



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE QUITO**

**CARRERA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS**

**REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE (NO SISTEMÁTICA) SOBRE EL USO DE  
ALGORITMOS GENÉTICOS EN LA CALIBRACIÓN DE MODELOS DE MICRO  
SIMULACIÓN VEHICULAR**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título de ingeniero de sistemas

AUTOR: CARLOS ALEJANDRO TORRES ALBAN

TUTOR: JULIO RICARDO PROAÑO ORELLANA

Quito - Ecuador

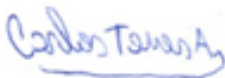
**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUDITORIA DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN**

Yo, Carlos Alejandro Torres Alban con número de cédula 1718164799; manifiesto que:

Soy autor y responsable del presente trabajo; de esta manera autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar, ya sea de manera parcial o total, el presente trabajo de titulación.

Quito, 02 de agosto de 2022

Atentamente,



Carlos Alejandro Torres Alban

1718164799

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN  
A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Carlos Alejandro Torres Alban con número de cédula 1718164799; expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy el autor del artículo académico: “Revisión del estado del arte (no sistemática) sobre el uso de algoritmos genéticos en la calibración de modelos de micro simulación vehicular”, el cual ha sido desarrollado con la finalidad de optar por el título de Ingeniero de Sistemas, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la misma facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que realice la entrega del trabajo final en formato digital a la biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 02 de agosto de 2022

Atentamente,



Carlos Alejandro Torres Alban

1718164799

## **CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Julio Ricardo Proaño Orellana con documento de identificación número 0103909412, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE (NO SISTEMÁTICA) SOBRE EL USO DE ALGORITMOS GENÉTICOS EN LA CALIBRACIÓN DE MODELOS DE MICRO SIMULACIÓN VEHICULAR, realizado por Carlos Alejandro Torres Alban con número de identificación 1718164799, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 02 de agosto de 2022

Atentamente,



---

Ing. Julio Ricardo Proaño Orellana  
0103909412

# REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE (NO SISTEMÁTICA) SOBRE EL USO DE ALGORITMOS GENÉTICOS EN LA CALIBRACIÓN DE MODELOS DE MICRO SIMULACIÓN VEHICULAR

## REVIEW OF THE STATE OF THE ART (NON-SYSTEMATIC) ON THE USE OF GENETIC ALGORITHMS IN THE CALIBRATION OF VEHICLE MICRO- SIMULATION MODELS

Carlos Torres<sup>1</sup>, Julio Proaño<sup>2</sup>

### Resumen

Este trabajo propone una revisión del estado del arte entre 2011 hasta la actualidad (2022), sobre el uso de Algoritmos Genéticos (AG) en la calibración de modelos de micro simulación vehicular. La calibración no es más que el proceso de optimización de modelos bajo la comparación de parámetros observados y reales.

Se seleccionó a los AG debido a su gran robustez y capacidad de trabajo con grandes cantidades de datos.

Se seleccionaron un total de 19 artículos de fuentes de investigación reconocidas como: IEEE Xplore, ScienceDirect, Springer Link y Scopus, respetando todos los criterios de selección y filtrado para únicamente trabajar con aquellos que aporten una actualización adecuada del tema.

Los resultados muestran que gracias a la actualización de este tema se pudo constatar que el uso de los AG en la calibración de modelos de micro simulación vehicular tiene el potencial para mejorar y acelerar el proceso de calibración, lo cual ayudara a investigaciones y futuras publicaciones.

**Palabras Clave:** Algoritmo Genético, Calibración, Estado del arte, Micro Simulación, Modelo, Revisión, Tráfico Vehicular

### Abstract

This paper proposes a state-of-the-art review from 2011 to the present (2022) on the use of genetic algorithms (GA) to calibrate vehicle microsimulation models. Calibration is nothing more than the optimization process of models under comparing experimental and real parameters.

Genetic algorithms (GA) were selected because of their excellent robustness and ability to work with large amounts of data.

A total of 19 articles were selected from recognized research sources such as IEE Xplore, ScienceDirect, Springer Link, and Scopus, respecting all the selection and filtering criteria to work only with those that provide an adequate update of the topic.

The results show that thanks to the update on this topic, it was possible to verify that the use of GA (Genetic Algorithms) in the calibration of vehicle microsimulation models can improve and accelerate the calibration process, which will help future research and publications.

**Keywords:** Genetic Algorithm, Calibration, State of the Art, Micro Simulation, Model, Review, Vehicle Traffic,

---

<sup>1</sup> Estudiante de Ingeniería en Sistemas- Universidad Politécnica Salesiana, Egresado- UPS – sede Quito. Autor para correspondencia: [ctorres1@est.ups.edu.ec](mailto:ctorres1@est.ups.edu.ec)

<sup>2</sup> Docente de Ingeniería en Sistemas – Universidad Politécnica Salesiana, UPS- sede Quito Email: [jproaño@ups.edu.ec](mailto:jproaño@ups.edu.ec)

## 1. Introducción

La congestión vehicular se produce por la gran cantidad de vehículos, ya sea en una calle, vía o autopista [23], la misma se ha convertido en una parte habitual y constante en las carreteras a nivel mundial.

En relación con la tecnología y con lo difícil de poder predecir el comportamiento real de la congestión vehicular dentro de la carretera como tal. Se ha vuelto una necesidad el uso de la micro simulación que logra obtener valores muy realistas y cercanos a condiciones reales de la congestión vehicular en carreteras.

Para una optimización correcta de los modelos de micro simulación vehicular se entiende que es necesario pasar por un proceso de calibración que no es más que ajustar el valor de los parámetros del modelo utilizando datos observados para que el modelo se pueda representar de forma realista [21].

Es por esto por lo que diferentes autores e investigadores usan algoritmos genéticos (AG) en el proceso de calibración de un modelo, ya que se caracterizan por ser robustos y pueden trabajar con grandes cantidades de datos.

La calibración adecuada de los parámetros influye de manera directa a la micro simulación de tráfico vehicular. Para identificar el mejor conjunto de parámetros en un modelo de simulación microscópica se requiere un algoritmo de optimización debido a que el conjunto de datos es potencialmente grande [1].

En este trabajo se realiza revisión del estado del arte en fuentes importantes de investigación científica tales como: IEE Xplore, ScienceDirect, Springer Link y Scopus.

Las cuales fueron clasificadas por el modelo que usaron donde destacan PARAMICS [1,6], IDM [2,3], VISSIM [4,5,14,17,19], transmodeler [7], SUMO[8,11], modelos alternativos [9,10,13,18], CORSIM [12,16] y AINSUM [15].

Cumpliendo con criterios de inclusión y exclusión que garanticen que la bibliografía es la adecuada y más relevante.

El presente artículo está constituido por cuatro secciones: Introducción donde se presenta el contexto de la revisión del estado del arte y todo

lo relacionado con el tema en específico. Metodología donde se presenta como se realizó la revisión del estado del arte, es decir, el proceso de búsqueda, clasificación y selección de las publicaciones más importantes y tomadas en cuenta.

Resultados y discusión donde se mostró una breve descripción con los resultados obtenidos por cada una de las publicaciones seleccionadas, para luego entrar en la discusión donde se obtuvo afirmaciones importantes de cada modelo que se usó en las publicaciones.

Por último, las conclusiones donde se muestra todo lo que arrojo este artículo académico y su revisión del estado del arte.

## 2. Metodología

Una Revisión del estado del arte no sistemática se realiza con un método de investigación que garantice los siguientes puntos [20]:

- No responde como tal a una sola pregunta clara y específica de investigación.
- Se debe identificar, analizar, valorar e interpretar el conocimiento general sobre un tema específico.
- Resume los aspectos más relevantes del conocimiento actual sobre un tema. Es una opinión experta ayudada por datos y evidencias.
- Se debe describir todo el proceso de búsqueda de la información.

Aunque la investigación se adapta principalmente al tema en cuestión, es lo suficientemente amplia como para servir de ayuda a futuras investigaciones que estén relacionadas con la tecnología.

A continuación, se presenta las diferentes etapas planteadas para la realización del presente artículo académico.

- Fuente de datos
- Términos de búsqueda usados
- Selección de artículos para su revisión
- Criterios de inclusión y exclusión
- Ejecución de la selección

## 2.1. Fuente de Datos

La primera etapa denominada fuente de datos, es aquella en la cual se escogió cuáles serían las bases de datos más relevantes y útiles para realizar la revisión del arte planteada.

Para llevar a cabo esta revisión del estado del arte, se usó un total de cuatro bases de datos: IEE Xplore, ScienceDirect, Springer Link y Scopus.

Se realizaron diferentes consultas relacionadas con la calibración de modelos en la micro simulación vehicular usando algoritmos genéticos (AG) entre 2011 y 2022, obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 1.

Las consultas devolvieron una gran cantidad de artículos de investigación que se filtraron de manera manual para retener únicamente las publicaciones más relevantes para esta revisión.

A continuación, se filtraron de manera manual los resultados para obtener únicamente las publicaciones más relevantes para esta revisión.

**Tabla 1.** Fuente de datos

| Base de Datos  | Fec ha de Acceso  | URL   | Result ados |
|----------------|-------------------|---|-------------|
| IEEE Xplore    | 2 de mayo de 2022 | <a href="https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp">https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp</a> | 160         |
| Science Direct | 3 de mayo de 2022 | <a href="https://www.sciencedirect.com/">https://www.sciencedirect.com/</a>                           | 133         |
| Springer Link  | 3 de mayo de 2022 | <a href="https://link.springer.com/">https://link.springer.com/</a>                                   | 144         |
| Scopus         | 4 de mayo de 2022 | <a href="https://www.scopus.com/home.uri">https://www.scopus.com/home.uri</a>                         | 76          |

## 2.2. Términos de búsqueda usados

En esta la segunda etapa se utilizaron los siguientes términos de búsqueda, más detallados que en la fase anterior, con la finalidad hallar los datos más relevantes y de utilidad en las fuentes previamente mencionadas:

- Calibration OR Vehicle Microsimulation Models OR Genetic Algorithm
- TITLE-ABS-KEY (Calibration of vehicle microsimulation models using genetic algorithms) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA,"COMP"))
- Predict \* AND Calibration AND using Genetic Algorithm

Cabe mencionar que tanto los términos como las búsquedas se realizaron en idioma inglés debido a que los artículos más relevantes, actuales e importantes han sido publicados y escritos en dicho idioma.

## 2.3. Procedimiento de selección de artículos para su revisión

El procedimiento de selección de los artículos comprende la identificación, el filtrado y que se haya cumplido con los criterios de la investigación de manera general, como lo estipula una revisión no sistemática del estado del arte.

Se inició con un total de 30 artículos de manera general que comprende la parte de selección, sin embargo, una vez filtrados y conociendo más a fondo su aporte como relevancia, se determinó trabajar con un total de 19 artículos, como se muestra en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Artículos Seleccionados

| Número | Título   |
|--------|--|
| 1      | A Calibration and Validation Procedure for Microscopic Simulation Model  |
| 2      | Calibration of Microscopic Traffic Flow Models Against Time-Series Data*   |
| 3      | Do We Really Need to Calibrate All the Parameters? Variance-Based Sensitivity Analysis to Simplify Microscopic Traffic Flow Models |
| 4      | Improving the calibration time of traffic simulation models using parallel computing technique                                     |

|    |   |
|----|---|
| 5  | Parameter Calibration of Microscopic Traffic Simulation Model Based on Floating Car Data  |
| 6  | Simultaneous Calibration of Microscopic Traffic Simulation Model and Estimation of Origin/Destination (OD) Flows based on Genetic Algorithms in a High-Performance Computer |
| 7  | Software for Calibration of Trans modeler traffic microsimulation models  |
| 8  | LOGAN's Run: Lane optimization using genetic algorithms based on NSGA-II  |
| 9  | Genetic Algorithm Based Efficient RSU Distribution to Estimate Travel Time for Vehicular Users  |
| 10 | A novel traffic routing method using a hybrid Ant Colony System based on a genetic algorithm  |
| 11 | Urban travel demand estimation using genetic algorithm  |
| 12 | Calibration of traffic flow models using a memetic algorithm  |
| 13 | Derivation of ATS and PTSF Functions for Two-lane, Rural Highways in Brazil   |
| 14 | An extreme value theory-based approach for calibration of microsimulation models for safety analysis  |
| 15 | Estimation of Passenger Car Equivalents for single-lane roundabouts using a microsimulation-based procedure   |
| 16 | Multi-objective Memetic Algorithm Based on NSGA-II and Simulated Annealing for Calibrating CORSIM Micro-Simulation Models of Vehicular Traffic Flow                         |
| 17 | Performance Evaluation and Enhancement of Unsignalized Intersection Using Microsimulation in VISSIM   |
| 18 | A Bayesian Neural Network-Based Method to Calibrate Microscopic Traffic Simulators  |
| 19 | Investigating the transferability of calibrated microsimulation parameters for operational performance analysis in roundabouts  |

## 2.4. Criterios de inclusión y exclusión

En esta cuarta etapa se procede a realizar un análisis el cual nos permitirá encontrar aquellos criterios que servirán para la inclusión o exclusión de un artículo de los ya antes mencionados con la finalidad de hallar solo aquellos que sean de utilidad para esta investigación.

### Inclusión

- Estudios relacionados con la calibración de modelos de micro simulación usando Algoritmos Genéticos.
- Investigaciones y trabajos aceptados por revistas y conferencias.
- Trabajos que utilicen Data sets con gran cantidad y diversidad de población.
- Trabajos que empleen tanto AG generacionales como estacionarios.
- Investigaciones que tengan como criterio de finalización de la calibración que se alcanzó el óptimo del AG planteado.
- Trabajos que estén dentro del rango de años entre 2011 hasta 2022 (Actualidad).
- Trabajos en idioma inglés.

### Exclusión

- Estudios que no traten la calibración de micro simuladores vehiculares.
- Estudios que no usen algoritmos genéticos para calibrar los modelos.
- Artículos que no tengan validación en sus métodos propuestos.
- Artículos de fuentes diferentes a las mencionadas y que no sean fiables.
- Artículos que utilicen AG que después de algunas interacciones no muestren mejora en la calibración.
- Trabajos que no hayan utilizado medidas estadísticas o con número reducido de iteraciones para el proceso de calibración mediante el uso de AG.
- Estudios que tengan una población reducida o mínima.

## 2.5. Ejecución de la selección

La revisión de los artículos antes mencionados se la realizó agrupando los mismos por su año de



publicación. Toda esta bibliografía contiene aquellos estudios que se ajustan totalmente a los criterios de inclusión.

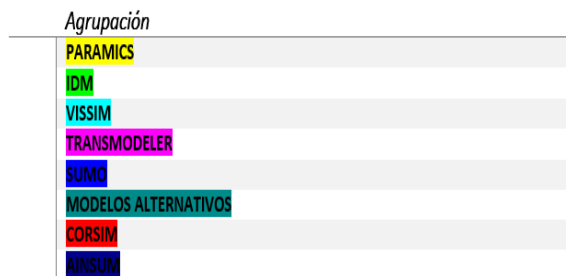
Una vez aplicados de manera adecuada los criterios tanto de inclusión como de exclusión, se obtienen los 19 artículos ordenados por sus años de publicación, como se muestra en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Número de artículos de investigación de 2011 a 2022

| Año   | Referencia | Cantidad |
|-------|------------|----------|
| 2011  | 1,13       | 2        |
| 2012  | 2          | 1        |
| 2013  | 6          | 1        |
| 2014  | 8          | 1        |
| 2015  | 3,9,11,12  | 4        |
| 2016  | 7,16       | 2        |
| 2017  | 10,15,19   | 3        |
| 2019  | 4,5        | 2        |
| 2021  | 14,18      | 2        |
| 2022  | 17         | 1        |
| Total |            | 19       |

Ya agrupados por año fue necesario volverlos a filtrar esta vez, por el modelo que usaron para lograr su objetivo.

De esta manera se obtuvieron un total de 7 tipos de modelos usados separados por un código de colores, como se mostrará en la Figura 1. Los cuales servirán para realizar de manera adecuada la discusión de los resultados obtenidos.



**Figura 1.** Clasificación Modelos

### 3. Resultados y Discusión

#### 3.1 Calibración de modelos de micro simulación vehicular usando algoritmos genéticos (AG)

Los modelos de micro simulación de tráfico en la actualidad se utilizan ampliamente para cuantificar los beneficios y limitaciones del control del tráfico en un lugar o zona establecida. [21]

La utilidad de dichos modelos para la toma de decisiones de diseño, control de tráfico dependerá principalmente de su precisión y fiabilidad.

La esencia de la calibración del modelo es un problema de optimización, cuyo objetivo es minimizar la discrepancia entre las condiciones de campo y las mediciones de tráfico simulado. Dado que el proceso de calibración es un problema no lineal y estocástico, los algoritmos heurísticos como el Algoritmo Genético (AG) pueden ser de gran beneficio. [1]

Esta sección presenta una revisión cronológica del estado del arte que se ha publicado desde 2011 hasta 2022 en la actualidad, que documenta la calibración de modelos de micro simulación vehicular usando AG.

Dichos estudios de investigación muestran el modelo que emplearon, el data set del sitio donde se implementó, una breve descripción de la investigación, AG empleados, las herramientas de experimentación y los resultados de los enfoques propuestos.

En [1] se propone explicar de manera adecuada el procedimiento sistemático y práctico que se realiza para la calibración y validación de modelos de simulación microscópica.

El mismo fue ejecutado en una muestra de la autopista de la provincia de Guandong en China, utilizando como modelo principal PARAMICS un software de modelización del tráfico de última generación que permite a los profesionales del transporte diseñar, evaluar y presentar soluciones fiables. [22]

Los resultados de la evaluación de los parámetros calibrados mostraron que el modelo PARAMICS se ha calibrado con éxito.

Obteniendo como resultado que la distancia media calibrada hacia el objetivo es de 0.45 s, el tiempo medio de reacción calibrado es de 0.43 s ambos valores son menores que el valor por

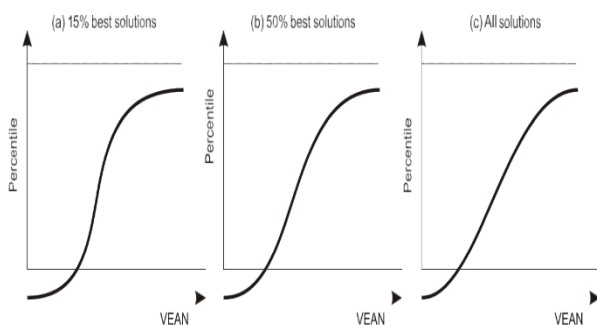
defecto de 60 s calibrados en condiciones normales en Reino Unido.

En el estudio se usó un solo MOE (tiempo de viaje) para la calibración, pero se llegó a concluir que es importante investigar que se agreguen más MOE para obtener resultados aún más significantes, además de exactos.

En ese mismo año (2011) se presenta un segundo artículo que con la ayuda del anterior busca mejorar de manera significativa la calibración de modelos de micro simulación vehicular usando AG.

En [13] el objetivo de este estudio fue lograr adaptar las funciones ATS (Velocidad media de viaje) y PTSF (Porcentaje de tiempo de seguimiento) del HCM2000, manual encargado del análisis de la capacidad y el nivel de servicio de las calles y carreteras de Estados Unidos.

En las carreteras rurales de Brasil, los datos obtenidos de 11 puntos distintos fueron calibrados mediante AG (Algoritmos Genéticos), dicho proceso fue simulado bajo TWOPAS modelo de simulación de tráfico microscópico ampliamente usado por el HMC200, dando como resultado una mejora del 15%, en la velocidad media de calibración (Figura 2) de soluciones haciendo uso de AG.



**Figura 2.** Distribuciones acumuladas de los valores de velocidad media de calibración (VEAN) a partir de la calibración de AG [13]

Para el año siguiente se decidió cambiar de modelo del ya conocido PARAMICS a otro nuevo que ayude a obtener un punto de vista diferente a lo antes expuesto.

En [2] el estudio se basó en un conjunto de datos sintéticos, es decir, los mismos que son generados por el modelo utilizado ajustando los parámetros a ciertos valores conocidos, el modelo

elegido fue IDM modelo de conductor inteligente conocido por su forma de clasificar la importancia de lo que se debe calibrar.

El algoritmo de optimización empleado en el estudio fue OptQuest Multistart, que combina el comportamiento de búsqueda de un PNL (Programación no lineal) local basado en el gradiente con las capacidades de optimización global de una búsqueda en específico.

Dejo como resultado un total de error de,  $\pm 5\%$  con lo que se pudo concluir que al usar datos sintéticos y las GOF adecuadas, el mismo algoritmo será capaz de encontrar el óptimo global del problema, sin embargo, a pesar de que los experimentos realizados con este tipo de datos confirman lo antes mencionado aún se siguen realizando más investigaciones.

Para 2013 se buscó dar solución a trabajos más complejos, aquellos que necesiten más de una sola calibración, como se apreciara en el siguiente aporte de investigación.

En [6] el objetivo del trabajo fue el desarrollo de un marco de optimización multicriterio para la calibración simultánea de los parámetros de demanda y oferta (DTA), tomando en cuenta los flujos de origen- destino (OD) en el modelo de simulación PARAMICS.

Se eligió a un AG como método de solución para resolver el problema de optimización, el mismo que fue implementado en un clúster de computación de alto rendimiento.

La metodología previamente propuesta se aplicó en Water Front, Canadá, una red compleja y a gran escala que abarca dos autopistas principales, carreteras menores, intersecciones señalizadas y no señalizadas.

Donde se obtuvo resultados importantes tales como que el porcentaje de cambios entre el caso base y antes de la calibración oscila entre el 22.5 y el 56.5% con una mejora de media del 38.1 %, dejando una mejora del 24.3 % en la velocidad de precisión de la calibración en comparación al caso inicial o llamado también caso base.

Con los AG ya convertidos en herramientas muy útiles para la calibración, se decidió ir en búsqueda de nuevos de estos.

En [8] el objetivo de este trabajo fue adoptar un AG de ordenación no dominante (NSGA-II) que intenta encontrar múltiples soluciones Pareto-óptimas en problemas de optimización multiobjetivo con la finalidad de estudiar el efecto de los carriles de bus en el tráfico urbano, el modelo usado para la investigación fue SUMO (Simulation For Urban Mobility), los datos obtenidos en la ciudad de Leicester, Reino Unido arrojaron que el uso de AG fue de gran ayuda, ya que redujo en un tiempo de 129.29 s, el tiempo de un carril de buses netamente exclusivo y en flujo libre es decir sin carriles de buses el AG consiguió bajar un aproximado de 20 a 30 segundos como se muestra en la Figura 3.

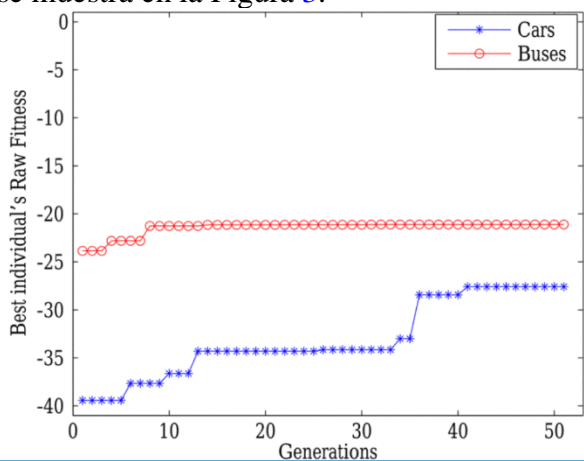


Figura 3. Comparativa de aptitud de autos vs. buses del AG en la sexta generación tras ser calibrado [8]

Siguiendo con la revisión de la literatura, el año 2015 sin duda es uno de los más productivos, teniendo en cuenta a cuatro publicaciones que afirmaron el uso de AG en este tema es de gran importancia y aporte.

En [3] el objetivo del estudio fue proporcionar una metodología robusta para simplificar a los modelos de seguimiento vehicular sin afectar a la capacidad de reproducir la realidad. La metodología que se aplicó fue IDM (Modelo de conductor inteligente) en un conjunto de datos reconstruidos de la NGSIM 180-1 (Next Generation SIMulation). Además del diseño robusto del marco de Monte Carlo que tiene como factor de análisis la entrada no paramétrica y que convierte a la trayectoria del líder como modelo de seguimiento de autos. Se pudo observar una

clara diferencia en el tiempo cálculo, ya que el beneficio de calibrar el modelo simplificado, el número de evaluaciones disminuyó en un 80% además de que en el modelo completo el nivel de confianza fue del 6.85 % dejando al simplificado con apenas 5% no teniendo una gran diferencia entre uno y otro.

En [9] el trabajo propuso un modelo de tiempo de viaje optimizado en RSU (Unidades de Carretera) y un AG para calcular el tiempo de viaje de cualquier vehículo, el modelo utilizado fue ORTT (Tiempo para la estimación de viaje) como resultados se obtuvo que la muestra que usó AG mostró que el número de RSU fue menor al que no la usó como se muestra en la Figura 4, además se observó claramente que la eficiencia y costo es mucho menor usando AG con una diferencia casi cuatro veces menor.

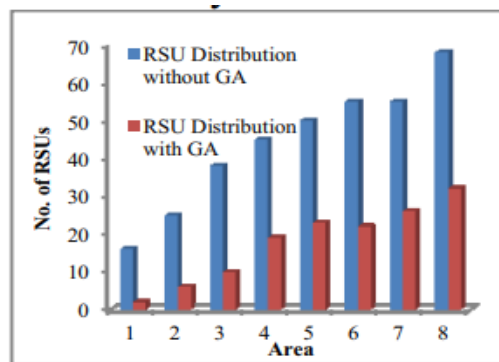


Figura 4. Eficiencia del AG en la distribución de RSU (Unidad de la carretera) [9]

Los datos fueron obtenidos bajo la infraestructura de una red VANNET la misma que los recoge en vehículos móviles.

En [11] el estudio se desarrolló un AG con el objetivo de encontrar una matriz óptima de OD que muestre los patrones de viajes reales de un número significativo de vehículos dentro de la ciudad, el modelo usado fue SUMO (Simulation For Urban Mobility) juntamente con el AG que se implementó mediante el paquete Java Genetic Algorithms Package (JGAP).

El estudio se realizó en la ciudad de Mumbai, India, donde se obtuvo que con cada generación del algoritmo genético se fue mejorando el porcentaje medio de error absoluto (MAPE), el cual inició en 75% llegando a tan solo el 46.62%

demonstrando así su importancia al momento de trabajar con la matriz adecuado de OD.

En [12] el estudio propuso un algoritmo memético (AM) para la calibración de modelos de simulación de flujo de tráfico microscópico, el mismo incluye una combinación entre AG y el previamente mencionado AM, para ello se calibraron dos sistemas bajo el simulador CORSIM el mismo que uso sus dos componentes FRESIM (simulación de autopistas) y NETSIM (simulación arterial).

Los dos ambientes usados para la simulación fueron Pyramid Highway en Reno, Estados Unidos, utilizó una red hipotética proporcionada por McTrans es decir del mismo CORSIM dando como resultados que Raíz normalizada cuadrática media (NRMS) usada en los experimentos fue mucho más baja después del uso del algoritmo AM (0.11) teniendo valores de cuatro veces menos que sin su uso (0.42).

Luego de un gran aporte para 2016 se destaca la inserción de un nuevo modelo de calibración como transmodeler que trajo consigo la implementación y creación de nuevos softwares en esta rama.

En [7] la investigación presentó una metodología general para el proceso de calibración, además de desarrollar un software que ayuda a calibrar la micro simulación de tráfico transmodeler además del uso de AG para la búsqueda de valores óptimos.

El mismo se realizó en Pereira, Colombia en un punto redondo bajo un puente y de difícil acceso, en el cual se procedió al uso y comparación de dos AG, el de Elitismo que permite el ingreso de entradas de nuevos individuos mientras sean mejores que la peor solución de la población y el de Apiñamiento el cual preservara la diversidad de la población sin realizar cambio alguno a la misma.

Dando como resultado que el algoritmo de Apiñamiento encontró la mejor solución porque el valor de su GOF fue de 0.15, un valor menor a su competidor, el algoritmo de Elitismo (Figura 5).

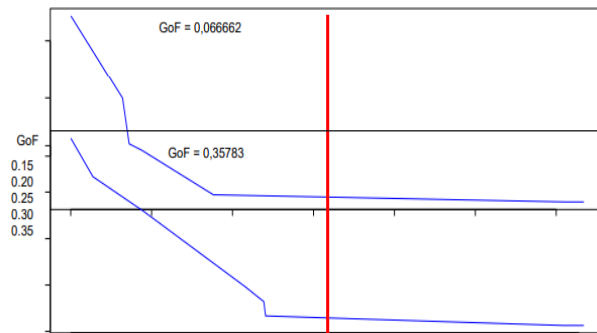


Figura 5. Comparativa entre AG Elitista vs. AG de Apiñamiento [7]

[16] Este trabajo propuso un algoritmo memético, multiobjetivo basado en NGS-II y Simulated Annealing (SA) para la calibración de modelos de micro simulación vehicular, además de NGS-II también se realizó el proceso con CORSIM, con la finalidad de compararlos tanto con un algoritmo genético con recorrido de simulación (GASA) y otro de aproximación simultánea perturbada estocástica (SPSA).

Los datos fueron obtenidos de Reno, Estados Unidos y del mismo programa de simulación CORSIM arrojando los siguientes resultados, el algoritmo NGS-II UN 36.5% menos de tiempo, mientras que SPSA 39.28% para calibrar la muestra de Reno, mientras que en los datos de CORSIM el algoritmo NGS-II obtuvo un 26.6% menos a diferencia que GASA con 42.1% siendo NGS-II un algoritmo muy rápido y de alta fidelidad al momento de realizar calibraciones.

2017 fue igual un año que aportó un total de tres investigaciones, las cuales dejaron a un lado el solo trabajar con lugares como carreteras grandes para hacerlo en lugares más específicos tales como Rotondas que son parte importante de un sistema de vial.

En [10] se presentó un marco base para proponer un nuevo método para resolver el problema de enrutamiento generado por el sistema híbrido de colonias de hormiga (ACS) basado en el algoritmo genético de la visualización de semáforos que se llama (GACSS), el cual utiliza una base de AG para optimizar los parámetros de ACS con el objetivo

de lograr viajes más cortos a nivel local como global.

Como metodología se usó la comparativa entre tres AG, el A-Star, ACS y GACS en el mapa de Berlín, de la misma manera para Hanoi, Vietnam, dejando en claro que se obtuvo mejores resultados por parte de GACSS (58 s) en comparación con A-Star (64.12 s) y ACS (60.88 s), ya que no solo es más corto, sino que el tiempo de viaje es menor.

[15] El presente trabajo abordó como estimar los equivalentes de los vehículos pesados en una rotonda de un solo carril, se tomó la comparativa de datos de la rotonda construida manualmente en el simulador microscópico AIMSUN, por esto fue de gran ayuda implementar AG para la calibración de este.

Los resultados más destacados fueron sin duda alguna que la mejor combinación de parámetros de AG obtuvo un tiempo de reacción de 0.86 s, avance mínimo de 1.59% y aceptación de velocidad de 1.0(Figura 6).

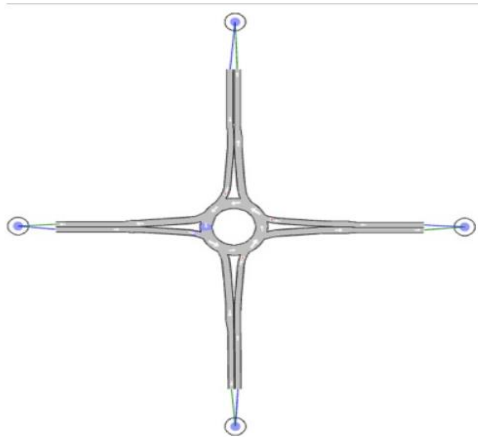


Figura 6. Rotonda Generada por AIMSUN [15]

[19] Este trabajo investigó la idoneidad del procedimiento de transferibilidad dentro de las rotondas, usando como técnica el AG, los casos de estudio se situaron en Cosenza, Italia, donde se usó VISSIM como modelo de micro simulación arrojando los siguientes resultados.

Que el escenario 1 tuvo parámetros de RMSNE de 1.29, mientras el escenario 2 aumento

a 1.35, el escenario 3 ya con la calibración aplicada descendió o a 0.59 s, dejando en calor que una vez calibrado se mejora mucho la tasa de error velocidad entre otros parámetros medibles.

Siguiendo esta revisión cronológica para el año 2019 y teniendo en cuenta el contexto global del inicio de una pandemia, de igual manera se aportó con dos investigaciones que tuvieron como finalidad lograr un desarrollo de procedimientos más rápidos de calibración mediante el uso de AG.

[4] El estudio tuvo como contribución el desarrollo de un procedimiento rápido de calibración de parámetros de los diferentes modelos de comportamiento de conducción utilizados EA (Algoritmos Evolutivos) y técnicas de computación en paralelo (PCT).

Se realizó en un segmento de la autopista 0-1 de Estambul, Turquía usando la metodología de realizar comparativas entre AG (Algoritmos genéticos) secuencial y paralelo, PSO (Optimización de enjambre de partículas) secuencial y paralelo bajo el modelo de micro simulación VISSIM. Llegando a obtener que el uso de calibración tanto integrada como de PCT pueden llegar a reducir un  $\pm 50\%$  el tiempo computacional y así mejorar el rendimiento del algoritmo de optimización.

El método propuesto además permite superar la limitación del tiempo computacional de los métodos de calibración existentes y que puede aplicarse a cualquier tipo de EA y software de simulación de tráfico.

[5] El artículo propuso un método de calibración adaptativa de los parámetros de simulación de tráfico microscópico basado en los datos de coches flotantes, además se construyó el proceso de calibración utilizando la genética ortogonal auto adaptativa.

Sobre una base de datos de automóviles flotantes proporcionada por una empresa de viajes en Changping, China, se llevó a cabo la simulación bajo VISSIM y con el algoritmo ortogonal auto adaptativo se obtuvo como resultados que el error relativo de a simulación se reduce en 7.65% de media y así se acerca a los

datos reales lo que demostró que el método es fiable y eficaz.

Habiendo pasado un año (2020) con muy poca investigación debido a los problemas de pandemia antes mencionados. 2021 vuelve con publicaciones relevantes al tema que sin duda ayudaran a continuar masa investigaciones y trabajos relacionados de este.

[14] El objetivo de este estudio es proponer un enfoque fresco e innovador de la calibración de los modelos de micro simulación utilizando otro enfoque como es el de la teoría del extremo EVT.

Se ha hecho uso de un AG para obtener los parámetros del modelo de simulación VISSIM, los datos fueron obtenidos en aproximaciones de una intersección señalada en Surrey, Canadá, Arrojando resultados interesantes tales como que después de la calibración el porcentaje de error absoluto (MAPE) bajo del 30.5% al 12% quedando en un promedio de 27.45 cuando se usó calibración con base en EVT dejando en evidencia que dicho modelo es fiable y de fácil uso.

En [18] se empleó un método basado en una red neuronal Bayesiana (BNN) (Figura 7) para calibrar parámetros de una micro simulación vehicular, se consideran tres HA, incluyendo AG (Algoritmo Genético), la estrategia evolutiva (ES) y el algoritmo de murciélago (BA) dentro de un conjunto de datos obtenidos de enlaces en la autopista de Shanghai, China.

Una vez realizada la comparativa entre la red bayesiana juntamente con los tres HA se hallaron los siguientes datos, el BNN-ES tiene el MSE (Error cuadrático) más bajo 6.681 después de la calibración, mientras que BNN-BA tiene un tiempo de cálculo más bajo, de tan solo 8.054 s y un MSE relativamente menor de 8.448 dando a entender que el uso de redes bayesianas con otros AG u AH es posible y deja muy buenas impresiones para una calibración correcta y sin errores.

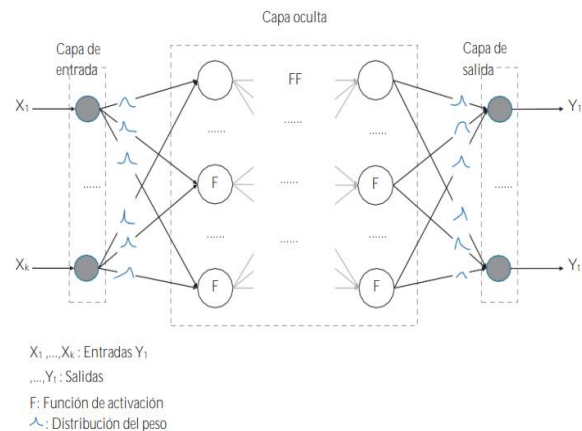


Figura 7. Estructura de una red Bayesiana [18]

Para finalizar en la actualidad 2022 se sigue aun investigando mucho acerca de la calibración de modelos de micro simulación vehicular con el uso de AG, es por esto por lo que fue de importancia mencionar una investigación actualizada como la que se presentara a continuación.

[17] El objetivo principal de este trabajo fue desarrollar un modelo de simulación en VISSIM utilizando la metodología adecuada y relevante para el tráfico mixto, para la optimización de este es importante usar AG en el proceso de calibración, los datos fueron obtenidos de la ciudad de Silchar Assam, India.

Se obtuvo un total de 11.99 % de error (MAPE) al momento de calibrar el modelo con AG siendo este más bajo que el 15% por defecto que se menciona en otras literaturas, dejando en calor que el uso de AG para la calibración de modelos ayuda a mejorar su calidad y fiabilidad.

Para finalizar se presentará en la Tabla 4 un resumen de los trabajos usados, resaltando los algoritmos que usaron y sus respectivos simuladores, los mismos que fueron descritos y mencionados en esta revisión del estado del arte en el apartado anterior.

Tabla 4. Algoritmos y simuladores usados en las Investigaciones

| Número de artículo | Algoritmos              | Simuladores |
|--------------------|-------------------------|-------------|
| 1                  | AG (Algoritmo Genético) | PARAMICS    |
| 2                  | OptQuest Multistart     | IDM         |

|    |  |                            |
|----|--|----------------------------|
| 3  | NGSIM 180-1 (Next Generation SIMulation)   | IDM                        |
| 4  | EA (Algoritmo Evolutivo)<br>AG (Algoritmo Genético)  | VISSIM                     |
| 5  | AG (Algoritmo Genético)  | VISSIM                     |
| 6  | AG (Algoritmo Genético)  | PARAMICS                   |
| 7  | AG (Algoritmos Genético) <ul style="list-style-type: none"> <li>• Elitismo</li> <li>• Apiñamiento</li> </ul>                         | Transmodeler               |
| 8  | NSGA-II (AG de ordenación no dominante)  | SUMO                       |
| 9  | AG (Algoritmo Genético)  | VANNET                     |
| 10 | AG (Algoritmos Genético) <ul style="list-style-type: none"> <li>• ACS</li> <li>• GACSS</li> </ul>                                    | CORSIM                     |
| 11 | JGAP (Java Genetic Algorithms Package)   | SUMO                       |
| 12 | AG (Algoritmo Genético)<br>AM (Algoritmo Memético)   | CORSIM<br>FERSIM<br>NETSIM |
| 13 | AG (Algoritmo Genético)  | TWOPAS                     |
| 14 | AG (Algoritmo Genético)  | VISSIM                     |
| 15 | AG (Algoritmo Genético)  | AINSUM                     |
| 16 | NGSA-II (Simulated Annealing) <ul style="list-style-type: none"> <li>• GASA</li> <li>• SPSA</li> </ul>                               | CORSIM                     |
| 17 | AG (Algoritmo Genético)  | VISSIM                     |
| 18 | AG (Algoritmos Genético)<br>BA (algoritmo de murciélago)<br>BNN-BA (Red-Bayesiana de Murcielago)<br>BNN-ES (Red-Bayesiana evolutiva) | BNN                        |
| 19 | AG (Algoritmos Genético)   | VISSIM                     |

### 3.2 Discusión

En esta sección se muestra la discusión que se dio a partir de los resultados antes mostrados. Teniendo así diferentes puntos de vista, desde la productividad global de la investigación hasta las afirmaciones que dejó cada uno de los modelos calibrados por AG (Algoritmos Genéticos).

En la Tabla 5 se muestra la productividad global por países de los estudios que han tratado este tema.

**Tabla 5.** Distribución de productividad global por países

| País estudio   | Caso de | Cantidad | Continente |
|----------------|---------|----------|------------|
| China          |         | 5        | Asia       |
| Estados Unidos |         | 4        | América    |
| Turquía        |         | 1        | Europa     |
| Canadá         |         | 2        | América    |
| Colombia       |         | 1        | América    |
| Vietnam        |         | 1        | Asia       |
| Alemania       |         | 1        | Europa     |
| India          |         | 2        | Asia       |
| Brasil         |         | 1        | América    |
| Italia         |         | 2        | Europa     |

En la Figura 8 se presenta el porcentaje de continentes que han presentado publicaciones del tema, destacando que tanto América como Europa lograron la misma cantidad de publicaciones, todo esto en el contexto de que Estados Unidos y Canadá son países muy comprometidos con el mejoramiento de sus carreteras y el flujo vehicular.

En cuanto a Asia con un poco menos de porcentaje destaca China, que es la ubicación geográfica con más micro simulaciones en sus diferentes carreteras y ciudades.



**Figura 8.** Distribución en porcentajes por continentes de las publicaciones

La distribución por tipo de literatura conferencias/revistas se muestra en la Figura 9.



Figura 9. Distribución por tipo de publicación

En donde se destacan más las conferencias sobre las revistas porque las mismas han sido foco importante de discusión en temas de tecnología y transporte.

La distribución de los años de las publicaciones se muestra en la Figura 10.



Figura 10: Distribución por años de las publicaciones

Como se puede observar en la Figura 10, destaca el año 2015 como el que más publicaciones tuvo con cuatro, mientras que en 2020 por el contexto global de la pandemia no se obtuvo ninguna publicación relevante.

Por último, la distribución de las fuentes se presenta la Figura 11.



Figura 11. Distribución por Fuentes

Donde se destaca IEE Xplore por su gran cantidad de conferencias con el tema de calibración con el uso de AG y los avances tecnológicos del transporte.

A continuación, se presenta en la Tabla 6 de manera más detallada los diferentes AG identificados en cada uno de los artículos, los mismos fueron usados e implementados a lo largo de este tiempo.

Tabla 6. Algoritmos Genéticos Identificados en los artículos

| Número de artículo          | Algoritmo Genético Identificado                           |
|-----------------------------|---|
| 1,4,5,6,9,12,13,14,15,17,18 | Algoritmo Genético  |
| 2                           | OptQuest Multistart                                       |
| 3                           | NGSIM 180-1(Next Generation Simulation)                   |
| 4                           | EA (Algoritmos Evolutivos)                                |
| 7                           | AG de Elitismo  |
| 8                           | AG de Apiñamiento   |
| 10                          | NSGA-II (AG de ordenación no dominante)                   |
| 11                          | Algoritmo genético de la visualización de semáforos GACSS |
| 16                          | JGAP (Java Genetic Algorithms Package)                    |
| 18                          | NSGA-II (AG de ordenación no dominante)                   |
|                             | BA (algoritmo de murciélago)                              |
|                             | BNN-BA (Red-Bayesiana de Murciélago)                      |
|                             | BNN-ES (Red-Bayesiana evolutiva)                          |

Este presente artículo se encarga de mostrar una visión general de la calibración de modelos de micro simulación vehicular usando AG (Algoritmos Genéticos).

Tras una revisión del estado del arte de publicaciones relevantes entre 2011 hasta la actualidad 2022, se llega a las siguientes afirmaciones:

- PARAMIC como modelo de micro simulación vehicular necesita tener como mínimo una medida de bondad como se menciona en [1,6] para obtener resultados exactos y fiables al momento de realizar calibración bajo el uso de AG (Algoritmos Genéticos).



- El modelo IDM por su parte, muestra que trabajar con datos generados por el mismo (sintéticos) y no reales como en otros modelos, logra obtener un  $\pm 5\%$  de mejorar al momento de calibrar un modelo con uso de AG (Algoritmos Genéticos).

- VISSIM logro destacar siendo uno de los más utilizados por los autores en las publicaciones con un total de cuatro [4,5,17,19]. Además de destacar por ser aplicado en sistemas adaptativos o distribuidos juntamente con AG para su eficiente calibración.

- El modelo transmodeler fue el que además de implementar calibración bajo dos AG (Algoritmos Genéticos), algoritmo elitista y algoritmo de apiñamiento, trabajo en la creación de un nuevo software bajo el mismo nombre (transmodeler) para ayudar a la comunidad tecnológica que trabaje con micro simulaciones vehiculares.

- SUMO es aquel modelo que es más usado para calibrar grandes cantidades de vehículos o vehículos de gran tamaño, como se logró apreciar en los trabajos mencionados [8,11]. En cuanto a la calibración por medio de AG (Algoritmos Genéticos) obtuvo promedio de error de 46.2 % mucho menor a otros modelos antes mencionados.

- [9,10,13,18] son el conjunto de publicaciones que trabajaron con técnicas o modelos alternativos donde destaca la inclusión de redes Bayesianas(BNN), el HCM2000 (Manual de carreteras en EEUU), VANNET (red de vehículos móviles) y sistema híbrido de colonias de hormigas (ACS) que arrojaron resultados muy positivos al trabajar con AG(Algoritmos Genéticos) y su respectiva calibración.

- CORSIM empleo varios tipos de AG (Algoritmos Genéticos) así como otros computacionales AM (Algoritmo Memético) demostrando que las diferencias entre ambos no son muy importantes teniendo como error promedio después de ser calibrado un total de 26.6 % y un promedio de Raíz normalizada cuadrática media (NRMS) de 0.11, valores muy

buenos para los estándares por defecto de las micro simulaciones vehiculares.

- AINSUM empleo un método exclusivo para vehículos pesados en una parte específica (rotondas) de las carreteras, más no en una como tal, siendo de gran ayuda para esta sección al obtener resultados importantes en la calibración de AG (Algoritmos Genéticos) en este tipo de micros simulaciones más específicas.

Como resultado, los AG (Algoritmos Genéticos) tienen el potencial para mejorar y acelerar el proceso de calibración de los diferentes modelos de micro simulación vehicular ya existentes o de nueva creación.

Este tipo de calibración y el uso de AG (Algoritmos Genéticos) con su uso de forma adecuada y eficiente transformará sin lugar a duda al transporte y su vinculación con la tecnología.

Por último, los AG (Algoritmos Genéticos) ayudará a tener mejor comprensión a proceso de calibración y de esta manera se beneficiará a nuevos autores con publicaciones por salir en fuentes de investigación importantes y reconocidas a nivel mundial.

## 4. Conclusiones

El presente trabajo realizó una revisión del estado del arte sobre el uso de algoritmos genéticos (AG) en la calibración de modelos de micro simulación vehicular, la misma que inicio con un total de 30 publicaciones de fuentes relevantes de la investigación científica.

Una vez realizado el proceso de selección y filtrado de las publicaciones se obtuvieron un total de 19, las cuales a su vez fueron clasificadas por el modelo que utilizaron en su investigación.

Se procedió a realizar una pequeña descripción de cada una de las publicaciones con lo más importante de los mismos para luego compararlos y obtener resultados que sirvan para dar a conocer las siguientes conclusiones y afirmaciones para una actualización importante del tema.

Las medidas de bondad son de vital importancia para una correcta y eficaz calibración, dejando en claro que se necesita al menos una de ellas para que los parámetros a comparar con datos reales arrojen una micro simulación de tráfico vehicular realista.

Las publicaciones [2,3], demostraron que al usar datos sintéticos bajo el modelo IDM logran por lo general un total +  $\pm 5\%$  de error medio en el nivel de confianza, al momento de ser calibrados bajo el uso de AG (Algoritmos Genéticos) que en comparativa con el 6.85% de aquellos que usan datos reales no existe mayor diferencia y de esta manera ambos tipos de datos son útiles al momento de cumplir con el proceso de calibrar un modelo de micro simulación vehicular.

Se ha encontrado que no solamente los modelos más conocidos y usados en el ámbito de la micro simulación de tráfico vehicular son útiles y tienen una precisa calibración, por ello es importante mencionar aquellos que aportaron ideas nuevas y diferentes tales como la publicación de redes Bayesianas o VANNET que lograron valores de error por debajo de lo ya establecido por otras publicaciones y modelos.

En la presente revisión del estado del arte, los diferentes autores han propuesto el uso de diversos e importantes modelos para la micro simulación vehicular. En general, esta revisión logro su objetivo de mostrar la importancia de la calibración, destacando la importancia del uso de algoritmos genéticos (AG) para ello.

Esta revisión proporciona la base para nuevos avances en el campo del transporte y la tecnología más en específico en cuanto a lo que tiene que ver con la calibración y el uso de los algoritmos genéticos, sin, embargo, el usar algoritmos meméticos de la mano con los genéticos es una idea que sin duda podría ser tomada en cuenta en el futuro.

Se estableció una revisión no sistemática para la redacción del presente artículo, debido a que es la que se encarga de dar un resumen de los puntos más relevantes y actuales del tema seleccionado. Gracias a ello se logró obtener una actualización completa de como la calibración de micro

simuladores de tráfico vehicular mediante el uso de AG es usado cada vez más en estos momentos, además de que servirá para el futuro.

Las diferentes fuentes de información utilizadas combinadas con la metodología correcta demostraron que, al trabajar de manera organizada, clasificada por años y tipo de simuladores, pudo obtener resultados importantes tales como la actualización del empleo de los Algoritmos Genéticos en la tecnología más específico del transporte.

La selección correcta de información dio como resultado la obtención de la información necesaria e importante de trabajos previos, dando así a la comunidad científica mayor conocimiento sobre los Algoritmos Genéticos y sus diferentes aplicaciones.

## Referencias

- [1] Zhe Li, H. L. (2011). A Calibration and Validation Procedure for Microscopic Simulation. *13th International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems* (pp. 563-568). Madeira Island: IEEE Xplore.
- [2] Montamino, M., Ciuffo, B., & Punzo, V. (2012). Calibration of microscopic traffic flow models against time-series data. *15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems* (págs. 106-114). Anchorage: IEEE Xplore.
- [3] Punzo, V., Montanino, M., & Ciuffo, B. (2015). Do We Really Need to Calibrate All the Parameters? Variance-Based Sensitivity Analysis to Simplify Microscopic Traffic Flow Models. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 184-193.
- [4] Nima, D., Murat, E., Ali, S. K., & Marijan, Ž. (2019). Improving the calibration time of traffic simulation models using parallel computing technique. *2019 6th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS)* (págs. 1-7). Cracow: IEEE Xplore.
- [5] Lingyu, Z., Dehui, S., Li, W., & Haibo, Z. (2019). Parameter Calibration of Microscopic Traffic Simulation Model Based on Floating Car Data. *2019 IEEE 8th Data-Driven Control and*

- Learning Systems Conference (DDCLS)* (págs. 1219-1224). Dali: IEEE Xplore.
- [6] Omrami, R., & Kattan, L. (2013). Simultaneous calibration of the microscopic traffic simulation model and estimation of origin/destination (OD) flows based on genetic algorithms in a high-performance computer. *International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013)* (págs. 2315-2321). The Hague: IEEE Xplore.
- [7] Jiménez, D., Muñoz, F., Arias, S., & Hincapie, J. (2016). Software for Calibration of Transmodeler traffic microsimulation models. *IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)* (págs. 1317-1323). Rio de Janeiro: IEE Xplore.
- [8] Witheridge, S., Passow, B. N., & Shell, J. (2014). LOGAN's Run: Lane optimization using genetic algorithms based on NSGA-II. *2014 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)* (págs. 63-68). Beijing: IEEE Xplore.
- [9] Sankaranarayanan, M., Mala, C., & Samson, M. (2015). Genetic Algorithm Based Efficient RSU Distribution to Estimate Travel Time for Vehicular Users. *Second International Conference on Soft Computing and Machine Intelligence (ISCMI)* (págs. 30-34). Hong Kong: IEEE Xplore.
- [10] Dang-Nhac, L., Thi-Hau, N., Thi-Thu-Trang, N., Duc-Nhan, N., & Ha-Nam, N. (2017). A novel traffic routing method using a hybrid Ant Colony System based on a genetic algorithm. *2017 International Conference on Information Networking (ICOIN)* (págs. 584-589). Da Nang: IEEE Xplore.
- [11] Tapas, S., Amritanshu, S., & Srikanth, S. (2015). Urban travel demand estimation using a genetic algorithm. *International Conference on Cognitive Computing and Information Processing (CCIP)*. Noida: IEEE Xplore.
- [12] Paz, A., Molano, V., Martinez, E., Gaviria, C., & Arteaga, C. (2015). Calibration of traffic flow models using a memetic algorithm. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 432-443.
- [13] Bessa, J. E., & Setti, J. R. (2011). Derivation of ATS and PTSF Functions for Two-lane, Rural Highways in Brazil. *6th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service* (págs. 282-292). Estocolmo: ScienceDirect.
- [14] Yanyong, G., Tarek, S., Lai, Z., & Mohamed, E. (2021). An extreme value theory-based approach for calibration of microsimulation models for safety analysis. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 1-16.
- [15] Giuffrè, O., Granà, A., Tumminello, M. L., & Sferlazzab, A. (2017). Estimation of Passenger Car Equivalents for single-lane roundabouts using a microsimulation-based procedure. *Expert Systems with Applications*, 333-347.
- [16] Cobos, C., Erazo, C., Luna, J., Mendoza, M., Gaviria, C., Areaga, C., & Paz, A. (2016). Multi-objective Memetic Algorithm Based on NSGA-II and Simulated Annealing for Calibrating CORSIM Micro-Simulation Models of Vehicular Traffic Flow. *Conference of the Spanish Association for Artificial Intelligence* (págs. 468-476). Madrid: Springer Link.
- [17] Ganguly, S., Mokades, A. A., & Dutta, M. (2022). Performance Evaluation and Enhancement of Unsignalized Intersection Using Microsimulation in VISSIM. *Proceedings of the Fifth International Conference of Transportation Research Group of India* (págs. 73-87). Mumbai: Springer Link.
- [18] Chen, Q., Ni, A., Zhang, C., Wang, J., Xiao, G., & Yu, C. (2021). A Bayesian Neural Network-Based Method to Calibrate Microscopic Traffic Simulators. *Hindawi*, 1-16.
- [19] Gallelli, V., Iuele, T., Vaiana, R., & Vitale, A. (2017). Investigating the Transferability of Calibrated. *Hindawi*, 1-10.
- [20] Navarra, U. d. (4 de Mayo de 2002). *Biblioguias*. Obtenido de Universidad de Navarra : <https://biblioguias.unav.edu/revisionessistematicas/tipo-de-revisiones>
- [21] Kyu-Ok, L. R. (2001). Enfoque basado en algoritmos genéticos para calibrar modelos de simulación microscópica. *IEEE*, 698-704.

- [22] Microsimulation, P. (25 de Noviembre de 2021). *Paramics*. Obtenido de Paramics: <https://www.paramics.co.uk/en/>
- [23] Lozano, A., Torres, V., & Antun, J. P. (Junio de 2003). *Trafico Vehicular en zonas urbanas*. Obtenido de Trafico Vehicular en zonas

urbanas:  
<http://www.ejournal.unam.mx/cns/no70/CNS07004.pdf>