lo tanto, se cumple el corolario. □

2.2 Pares en un atractor global

El atractor global de $T(\cdot)$ es el compacto invariante que atrae a cada subconjunto acotado de X . En otras palabras, el atractor global es un compacto invariante al cual confluyen todas las trayectorias, este hecho nos da la información de cómo evoluciona el sistema con el transcurrir del tiempo. Cabe recordar que el atractor global es único y se caracteriza con las soluciones globales ξ que son acotadas. Es decir, el atractor global \mathcal{A} satisface

$$\mathcal{A} = \left\{ \xi(0) : \xi \text{ es una solución global acotada} \right\}.$$

A continuación, se presenta un resultado de existencia del atractor global en dimensión finita, tal como aparece en Gavilán (2019). Cabe mencionar que tal monografía no describe la estabilidad de las familias uniparamétricas de semigrupos en el sentido de la sección 5.

Proposición 2.6. Si $X = \mathbb{R}^n$ y $T(\cdot)$ admite un subconjunto acotado $B \subset \mathbb{R}^n$ que atrae a cada conjunto unitario de \mathbb{R}^n . Entonces B atrae a cada subconjunto compacto $K \subset \mathbb{R}^n$. En particular, B es atrayente, es decir:

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} d_H(T(t)C, B) = 0, \quad \forall C \subset \mathbb{R}^n, \text{ acotado.}$$

Demostración. La condición « B atrae al conjunto A » es equivalente a decir para cada constante $\varepsilon > 0$, la vecindad $\mathcal{O}_\varepsilon(B)$ absorbe al conjunto A . Simbólicamente esto significa:

$$\forall \varepsilon > 0, \exists t_{A,\varepsilon} > 0 \text{ tal que } T(t)A \subset \mathcal{O}_\varepsilon(B), \text{ si } t \geq t_{A,\varepsilon}. \quad (4)$$

Esto se obtiene directamente, puesto que la inclusión $T(t)A \subset \mathcal{O}_\varepsilon(B)$ es equivalente a la desigualdad $d_H(T(t)A, B) \leq \varepsilon$. En este contexto, basta probar que para cada conjunto compacto $K \subset \mathbb{R}^n$ se cumple:

$$\varepsilon > 0 \Rightarrow \mathcal{O}_\varepsilon(B) \text{ absorbe al conjunto } K.$$

En efecto, si $\varepsilon > 0$, la condición $\lim_{t \rightarrow +\infty} d_H(T(t)x, B) = 0, \forall x \in \mathbb{R}^n$ implica que alguna vecindad abierta de $x \in K$ es absorbida por $\mathcal{O}_\varepsilon(B)$. Usando una cobertura finita del compacto K se infiere que $\mathcal{O}_\varepsilon(B)$ absorbe K . Por (4), se obtiene que B atrae a cada compacto $K \subset \mathbb{R}^n$.

El conjunto B es atrayente, pues para cada acotado $C \subset \mathbb{R}^n$ su clausura \overline{C} es un compacto que satisface no solo la inclusión $\overline{T(t)C} \subset T(t)\overline{C}$ sino también

$$d_H(T(t)C, B) = d_H(\overline{T(t)C}, B) \leq d_H(T(t)\overline{C}, B) \rightarrow 0.$$

Esto concluye la demostración. □

Ejemplo 2.7. La ecuación diferencial

$$\dot{x} = -x(x - \eta)(x + \eta), \quad \eta \text{ es una constante}$$

induce un semigrupo $T(\cdot)$ que admite un conjunto compacto e invariante que atrae a cada número real. Específicamente, a partir de la proposición 2.6, se obtiene que el intervalo $\mathcal{A} = [-\eta, \eta]$ es el atractor global.

Ejemplo 2.8. Considere el sistema de ecuaciones diferenciales dado en (2). Por la caracterización presentada en (3), se obtiene directamente que el disco

$$\overline{D_2} = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : x^2 + y^2 \leq 4\},$$

de la Figura 1, es un conjunto compacto e invariante bajo $T(\cdot)$ que atrae a cada conjunto unitario del plano \mathbb{R}^2 . En este contexto, la proposición 2.6 garantiza que el disco $\overline{D_2}$ es el atractor global del sistema.

A continuación, se estudia la estructura del atractor global.

Definición 2.9. Sea $T(\cdot)$ un semigrupo que admite un atractor global $\mathcal{A} \subset X$. Un subconjunto $A \subset \mathcal{A}$ es un **atractor local del semigrupo** si

$$\omega(\mathcal{O}_\varepsilon(A)) = A, \quad \text{para algún } \varepsilon > 0.$$

El **repulsor** A^* asociado al atractor local A es el conjunto definido por

$$A^* = \{x \in \mathcal{A} : \omega(x) \cap A = \emptyset\}.$$

El par (A, A^*) es llamado **par atractor-repulsor para** $T(\cdot)$.

Ejemplo 2.10. A manera de ilustración se presentan algunos atractores locales que se construyen dentro del atractor global $\mathcal{A} = \overline{D_2}$ (ejemplo 2.8). Específicamente, ellos son:

$$A_0 = \emptyset, \quad A_1 = \{(0, 0)\}, \quad A_2 = \{(0, 0)\} \cup \partial \overline{D_2} \text{ y } A_3 = \overline{D_2} = \mathcal{A}.$$

Así, cada uno de estos conjuntos cumplen $\omega(\mathcal{O}_\varepsilon(A_j)) = A_j$ para algún $\varepsilon > 0$ cuando $0 \leq j \leq 3$. Sus respectivos repulsores asociados son:

$$A_0^* = \mathcal{A}, \quad A_1^* = \overline{D_2} \setminus \text{int}(\overline{D_1}), \quad A_2^* = \partial \overline{D_1} \text{ y } A_3^* = \emptyset$$

donde $\text{int}(\overline{D_1})$ significa el interior de $\overline{D_1}$. Además se observa que

$$\emptyset = A_0 \subset A_1 \subset A_2 \subset A_3 = \mathcal{A} \quad \text{y} \quad \emptyset = A_3^* \subset A_2^* \subset A_1^* \subset A_0^* = \mathcal{A}.$$

La siguiente proposición presenta las definiciones de atractor local de acuerdo a dos enfoques diferentes. El primero aparece en el libro de Rybakowski (1987) y el segundo se encuentra en el libro de Carvalho et al. (2013).

Proposición 2.11. Sea \mathcal{A} un atractor global para $T(\cdot)$. Si $A \subset \mathcal{A}$ es invariante, son equivalentes:

(a) Existe $\varepsilon > 0$ tal que $\omega(\mathcal{O}_\varepsilon(A) \cap \mathcal{A}) = A$.

(b) Existe $\varepsilon > 0$ tal que $\omega(\mathcal{O}_\varepsilon(A)) = A$.

Demostración. Si se acepta el ítem (b), basta observar que

$$A \subset \mathcal{O}_\varepsilon(A) \cap \mathcal{A} \subset \mathcal{O}_\varepsilon(A).$$

A partir de las propiedades del conjunto límite, que aparecen en (1), se obtiene que

$$\omega(A) \subset \omega(\mathcal{O}_\varepsilon(A) \cap \mathcal{A}) \subset \omega(\mathcal{O}_\varepsilon(A)) = A$$

Por lo tanto, se cumple (a) pues A es invariante.

Para la demostración de la recíproca vea el libro de Carvalho et al. (2013). \square

Observación 2.12. Cuando en la proposición 2.11, se sustituye la condición \mathcal{A} (atractor global) por $S_{\mathcal{A}}$ (compacto e invariante) la equivalencia no necesariamente es válida.

Este hecho se muestra en el siguiente ejemplo:

Ejemplo 2.13. Sea $S_{\mathcal{A}} = \overline{D_1}$. En el ejemplo 2.3 se observa que el conjunto $A = \overline{D_1}$ cumple el ítem (a) de la proposición 2.11, sin embargo $A = \overline{D_1}$ no satisface el ítem (b), pues $\omega(\mathcal{O}_\varepsilon(A)) \neq A$ para todo $\varepsilon > 0$.

3. DESCOMPOSICIÓN DE MORSE

El estudio de la descomposición de Morse es una herramienta importante que permite entender la dinámica de un atractor global.

Definición 3.1. Sea $S_{\mathcal{A}} \subset X$, un conjunto compacto e invariante con respecto a $T(\cdot)$. Una colección ordenada $\{E_1, \dots, E_n\}$ de subconjuntos $E_j \subset S_{\mathcal{A}}$ es una **descomposición de Morse débil** de $S_{\mathcal{A}}$ si existe un sucesión creciente

$$A_0 = \emptyset \subset A_1 \subset \dots \subset A_{n-1} \subset S_{\mathcal{A}} = A_n \quad (5)$$

de atractores locales débiles, en $S_{\mathcal{A}}$ para los cuales se cumple

$$E_j = A_j \cap A_{j-1}^*, \quad \forall 1 \leq j \leq n.$$

Las propiedades básicas de una familia que satisface esta definición se describen en la siguiente proposición.

Proposición 3.2. Sea $S_{\mathcal{A}} \subset X$ un compacto, invariante con respecto a $T(\cdot)$ y $\{E_1, \dots, E_n\}$ una descomposición de Morse de $S_{\mathcal{A}}$ asociada a los atractores locales débiles, $\emptyset = A_0 \subset A_1 \subset \dots \subset A_{n-1} \subset A_n = S_{\mathcal{A}}$. Se satisfacen los siguientes enunciados.

- (a) Existe $\varepsilon > 0$ tal que $\mathcal{O}_\varepsilon(E_i) \cap \mathcal{O}_\varepsilon(E_j) = \emptyset$ si $1 \leq i < j \leq n$.
- (b) Si $\xi_x = \xi : \mathbb{R} \rightarrow S_{\mathcal{A}}$ es la solución global que pasa por $x \in S_{\mathcal{A}}$, entonces:
 - o $\xi(\mathbb{R}) \subset E_j$ para algún $j = 1, \dots, n$.
 - o existen $k < r$ tal que $E_k \supset \omega(x)$ y $\alpha(x) \subset E_r$.
- (c) Cada A_k está únicamente determinado por $\{E_1, \dots, E_n\}$:

$$A_k = \{x \in S_{\mathcal{A}} : \alpha(\xi_x) \subset E_1 \cup \dots \cup E_k\}, \quad 1 \leq k \leq n.$$
- (d) Si $1 \leq i \leq n$, (A_{i-1}, E_i) es una pareja atractor-repulsor respecto a A_i .

Demostración. Referimos al libro de Rybakowski. □

La siguiente proposición describe una caracterización de la existencia de una familia que satisface la definición 3.1.

Proposición 3.3. *Sea $S_{\mathcal{A}} \subset X$ un compacto, invariante con respecto a $T(\cdot)$. Si se asume que la familia ordenada $\{E_1, \dots, E_n\}$ satisface las tres condiciones:*

1. Cada $E_k \subset S_{\mathcal{A}}$ es compacto e invariante.
2. Existe $\varepsilon > 0$ tal que $\mathcal{O}_\varepsilon(E_i) \cap \mathcal{O}_\varepsilon(E_j) = \emptyset$, si $1 \leq i < j \leq n$.
3. Si $\xi = \xi_x : \mathbb{R} \rightarrow S_{\mathcal{A}}$ es la solución global que pasa por $x \in S_{\mathcal{A}}$, entonces
 - $\xi_x(\mathbb{R}) \subset E_i$ para algún $i = 1, \dots, n$.
 - existen $j < i$ tal que $E_j \supset \omega(x)$ y $\alpha(\xi_x) \subset E_i$.

Entonces $\{E_1, \dots, E_n\}$ es una descomposición de Morse de $S_{\mathcal{A}}$.

Demostración. La prueba está en el libro de Rybakowski. □

3.1 Familia invariante aislada

Este concepto aparece en el artículo de Aragão et al. (2011) y es de gran utilidad para describir las propiedades de una descomposición de Morse, en un atractor global \mathcal{A} (teorema 3.4). La familia $\{E_1, \dots, E_n\}$ es **invariante aislada** si existe $\delta > 0$ tal que

$$\mathcal{O}_\delta(E_i) \cap \mathcal{O}_\delta(E_j) = \emptyset, \text{ cuando } 1 \leq i < j \leq n$$

y cada cerrado $E_i \subset \mathcal{A}$ es el invariante maximal en $\mathcal{O}_\delta(E_i)$. En otras palabras, cada conjunto cerrado E_i es invariante aislado. Específicamente, un conjunto cerrado e invariante $E \subset X$ se denomina **invariante aislado**, si existe una constante $\varepsilon > 0$ tal que el conjunto inicial E es el invariante maximal en $\mathcal{O}_\varepsilon(E)$, es decir, cualquier conjunto invariante $B \subset \mathcal{O}_\varepsilon(E)$ satisface $B \subset E$. Por ejemplo, en un atractor global \mathcal{A}

cada atractor local $A \subset \mathcal{A}$ y su respectivo repulsor

son invariantes aislados.

El siguiente teorema demuestra la equivalencia del concepto de descomposición de Morse dados en los libros de Rybakowski (1987) y de Carvalho et al. (2013). Cabe mencionar que por la proposición 2.11 los pares atractor-repulsor en un atractor global heredan las propiedades topológicas de las parejas atractor-repulsor, por ejemplo la compacidad. En particular, se dan las condiciones para aplicar el teorema 2.4.

Teorema 3.4. *Sea $T(\cdot)$ un semigrupo que admite un atractor global \mathcal{A} . Son equivalentes:*

- (1) *El atractor global admite una descomposición de Morse débil. Es decir, existe una colección ordenada $\{\tilde{E}_1, \dots, \tilde{E}_n\}$ asociada a una familia de atractores locales débiles en \mathcal{A}*

$$\emptyset = A_0 \subset A_1 \subset \dots \subset A_{n-1} \subset A_n = \mathcal{A}$$

por medio de la relación

$$\tilde{E}_j = A_j \cap A_{j-1}^*, \quad \forall 1 \leq j \leq n.$$

- (2) *El atractor global admite una familia ordenada $\{E_1, \dots, E_n\}$ de cerrados que es invariante aislada, para la cual cada solución global $\xi : \mathbb{R} \rightarrow \mathcal{A}$ induce i, j con $i \geq j$ tal que*

$$E_i \xleftarrow{t \rightarrow -\infty} \xi(t) \xrightarrow{t \rightarrow +\infty} E_j.$$

Demostración. (1 \Rightarrow 2): Se prueba inicialmente que la siguiente familia ordenada $\{\tilde{E}_1, \dots, \tilde{E}_n\}$ es invariante aislada. Para obtener esta afirmación se observa que todos los conjuntos $\tilde{E}_j = A_j \cap A_{j-1}^*$ son compactos y disjuntos, por ello existe una constante positiva $\varepsilon > 0$ que satisface $\mathcal{O}_\varepsilon(\tilde{E}_i) \cap \mathcal{O}_\varepsilon(\tilde{E}_j) = \emptyset$ cuando $1 \leq i < j \leq n$. Como \tilde{E}_i es el repulsor de A_{i-1} en A_i , entonces \tilde{E}_i es invariante aislado, es decir, admite una constante $\delta_i > 0$ de modo que \tilde{E}_i es invariante maximal en $\mathcal{O}_{\delta_i}(\tilde{E}_i)$. Por tanto,

- Existe la constante $\delta = \min\{\varepsilon, \delta_1, \dots, \delta_n\} > 0$ para la cual se cumple que \tilde{E}_i es invariante maximal en $\mathcal{O}_\delta(\tilde{E}_i)$. Además, si $1 \leq i < j \leq n$, la intersección $\mathcal{O}_\delta(\tilde{E}_i) \cap \mathcal{O}_\delta(\tilde{E}_j) = \emptyset$.

Continuando con la prueba, se afirma que cada solución global $\xi : \mathbb{R} \rightarrow \mathcal{A}$ induce subíndices i, j con $i \geq j$ de modo que $\alpha(\xi) \subset \tilde{E}_i$ y $\omega(\xi(0)) \subset \tilde{E}_j$. En este sentido, se da $x = \xi(0) \in \mathcal{A}$ y se elige el subíndice i como el menor elemento del conjunto $\{1, \dots, n\}$ para el cual el respectivo atractor local A_i contiene a x , pero A_{i-1} no lo incluye. Es decir,

$$i = \min\{1, \dots, n : x \in A_i, \text{ pero } x \notin A_{i-1}\}.$$

En este contexto, si $x \in A_{i-1}^*$, la invarianza del conjunto cerrado \tilde{E}_i garantiza que $\alpha(\xi) \cup \omega(x) \subset \tilde{E}_i$ y se concluye. Si por el contrario $x \notin A_{i-1}^*$ es decir $x \notin (A_{i-1} \cup A_{i-1}^*)$, el teorema 2.4 muestra que $\alpha(\xi) \subset A_{i-1}^*$ y $\omega(x) \subset A_{i-1}$. La elección de i y la invarianza de A_i implica que $\alpha(\xi) \subset \tilde{E}_i = A_i \cap A_{i-1}^*$. De $\omega(x) \subset A_{i-1}$, pueden ocurrir dos situaciones complementarias:

$$o \quad \omega(x) \cap A_{i-2}^* \neq \emptyset, \text{ o bien } \omega(x) \cap A_{i-2}^* = \emptyset.$$

Si $\omega(x) \cap A_{i-2}^* \neq \emptyset$, el teorema 2.4 muestra que $\omega(x) \subset A_{i-2}^*$ y se concluye que $\omega(x) \subset \tilde{E}_{i-1}$. Si por el contrario $\omega(x)$ es disjunto de A_{i-2}^* se desprende que $\omega(x) \cap \tilde{E}_{i-1} = \emptyset$. Es más, la suposición $\omega(x) \cap A_{i-2}^* = \emptyset$ implica que $\omega(x) \cap A_{i-2} \neq \emptyset$ y por el corolario 2.5 se obtiene $\omega(x) \subset A_{i-2}$. En este contexto,

$$\left. \begin{array}{l} \omega(x) \subset A_{i-2} \\ \omega(x) \cap A_{i-3}^* \neq \emptyset \end{array} \right\} \implies \omega(x) \subset \tilde{E}_{i-2}$$

y

$$\left. \begin{array}{l} \omega(x) \subset A_{i-2} \\ \omega(x) \cap A_{i-3}^* = \emptyset \end{array} \right\} \implies \omega(x) \subset A_{i-3}.$$

De este modo, se desprende que $\omega(x) \subset \tilde{E}_{i-2}$ o bien $\omega(x) \subset A_{i-3}$. Continuando con este procedimiento inductivo, puede finalmente ocurrir que $\omega(x) \subset A_2$, y así se desprende que $\omega(x) \subset \tilde{E}_2$ o bien $\omega(x) \subset A_1 = \tilde{E}_1$. Es decir, $\omega(x) \subset \tilde{E}_j$, para algún $1 \leq j < i$. Por lo tanto, se cumple (2) en el presente teorema.

(2 \Rightarrow 1): La familia ordenada de cerrados $\{E_1, \dots, E_n\}$ es invariante aislada, existe $\delta > 0$ tal que $\mathcal{O}_\delta(E_i) \cap \mathcal{O}_\delta(E_j) = \emptyset$ cuando $1 \leq i < j \leq n$, y además cada cerrado $E_i \subset \mathcal{A}$ es invariante maximal en $\mathcal{O}_\delta(E_i)$. La compacidad de \mathcal{A} garantiza que cada E_i es compacto. Con todo esto, (2) induce las condiciones de

la proposición 3.3. Por lo tanto, la familia $\{E_1, \dots, E_n\}$ es una descomposición de Morse y se obtiene (1). Esto concluye la demostración. \square

Ejemplo 3.5. La descomposición de Morse $\mathcal{S} = \{E_1, E_2, E_3\}$ del atractor global $\mathcal{A} = \overline{D_2}$ se obtiene utilizando la relación $E_j = A_j \cap A_{j-1}^*$ para todo $1 \leq j \leq 3$, donde el par atractor-repulsor (A_j, A_j^*) están dados en el ejemplo 2.10. Es decir,

$$E_1 = A_1 \cap A_0^* = \{(0,0)\} \cap \overline{D_2} = \{(0,0)\}.$$

$$E_2 = A_2 \cap A_1^* = (\{(0,0)\} \cup \partial \overline{D_2}) \cap (\overline{D_2} \text{ int}(\overline{D_1})) = \partial \overline{D_2}.$$

$$E_3 = A_3 \cap A_2^* = \overline{D_2} \cap \partial \overline{D_1} = \partial \overline{D_1}.$$

Además, se observa que la familia ordenada $\mathcal{S} = \{E_1, E_2, E_3\}$ de cerrados es invariante aislada. Además, en la Figura 1, para cada solución global $\xi : \mathbb{R} \rightarrow \mathcal{A}$ se cumple

$$E_3 \xleftarrow{t \rightarrow -\infty} \xi(t) \xrightarrow{t \rightarrow +\infty} E_i \text{ cuando } i = 1; 2. \quad (6)$$

4. SEMIGRUPO DINÁMICAMENTE GRADIENTE Y FUNCIÓN DE LYAPUNOV

En esta sección, se caracteriza al semigrupo gradiente usando el siguiente concepto de estructura homoclínica.

Definición 4.1. Sea $T(\cdot)$, un semigrupo y sea $\mathcal{S} = \{E_1, \dots, E_n\}$, una familia invariante aislada. Una **estructura homoclínica** en \mathcal{S} es un subconjunto $\{E_{k_1}, \dots, E_{k_p}\}$ de \mathcal{S} ($p \leq n$), asociado a soluciones globales $\{\xi_1, \dots, \xi_p\}$ para las cuales se cumple

$$E_{k_j} \xleftarrow{t \rightarrow -\infty} \xi_j(t) \xrightarrow{t \rightarrow +\infty} E_{k_{j+1}}, \quad 1 \leq j \leq p$$

donde $E_{k_{p+1}} = E_{k_1}$ y cada ξ_j admite un t_j con $\xi_j(t_j) \notin (E_{k_j} \cup E_{k_{j+1}})$.

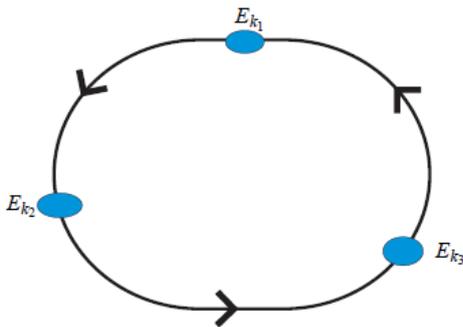


Figura 2. Estructura homoclínica ($p = 3$).

Ejemplo 4.2. De (6) se infiere que el sistema no tiene estructura homoclínica en la familia invariante aislada \mathcal{S} .

A continuación, se presenta el concepto de semigrupo dinámicamente gradiente, de acuerdo con la presentación dada en el libro de Carvalho et al. (2013). Cabe mencionar que este

concepto aparece inicialmente en el artículo de Aragão et al. (2011) con el nombre de *semigrupo tipo-gradiente* y en el artículo de Carvalho et al. (2007) se extiende al caso de los procesos de evolución.

Definición 4.3. Sea $T(\cdot)$, un semigrupo que admite un atractor global \mathcal{A} y sea $\mathcal{S} = \{E_1, \dots, E_n\}$, una familia invariante aislada. Se dice que $T(\cdot)$ es **dinámicamente gradiente**, respecto a \mathcal{S} si

- ◊ Para cualquier solución global $\xi : \mathbb{R} \rightarrow \mathcal{A}$ existe $1 \leq i, j \leq n$ tal que

$$E_i \xleftarrow{t \rightarrow -\infty} \xi(t) \xrightarrow{t \rightarrow +\infty} E_j,$$

- ◊ No existe una estructura homoclínica asociada a \mathcal{S} .

Ejemplo 4.4. La ecuación diferencial $\dot{x} = -x(x-1)(x+1)$, induce un semigrupo $T(\cdot)$ que tiene un atractor global $\mathcal{A} = [-1, 1]$. Sea $\mathcal{S} = \{E_1, E_2, E_3\}$ una familia invariante aislada, donde $E_1 = \{-1\}$; $E_2 = \{1\}$ y $E_3 = \{0\}$. Se observa que para cualquier solución global $\xi : \mathbb{R} \rightarrow \mathcal{A}$ se cumple

$$E_3 \xleftarrow{t \rightarrow -\infty} \xi(t) \xrightarrow{t \rightarrow +\infty} E_j, \quad j = 1; 2.$$

Por lo tanto, no existe estructura homoclínica en \mathcal{S} y en consecuencia $T(\cdot)$ es dinámicamente gradiente respecto a \mathcal{S} .

Ejemplo 4.5. De los resultados obtenidos en los ejemplos 3.5 y 4.2 se concluye que el semigrupo $T(\cdot)$ es dinámicamente gradiente con respecto a la familia invariante $\mathcal{S} = \{E_1, E_2, E_3\}$.

4.1 Semigrupo gradiente

Definición 4.6. Sea $T(\cdot)$, un semigrupo que admite un atractor global \mathcal{A} y sea $\mathcal{S} = \{E_1, \dots, E_n\}$, una familia invariante aislada. Se dice que $T(\cdot)$ es un **semigrupo gradiente con respecto a \mathcal{S}** si existe una función continua $V : X \rightarrow \mathbb{R}$ tal que:

- ◊ La función $[0, \infty) \ni t \mapsto V(T(t)x) \in \mathbb{R}$ es decreciente, para cada $x \in X$;
- ◊ V es constante en E_i , para cada $1 \leq i \leq n$ y
- ◊ $V(T(t)x) = V(x), \forall t \geq 0$ si y sólo si $x \in \bigcup_{i=1}^n E_i$.

V es la **función de Lyapunov generalizada** de $T(\cdot)$, con respecto a \mathcal{S} .

Ejemplo 4.7. La ecuación diferencial

$$\dot{x} = -x^3, \quad x \in \mathbb{R},$$

genera un semigrupo $T(\cdot)$ cuyo atractor global es $\mathcal{A} = \{0\}$. En este caso, $\mathcal{S} = \{E_1\} = \{\{0\}\}$ es invariante aislada y la función $V : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, definida por $V(y) = \frac{y^4}{4}$ cumple

$$\frac{d}{dt} V(x(t)) = -x^6(t),$$

donde $x(t) = T(t)x_0$ es la solución que satisface $x(0) = x_0$. Claramente se verifica que $t \mapsto V(T(t)x_0)$ es decreciente. Además, $V(x(t)) = V(x_0), \forall t \geq 0$ implica que $x(t) \in \{0\} = E_1$. Por tanto, V es una función de Lyapunov y el semigrupo es gradiente con respecto a \mathcal{S} .

Proposición 4.8. Si $V : X \rightarrow \mathbb{R}$ es una función de Lyapunov generalizada de $T(\cdot)$, con respecto a la familia invariante aislada $\mathcal{S} = \{E_1, \dots, E_n\}$, entonces $T(\cdot)$ es dinámicamente gradiente con respecto a \mathcal{S} .

Demostración. Para verificar la definición 4.3 se considera una solución global ξ_x , con $\xi_x(0) = x$. Como $T(\cdot)$ es gradiente con respecto a la familia invariante aislada $\mathcal{S} = \{E_1, \dots, E_n\}$, se cumple que

$$\omega(x) \subset \bigcup_{k=1}^n E_k \text{ y } \alpha(\xi_x) \subset \bigcup_{k=1}^n E_k.$$

Por tanto,

- ◊ Para cualquier solución global $\xi : \mathbb{R} \rightarrow \mathcal{A}$ existe $1 \leq i, j \leq n$ tal que

$$E_i \xleftarrow{t \rightarrow -\infty} \xi(t) \xrightarrow{t \rightarrow +\infty} E_j,$$

Para probar que \mathcal{S} no tiene una estructura homoclínica se procede por reducción al absurdo. En otras palabras:

- Se admite un subconjunto $\{E_{k_1}, \dots, E_{k_p}\}$ de \mathcal{S} ($p \leq n$), asociado a soluciones globales $\{\xi_1, \dots, \xi_p\}$ tales que

$$E_{k_j} \xleftarrow{t \rightarrow -\infty} \xi_j(t) \xrightarrow{t \rightarrow +\infty} E_{k_{j+1}},$$

cuando $1 \leq j \leq p$ con $E_{k_{p+1}} = E_{k_1}$.

Como V es continua y decreciente a lo largo de las soluciones, para todo $1 \leq j \leq p$ y $s \leq 0 \leq t$ se tiene

$$V(\alpha(\xi_j)) \geq V(\xi_j(s)) \geq V(\xi_j(0)) \geq V(\xi_j(t)) \geq V(\omega(\xi_j(0))),$$

donde $V(E_{k_j}) = V(\alpha(\xi_j))$ y $V(\omega(\xi_j(0))) = V(E_{k_{j+1}})$. Puesto que $E_{k_{p+1}} = E_{k_1}$, se desprende que $V(T(t)\xi_p(0)) = V(\xi_p(t)) = V(\xi_p(0))$ y por la definición 4.6, $\xi_p(0) \in \bigcup_{j=1}^p E_{k_j}$. Por la invarianza de cada E_{k_j} se tiene que los conjuntos límites $\omega(\xi_p(0)), \alpha(\xi_p) \subset E_{k_{j_0}}$ para algún $1 \leq j_0 \leq p$. Como $\omega(\xi_p(0)) \subset E_{k_{p+1}}$ y $\alpha(\xi_p) \subset E_{k_p}$, surge una contradicción con la definición de familia invariante aislada. Consecuentemente,

- ◊ No existe una estructura homoclínica asociada a \mathcal{S} .

Por tanto, el semigrupo satisface la definición 4.3. □

4.2 Atractor tipo-gradiente

En el artículo de Carvalho et al. (2009), se presenta el concepto de atractor tipo-gradiente como el atractor que se caracteriza por medio de la unión de los conjuntos inestables de sus conjuntos invariantes asociados (8). En este contexto, de acuerdo con la clásica teoría de los sistemas dinámicos, el **conjunto inestable** de un subconjunto invariante E viene dado por

$$W^u(E) = \{z \in X : \exists \xi_z : \mathbb{R} \rightarrow X \text{ y } \lim_{s \rightarrow -\infty} d_H(\xi_z(s), E) = 0\}.$$

Ejemplo 4.9. Se considera los conjuntos invariantes

$$E_1 = \{(0,0)\}, E_2 = \partial \overline{D_2} \text{ y } E_3 = \partial \overline{D_1}$$

para el semigrupo generado por el sistema dado en (2). Los conjuntos inestables de cada E_j son:

$$W^u(E_1) = E_1, W^u(E_2) = E_2 \text{ y } W^u(E_3) = \text{int}(\overline{D_2}) \setminus E_1.$$

Además, cuando los conjuntos invariantes son atractores locales, estos coinciden con sus conjuntos inestables.

En el siguiente teorema se describen las propiedades básicas de un semigrupo dinámicamente gradiente respecto a una descomposición de Morse del atractor global. En este contexto, se utilizan los conjuntos inestables para obtener atractores locales.

Teorema 4.10. Sea $T(\cdot)$ un semigrupo dinámicamente gradiente respecto a la familia invariante aislada $\mathcal{S} = \{E_1, \dots, E_n\}$. Si \mathcal{A} es una descomposición de Morse de \mathcal{A} . Entonces los conjuntos

$$A_k = \bigcup_{i=1}^k W^u(E_i), \text{ con } 1 \leq k \leq n$$

son atractores locales de $T(\cdot)$ que satisfacen las inclusiones $A_0 = \emptyset \subset A_1 \subset \dots \subset A_{n-1} \subset A_n = \mathcal{A}$ y $E_j = A_j \cap A_{j-1}^*$. Además,

$$\bigcap_{j=0}^n (A_j \cup A_j^*) = \bigcup_{j=1}^n E_j. \tag{7}$$

Demostración. Una prueba aparece en el artículo de Aragão et al. (2011). □

Del teorema 4.10 se desprende otra caracterización del atractor global:

$$\mathcal{A} = A_n = \bigcup_{i=1}^n W^u(E_i) \tag{8}$$

y recibe el nombre de atractor tipo-gradiente.

Ejemplo 4.11. Si se considera los resultados del ejemplo 4.9 se tiene que

$$\mathcal{A} = A_3 = \bigcup_{i=1}^3 W^u(E_i).$$

donde E_i fueron obtenidos utilizando la relación $E_i = A_i \cap A_{i-1}^*$ del ejemplo 3.5 en el cual también se presentan los atractores locales.

4.3 Construcción de la función de Lyapunov generalizada

Los siguientes resultados permiten construir la función de Lyapunov generalizada del teorema 4.13.

Proposición 4.12. Se asume que $T(\cdot)$ admite un atractor global \mathcal{A} y que (A, A^*) es un par atractor-repulsor para $T(\cdot)$, con $A \neq \emptyset$.

- 1.- La función $h : X \rightarrow [0, +\infty)$ dada por $h(z) = \sup_{t \geq 0} d(T(t)z, \mathcal{A})$ cumple

- (a) $h^{-1}(0) = \mathcal{A}$ y h es continua en X .
- (b) $t \mapsto h(T(t)z)$ es decreciente, para cada $z \in X$.

- 2.- La función $L : X \rightarrow [0, 1]$, dada por

$$L(z) = \frac{d(z, A)}{d(z, A) + d(z, A^*)} \text{ está bien definida}$$

y es uniformemente continua en X . Además, $L^{-1}(0) = A$ y $L^{-1}(1) = A^*$.

3.- La función $K : X \rightarrow [0, 1]$ dada por $K(z) = \sup_{t \geq 0} L(T(t)z)$ esta bien definida y satisface:

- (a) K es continua en X y decreciente a lo largo de las soluciones.
- (b) $K^{-1}(0) = A$ y $K^{-1}(1) \cap \mathcal{A} = A^*$.
- (c) Si $z \in \mathcal{A}$ y $K(T(t)z) = K(z)$, $\forall t \geq 0$ entonces $z \in A \cup A^*$.

4.- La función $f : X \rightarrow \mathbb{R}$ dada por $f(z) = K(z) + h(z)$ es continua en X , y satisface:

- (a) f decreciente a lo largo de las soluciones.
- (b) $f^{-1}(0) = A$ y $f^{-1}(1) \cap \mathcal{A} = A^*$.
- (b) Si $z \in X$ y $f(T(t)z) = f(z)$, $\forall t \geq 0$ entonces $z \in A \cup A^*$.

◊ La función $[0, \infty) \ni t \mapsto V(T(t)x) \in \mathbb{R}$ es decreciente, para cada $x \in X$.

Para continuar se considera $z \in E_k = A_k \cap A_{k-1}^*$. De este modo, $z \in A_k \subset A_{k+1} \subset \dots \subset A_n = \mathcal{A}$ y

$$z \in A_{k-1}^* \subset A_{k-2}^* \subset \dots \subset A_1^* \subset A_0^* = \mathcal{A}.$$

En consecuencia

$$h(z) = 0, K_j(z) = 1, \text{ si } 1 \leq j \leq k-1 \text{ y } K_j(z) = 0, \text{ si } k \leq j \leq n.$$

Es decir,

$$V(z) = \sum_{j=0}^n K_j(z) = \sum_{j=0}^{k-1} k_j(z) + \sum_{j=k}^n K_j(z) = \sum_{j=0}^{k-1} 1 + \sum_{j=k}^n 0 = k-1.$$

Por lo tanto, $V(E_k) = k-1$, para todo $1 \leq k \leq n$ y se obtiene la siguiente afirmación.

◊ V es constante en E_i , para cada $1 \leq i \leq n$.

Para probar que V satisface la definición 4.6 se afirma:

$$\left(V(T(t)z) = V(z), \forall t \geq 0 \right) \implies z \in \bigcup_{j=1}^n E_j. \quad (9)$$

Para obtener (9) se observa que las funciones h y K_j son decrecientes a lo largo de las soluciones de $T(\cdot)$, es decir,

$$h(T(t)z) \leq h(z) \text{ y } K_j(T(t)z) \leq K_j(z), \forall t \geq 0 \text{ si } 0 \leq j \leq n.$$

Si existe $t > 0$ con $h(T(t)z) < h(z)$ (o bien $K_j(T(t)z) < K_j(z)$, para algún $0 \leq j \leq n$) se obtiene $V(T(t)z) < V(z)$, lo cual genera una contradicción. Por tanto, $h(T(t)z) = h(z), \forall t \geq 0$ (o $K_j(T(t)z) = K_j(z), \forall t \geq 0$ cuando $0 \leq j \leq n$). En otras palabras, cada $f_j = K_j + h$ satisface

$$f_j(T(t)z) = f_j(z), \quad \forall t \geq 0.$$

De la proposición 4.12, se obtiene $z \in (A_j \cup A_j^*)$ cuando $0 \leq j \leq n$. Es decir,

$$z \in \bigcap_{j=0}^n (A_j \cup A_j^*) = \bigcup_{j=1}^n E_j$$

(teorema 4.10) y se obtiene (9). Para concluir, se afirma que para todo $z \in X$,

$$z \in \bigcup_{i=1}^n E_i \implies V(T(t)z) = V(z), \forall t \geq 0 \quad (10)$$

En efecto, sea $z \in \bigcup_{j=1}^n E_j = \bigcap_{j=0}^n (A_j \cup A_j^*)$. Para cada $0 \leq j \leq n$ se obtiene que $z \in A_j \cup A_j^*$.

- Si $z \in A_j$ se cumple que $T(t)z \in A_j \subset \mathcal{A}, \forall t \geq 0$ y así $h(T(t)z) = 0$ y $K_j(T(t)z) = 0, \forall t \geq 0$, luego $V(T(t)z) = h(T(t)z) + \sum_{j=0}^n K_j(T(t)z) = 0, \forall t \geq 0$. En particular,

$$V(T(t)z) = V(z) = 0, \forall t \geq 0.$$

Demostración. Esta construcción aparece en los trabajos de Aragão et al. (2011); Carvalho et al. (2013) (vea también las tesis de Marín (2016)). □

Los autores en el artículo de Aragão et al. (2011), recuerdan que en el artículo de «en Carvalho et al. (2009) aparecen los semigrupos dinámicamente gradiente (no requieren la existencia de una función de Lyapunov, sólo algunas propiedades en la descomposición de Morse del atractor) como un concepto intermedio entre los semigrupos gradientes y los semigrupos que admiten un atractor tipo-gradiente» (8). Para los semigrupos que admiten un atractor global, ser dinámicamente gradiente con respecto a una familia invariante aislada es equivalente a poseer una función de Lyapunov generalizada.

Teorema 4.13. Sea $T(\cdot)$, un semigrupo que admite un atractor global \mathcal{A} y sea $\mathcal{S} = \{E_1, \dots, E_n\}$, una familia invariante aislada. Son equivalentes:

- (1) $T(\cdot)$ es un semigrupo gradiente con respecto a \mathcal{S} .
- (2) $T(\cdot)$ es \mathcal{S} -dinámicamente gradiente.

Demostración. La parte (1 \implies 2) se prueba en la proposición 4.8. Para obtener (2 \implies 1) se construye una función de Lyapunov generalizada $V : X \rightarrow \mathbb{R}$ que satisface $V(E_k) = k-1$ para $1 \leq k \leq n$. Inicialmente se reordena \mathcal{S} para obtener una descomposición de Morse y se usa cada par atractor-repulsor (A_j, A_j^*) . Con esto se consideran las funciones continuas K_j dadas por

$$K_j(z) = \sup_{t \geq 0} \left[\frac{d(T(t)z, A_j)}{d(T(t)z, A_j) + d(T(t)z, A_j^*)} \right], \quad \forall 1 \leq j \leq n$$

y se define

$$V(z) = h(z) + \sum_{j=0}^n K_j(z),$$

donde

$$K_0(z) = \sup_{t \geq 0} \left[\frac{d(T(t)z, \emptyset)}{d(T(t)z, \emptyset) + d(T(t)z, \mathcal{A})} \right] = 0.$$

Como las funciones h y K_j son decrecientes a lo largo de las soluciones (proposición 4.12), se obtiene el primer ítem de la definición 4.6, según el cual:

- Si $z \in A_j^*$, cada $K_j(T(t)z) = 1$ y $h(T(t)z) = 0, \forall t \geq 0$. Es decir,

$$V(T(t)z) = V(z) = n, \forall t \geq 0.$$

Esto demuestra (10). En otras palabras,

$$\diamond V(T(t)x) = V(x), \forall t \geq 0 \text{ si y sólo si } x \in \bigcup_{i=1}^n E_i.$$

En consecuencia V satisface la definición 4.6. Por lo tanto, $T(\cdot)$ es un semigrupo gradiente con respecto a \mathcal{S} . \square

Ejemplo 4.14. Del resultado del ejemplo 4.5, se concluye que $T(\cdot)$ es un semigrupo gradiente respecto a la familia invariante aislada $\mathcal{S} = \{E_1, E_2, E_3\}$.

5. ESTABILIDAD DE SEMIGRUPOS GRADIENTE BAJO PERTURBACIÓN

En esta sección, se presenta la aplicación de toda la teoría desarrollada en las secciones anteriores.

Definición 5.1. El semigrupo $T(\cdot)$ se dice que es **asintóticamente compacto** si cada sucesión acotada $x_k \in X$ satisface lo siguiente: por cada sucesión $t_k \geq 0$ con $\lim_{k \rightarrow +\infty} t_k = +\infty$, se obtiene que la sucesión inducida $T(t_k)x_k$ admite una subsucesión convergente.

Con el objeto de aclarar y explicar mejor este concepto, se presenta el siguiente ejemplo sencillo:

Ejemplo 5.2. El semigrupo $T(\cdot)$ en $X = \mathbb{R}^n$ para el cual la órbita de cada conjunto acotado es acotada (semigrupo acotado) es un ejemplo natural de un semigrupo asintóticamente compacto.

Teorema 5.3. Sea $T(\cdot)$ un semigrupo sobre un espacio de Banach X que es gradiente con respecto a una colección finita \mathcal{S} de conjuntos invariantes aislados $\{E_1, \dots, E_n\}$. Si \mathcal{A} es un atractor global para $T(\cdot)$ y se cumple:

1. Para cada $\eta \in (0, 1]$, $T_\eta(\cdot)$ es un semigrupo en X con atractor global \mathcal{A}_η ;
2. $\{T_\eta(\cdot)\}_{\eta \in [0, 1]}$ es una colección de semigrupos asintóticamente compacto y $\overline{\bigcup_{\eta \in [0, 1]} \mathcal{A}_\eta}$ es acotada;
3. $T_\eta(\cdot)$ converge a $T(\cdot)$, en el sentido que

$$d(T_\eta(t)u, T(t)u) \rightarrow 0 \text{ cuando } \eta \rightarrow 0, \quad (11)$$

uniformemente para cada u en un subconjunto compacto de X ; y

4. Para cada $\eta \in (0, 1]$, \mathcal{A}_η contiene una colección finita de conjuntos invariantes aislados $\mathcal{S}_\eta = \{E_1^\eta, \dots, E_n^\eta\}$ de modo que

$$\lim_{\eta \rightarrow 0} d_H(E_j^\eta, E_j) = 0$$

y existen $\delta > 0$ y $\eta_1 \in (0, 1)$ de modo que para todo $\eta \in (0, \eta_1)$, si $\xi_\eta : \mathbb{R} \rightarrow \mathcal{A}_\eta$ es una solución global, entonces

$$\sup_{t \in \mathbb{R}} d(\xi_\eta(t), E_j^\eta) \leq \delta \implies \xi_\eta(t) \in E_j^\eta \text{ para todo } t \in \mathbb{R}. \quad (12)$$

Entonces existe un $\eta_0 > 0$ de modo que, para todo $\eta \in (0, \eta_0)$, $T_\eta(\cdot)$ es un semigrupo gradiente con respecto a \mathcal{S}_η . En particular

$$\mathcal{A}_\eta = \bigcup_{i=1}^n W(E_i^\eta).$$

Demostración. La demostración aparece en el libro de Carvalho et al. (2013). \square

Los siguientes ejemplos ilustran adecuadamente las propiedades del teorema 5.3.

Ejemplo 5.4. La ecuación diferencial

$$\dot{x} = -x(x - \eta)(x + \eta), \quad x \in \mathbb{R} \text{ y } \eta \in [0, 1]$$

induce para cada η un semigrupo $T_\eta(\cdot)$. Cuando $\eta = 0$, el semigrupo $T_0(\cdot)$ tiene un atractor global $\mathcal{A} = \{0\}$ y es gradiente con respecto a $\mathcal{S} = \{E\}$ (ejemplo 4.7). Además, se cumple lo siguiente:

1. Para cada $\eta \in (0, 1]$, $T_\eta(\cdot)$ es un semigrupo en \mathbb{R} con atractor global $\mathcal{A}_\eta = [-\eta, \eta]$.
2. Por el ejemplo 5.2, la colección de semigrupos $\{T_\eta(\cdot)\}_{\eta \in [0, 1]}$ es asintóticamente compacto y $\overline{\bigcup_{\eta \in [0, 1]} \mathcal{A}_\eta} = [-1, 1]$ es acotada.
3. Sea $x \in [-m\eta, m\eta]$, donde $m \in \mathbb{Z}$ y $m \geq 1$, luego

$$|T_\eta(t)x - T_0(t)x| \leq 2m\eta$$

implica

$$\lim_{\eta \rightarrow 0} |T_\eta(t)x - T_0(t)x| \leq \lim_{\eta \rightarrow 0} 2m\eta = 0.$$

4. Para $\eta \in (0, 1]$, $\mathcal{S}_\eta = \{\mathcal{A}_\eta\} = \{E^\eta\}$

$$\lim_{\eta \rightarrow 0} d_H(E^\eta, E) = \lim_{\eta \rightarrow 0} \sup_{a \in E^\eta} d(a, \{0\}) = 0.$$

Por otro lado, desde que $\xi_\eta : \mathbb{R} \rightarrow \mathcal{A}_\eta$ es una solución global, existen $\delta = \frac{1}{2}$ y $\eta_1 = \frac{1}{10}$ de modo que para todo $\eta \in (0, \eta_1)$ se cumple (12).

Por el teorema 5.3, existe un $\eta_0 > 0$ de modo que, para todo $\eta \in (0, \eta_0)$, $T_\eta(\cdot)$ es un semigrupo gradiente con respecto a \mathcal{S}_η .

Ejemplo 5.5. La ecuación diferencial

$$\dot{x} = -x(x - \eta - 1)(x + \eta + 1), \quad x \in \mathbb{R} \text{ y } \eta \in [0, 1]$$

induce para cada η un semigrupo $T_\eta(\cdot)$. Cuando $\eta = 0$, el semigrupo $T_0(\cdot)$ tiene un atractor global $\mathcal{A} = [-1, 1]$ y es gradiente con respecto a $\mathcal{S} = \{E_1, E_2, E_3\}$ donde $E_1 = \{-1\}$, $E_2 = \{1\}$ y $E_3 = \{0\}$ (ejemplo 4.4). Además:

1. Para cada $\eta \in (0, 1]$, $T_\eta(\cdot)$ es un semigrupo sobre \mathbb{R} con atractor global $\mathcal{A}_\eta = [-\eta - 1, \eta + 1]$.
2. Por el ejemplo 5.2, la colección de semigrupos $\{T_\eta(\cdot)\}_{\eta \in [0, 1]}$ es asintóticamente compacto y $\overline{\bigcup_{\eta \in [0, 1]} \mathcal{A}_\eta} = [-2, 2]$ es acotada.

3. $T_\eta(\cdot)$ converge a $T(\cdot)$, uniformemente en subconjuntos compactos de \mathbb{R} .
 Sea $x \in \mathcal{A} = [-1, 1] = \bigcup_{m \in [\frac{1}{\eta}, 1]} [-1; -1 + m\eta) \cup \{0\} \cup (1 - m\eta, 1]$, luego $x \in [-1; -1 + m\eta)$ ó $x = 0$ ó $x \in (1 - m\eta, 1]$, para algún $m \in [\frac{1}{\eta}, 1]$. Si $x = 0$, se cumple trivialmente (11). Si $x \in [-1; -1 + m\eta) \cup (1 - m\eta, 1]$, se tiene que $|T_\eta(t)x - T_0(t)x| \leq (m + 1)\eta$, y se cumple (11). Si $x \in [-k\eta + 1, k\eta + 1]$, $k \in \mathbb{Z}$, $k \geq 1$, $\eta \in (0, 1]$, entonces $|T_\eta(t)x - T_0(t)x| \leq k\eta$, y se cumple (11).
4. Para $\eta \in (0, 1]$, \mathcal{A} contiene una colección finita de conjuntos invariantes aislados $\mathcal{S}_\eta = \{E_1^\eta, E_2^\eta, E_3^\eta\}$ donde $E_1^\eta = \{-\eta - 1\}$, $E_2^\eta = \{\eta + 1\}$ y $E_3^\eta = \{0\}$ y se cumple que

$$\lim_{\eta \rightarrow 0} d_H(E_j^\eta, E_j) = 0.$$

Además, se observa que para cada solución global $\xi_\eta : \mathbb{R} \rightarrow \mathcal{A}_\eta$ se cumple (12), cuando $\delta > 0$ y $\eta \in (0, 1)$.

Por el teorema 5.3, existe un $\eta_0 > 0$ de modo que, para todo $\eta \in (0, \eta_0)$, $T_\eta(\cdot)$ es un semigrupo gradiente con respecto a \mathcal{S}_η .

6. AGRADECIMIENTO

Este trabajo es parte del proyecto intitulado «estudio de atractores globales en sistemas no-autónomos» que fue parcialmente apoyado por la UNMSM, con número: 151401215. La autora agradece a los revisores por hacer un reporte detallado del manuscrito y por enviarnos valiosas sugerencias, las cuales se incluyeron para mejorar la presentación del trabajo.

REFERENCIAS

Aragão Costa, E. R., Caraballo, T., Carvalho, Alexandre N., and Langa, José A. (2011). Stability of gradient semigroups under perturbations *Nonlinearity*, 24 (7), 2099–2117. MR 2805595. <https://www.doi.org/10.1088/0951-7715/24/7/010>

Bortolan, Matheus C. and Carvalho, Alexandre N. and Langa, José A. (2020) *Attractors under autonomous and non-autonomous perturbations* Mathematical Surveys and Monographs, vol. 246 American Mathematical Society, Providence, RI 2020 MR 4249447

Carvalho, Alexandre N., Langa, José A., Robinson, James C. and Suárez, Antonio. (2007) Characterization of non-autonomous attractors of a perturbed infinite-dimensional gradient system. *J. Differential Equations* 236 (2), 570–603. MR 2322025 <https://doi.org/10.1016/j.jde.2007.01.017>

Carvalho, Alexandre N. and Langa, José A. (2009) An extension of the concept of gradient semigroups which is stable under perturbation. *J. Differential Equations*, 246 (7), 2646–2668. MR 2503016 <https://doi.org/10.1016/j.jde.2009.01.007>

Carvalho, Alexandre N. and Langa, José A. and Robinson, James C. (2013). *Attractors for infinite dimensional*

non autonomous dynamical systems. South Melbourne, Australia: Thomson. Applied Mathematical Sciences, vol. 182, Springer, New York, 2013. MR 2976449

Chicone, Carmen (2006). *Ordinary differential equations with applications*. 2nd ed., Texts in Applied Mathematics, vol 34, Springer, New York, 2006. MR 2224508

Gavilán, Maruja (2019) *Funciones de Lyapunov y semigrupos tipo-gradiente*. Tesis para optar grado de magíster en matemática pura, Unidad de Posgrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú, diciembre 2019. <http://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/cybertesis/11586>

Hale, Jack, K. (2004). Stability and gradient dynamical systems. *Rev. Mat. Complut*, 17 (1), 7–57. MR 2063940 https://doi.org/10.5209/rev_REMA.2004.v17.n1.16767

Hale, Jack, K. (1980). *Ordinary differential equations*. 2nd ed., Robert E. Krieger Publishing Co., Inc., Huntington, N.Y., 1980. MR 587488

Marín, Gayte, Irene (2016) *Dinámica global de sistemas mutualistas*. Trabajo de fin de grado, Facultad de matemáticas, Universidad de Sevilla, Sevilla, España, 2016, <http://hdl.handle.net/11441/43805>

Raugel, G. (2002). *Global attractors in partial differential equations*, Handbook of dynamical systems, Vol. 2, North-Holland, Amsterdam, 2002, pp. 885–982. MR 1901068 (2003f:37151)

Krzysztof P. Rybakowski, (1987). *The homotopy index and partial differential equations*. Universitext, Springer-Verlag, Berlin, 1987. MR 910097 (89d:58025)

BIOGRAFÍA



Maruja Gavilán Gonzales, es Magíster en Matemática Pura por la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM) (Perú). Premio Sofia Kovalevskaja a la mejor tesis de maestría 2020. Docente a tiempo completo en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos desde el año 2009 hasta la actualidad. Reconocimiento al mérito en el desempeño docente en el 2020.

Apéndice A: Ecuaciones diferenciales autónomas

Tal como se describe en el libro texto de Hale (1980), cada función continua en un abierto euclidiano induce una ecuación diferencial, de modo que las soluciones siempre existen. Es más, la continuidad de las derivadas garantizan la unicidad de las soluciones y se obtienen así ejemplos de semigrupos. Específicamente, se considera el siguiente problema de valor inicial

$$\dot{x} = f(x), \quad x(0) = x_0 \in \mathbb{R}^n, \quad (13)$$

donde $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ es una función continuamente diferenciable. Consecuentemente, esta función f es *localmente Lipschitz*: para cada $x_0 \in \mathbb{R}^n$, existen dos constantes $\delta > 0$ y $L > 0$ tales que las desigualdades $\|x - x_0\| < \delta$ y $\|y - x_0\| < \delta$ implican que

$$\|f(x) - f(y)\| \leq L\|x - y\|.$$

Una *solución* de (13) es una función continuamente diferenciable $\varphi : I \rightarrow \mathbb{R}^n$, definida en un intervalo abierto que contiene al cero tal que

$$\frac{d}{dt}(\varphi(t)) = f(\varphi(t)), \quad \forall t \quad \varphi(0) = x_0. \quad (14)$$

La función $\phi : (\alpha, \beta) \rightarrow \mathbb{R}^n$ es llamada *solución maximal* si por cada solución $\varphi : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ que satisface $(\alpha, \beta) \subset I$ y $\phi = \varphi|_{(\alpha, \beta)}$, se obtiene $(\alpha, \beta) = I$, y consecuentemente $\phi = \varphi$.

Ejemplo 6.1. Si $y_0 \in \mathbb{R}$ es positivo, la solución de $\dot{x} = x^2$, $x \in \mathbb{R}$ que envía $t_0 = 0$ en y_0 satisface

$$\varphi(t) = \frac{y_0}{1 - y_0 t}, \quad t \in \left(-\infty, \frac{1}{y_0}\right).$$

Además, $|\varphi(t)| \rightarrow +\infty$ cuando $t \rightarrow \frac{1}{y_0}$.

En el problema (13) se cumple el siguiente teorema. La prueba se obtiene a partir de la teoría descrita en el libro texto de Chicone, C. (2006).

Teorema 6.2. Para cada $x_0 \in \mathbb{R}^n$ existe una solución maximal de (13) que satisface las siguientes propiedades.

1. Si $\psi : J \rightarrow \mathbb{R}^n$ satisface (14) en el intervalo abierto $J \ni 0$, entonces $\psi(t) = \varphi(t)$ para todo $t \in I \cap J$. Consecuentemente, la solución maximal es única.

2. Si

$$(\alpha, \beta) \ni t \mapsto \phi(t, x_0) \in \mathbb{R}^n$$

denota la solución maximal de (13), entonces $\beta = +\infty$ o bien $\beta < +\infty$ y $\{\phi(t, x_0) : 0 \leq t < \beta\}$ intersecta el complemento de cualquier compacto $K \subset \mathbb{R}^n$.

3. Si $I(x_0)$ denota el dominio de la solución maximal, entonces el conjunto

$$\bigcup_{x_0 \in \mathbb{R}^n} I(x_0) \times \{x_0\}$$

es abierto en $\mathbb{R} \times \mathbb{R}^n$. Además, en este conjunto abierto la regla de correspondencia $(t, x) \mapsto \phi(t, x)$ genera una función continuamente diferenciable tal que

$$\begin{aligned} \phi(0, x) &= x, \\ \phi(t + s, x) &= \phi(t, \phi(s, x)), \quad x \in \mathbb{R}^n, \quad s, t + s \in I(x). \end{aligned}$$

Si se asume que existe una constante $r_0 > 0$ tal que

$$\|x\| \geq r_0 \implies f(x) \cdot x < 0, \quad (15)$$

donde \cdot denota el producto usual de \mathbb{R}^n . A partir del teorema 6.2, se obtiene que la solución maximal está definida en un intervalo de longitud infinita. Específicamente, (15) implica que el dominio $I(x_0)$ de la solución maximal de (13) incluye al intervalo $[0, +\infty)$. En este contexto, la familia de funciones continuas $T(t) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ dada por medio de la regla

$$T(t)x_0 = \phi(t, x_0) \quad x_0 \in \mathbb{R}^n \quad t \geq 0$$

está bien definida y forma un semigrupo en $X = \mathbb{R}^n$, pues se construye a partir de soluciones maximales. Esto se describe en la monografía de Bortolan et al. (2020).

Ejemplo 6.3. En el plano $\mathbb{R}^2 = \{(x, y) : x, y \in \mathbb{R}\}$, se considera el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales

$$\begin{cases} \dot{x} = -y + P(x^2 + y^2)x, \\ \dot{y} = x + P(x^2 + y^2)y. \end{cases} \quad (16)$$

donde $P : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ es una aplicación polinomial que admite una raíz $r_0 > 0$ tal que

$$r_0 = \max\{r \in \mathbb{R} : P(r) = 0\} \implies P'(r_0) < 0.$$

En este contexto, en el sistema (16) se cumple (15) y por lo tanto las soluciones maximales definen un semigrupo en \mathbb{R}^2 . En las coordenadas polares (r, θ) , dadas por las igualdades $x = r \cos \theta$, $y = r \sin \theta$, el sistema (16) toma la forma

$$\begin{cases} \dot{r} = rP(r^2), \\ \dot{\theta} = 1. \end{cases}$$

Cabe mencionar que las raíces del polinomio P inducen ciclos límite para (16). En el caso especial del polinomio $P(u) = 1 - u$ (satisface $P'(1) < 0$) la solución maximal que envía el cero en (r_0, θ_0) en coordenadas polares toma la forma:

$$\phi(t, r_0, \theta_0) = \left(\left(\frac{r_0^2 e^{2t}}{1 - r_0^2 + r_0^2 e^{2t}} \right)^{\frac{1}{2}}, \theta_0 + t \right).$$

Estado del Arte de Estudios de Vulnerabilidad Sísmica en Ecuador

Cunalata, Fabiana^{1,*} ; Caiza, Pablo² 

¹Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Programa de Maestría de Investigación en Ingeniería Civil mención Estructuras, Sangolquí, Ecuador

²Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Departamento de Ciencias de la Tierra y Construcción, Sangolquí, Ecuador

Resumen: Los estudios de vulnerabilidad sísmica constituyen una parte importante para la implementación de programas de mitigación de riesgo. El Ecuador, al ser un país en el que se presenta un riesgo sísmico alto, ha empezado a estudiar el grado de vulnerabilidad de las edificaciones existentes. En este artículo, se describen las diferentes metodologías empleadas en estos estudios como: la del proyecto South America Risk Assessment (SARA) para la ciudad de Quito; en tesis y trabajos académicos, las metodologías FEMA P-154, NEC-15 y FUNVISIS además de Benedetti-Petrini y FEMA 310. Posteriormente, se comparan los resultados obtenidos, enfocándose en primer lugar en las características comunes a todas ellas, luego en sus diferencias y su importancia relativa para considerar aspectos propios de las edificaciones en el Ecuador. Merecen especial atención los porcentajes de edificaciones vulnerables y que requieren una evaluación más detallada. Se concluye que las metodologías presentadas constituyen una alternativa útil para determinar aquellas edificaciones que no mostrarán un comportamiento aceptable ante un evento sísmico. Además, son complementarias unas de otras y, por tanto, se recomienda el uso de por lo menos tres de ellas: NEC-15, FEMA P-154 Y FUNVISIS.

Palabras clave: Vulnerabilidad sísmica, proyecto SARA, NEC-15, FEMA P-154, FUNVISIS

State of the Art of Seismic Vulnerability Studies in Ecuador

Abstract: Seismic vulnerability studies constitute an important part for the implementation of risk mitigation programs. In Ecuador, being a country in which there is a high seismic risk, studies have begun to be carried out to know the degree of vulnerability of existing buildings. This article describes the different methodologies used in these studies: that of the South America Risk Assessment (SARA) project for the city of Quito, in theses and academic papers, the methodologies FEMA P-154, NEC-15 and FUNVISIS also Benedetti-Petrini and FEMA 310. Subsequently, the results obtained are compared, focusing first on the common characteristics to all of them, and then on their differences and their relative importance. The percentages of vulnerable buildings that require a more detailed evaluation, deserve special attention. It is concluded that the methodologies presented constitute a useful alternative to determine those buildings that will not show an acceptable behavior in the event of a seismic event. In addition, these methodologies are complementary to each other and, therefore, the use of at least three of them is recommended: NEC-15, FEMA P-154 and FUNVISIS.

Keywords: Seismic vulnerability, SARA project, NEC-15, FEMA P-154, FUNVISIS

1. INTRODUCCIÓN

Parte de América Central y América de Sur son calificadas como las regiones que presentan gran actividad sísmica, razón por la cual se presentan con frecuencia sismos que alcanzan grandes magnitudes y han causado pérdidas de vidas humanas y daños materiales (Udías, 1998).

Una parte del territorio del actual Ecuador se encuentra dentro de la microplaca llamada “Bloque Andino” que pertenece a la placa Sudamericana, la cual está en interacción con las placas de Nazca, Cocos y Caribe. Por otro lado, en el sur del Ecuador, se tiene la interacción relativamente más sencilla entre la placa

Sudamericana y la de Nazca. La compleja tectónica descrita ha desarrollado un sistema de fallas que, combinado con la subducción que se presenta en la costa del país, constituyen las fuentes principales que generan movimientos sísmicos (Quinde & Reinoso, 2016).

Ecuador puede describirse como un país multiamenazas, en lo que se refiere a desastres naturales, es por esta razón que es una tarea de gran importancia el trabajar por optimizar la calidad de las edificaciones (Fernández et al., 2018). En los últimos 460 años, se han detectado en Ecuador un gran número de sismos de magnitud considerable (Cabezas, 2016) tanto en la capital, Quito, como en otros lugares del país.

*fecunalata@espe.edu.ec

Recibido: 26/08/2021

Aceptado: 12/04/2022

Publicado en línea: 25/05/2022

10.33333/rp.vol50n1.06

CC 4.0

Si se considera los sismos de pequeña magnitud y aquellos que son detectados únicamente por los sismógrafos, la cantidad de sismos que se registran en el territorio ecuatoriano podrían sumar varios miles por año. Es así que, dentro de la gran cantidad de actividad sísmica, en el lapso de 1541 hasta el año 2007, han ocurrido en el país 37 sismos de intensidad mayor o igual a VIII en escala MSK (llamado así por las iniciales Medvedev – Sponheuer – Karnik) donde los daños que se registran son considerables; sin embargo, si se toma en cuenta los sismos de intensidad VI (en donde se presentan daños moderados) los registros sísmicos importantes sumarán 123. El primer sismo del que se tiene registro en el país, sucedió en el año de 1541 con epicentro ubicado en la provincia de Napo, dando inicio al catálogo sísmico en Ecuador (Rivadeneira et al., 2007). En la ciudad de Quito, de conformidad con los datos registrados desde el año de 1587, se dispone de información sobre diversos eventos sísmicos con gran capacidad de destrucción, que se presentaron por lo menos una vez por cada siglo a excepción del siglo XIX (Fernández et al., 1995). En 1698, un sismo afectó las provincias de Chimborazo, Tungurahua y otras del centro del país. Uno de los sismos históricos de gran intensidad, ocurrió en febrero del año 1797 en Riobamba convirtiéndose en el que mayores daños ha causado en el Ecuador resultando afectadas las provincias de Tungurahua, Cotopaxi, Bolívar y Pichincha (Rivadeneira et al., 2007). Las viviendas, en su mayoría de una y dos plantas con paredes de ladrillo, adobes de barro, bahareque y en pocos casos de piedra estaban recubiertas con un “empañetado” de barro con paja picada y enlucida con una capa de barro fino, sin embargo en las zonas rurales las técnicas constructivas eran deficientes, por lo que, ante el terremoto, las casas cayeron desde sus cimientos, algunos barrios fueron sepultados y todas las iglesias, conventos, edificios públicos, hospitales y escuelas se destruyeron por completo (Egred, 2000). En agosto de 1898, un terremoto en la ciudad de Ibarra provocó daños considerables en la ciudad y sus alrededores (Rivadeneira et al., 2007).

En el año de 1900, empezaron a trabajar los primeros instrumentos de medición sísmica en el mundo, es por esta razón que se cuentan con registros a partir de esa fecha. El 31 de enero de 1906, un evento telúrico de magnitud $M_w=8.8$ en escala Richter azotó las costas de Ecuador y Colombia; su epicentro fue aproximadamente a 18 km al noroeste de la ciudad de Esmeraldas causando además un tsunami que generó olas de hasta 5 metros de altura (Moncayo et al., 2017), pero se considera que el efecto sobre las casas fue pequeño en relación con su gran magnitud debido al tipo de construcción que predominaba en esa época que era madera dura y bien encajada (IGE EPN, 2011). El 2 de octubre de 1933, ocurrió un sismo de magnitud 6.9 con epicentro localizado frente a las costas de las poblaciones de Montañita y Olón acompañado de fuertes oscilaciones a nivel del mar y grandes olas (Moncayo et al., 2017), de los daños solo se indica que un cable submarino fue roto a 25 kilómetros al sur de Salinas (Espinoza, 1992). El 14 de mayo de 1942, un sismo sacudió a Manabí y a todo el Ecuador con una magnitud de 7.8 grados en escala Richter con una profundidad de 20 km cuyo epicentro estuvo localizado al oeste de la ciudad de Pedernales. En el año de 1944, un sismo importante de magnitud 6.7 con una profundidad de 20 km afectó nuevamente a Esmeraldas. Por otro lado, el 5 de agosto de 1949, el conocido como “terremoto

de Ambato” de magnitud 6.8, causó la destrucción total del cantón Pelileo y grandes pérdidas en Guano, Patate, Píllaro y Ambato en donde se presentó un daño considerable (Moncayo et al., 2017), en donde las casas en su mayoría eran de bahareque con piedra y adobe y en número menor, de mampostería de piedra con algunos elementos de hormigón, así como, edificaciones de piedra pishilata empleada en iglesias y edificios públicos, sin embargo muchas colapsaron debido a una ordenanza municipal que preservaba el aspecto de la casa pero que carecía de criterios técnicos elementales, además de que los encargados de la construcción incumplían los lineamientos básicos (Torres, 2017). Años después, el 12 de diciembre de 1953, a una profundidad de 20 km un fuerte sismo de magnitud 7.3 se produjo cerca de la frontera Ecuador-Perú, frente a la población de Tumbes. La capital fue afectada por un sismo el 11 de mayo de 1955, el mismo que tuvo una magnitud de 6.5 con una profundidad de 15 km. El 16 de enero de 1956 a una profundidad de 20 km tuvo lugar un evento sísmico de fuertes características con epicentro ubicado a 6 km al norte de la población de Tosagua y a 26 km de Bahía de Caráquez con una magnitud de 7.0 (Moncayo et al., 2017). El 5 de marzo de 1987, la capital fue afectada por un sismo fuerte, que provocó la muerte de aproximadamente 1000 personas fuera de los límites de la ciudad (Fernández et al., 1995). El 4 de agosto de 1998, un sismo de magnitud 7.2 afectó a Bahía de Caráquez con una profundidad de 33 km y cuyo epicentro se ubicó a 20 km al suroeste del sismo de 1956 (Moncayo et al., 2017).

La destrucción causada por el terremoto se pudo observar en las provincias de Esmeraldas, Santa Elena, Guayas, Los Ríos y parte de Santo Domingo de los Tsáchilas además de varias provincias de la región Sierra, en donde se registró una intensidad máxima de 4 dentro de la Escala Macrosísmica Europea (IG EPN, 2016).

Considerando lo sucedido en Pedernales en abril de 2016, se ha obtenido información útil a partir de edificaciones que colapsaron o que presentaron un grado de deterioro significativo, en donde se observó que varias estructuras fueron construidas sin ningún criterio estructural, así como también construcciones realizadas sin considerar normativas, carencia del control de un profesional durante la construcción y poca previsión de los daños estructurales que podrían darse ante la ocurrencia de un sismo de gran magnitud (Fernández et al., 2018).

El Ecuador al ser conocido como un país que está expuesto a un peligro sísmico permanente, involucra la exposición a ciertos eventos que pueden traer consigo la pérdida de vidas humanas, pérdidas materiales y económicas; por lo tanto es necesario tomar medidas que permitan reducir los efectos negativos de un evento sísmico, entre ellos, el efectuar estudios que permitan determinar el comportamiento probable de una estructura ante dichos eventos, para así poder planificar y mitigar los grandes efectos que trae consigo. Es necesario insistir que el Ecuador ha pasado por varios eventos sísmicos, con diferentes niveles de afectación, muchos de ellos han sido de gran intensidad y han causado daños considerables y víctimas fatales (Fernández et al., 1995).

Una de las causas trascendentales de daño en las estructuras inducidas por los sismos es el comportamiento poco adecuado de las edificaciones, razón por la cual es importante determinar el grado de vulnerabilidad que presentan de acuerdo a la configuración estructural de las mismas, para así investigar soluciones y mejorar su respuesta estructural ante la influencia de un sismo de mediana o gran intensidad (Fernández et al., 2018).

Los terremotos ocasionan considerables daños materiales que dejan a gran cantidad de personas damnificadas, además, de las víctimas mortales; lo cual indica que los programas de Evaluación de Riesgo Sísmico todavía no se han puesto en práctica con el fin de impedir o aminorar estas pérdidas, pese al adelanto que se tiene de ellos. La situación en mención predomina en la mayor parte de países en vías de desarrollo, por la carencia de recursos económicos asignados a la investigación y desarrollo de la tecnología, cuyo objetivo principal es promover los estudios de prevención y mitigación del riesgo sísmico. Por otra parte, y definitivamente, la razón de las pérdidas tanto humanas como económicas causadas por los terremotos es un comportamiento sísmico deficiente de las edificaciones, en donde en varias ocasiones se han llegado a colapsos parciales e incluso totales (Caballero, 2007).

Debido al historial sísmico del país y a las consecuencias que cada uno de ellos ha dejado en el territorio ecuatoriano, los expertos en el campo de la ingeniería estructural han visto la necesidad de realizar estudios de vulnerabilidad sísmica que permitan conocer el estado actual de las edificaciones existentes para así poder determinar su comportamiento ante un evento sísmico.

En este artículo, se describen los estudios realizados para la evaluación de vulnerabilidad sísmica en torno a la metodología presentada dentro del proyecto South America Risk Assessment (SARA), Federal Emergency Management Agency (FEMA P-154), Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-15) y Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS). SARA permite asignar una taxonomía a cada estructura la cual depende de factores como el sistema resistente a carga lateral, material de paredes y techo, sistema de piso, ubicación, uso, condición del terreno; mientras que FEMA P-154 y NEC-15 califican a la estructura con un puntaje que permite ubicar a la estructura dentro de la categoría de alta, media y baja vulnerabilidad. FUNVISIS considera características similares a las de SARA, lo cual se utiliza para el cálculo de índices de riesgo.

Cada uno de los estudios que se menciona a continuación muestra los resultados de la aplicación de las metodologías mencionadas a edificaciones, determinando de este modo, su grado de vulnerabilidad.

2. VULNERABILIDAD SÍSMICA EN TORNO AL PROYECTO SARA

SARA constituye un proyecto que enfoca su trabajo en los temas de riesgo, exposición, vulnerabilidad física y socio-económica en América del Sur, en países como Chile, Venezuela, Colombia y Ecuador, proporcionando una

metodología para estimar el riesgo físico ante un sismo (Silva, 2017).

Este proyecto considera resultados de vulnerabilidad bajo tres niveles: regional, nacional y subnacional de los países que tienen un alto grado de afectación ante la ocurrencia de un evento sísmico. El modelo de exposición está subdividido en un modelo de exposición local que se centra en una ciudad específica y uno regional a nivel de país. La metodología propuesta por SARA para la obtención de estos modelos de exposición incluye la definición de clases de construcciones existentes en la región de estudio y la estimación de las fracciones de viviendas basándose en la información censal y esquemas de mapas, así como el número de edificios y los costos de reparación considerando valores de referencia (Silva, 2017).

En Ecuador, se trabajó en un modelo de exposición y uno de pérdidas estimadas con información basada en el Censo Poblacional del año 2010 efectuado por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC). Los materiales utilizados en la construcción de las edificaciones (mampostería, hormigón armado, adobe, madera, bahareque, caña) fueron definidos basándose en proyectos como, por ejemplo: PAGER, UN-HABITAT y WHE, y en tipologías constructivas. Dichas clasificaciones se indican en la Figura 1 (Silva, 2017):

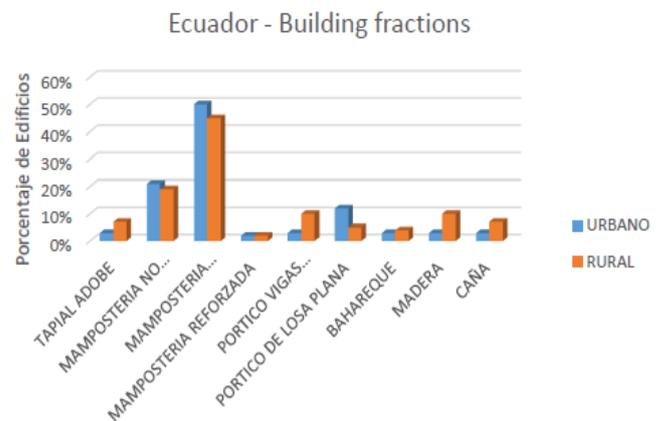


Figura 1. Tipologías constructivas
Fuente: Silva (2017)

En el estudio realizado por el proyecto SARA en Ecuador, se mostró que existen cerca de 29 tipologías de viviendas (alrededor de 3748919 unidades de vivienda) entre las que predominan la mampostería confinada, mampostería no reforzada y estructuras aperticadas de concreto reforzado con el 27%, 26% y 19% respectivamente como se muestra en la Figura 2, de lo cual se puede deducir que las estructuras aperticadas corresponden a la tercera opción elegida por la población, por lo que puede suponerse que constituye una realidad que se repite en las ciudades más representativas del país (Silva, 2017).



Figura 2. Estadística de tipologías estructurales en Ecuador
Fuente: Silva (2017)

A finales del año 2015, se inició un proceso de levantamiento de información de configuración geométrica estructural de la ciudad de Quito, de una muestra de 11556 edificaciones multifamiliares, por medio de un convenio con Global Earthquake Model (GEM) para emplear su metodología en el análisis de vulnerabilidad sísmica. Como primer paso, se realizó un análisis de zonificación de la ciudad basado en la información socio económica y un muestreo de las geometrías estructurales. Se clasificó así a la capital en zonas homogéneas, es decir con características semejantes. Allí se realizó la distribución para el muestreo, del número de edificaciones indicado como muestra representativa de las estructuras multifamiliares de hasta 4 pisos, que como ya se indicó, corresponde a 11556 edificaciones (Celi et al., 2016).

Para realizar el inventario geométrico-estructural se utilizó la aplicación desarrollada por GEM denominada Inventory data capture tools (IDCT do survey), cuyos parámetros más importantes son: el sistema resistente a carga lateral, materiales constitutivos estructurales y no estructurales, y georreferenciación. Como resultado, se identificaron 4 tipologías recurrentes en la muestra. La tipología 1, agrupó a edificaciones de un piso con techo de zinc, eternit o losa de hormigón. La tipología 2 comprende las edificaciones de dos a tres pisos que presentan irregularidad en planta tipo L y entrepisos de hormigón. La tipología 3 se refiere a edificaciones de dos a tres pisos con una planta rectangular con entrepisos de hormigón. Finalmente, la tipología 4 comprende estructuras de 4 a 6 pisos con planta rectangular y entrepisos de hormigón, éstas representan el 88% de la totalidad (Celi et al, 2016).

Para los modelos computacionales, se realizaron 114 modelaciones no lineales que fueron distribuidas en las 4 tipologías; mientras que, la representación no lineal se observó mediante 4 modelos matemáticos diferentes. Es así que, para la tipología 1, las curvas de capacidad se obtuvieron con el método de fibras; para la tipología 2, se utilizó el modelo de rigidez equivalente de muros; para la tipología 3, se representaron los mecanismos de disipación de energía por medio de plastificación concentrada y, para la tipología 4, se representa el comportamiento del pórtico como un ensamblaje de celdas celosía. Es decir, se utilizaron dos criterios diferentes de análisis para representar la plastificación de los elementos marco plano, esto es, plastificación concentrada y distribuida. Por otro lado, la representación del comportamiento no lineal-frágil de mampostería enmarcada y no enmarcada se basó en cuatro maneras de modelación sustentadas en: puntales de compresión axial con plastificación concentrada, elementos

tipo Shell no lineales a cortante, modelo celosía y modelo bi puntal no lineal- frágil (Panagiotou, 2012; Williams, 2013; Reinhorn et al, 1995; Crisafulli, 1997). Para obtener las curvas de capacidad se utilizó la técnica de Non linear PushOver (NSP), con ello se procedió a calcular el punto de desempeño teórico en donde los modelos alcanzaron la demanda sísmica teórica para 100 y 475 años de periodo retorno. Dicho estudio constituyó la primera fase del proyecto SARA denominada: “Capacity curves of structural tipologies, Project GEM-SARA” (Celi et al., 2016). Estos métodos se consideran los más importantes al momento de realizar un análisis estructural no lineal, puesto que permiten describir el comportamiento de los elementos no estructurales analizados en el estudio en mención.

En el estudio, se concluyó que, en todas las tipologías frente al escenario sísmico de 475 años de período de retorno, amplificado por un suelo tipo C, un porcentaje mayor al 80% tiene daños moderados y graves. Nótese que esto significa que, aunque no haya un colapso estructural, las pérdidas económicas pueden ser tan altas que son semejantes a las de la pérdida total (Celi et al., 2016).

El proyecto SARA consta de dos fases más, la segunda titulada “Fragility and Vulnerability Curves of Structural Typologies”, pretende incluir curvas de fragilidad para escenarios de peligrosidad sísmica que va desde el 2% de probabilidad de excedencia hasta el 92% con amplificación de los 5 tipos de suelo que se encuentran en la NEC15 por medio de métodos estáticos directos y correlación HAZUS. La fase 3 “Exposure Model of Structural Typologies” tratará a profundidad el costo de reposición (Celi et al, 2016).

Dentro de los lineamientos del proyecto SARA, se realizó otro estudio que consistió en un análisis de vulnerabilidad sísmica compuesto por un modelo de exposición y un mapa de vulnerabilidad de las construcciones existentes en el Distrito Metropolitano de Quito elaborado por la Fundación GEM y la Escuela Politécnica Nacional. Para ello, se realizaron levantamientos al 3% del total existente en la zona urbana, mediante la herramienta IDCT Direct Observation Survey desarrollada por GEM que es una aplicación de libre acceso que permite recolectar las características estructurales, el tipo de material, uso y ocupación de las construcciones a través de una inspección visual. Una vez realizados los levantamientos, se identificó un total de 135 tipologías, las cuales fueron filtradas y se redujeron a 17, que se indican en la Tabla 1 (Chicaiza, 2017).

Tabla 1. Tipologías estructurales encontradas

N°	Tipologías	Taxonomía GEM
1	Hormigón armado hecho en sitio con mampostería de relleno y losas planas macizas o alivianadas, no dúctil	CR+CIP/LFLSINF+DNO
2	Hormigón armado hecho en sitio con mampostería de relleno y losas planas macizas o alivianadas, dúctil	CR+CIP / LFLSINF + DUC
3	Hormigón armado hecho en sitio con sistema dual, pórticos y muros, dúctil/no dúctil	CR+CIP / LDUAL + DUC; CR+CIP / LDUAL + DNO
4	Hormigón armado hecho en sitio con postes y vigas, no dúctil	CR+CIP / LPB + DNO
5	Hormigón armado hecho en sitio con sistema híbrido, no dúctil	CR+CIP/LH+DNO
6	Hormigón armado hecho en sitio con mampostería de relleno con vigas descolgadas, dúctil	CR+CIP/LFINF+DUC
7	Hormigón armado hecho en sitio con mampostería de relleno con vigas descolgadas, no dúctil	CR+CIP/LFINF+DNO
8	Hormigón armado hecho en sitio con sistema de muros portantes, dúctil	CR+CIP/LWAL+DUC
9	Mampostería no reforzada con paredes de bloque hueco de cemento, no dúctil	MUR+CBH/LWAL + DNO
10	Mampostería no reforzada con paredes de bloque hueco de ladrillo, no dúctil	MUR+CLBRS/LWAL + DNO
11	Mampostería no reforzada con paredes de adobe, no dúctil.	MUR+ADO/LWAL+ DNO
12	Mampostería no reforzada con paredes de mampostería desconocida, no dúctil	MUR + MUN99 / LWAL + DNO
13	Acero	S + S99
14	Madera	W + W99
15	Tierra	E99 + ET99
16	Material desconocido, sistema de resistencia a carga lateral desconocida	MAT99+L99+DNO
17	Hormigón reforzamiento y tecnología desconocida	C99+CT99

Para realizar los levantamientos, se dividió a la parte urbana de Quito en 5 zonas homogéneas mediante el software ARCGIS con información obtenida del Plan de Uso y Ocupación del Suelo del Distrito Metropolitano de Quito (PUOS). En cada zona se identificó el uso del predio, la altura de construcción permitida y el nivel socioeconómico de sus habitantes. Para cada zona homogénea se elaboró un Mapping Scheme para la ciudad que consistió en tres matrices que agruparon las combinaciones de las características de los materiales de construcción y tipo de vivienda (datos del censo del año 2010) y el porcentaje de estructuras de cada una de las tipologías que se obtuvieron en los levantamientos (Chicaiza, 2017).

Es así, que se asignó una tipología estructural para las diferentes clases de vivienda que se identificaron en el censo de acuerdo al material de paredes exteriores, material de piso y material de techo; de esta manera fue posible relacionar las características presentes en el Censo de Población y Vivienda del año 2010 y la información obtenida una vez aplicadas las encuestas. Este procedimiento se realiza para las 5 zonas homogéneas por lo que, se recurre a un programa desarrollado en Matlab para realizar el cálculo del número de viviendas por

cada tipología estructural; el programa arroja una matriz de resultados por cada zona homogénea que incluye atributos como el código del sector censal, la tipología y el número de viviendas (Chicaiza, 2017).

Una parte importante del modelo de exposición fue el costo de reposición de las estructuras analizadas, para lo cual se recurrió a la opinión de un profesional experto en costos de la construcción, docente de la Escuela Politécnica Nacional, y a la metodología presentada en la ordenanza N° 0093 expedida por el Municipio de Quito, en cuyo contenido se indica el método de valoración de las construcciones. De este modo, se calculó el valor correspondiente al metro cuadrado de construcción según el tipo de estructura, rango de pisos, condición de propiedad y materiales de acabados exteriores, paredes, cubierta, marcos de ventanas, vidrios y puertas (Chicaiza, 2017).

Una vez construido el modelo de exposición, se procedió a determinar la vulnerabilidad de las edificaciones analizadas, para lo cual se utilizó la Tabla de Vulnerabilidad propuesta por la Escala Macrosísmica Europea, la cual propone seis clases de vulnerabilidad descendiente que va desde la A hasta la F. Las tipologías encontradas en cada zona homogénea sumaron 62 sin realizar distinción de altura y 88 cuando se considera el número de pisos, finalmente, luego de un filtrado se obtuvieron 24 tipologías sin número de pisos y se les asignó una clase de vulnerabilidad correspondiente, obteniendo que el 84% del total de edificaciones se clasifican dentro de la vulnerabilidad B, el 10% vulnerabilidad clase A, 4% clase C y el 2% clase D (Chicaiza, 2017).

3. VULNERABILIDAD SÍSMICA BASADA EN SARA CON ENFOQUE A REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL

En torno al proyecto SARA y a la ciudad de Quito se han realizado otros estudios que determinan vulnerabilidad sísmica centrándose solamente en estructuras apertadas informales de hormigón armado de 2 y 3 pisos de altura y considerando dos de las cuatro tipologías presentadas en (Celi et al., 2016). Es así, que fue planteado un formato que permite evaluar la vulnerabilidad de las viviendas considerando información para análisis rápidos de vulnerabilidad como el formato presentado por el Centro Nacional de Prevención de desastres en México (CENAPRED) y el ATC-20 Rapid Evaluation Safety Assessment Form (ATC 20-2 Rapid Evaluation Safety Assessment Form, 2005) incluyendo el análisis de costo de reposición. El formato propuesto se basa en un “check list” que evalúa el sistema estructural y vulnerabilidad en una escala del 1 al 5, siendo el 1 “poco vulnerable” y 5 “altamente vulnerable”; con el fin de proponer soluciones de reforzamiento estructural para cada vivienda evaluada según el puntaje final obtenido; es decir que, una puntuación elevada (igual o mayor a 20 puntos) requerirá una combinación de reforzamientos, ya sea encamisado de columnas combinado con CFRP o enchapado de paredes con encamisado de columnas entre otros (Silva, 2017).

Tabla 2. Reforzamiento sugerido según el puntaje obtenido

Puntaje obtenido de evaluación	Reforzamiento sugerido
20-25	Muro de hormigón + encamisado de columna
15-19	Encamisado de columnas + Enchapado + CFRP
10-14	Encamisado de columnas + Enchapado de paredes + CFRP
Menor a 10	Enchapado de paredes + CFRP

La Tabla 2 muestra el tipo de reforzamiento según el puntaje de evaluación obtenido en el formulario propuesto por Silva (2017); es importante señalar que el muro de hormigón deberá tener un espesor de 5 a 7 cm y se armará con malla electrosoldada. Para los puntajes de 10 a 14 y menor a 10, el CFRP se deberá colocar en las zonas donde se requiera refuerzo ya sea en vigas, columnas o losas (Silva, 2017).

Se analizaron en total diez edificaciones residenciales de dos y tres pisos, cada una de ellas fue modelada en los programas comerciales ETABS y SAFE (Computers and Structures Inc. CSI Spain, s.f.). Para la resistencia a la compresión del hormigón, se consideró un valor de 180 kg/cm², un perfil de suelo tipo D y acelerogramas sintéticos en ETABS generados a partir de acelerogramas de tres estaciones (APED, AMNT, APO1) con el fin de realizar un análisis ante un sismo de características similares al ocurrido en abril de 2016. Para columnas y vigas se consideraron inercias agrietadas de 0.8 y 0.5 respectivamente; finalmente, se asume un valor de 12 T/m² para el esfuerzo admisible del suelo y así obtener el coeficiente de balasto. Una vez modeladas las estructuras, se realizó un análisis lineal elástico para estudiar parámetros como derivas de piso y torsión en planta, obteniéndose torsión en modo 1 y 2 para dos de las viviendas analizadas, sin torsión en planta para otras dos, una presenta torsión en modo 2 y las restantes presentan torsión en modo 1; lo cual indica que solo una de las diez viviendas analizadas cumple con los requerimientos de la NEC 2015 (Silva, 2017).

Adicionalmente, todas las estructuras modeladas se sometieron a un análisis no lineal estático (pushover) con el fin de explicar su comportamiento en el rango no lineal por medio de la curva de capacidad y otros parámetros como la comparación entre el cortante de fluencia y el cortante de diseño (Silva, 2017).

Para presentar los resultados, se agruparon las estructuras de dos y tres pisos; encontrándose, que para las estructuras de tres pisos el valor de cortante de fluencia es menor que el cortante de diseño, lo que indica que las estructuras analizadas no pueden resistir las cargas mínimas especificadas en la NEC 2015. Los espectros de capacidad obtenidos de cada modelo, están por debajo del espectro de demanda de la NEC y el punto de desempeño no interseca los dos espectros; al analizar los resultados de los desplazamientos y aceleraciones espectrales se concluye que puede esperarse un daño considerable en las estructuras analizadas, además de un valor alto de deriva (Silva, 2017).

Para las estructuras de dos pisos, se realizó el mismo análisis que para las de tres pisos, en donde tres de sus cinco modelos presentan una falla frágil, puesto que llegan a la fluencia sin resistir las fuerzas de diseño, mientras que los dos modelos restantes muestran un comportamiento dúctil al presentarse la

fluencia luego de resistir la fuerza cortante de diseño; sin embargo, al analizar los desplazamientos y aceleraciones espectrales se concluye que se espera un daño considerable para estas viviendas. Así también, considerando los registros de Manta, Pedernales y Portoviejo se realizó un análisis no lineal dinámico y se obtuvieron las gráficas tiempo versus desplazamiento para varios nudos con el fin de poder calcular la irregularidad torsional según se indica en la Norma Ecuatoriana de la Construcción; estos resultados se compararon con los obtenidos por medio del análisis lineal elástico, encontrándose que son similares en un 70% en lo que se refiere a la magnitud de los resultados (Silva, 2017).

Por medio del software comercial SAFE (Computers and Structures Inc. CSI Spain, s.f.), se realizó la modelación de la cimentación de todas viviendas (zapatas aisladas), una vez concluido el análisis se determinó que la cimentación existente no es suficiente, debido a que las zapatas superan la presión admisible de suelo; por lo tanto, se concluye que es necesario realizar un reforzamiento estructural que permita dar solución a los problemas de presión y punzonamiento (Silva, 2017).

Aplicando el formato de evaluación rápida descrita en párrafos anteriores, se asignó el puntaje de evaluación a cada vivienda, el cual se encuentra entre 10 a 13 puntos que corresponden a una vulnerabilidad media y una propuesta de reforzamiento que consiste en encamisado más un enchapado mampostería y un refuerzo de CFRP que puede ser opcional; todo esto permitirá eliminar el comportamiento frágil que presentan las estructuras ante el análisis estático no lineal (Silva, 2017).

Todos los estudios presentados constituyen un aporte significativo puesto que muestran de una forma clara la manera de aplicar la metodología, de tal modo que se pueda replicar el procedimiento en otras ciudades del país. Por un lado, se indican los avances investigativos en la ciudad de Quito dentro del proyecto South America Risk Assessment (SARA), mientras que por otra parte, se muestra el proceso para construir un modelo de exposición que, si bien es cierto es un proceso largo y que requiere de experiencia por parte del investigador, resulta de mucha utilidad para conocer las principales características estructurales de las edificaciones de una ciudad además de establecer el costo de reposición ante la probabilidad de ocurrencia de un evento sísmico. Global Earthquake Model (GEM) proporciona la aplicación IDCT do survey de manejo sencillo que permite recopilar toda la información.

Otra de las investigaciones realizadas mediante la metodología SARA (Silva, 2017), analiza un número menor de edificaciones y crea un formulario propio que califica a la estructura y determina su grado de vulnerabilidad, además de sugerir una alternativa de reforzamiento para cada vivienda analizada y finalmente define un manual para realizar estos reforzamientos, lo cual resulta de gran utilidad para realizar evaluaciones rápidas puesto que, mediante el puntaje obtenido por la estructura sugiere un tipo de reforzamiento que se puede aplicar.

3. VULNERABILIDAD SÍSMICA SEGÚN OTRAS METODOLOGÍAS

El procedimiento de detección visual rápida conocida también por sus siglas en inglés como RVS constituye un método desarrollado para identificar, inventariar y examinar los edificios que son potencialmente peligrosos (punto de vista sísmico). En caso de ser considerados como peligrosos, estos edificios deberán evaluarse por un profesional con especialidad en diseño sísmico. El procedimiento RVS usa una metodología de estudio “de acera” de un edificio y un formulario de recolección de datos que es llenada por la persona que realiza la evaluación con base en la observación visual del edificio desde el exterior y si es posible, desde el interior. El formulario consta de dos páginas con espacio para incluir la información de identificación del edificio como su uso y tamaño, una fotografía, bocetos y datos relacionados con el comportamiento sísmico; con los datos recogidos se calcula una puntuación que muestra un indicio del comportamiento sísmico esperado del edificio (FEMA P-154, 2015).

Esta metodología se ha aplicado para varios estudios en el Ecuador y comparada con otros métodos, se ha realizado la evaluación de edificaciones públicas individuales con el fin de identificar su nivel de vulnerabilidad, este es el caso de la evaluación del edificio de la Facultad de Filosofía, Comercio y Administración de la Universidad Central del Ecuador utilizando las metodologías FEMA 154, FEMA 310 y el método italiano denominado: Bendetti-Petrini. Para ello, se realizó una vista preliminar al sitio para identificar datos generales y particulares de la edificación como el año de inicio de la construcción, número de plantas, ocupación, descripción de los bloques que la conforman entre otros. Así también se recopiló información de elementos estructurales (sección, armadura longitudinal y transversal), además de identificar las patologías presentes en la estructura ya sea causadas por defectos, daños o deterioro. Para determinar el período de vibración ambiental, se utilizó un equipo que funciona como un acelerómetro-velocímetro de tres componentes ortogonales MEMS de rango +- 4g con una frecuencia de respuesta DC-45 HZ y amortiguamiento crítico de 0.7. De esta manera, se pudo obtener las gráficas: velocidad versus número de pulsaciones y amplitud versus frecuencia en las direcciones norte y este para cada bloque (Cueva, 2017).

Aplicando la metodología FEMA P-154, se alcanzaron puntajes de 2.3 y 1.8 que corresponden a media y alta vulnerabilidad, respectivamente. Por otro lado, para el método FEMA 310, se requirió de recopilación de información general, es decir, información del sistema estructural y no estructural, ocupación del edificio y tipo de suelo. El nivel de desempeño elegido corresponde a ocupación inmediata y una región de sismicidad alta, así, se procede a aplicar las listas de verificación indicando si cada parámetro cumple, no cumple o no aplica. Una vez aplicadas las listas de verificación, se procedió con el nivel 1 de evaluación que implicó la modelación de la estructura con el programa SAP2000, incluyendo el cálculo de la fuerza sísmica según FEMA 310 y la distribución del cortante basal. Para el nivel 2, se aplicó el análisis estático lineal obteniéndose los mismos resultados que para el análisis nivel 1 (Cueva, 2017).

Para la aplicación del método italiano (Benedetti-Petrini), se determinó la organización del sistema resistente considerando criterios relacionados con: calidad de la mampostería, área de ventanas, relación altura-espesor y relación área de columnas ancho de mampostería adyacente, asignándose la clase C para el parámetro de organización del sistema resistente; en cuanto a la calidad del sistema resistente se consideró la calidad del hormigón, morteros y mano de obra, y se escogió para este parámetro la clase B. En lo que se refiere a la resistencia convencional, se asigna la clase A, así como también a la posición del edificio y cimentación considerando la dureza del terreno, la presencia de muros de contención en uno de los bloques y la ausencia de fisuras por hundimientos o asentamientos. De la misma manera, ocurre con las losas cuya clase asignada es A, la configuración en planta y elevación corresponde a las clases A y B respectivamente, así se evalúan otros parámetros que permiten calcular el índice de vulnerabilidad de cada bloque, de lo cual se obtiene que para todos los bloques analizados se tiene una vulnerabilidad media (Cueva, 2017).

Del mismo modo, los estudios de vulnerabilidad sísmica se han realizado para viviendas unifamiliares aplicando el método de inspección visual del FEMA P-154 para una zona urbana residencial ubicada en la parroquia Anconcito del cantón Salinas en la provincia de Santa Elena, por considerarla una zona vulnerable en el perfil costanero del Ecuador. Se encontró que las viviendas en el sector presentan características estructurales similares a las edificaciones que colapsaron en el sismo de abril de 2016, así como también la utilización de distintos materiales para elementos constructivos en una misma vivienda, así existen: viviendas de estructura de hormigón, madera, estructuras mixtas, albañilería sin confinar, viviendas de caña de 1 a 4 pisos. Las estructuras en mención se clasificaron de conformidad con los sistemas estructurales propuestos en el Manual FEMA P-154, se utilizó el formulario de muy alta sismicidad para obtener el índice de vulnerabilidad “S” de 40 viviendas de la zona 3 (según el Plan de Ordenamiento Territorial del cantón Salinas); obteniéndose que el mayor porcentaje son usadas únicamente para viviendas y un 28% para vivienda y comercio. El 70% realizó un aumento luego de su construcción y la totalidad de las viviendas fueron construidas en un suelo tipo E antes de que la actual normativa se encuentre vigente, lo cual indica que las edificaciones no fueron realizadas bajo criterios técnicos actualizados y que las viviendas se encuentran expuestas a gran peligro (Vargas et al., 2018).

En cuanto a las tipologías encontradas, el 40% corresponde al pórtico de hormigón albañilería no reforzada, el 30% a una combinación de pórtico de madera ligera de uno o más pisos y de albañilería no reforzada y el 30% restante se reparte entre las edificaciones de madera, hormigón, estructura metálica y sus combinaciones. En lo que se refiere a patologías estructurales, en el 83% de las edificaciones puede darse un posible golpeteo entre edificios, puesto que la mayor parte de ellas se encuentran adosadas en los linderos laterales y el 2% se encuentra en riesgo de caída entre edificios adyacentes ya que están construidos a un mismo nivel de piso o no existen edificaciones de mayor altura a los lados. De todas las viviendas analizadas, un 75% muestra daño importante o deterioro en su sistema estructural; así también el valor “S” es

menor a dos lo que indica que las viviendas son vulnerables y que requieren una evaluación con mayor detalle (Vargas et al., 2018).

La metodología FEMA P-154 se ha utilizado junto con otros métodos para evaluaciones de vulnerabilidad sísmica y riesgo sísmico, como el propuesto por la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), en donde se evaluaron 50 edificaciones típicas en la isla Isabela en Galápagos. Para la recolección de datos se utilizaron 3 formatos: el nivel 1 y 2 de la metodología FEMA y un nivel 1 del método FUNVISIS, que ayudaron a recoger información agrupada en: información básica que contiene identificación y dirección, año de diseño y/o construcción, esquema en planta y elevación, configuración estructural, detalles no estructurales, irregularidades, amenazas geotécnicas, estado de mantenimiento, construcción formal o informal, fotografías y uso y número de ocupantes; se realizó un formato adaptado del formulario FUNVISIS con cuya información se calcularon los índices de amenaza, vulnerabilidad y priorización (Vargas et al., 2018).

Para la metodología FEMA P-154, se utilizó el formulario de nivel 1 y de nivel 2 el cual recogerá datos estructurales adicionales que afectan al riesgo y proporciona un ajuste de los modificadores de puntaje. Así también fue realizada una equivalencia con la Norma Ecuatoriana de la Construcción mediante el uso del espectro elástico de diseño horizontal de aceleraciones y, según la altura de las edificaciones y el tipo de suelo, se obtuvo la aceleración espectral de respuesta en periodo corto y se estableció que la sismicidad de la región es moderada alta. Se encontraron 5 tipologías estructurales de acuerdo con esta metodología que son: C3 (pórtico con tabique de mampostería de relleno), C1 (pórtico de concreto resistente a momento), W1 (pórtico de madera ligera para vivienda unifamiliar), RM1 (mampostería reforzada con piso rígido) y URM (mampostería no reforzada) (Vargas et al., 2018).

Una vez evaluada la muestra de edificaciones, se obtuvo que según la metodología FEMA el 52% de las edificaciones requiere una evaluación más detallada, se identificó, además que en algunos casos los resultados difieren entre la metodología FEMA y FUNVISIS puesto que la metodología venezolana considera parámetros adicionales y castiga varias irregularidades mientras que FEMA toma en cuenta únicamente dos modificadores al puntaje básico. Según los resultados de la metodología FUNVISIS, el 34% de las edificaciones evaluadas tiene una vulnerabilidad muy elevada, el 28% elevada y el 34% media alta y alrededor del 72% de las estructuras evaluadas corresponde a rangos de riesgo elevados y muy elevados. Por lo tanto, se concluye que en el Ecuador es posible aplicar ambas metodologías para inspeccionar y evaluar vulnerabilidad sísmica y riesgo, mediante la adaptación de dos formatos de recolección de datos que permiten recolectar información de las características estructurales y no estructurales de las edificaciones analizadas (Vargas et al., 2018).

3. CONCLUSIONES

Los trabajos aquí presentados constituyen una parte de los estudios realizados en Ecuador sobre vulnerabilidad sísmica a partir de inspección visual de estructuras utilizando la metodología presentada en el proyecto SARA, la metodología FEMA y la metodología propuesta por FUNVISIS. Una de ellas, el proyecto SARA, que se sigue desarrollando hasta la actualidad en la ciudad de Quito, proporciona una metodología innovadora para describir una edificación considerando sus características estructurales más importantes y la presenta a manera de código que, una vez que el usuario se familiarice con la taxonomía de GEM, podrá identificar la edificación y enmarcarla dentro de una tipología pudiendo así determinar el número de tipologías presentes dentro de una ciudad. Sin embargo, la construcción del modelo de exposición requiere contar con información que puede obtenerse de censos y bases de datos catastrales, que es recomendable que sean actualizados puesto que, de este parámetro depende en gran medida la precisión del modelo levantado.

FEMA y FUNVISIS proporcionan formularios que resultan útiles para realizar una inspección visual rápida y tener un indicio de las patologías presentes en una estructura, que si bien es cierto, se requerirá una evaluación más detallada con el estudio de planos y el uso de equipos que permitan analizar de una mejor manera el comportamiento de una estructura, con lo que se podrá determinar al menos el número de viviendas más vulnerables y con esta información se pueda empezar a trabajar en planes de reforzamiento estructural y mitigación de riesgo.

Las metodologías analizadas constituyen una alternativa útil para una evaluación preliminar de vulnerabilidad, considerando que tanto FEMA P-154, NEC-15, FUNVISIS y la aplicación IDCT do survey consideran los mismos parámetros como: el año de construcción, fechas de remodelaciones y patologías presentes en la estructura; sin embargo la aplicación mencionada, recopila más características como material de piso y techo, además del material predominante en la estructura; de acuerdo con los datos ingresados se obtiene la taxonomía correspondiente. FEMA P-154 y NEC-15 utilizan puntajes básicos de acuerdo a la tipología estructurales, estos se modifican de acuerdo a los datos ingresados en el formulario y se obtiene un puntaje final que califica a la estructura como alta, media o baja vulnerabilidad. Finalmente, FUNVISIS utiliza la información recopilada para el cálculo de índices de riesgo que ubican a la estructura en estas mismas categorías de vulnerabilidad. Por lo tanto, cada una de las metodologías presentadas son complementarias puesto que cada una incluye información relevante acerca de la estructura lo cual resulta útil al momento de determinar su grado de vulnerabilidad mediante una inspección visual.

El Ecuador, al ser calificado como un país multiamenazas, está expuesto a sufrir las consecuencias de eventos sísmicos, por lo cual se hace necesario la realización de estudios de vulnerabilidad sísmica que permitan conocer la situación actual de las edificaciones existentes con el fin de ubicarlas en un nivel de vulnerabilidad y proponer planes de reforzamiento

para aquellas estructuras que lo requieran y de este modo, alcanzar un comportamiento aceptable ante un evento sísmico.

REFERENCIAS

- Ayala C., Almazán J. (2015). *Modelo Celosía No-lineal para muros de albañilería armada de bloque con relleno parcial*. XI Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica, paper N° 195. DOI:10.13140/RG.2.1.2985.2885
- ATC 20-2 Rapid Evaluation Safety Assessment Form. (2005). *ATC-20 Building Safety Evaluation Forms and Placards*. Obtenido de <https://www.atcouncil.org/pdfs/rapid.pdf>
- Caballero, A. (15 de Julio de 2007). *Determinación de la Vulnerabilidad Sísmica por medio del Método del Índice de Vulnerabilidad en las estructuras ubicadas en el Centro Histórico de la ciudad de Sincelejo, utilizando la tecnología del Sistema de Información Geográfica*. [Tesis Maestría]. Sincelejo: Universidad del Norte.
- Cabezas, J. (17 de Agosto de 2016). *Evaluación de la Vulnerabilidad Sísmica del Edificio de la Facultad de Comunicación Social, de la Universidad Central del Ecuador, utilizando la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-SE-RE, 2015)*. [Tesis ingeniería] Quito, Pichincha, Ecuador: Universidad Central del Ecuador.
- Celi, C., Pantoja, J., Ayala, C., & Sosa, D. (2016). *Capacity Curves of Structural Typologies of Quito - Ecuador, Project GEM* -. Revista PUCE, 41-79.
- Chicaiza, M. (Junio de 2017). *Modelo de Exposición y Mapa de Vulnerabilidad del Distrito Metropolitano de Quito*. [Tesis Ingeniería]. Quito, Pichincha, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- Computers and Structures Inc. CSI Spain. (s.f.). *ETABS*. Obtenido de <https://www.csiespana.com/software/5/etabs#>
- Computers and Structures Inc. CSI Spain. (s.f.). *SAFE*. Obtenido de <https://www.csiespana.com/software/8/safe#>
- Crisafulli F.J. (1997) *Seismic Behaviour of Reinforced Concrete Structures with Masonry Infills*. [PhD Thesis]. University of Canterbury, New Zealand.
- Cueva, C. (2 de Marzo de 2017). *Vulnerabilidad sísmica del edificio de la Facultad de Filosofía, Comercio y Administración de la UCE con la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC SE-RE 2015)*. [Tesis Ingeniería]. Quito, Pichincha, Ecuador: Universidad Central del Ecuador.
- Egred, J. (2000). *El Terremoto de Riobamba Tomo 2*. Riobamba: Ediciones Abya-Yala.
- Espinoza, J. (1992). *Terremotos Tsunamigénicos en el Ecuador*. Acta Oceanográfica del Pacífico INOCAR Ecuador 7(1), 21-28.
- FEMA P-154. (Enero de 2015). *Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: Supporting Documentation*, third edition.
- FEMA P-155. (Enero de 2015). *Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook*, third edition.
- Fernández, I., Gómez, A., Carchipulla, N., Bonucci, Y., & Pavón, M. (2018). *Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de 97 edificaciones de la "Comuna Santa Clara de San Millán"*, Quito. EÍDOS UTE Revista.
- Fernández, J., Valverde, J., & Yepes, H. (1995). *Proyecto para el manejo del Riesgo Sísmico de Quito*. Quito.
- IG EPN. (4 de Mayo de 2016). Instituto Geofísico, Escuela Politécnica Nacional. Obtenido de: *Observaciones del sismo del 16 de abril de 2016 de magnitud mw 7.8. Intensidades y aceleraciones*: <https://www.igepn.edu.ec/servicios/noticias/1324-informe-sismico-especial-n-18-2016>
- IG EPN Instituto Geofísico Escuela Politécnica Nacional. (s.f.). Obtenido de Descarga de registros acelerográficos: <https://www.igepn.edu.ec/registros-acelerograficos/formulario-registros-acelerograficos>
- IG EPN. (31 de Enero de 2011). Instituto Geofísico Escuela Politécnica Nacional. Obtenido de: *¿A 105 años del terremoto y tsunami de Esmeraldas, está Ecuador preparado para un viento similar?*: <https://www.igepn.edu.ec/servicios/noticias/344-a-105-a%C3%B1os-del-terremoto-y-tsunami-de-esmeraldas-%C2%BFest%C3%A1-ecuador-preparado-para-otro-evento-as%C3%AD?>
- Moncayo, M., Velasco, G., Mora, C., Montenegro, M., & Cordova, J. (2017). *Terremotos mayores a 6.5 en escala Richter ocurridos en Ecuador desde 1900 hasta 1970*. Ingeniería, 55-64.
- OPENQUAKE. (s.f.). SARA Wiki. Obtenido de <https://sara.openquake.org/risk>
- Panagiotou, M., (2012). Nonlinear cyclic truss Model for reinforced Concrete Walls. *ACI Structural Journal. Technical Paper*: 109(2), 205–214.
- Quinde, P., & Reinoso, E. (Abril de 2016). Estudio de peligro sísmico de Ecuador y propuesta de espectros de diseño para la Ciudad de Cuenca. *Revista de Ingeniería Sísmica*. Obtenido de Scielo: <http://www.scielo.org.mx>
- Reinhorn A.M, Madan A., Valles R.E., Reichmann Y., Mander J.B. (1995). *Modeling of masonry infill panels for structural analysis*.
- Rivadeneira, F., Segovia, M., Alvarado, A., Egred, J., Troncoso, L., Vaca, S., & Yepes, H. (2007). *Breves fundamentos sobre los terremotos en Ecuador*. Quito: Corporación Editora Nacional.
- Silva, J. (Junio de 2017). *Guía de Reforzamiento para estructuras informales aperticadas según estudio de vulnerabilidad en el Distrito Metropolitano de Quito*. [Tesis Ingeniería]. Sangolquí, Pichincha, Ecuador: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Smyrou E., Blandon C.A., Antoniou S., Pinho R., Crisafulli F. (2011). Implementation and verification of a masonry panel model for nonlinear dynamic analysis of infilled RC frames. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9, 1519–1534. DOI 10.1007/s10518-011-9262-6.
- Torres, J. (2017). *Estado central, gobierno local y población ambateña en la reconstrucción de la urbe tras el terremoto del 5 de agosto de 1949*. [Tesis Maestría]. Quito, Pichincha, Ecuador: Universidad Andina Simón Bolívar.

- Udías, A. (1998). *Introducción: sismicidad y sismotectónica de América Central y Sur*. Física de la Tierra, 11-17.
- Vargas, M., Arroyo, J., & Vizconde, A. (2018). Vulnerabilidad sísmica de viviendas unifamiliares existentes de una Zona Urbano- Residencial en Anconito, Ecuador. *Journal of Science and Research: Revista Ciencia e Investigación*, 3(ICCE2018), 10-15. <https://doi.org/10.26910/issn.2528-8083vol3issICCE2018.2018pp10-16p>.
- Vizconde, A., & Delgado, R. (2018). Evaluación del riesgo sísmico de edificaciones existentes en la Isla Isabela, Galápagos. *Journal of Science and Research: Revista Ciencia e Investigación*, 3, 102-109.
- Williams, S.A., (2013). *Numerical Analysis of Reinforced Masonry Shear Walls Using the Nonlinear Truss Approach*. Thesis Master of Science in Civil Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University.

BIOGRAFÍAS



Fabiana Elizabeth Cunalata Vásquez, Ingeniera Civil graduada como mejor estudiante en la Universidad Técnica de Ambato. Egresada del programa de Maestría en Investigación en Ingeniería Civil mención Estructuras de la Universidad de las Fuerzas Armadas. Con amplia experiencia en Seguimiento y

Control de Construcciones, desempeñándose actualmente como investigadora en el área de Estructuras enfocado en Vulnerabilidad Sísmica, además de ser miembro consultor en el comité de actualización de la Norma Ecuatoriana de la Construcción en los capítulos de peligro sísmico y reforzamiento estructural. Manteniendo una preparación continua en pro de impulsar el interés en el área sísmica dentro del país.



Pablo Enrique Caiza Sánchez, PhD en Ingeniería Civil en la Universidad de Illinois en Urbana- Champaign en el año 2012. Siendo primer becario Fulbright y luego Asistente de Investigación, siendo además Asistente de Docencia en varios cursos de estructuras. Previamente obtuvo su M.Sc. en Estructuras en la Escuela

Politécnica Nacional de Quito, fue el mejor graduado de Ingeniería Civil en la Escuela Politécnica del Ejército (ESPE). También realizó cursos de posgrado en la Middle Tennessee State University en los Estados Unidos de Norteamérica, y en la Fachhochschule Hildesheim-Holzminden en Alemania. Actualmente trabaja en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

INDEXACIONES



revistapolitecnica.epn.edu.ec





revistapolitecnica.epn.edu.ec
www.epn.edu.ec



ESCUELA
POLITÉCNICA
NACIONAL



REVISTA
POLITÉCNICA



EPN
editorial

revistapolitecnica.epn.edu.ec
www.epn.edu.ec