

PSO Aplicado a la optimización de estrategia de carrera para la Formula 1.

Michael Andres Gutierrez Alfonso.*
Eduard Felipe Ortegon Correa.*

* *Department of Electronic Engineering, Universidad Santo Tomás,
Bogotá, Colombia (e-mail: {eduardortegon, michaelgutierrez}
@usantotomas.edu.co)*

Abstract: En este artículo se presenta una versión del algoritmo PSO (Particle Swarm Optimization), aplicado en la optimización de la estrategia de carrera en autos de la escudería McLaren la cual compite en la formula 1, para este fin, se tendrán en cuenta factores como el consumo de combustible, las paradas en boxes, el peso del auto y el tiempo de vuelta. Se resalta que el PSO es un algoritmo basado en la naturaleza. Este algoritmo se usa debido a que se desea aprovechar sus características principales de optimización, ya que cada partícula dentro del enjambre es capaz de comunicarse con otras a través de su respectivo gradiente.

Keywords: PSO, McLaren, Enjambre, Gradiente.

1. INTRODUCCIÓN

El algoritmo PSO es una herramienta meta-heurística poblacional, es decir un proceso que se basa en la indagación y el descubrimiento de conocimiento para realizar tareas de forma dinámica, el cual establece estrategias para recorrer y explorar un espacio de soluciones, optimizando un problema de manera iterativa. Esta técnica de optimización se basa en el comportamiento social de los individuos.

En un principio se vio inspirado por Reynold y Heppner, quienes se interesaron en la estética de las bandadas de aves, las reglas de vuelo sincronizado y como era posible dicho sincronismo sin chocar entre individuos.

De esa manera se genera el estudio sobre los PSO (Particle Swarm Optimization), siendo James Kennedy y Russell Eberhart los primeros en proponer un modelo matemático del movimiento de las aves que se ha ido mejorando con el paso del tiempo hasta llegar a lo que hoy es el algoritmo. Este algoritmo cuenta con dos entes principales, el individuo y el grupo, en donde cada individuo modifica su comportamiento basado en tres factores, el conocimiento del entorno, el conocimiento histórico, y la experiencia de los individuos cercanos. Por otra parte en el grupo existe un líder y este es el individuo que cuenta con las mejores características dentro del enjambre, este líder es seguido por todos los individuos hasta que exista un individuo con mejores características. Al ser un algoritmo que busca seguir el individuo con mejores características se extrapola el concepto a sistemas que permiten optimizar resultados de una función.

2. TRABAJOS RELACIONADOS Y ANTECEDENTES

Entre los principales trabajos revisados para la realización del modelo de estrategia de carrera, se encuentra el documento *Simulating Formula One Race Strategies* Sulsters (2018), en el cual se determina la estrategia de carrera

óptima, mediante el uso de simulación de eventos discretos y regresiones lineales, se resalta que en la Formula Uno, se hace uso de una gran cantidad de datos tomados en tiempo real para predecir el desempeño de los autos en carrera, el modelo propuesto en el documento imita una gran variedad de eventos que suceden en la pista, tales como el consumo de combustible, el desgaste de las llantas y la resistencia provocada por el aire. Los datos usados para la investigación se toman de ergast.com la cual es una pagina web que proporciona información de las carreras desde el año 1950.

Pero, ¿por que usar optimización por enjambre de partículas en una estrategia de carrera?, pues bien, al querer obtener los mejores resultados con el mínimo error posible, se propone una de las estrategias mas fuertes de sistemas bio-inspirados, la capacidad de las partículas de moverse a través de un universo de discurso para generar soluciones que resuelvan el problema propuesto de manera óptima, evitando llegar a mínimos locales, además de la capacidad del PSO para retener en su memoria los mejores resultados para cada partícula, convierte la técnica usada en una herramienta eficiente y útil. Cabe resaltar que no es la única técnica que puede ser aplicada ya que existen otras, tales como las redes neuronales, los PSO Multi-objetivo (que podría ser una mejor solución para este problema en específico ya que si quisiéramos ser mas estrictos, se deberían tener en cuenta varias funciones de costo), o los métodos híbridos los cuales combinan procesos de heurística local con algunos meta-heurísticos.

Las redes neuronales por su parte han sido usadas en el desarrollo de estrategias que permitan mejorar la gestión energética de los automóviles eléctricos presentes en los campeonatos de la formula E, llegando a optimizar estrategias de carrera, aprovechando la velocidad de predicción de estos algoritmos Xuze Liu (2020), en este caso en específico se tienen en cuenta otros parámetros analizados, como las potencias motrices, las distancias de elevación y la

temperatura del entorno, y de esta manera estudiar el efecto de dichos factores en el rendimiento en la carrera, el tiempo por vuelta, el estado de carga de la batería, etc.

En ultima instancia pero no menos importante, leyendo algunos artículos relacionados con las estrategias de carrera ROSA (2018), esto es realmente un reto, ya que depende de la cantidad de experiencia en el ámbito de las carreras. Se deben tener en cuenta variedad de condiciones, tales como, aspectos meteorológicos y la dureza de los neumáticos Pirelli (2020) ya que si estos son muy duros duraran mas, pero si son muy blandos se perderá demasiado tiempo en boxes cambiándolos debido al desgaste de los mismos. También se debe tener en cuenta las paradas en boxes y el tiempo transcurrido en cada una, adicionalmente, se debe tener en cuenta la posición en la que se arranca ya que si ocurre en la parte frontal de la carrera se arriesga un poco menos, también se debe tener en cuenta el peso del combustible y como este influye en la velocidad del monoplaza. Sulsters (2018), pero si se arranca en la zona media de la misma sera mas difícil competir. Eso sin resaltar también la componente humana que aunque no es tenido en cuenta en muchos de los estudios realizados juega un papel muy importante a la hora de competir Sánchez (2020).

3. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

"Las carreras de Fórmula 1 se ganan en la fábrica en lugar de en el circuito" Sulsters (2018), en la actualidad los equipos de Formula 1 recogen una gran cantidad de datos en cada carrera, parte de la planificación de la estrategia de carrera se lleva a cabo días antes del fin de semana, con el fin de llevar el rendimiento de los autos a su mayor capacidad. Obtener un modelo matemático que agrupe todas las posibles variables que influyen en cada vuelta, como condiciones climáticas, resistencia del aire, tiempo de rebufo, probabilidad de fallas o choques y combustible, se hace casi imposible; sin embargo, modelos menos complejos diseñados por los ingenieros de datos ayudan a la toma de decisiones para cada uno de los equipos. Una de las principales decisiones que se toman con antelación a su ejecución y que influye directamente en el desempeño del equipo es el numero de paradas en boxes o "Pits strategy" Mulholland (2010), esta decisión influye directamente en la cantidad de combustible con la que será cargado el auto y los neumáticos con los que competirá, lo que a su vez influye en el tiempo de vuelta del monoplaza. Teniendo como base el número de vueltas y el mejor tiempo de clasificación el sistema debe ser capaz de calcular la mejor estrategia para alcanzar el menor tiempo de carrera.

4. OBJETIVO GENERAL

Diseñar un algoritmo de PSO capaz de calcular la mejor estrategia de carrera, mas específicamente las paradas en boxes ("Pits strategy"), para diferentes competiciones de la Formula 1.

5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener el modelo que describa de manera adecuada la estrategia de carrera.

- Plantear las diferentes variables y ecuaciones que forman parte del modelo
- Adecuar correctamente el algoritmo de PSO al problema planteado

6. SISTEMA PROPUESTO

El sistema propuesto para el modelo planteado agrupa dos problemas de regresión, el primero lineal correspondiente al consumo de combustible del vehículo en cada vuelta, y el segundo cuadrático que corresponde a la influencia de la degradación del neumático en cada vuelta, debido a la gran cantidad de variables que se pueden encontrar en este campo, se toman las siguientes consideraciones:

- No se experimentan los efectos de la resistencia del aire
- El consumo de combustible es constante
- Las condiciones climatológicas permanecen óptimas o "secas" durante la carrera

De acuerdo al problema planteado, tenemos que:

Tiempo de carrera = Tiempo hasta la primera parada + Tiempo primera parada + Tiempo hasta Final de carrera

6.1 Entradas del sistema

Para darle al sistema la capacidad de calcular una óptima estrategia el usuario debe entregarle el numero de vueltas del circuito y el mejor tiempo de clasificación para esta pista

$$\begin{aligned} Lend &= \text{Numero de Vueltas} \\ t1 &= \text{Mejor tiempo de vuelta} \end{aligned}$$

El planteamiento del modelo se divide en 3 partes que componen la ecuación final:

Paso 1: Tiempo hasta primera parada En esta sección se calcula el tiempo necesario para alcanzar la primera parada en boxes teniendo en cuenta la siguiente información:

$$\begin{aligned} \text{Consumo de combustible} &= 3 \text{ kg/lap} \\ \text{Mas lento por combustible } E &= 0.03 \text{ s/(lab Kg)} \end{aligned}$$

Utilizando esto se puede calcular que tan lento ira el automóvil en cada vuelta por efecto del peso que genera el combustible (W) conocido como "Fuel Labs Weight Effect"

$$\begin{aligned} W &= \text{Consumo de combustible} * E \\ W &= 3 * 0.03 = 0.09 \text{ sec/(labfuel)} \end{aligned} \quad (1)$$

Con esta información es posible calcular el tiempo extra en completar una vuelta debido al combustible a bordo:

$$Et = \text{Media de vueltas} * \text{Fuel Labs Weight Effect}$$

Por ejemplo, para la primera vuelta donde la primera parada en boxes se proyecta a la vuelta número 20

$$Et = \left(\frac{20 + 19}{2} \right) * 0.09 = 1.775 \text{ sec} \quad (2)$$

Ahora es necesario calcular el tiempo perfecto de vuelta t_0 , tiempo hipotético que el auto podría conseguir si no tuviera carga de combustible

$$t_0 = t_1 - \left[\frac{1+0}{2} * W \right] \quad (3)$$

Finalmente se puede calcular el tiempo para completar una vuelta de la siguiente manera:

$$\text{LapTime} = \text{Et} + t_0$$

Con todos los valores calculados se obtiene el tiempo para completar la primera parada en boxes, conocido como "Fist Stint"

Paso 2: Tiempo que toma la parada en boxes Al conocer el numero total de vueltas y la distribución de las paradas en boxes a lo largo de la carrera es posible calcular el tiempo que le toma al automóvil abastecer de combustible para continuar con la carrera:

$$\begin{aligned} &\text{Tiempo para adicionar una (1) vuelta de combustible} \\ &\quad tf = 0.5 \text{sec} \\ &\text{Tiempo extra de vuelta con Pit Stop} \\ &\quad tp = 20 \text{segundos (Sin recargar combustible)} \\ &\text{Consumo de combustible} \\ &\quad C = 3 \text{Kg/lap} \end{aligned}$$

Usando estos datos se calcula: El numero de vueltas de combustible para adicionar

$$\text{L2} - \text{L1} = \text{Laps of Fuel}$$

Donde L2 es la vuelta de la segunda parada y L1 es la vuelta en la que se realizará la primera parada, así mismo se asocia esta ecuación para el final de la carrera o para una tercera parada, en caso de que exista

El tiempo de carga del combustible será el numero de Vueltas de combustible por adicionar por "tf"

$$\text{Laps of Fuel} * 0.5 = \text{Tiempo de carga}$$

Finalmente se calcula el tiempo extra de una vuelta con parada en boxes:

$$\text{Fuelflowtime} + tp \quad (4)$$

El tiempo total de carrera sera entonces la suma de cada uno de los intervalos de tiempo entre las paradas en boxes y el final de carrera, adicionando a la vuelta de PitStop el tiempo de parada necesario para recargar combustible.

6.2 Modelo

Básicamente el procedimiento anterior corresponde a la suma del área bajo la curva de la función que modela el tiempo de vuelta del automóvil, este procedimiento es facilitado por la integración:

$$\text{RaceTime} = \int \text{FirstStintTime} + \text{PitsTime} + \dots + \int \text{EndRaceTime}$$

La formula es similar a la usada para calcular el tiempo de vuelta:

$$\text{LapTime} = [t_0 + (\text{L2} - I) * W] \quad (5)$$

Donde I es el número de vueltas completadas. El hecho de que I sea continuo durante una vuelta, promedia automáticamente la carga de combustible durante la vuelta

$$\text{StintTime} = \int_{L1}^{L2} [t_0 + (\text{L2} - I) * W] dI \quad (6)$$

La solución es:

$$\text{StintTime} = [t_0 * I + \text{L2} * I * W - \frac{W * I^2}{2}]_{L1}^{L2} \quad (7)$$

La ecuación anterior presenta un problema de regresión donde los parámetros L1 y L2 son los limites de los intervalos realizados entre cada parada en boxes, la longitud de cada intervalo depende del numero de paradas que se planteen realizar como estrategia de carrera

Tiempo de Vuelta con el modelo de Neumáticos Adicionalmente al modelo de consumo de combustible ya planteado se puede adicionar un segundo modelo como tiempo extra para cada vuelta, el cual toma en cuenta la influencia de la degradación del neumático en cada vuelta. Debido a que el Tiempo de vuelta aumenta ligeramente con neumáticos nuevos y vuelve a aumentar cuando se acerca un "Stint", por su degradación, una función estrictamente convexa es mas adecuada para modelar la influencia en el tiempo de vuelta del circuito

$$e_{it} = \sum_{c \in C} (\beta_{0,c} + \beta_{1,c} * X_{it} + \beta_{2,c} * X_{it}^2) + u_{it} \quad (8)$$

Donde los β corresponden a los coeficientes de desgaste correspondientes para los diferentes tipos de neumáticos ilustrados en la figura 1

| Compound | Driving conditions | Grip | Durability |
|--------------|----------------------------|------|------------|
| Ultrasoft | Dry | 1 | 5 |
| Supersoft | Dry | 2 | 4 |
| Soft | Dry | 3 | 3 |
| Medium | Dry | 4 | 2 |
| Hard | Dry | 5 | 1 |
| Intermediate | Wet (light standing water) | - | - |
| Wet | Wet (heavy standing water) | - | - |

Fig. 1. Tipos de Neumáticos Sulsters (2018)

6.3 Variables

La variable principal del problema es el numero de paradas en boxes que debe realizar el auto para conseguir el menor tiempo de carrera, es decir, cual estrategia de carrera debe seguir para que los tiempos entre cada una de las paradas, teniendo en cuenta el combustible y desgaste de los neumáticos, sea el menor posible. Ahora, escoger una estrategia de 1, 2 o 3 paradas debe ser calculado por el modelo, al igual que la vuelta específica para cada una de las paradas.

Se debe tener en cuenta que la vuelta para cada una de las paradas no tiene que necesariamente dividir la carrera en partes iguales, por ejemplo: Se tiene una pista de 50 vueltas y la mejor estrategia es de 2 paradas en boxes, la primera bien puede ser a la vuelta 10 como a la 20, y la segunda a la 30 como a la 40. Estas variables también deben ser optimizadas.

Por ultimo, el tipo de neumático que se escoja para la carrera también influye en cierta medida el tiempo de vuelta, sin embargo, como la condición climática se mantiene constante, este parámetro bien podría ser lo igualmente.

7. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

El software desarrollado considera las tres posibles opciones que se pueden plantear como estrategia, las cuales dependen del número de paradas en boxes o "Pitstops" durante la carrera, para cada caso se plantea una ecuación de diferente dimensionalidad, descrita por la combinación de las ecuaciones 7 y 4 de este documento.

$$RaceTime = StintTime + Fuelflowtime \quad (9)$$

$$RaceTime = [t_0 * I + L2 * I * W - \frac{W * I^2}{2}]_{L1}^{L2} \quad (10)$$

$$+ (L3 * 0.5 + tp)$$

Hay que considerar que el número de vueltas hasta cada una de las paradas en boxes divide el problema en diferentes instancias de tiempo claramente diferenciadas, donde cada intervalo inicia con un valor de 0 y acaba con el número de vueltas que se deben realizar hasta la próxima parada en boxes, es decir, el valor que toma L1 en la ecuación anterior es de cero, L2 es el número de vueltas hasta la parada y L3 es el número de vueltas del siguiente intervalo, omitiendo el valor de L1 y reordenando las variables se obtiene que:

$$RaceTime = t_0 * L1 + L1^2 * W - \frac{W * L1^2}{2} \quad (11)$$

$$+ (L2 * 0.5 + tp)$$

$$+ t_0 * L2 + L2^2 * W - \frac{W * L2^2}{2}$$

La ecuación 11 modela el caso en donde se plantea una sola parada en boxes, L1 y L2 definen el tamaño de cada uno de los intervalos de vueltas resultantes, hasta la primera parada y hasta el final de la carrera respectivamente.

7.1 Cálculo del Error, función de evaluación

El problema planteado no corresponde a un modelo de regresión o clasificación, cada uno de los casos se compara con un solo valor que corresponde a la definición del tiempo perfecto de carrera, el cual es calculado con la información suministrada por la FIA en el año 2020 de cada uno de los grandes premios. Para ello se toma el mejor tiempo de clasificación y a este se le resta el tiempo correspondiente a una vuelta de combustible, ecuación 3.

Utilizando el valor anterior el algoritmo se encarga de comparar el tiempo de carrera resultante de cada época con el tiempo perfecto, lo que se conoce como error absoluto, el cual es la diferencia entre el valor real de la medida (X) y el valor que se ha obtenido en la medición (X_i), entre mas cerca este el tiempo obtenido en cada intervalo al valor hallado menor es el error.

$$E_{abs} = X - X_i \quad (12)$$

7.2 Software y Resultados

El algoritmo PSO implementado no presenta gran diferencia al utilizado en trabajos anteriores, la definición de cada una de las partículas se realiza de manera estándar, existe una clara diferencia el modelo utilizado y la función

de evaluación descrita anteriormente. Otro de los aspectos a resaltar es que el programa crea un grupo diferente de partículas para cada una de las posibles estrategias, ya que la dimensionalidad del modelo cambia y con ella la cantidad de variables a calcular.

El programa inicia solicitando al usuario escoger entre cada uno de los premios realizados en el 2020, posteriormente carga la información del tiempo de clasificación, número de vueltas y nombre de la carrera escogida.

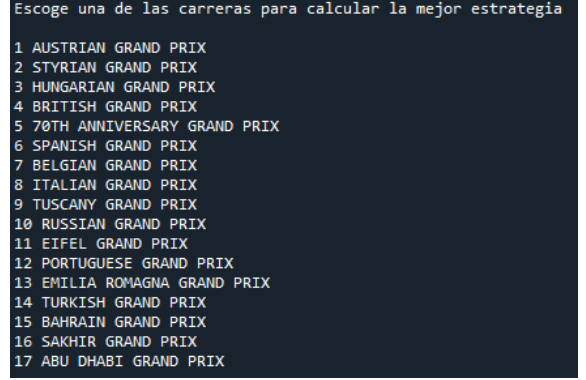


Fig. 2. Entrada del Usuario

Para cada uno de los casos se define de manera aleatoria el valor de cada intervalo, considerando que la primera parada reglamentaria se debe realizar después de la décima vuelta de la competencia el valor mínimo de x es 10, los valores de cada intervalo se ajustan según la estrategia sin dejar de ser aleatorios, al final la suma de cada uno de ellos da como resultado el número total de vueltas.

Al finalizar el programa entrega cada uno de los tiempos de carrera correspondientes a cada estrategia y la o las vueltas en las cuales se debería realizar la parada en boxes, en la figura 3 el usuario elige el Gran Premio de Sakhir, para el cual el programa calcula los siguientes resultados:

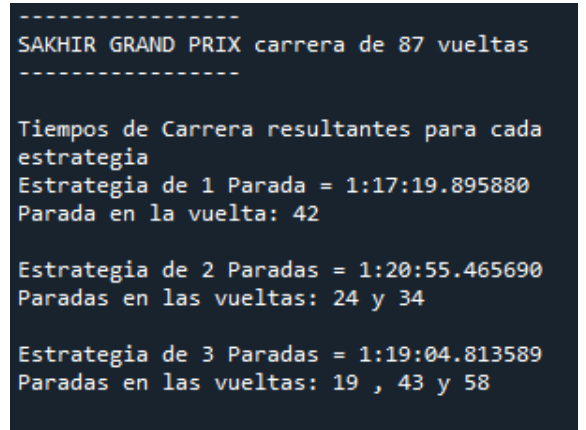


Fig. 3. Estrategia para el Premio de Sakhir

Adicionalmente el programa presenta el gráfico del error absoluto para cada uno de los diferentes casos a lo largo de cada época, los cuales son ilustrados a continuación en su respectivo orden:

Por ultimo el programa, utilizando los diferentes valores encontrados calcula y gráfica el tiempo de vuelta a lo largo de la competencia para cada una de las estrategias.

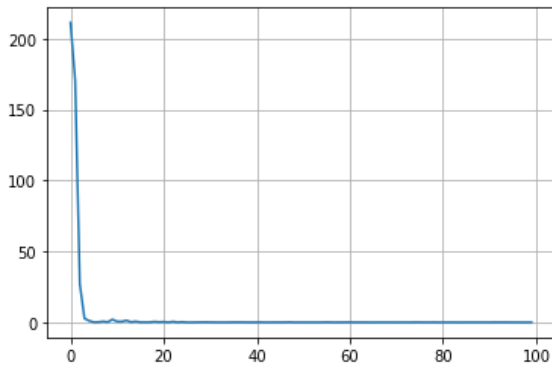


Fig. 4. Error para estrategia de 1 parada

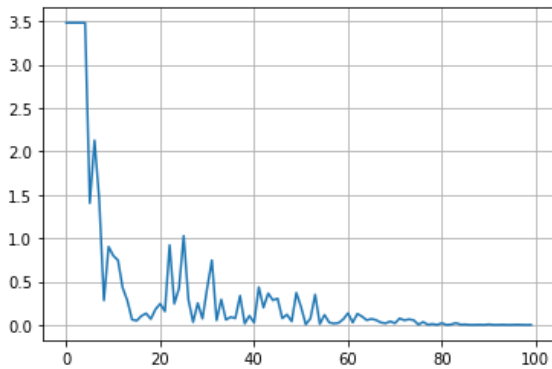


Fig. 5. Error para estrategia de 2 paradas

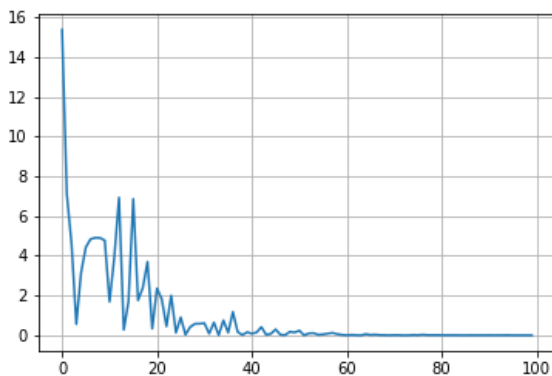


Fig. 6. Error para estrategia de 3 paradas

En la figura 9 se observa como claramente la cantidad de combustible que es necesario cargar al auto influye directamente en el tiempo de parada, además del comportamiento del tiempo de vuelta que disminuye a medida que se agota el combustible.

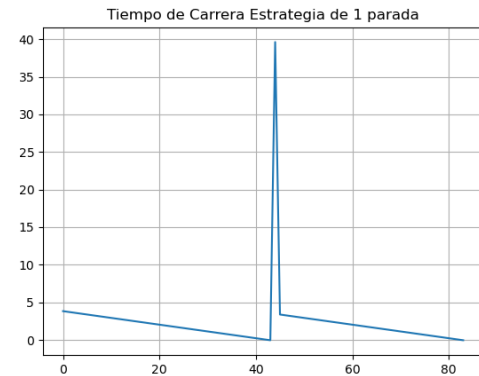


Fig. 7. Tiempo de Vuelta Estrategia 1 parada

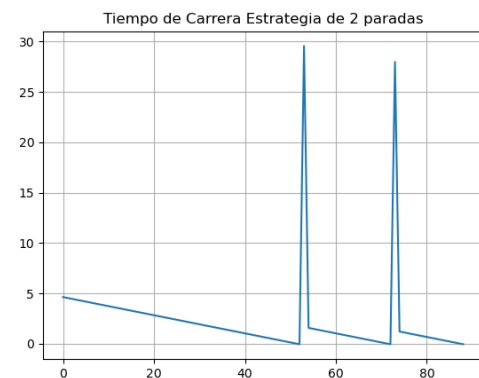


Fig. 8. Tiempo de Vuelta Estrategia 2 paradas

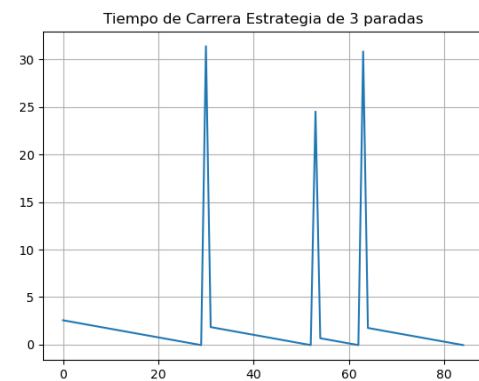


Fig. 9. Tiempo de Vuelta Estrategia 3 paradas

8. CONCLUSIONES

- El modelo presentado en Mulholland (2010) describe con gran generalidad y precisión el comportamiento del consumo de combustible y estrategia de carrera para un entorno ideal en la Formula 1, sin embargo a este modelo se le deben sumar un número considerable de variables para lograr un entorno similar al vivido realmente en la competencia, muchos de estos sistemas presentan un gran reto para el modelado, como por ejemplo el rebufo y resistencia del aire
- Se obtuvieron 3 diferentes ecuaciones en función del número de posibles paradas a realizar en boxes, es interesante resaltar que aunque el tiempo de parada en boxes es considerable, el programa era capaz de calcular un tiempo similar para cada uno de los casos, a su vez el error para cada uno también alcanza un valor reducido
- El algoritmo diseñado se adecua correctamente al problema planteado, el valor del error alcanza un mínimo en pocas épocas, lo que indica que la complejidad del modelo se ajusta a los parámetros del PSO. Hay que resaltar que el modelo utilizado es una versión sencilla de los parámetros que pueden influir en una carrera real de la Formula 1, otras variables como el desgaste de los neumáticos, la resistencia del aire, incluso la temperatura de la pista, influyen individualmente y consecuentemente en el desempeño del auto, todos ellos se toman en cuenta a la hora de plantear una estrategia de carrera, una versión mas compleja de este problema requeriría hasta una implementación de MultiObjective Particle Swarm Optimization (MOPSO) por sus características.

REFERENCES

- Mulholland, W. (2010). Formula one race strategy mclaren racing limited sports technology.
- Pirelli (2020). Neumáticos f1. [urlhttps://www.pirelli.com/tyres/es-es/motorsport/f1/neumaticos](https://www.pirelli.com/tyres/es-es/motorsport/f1/neumaticos).
- ROSA, P.D.L. (2018). F1: Manual para principiantes, claves para entender una carrera de fórmula 1 en 2018. [urlhttps://www.elconfidencial.com/deportes/formula-1/2018-03-20/f1-manual-para-principiantes-carreras-pedro-de-la-rosa_538166/](https://www.elconfidencial.com/deportes/formula-1/2018-03-20/f1-manual-para-principiantes-carreras-pedro-de-la-rosa_538166/).
- Sulsters, C. (2018). Simulating formula one race strategies.
- Sánchez, D. (2020). El factor humano en la fórmula 1. [urlhttps://www.thebestf1.es/factor-humano-la-formula-1/](https://www.thebestf1.es/factor-humano-la-formula-1/).
- Xuze Liu, A.F. (2020). Formula-e race strategy development using artificial neural networks and monte carlo tree search.