

Trabajo académico

# Aplicación del método de diferencias mínimas ponderadas para la obtención de un ciclo de conducción en una ruta urbana de un autobús. Caso de estudio: Azogues, Ecuador

Application of the method of least differences on driving cycle of an urban bus route. Case study in Azogues, Ecuador

Pablo Javier Urgilés Amoroso - Santiago Ismael Urgilés Verdugo

Tecnología Superior en Mecánica  
Automotriz, Instituto Superior Tecnológico  
Luis Rogerio González, Azogues, Ecuador

pablo.urgiles@institutoscanar.ec  
santiago.urgiles@institutoscanar.ec

## RESUMEN

Los ciclos de conducción como los de la FTP (Federal Test Procedure) y de Worldwide Harmonized Light Vehicles (WLTC), usados actualmente para el diseño de trenes de potencia de autobuses de transporte masivo de pasajeros, son usados para estimar el consumo de combustible o emisiones de autobuses de varias ciudades del mundo, en donde el ciclo de conducción es muy diferente, debido a las características topográficas de las carreteras y condiciones climáticas de cada ciudad. Un claro ejemplo de esto son las ciudades de la sierra andina de Ecuador, cuyas carreteras atraviesan terrenos con topografías variables. En el presente trabajo se investiga el ciclo de conducción de una ruta de un autobús de transporte público masivo en la ciudad de Azogues, que conecta diferentes poblados ubicados a 2.300 y 2.500 m.s.n.m. Para encontrar el ciclo de conducción particular, se aplica la metodología de las diferencias mínimas ponderadas, respaldado en casos de estudio exitosos de diferentes ciudades del mundo, Hong Kong, Toluca (México), Chennai (India), Pereira (Colombia), Madrid (España), Cuenca (Ecuador). Se realiza una investigación de campo, en el cual se estudian 2 autobuses iguales, durante 1 mes de operación en ruta, con una muestra de 34 viajes del autobús con retorno en el punto de partida. Se encontró que el ciclo de conducción para esta ruta urbana es diferente del Ciclo Transiente Pesado Europeo (ECE-15 + EUDC y ECE-49), normado en la INEN 2207 e INEN 2202:2002, empleado por las autoridades ecuatorianas para las pruebas de emisiones y consumo combustible de autobuses en Ecuador.

## Palabras Claves

Ciclo de conducción, rutas fijas, modelo de terreno digital, sistema de posición global

## ABSTRAC

Driving cycles such as those of the FTP (Federal Test Procedure) and Worldwide Harmonized Light Vehicles (WLTC), currently used for the design of powertrain for mass passenger transport buses, are used to estimate fuel consumption or Bus emissions from various cities in the world, where the driving cycle is very different, due to the topographic characteristics of the roads and weather conditions of each city. A clear example of this are the cities of the Andean highlands of Ecuador, whose roads cross terrain with variable topography. In the present work, the driving cycle of a route of a mass public transport bus in the city of Azogues is investigated, which connects different towns located at 2,300 and 2,500 m.a.s.l. To find the particular driving cycle, the weighted minimum differences methodology is applied, supported by successful case studies from different cities around the world, Hong Kong, Toluca (Mexico), Chennai (India), Pereira (Colombia), Madrid (Spain), Cuenca (Ecuador). A field investigation is carried out, in which 2 equal buses are studied, during 1 month of operation en route, with a sample of 34 bus trips with return at the starting point. It was found that the driving cycle for this urban route is different from the European Heavy Transient Cycle (ECE-15 + EUDC and ECE-49), regulated in the INEN 2207 and INEN 2202: 2002, used by the Ecuadorian authorities for the tests of emissions and fuel consumption of buses in Ecuador.

## Keywords

Driving cycle, fixed routes, digital terrain model, global position system

## I. Introducción

Un ciclo de conducción es un patrón típico de velocidad que siguen los vehículos de una ciudad en el tiempo, este se representa mediante una gráfica de velocidad vs tiempo, mostrada en la Fig.1, y se utiliza para estimar las emisiones contaminantes y consumo de combustible de los automotores, bajo diferentes condiciones de circulación de un lugar específico [1].

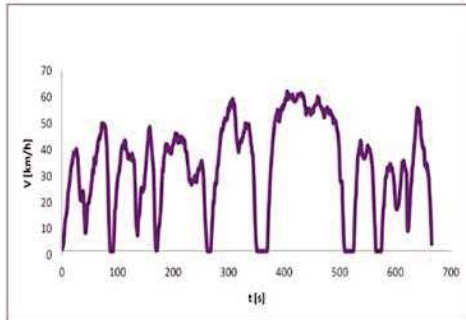


Fig. 1. Ejemplo de ciclo de conducción. [7].

Para la obtención de los ciclos de conducción no existe una metodología estándar, sin embargo, se deben utilizar métodos basados en procesos validados y elaborados en diferentes partes del mundo, en donde para obtener un ciclo de conducción, es necesario fijar una ruta de estudio y utilizar un método confiable de recolección y procesamiento de datos, que permita la construcción de los ciclos de conducción. [2].

En una ciudad, la variabilidad de las condiciones de tráfico presentes durante el día, generan diferentes gráficas que representan el patrón de conducción de cada vehículo. [3]. Para realizar el estudio de una ruta que recorre un autobús, por ejemplo, es conveniente emplear los ciclos de conducción que deberían ser obtenidos de acuerdo a las condiciones de cada ciudad, estos ciclos permiten estandarizar las condiciones de prueba, en el caso de la medición de emisiones contaminantes y consumo de combustible. En Ecuador, los autobuses de transporte masivo urbano son importados, por ende, el diseño de tren de potencia no está basado en el uso de ciclos de conducción exclusivos, sino más bien, son diseñados empleando el Ciclo Transiente Pesado Europeo (ECE-15 + EUDC y ECE-49), según menciona la norma con la cual se homologan los autobuses en el país INEN 2207 e INEN 2202:2002.

Es indispensable encontrar un ciclo de conducción exclusivo de un autobús para una ruta, aplicando una metodología adecuada, permitiendo analizar diferentes condiciones de operación del automotor (ralentí, aceleración, deceleración, entre otras) que pueden representar un ciclo de conducción. El objetivo principal de esta investigación es encontrar el ciclo exclusivo de conducción de un autobús de transporte público masivo, que recorre la ruta urbana de la ciudad de Azogues denominada Uchupucun-Terminal Terrestre. Azogues está ubicada en la zona de la cordillera de los Andes, a una altura de 2.300 hasta 2.500 m.s.n.m, con un rango de temperaturas entre 8°C a 13°C, y pendientes en un rango de 50 % al 70% que cubren una superficie de 60.260,50 ha., representando el 49.42% del cantón, presentado una

irregularidad topográfica territorial [20]. Estas características generan la necesidad de encontrar un ciclo de conducción exclusivo, ya que las pendientes de las carreteras que forman la ruta urbana son muy variables. En la presente sección I, se elabora una revisión bibliográfica a la problemática que se pretende solucionar, la sección II, refiere al método utilizado para obtener el ciclo de conducción, en donde se analizan las diferentes variables relevantes para este estudio. En la sección III, se comenta los resultados de la investigación pertenecientes al ciclo de conducción de la ruta elegida. Finalmente se presentan las conclusiones relevantes en la sección IV.

## II. Método

La metodología aplicada en este estudio para encontrar el ciclo de conducción se muestra en la Fig. 2, en las cuales se sugieren algunos parámetros que describen las características del ciclo de conducción, por ejemplo, la velocidad máxima del autobús, los tiempos de parada del autobús, el tiempo total de recorrido, fuerzas, aceleraciones, entre otras. [3].

La selección de la ruta del autobús es importante, puesto que debe ser caracterizada por la topografía, alto tráfico en horas pico, alta demanda de uso, estaciones de parada, concurrencia, semaforización, entre otras [5]. Posteriormente se utiliza instrumentación de geo posicionamiento global (GPS) a bordo de 2 autobuses, para recolectar información en tiempo real sobre la geo- posición del autobús, cuyos datos son procesados y resumidos utilizando un software matemático elaborado por [3], aplicando la metodología de las diferencias mínimas ponderadas, conjuntamente con cálculos que involucran las ecuaciones referentes a la dinámica del automóvil en donde la Resistencia Aerodinámica, Resistencia a la Rodadura, Resistencia a la Inercia, Resistencia a la Pendiente y Fuerza en Rueda [3], son consideradas, para obtener la curva de velocidad que describe el ciclo de conducción exclusivo.

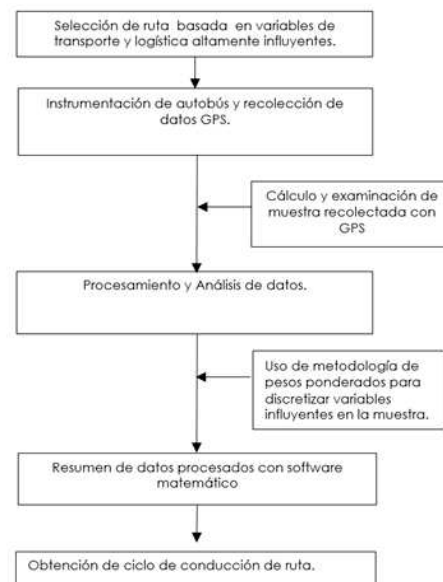


Fig. 2. Metodología para obtener el ciclo de conducción en una ruta urbana de la ciudad de Azogues. [3]

### A. Instrumentación de autobús y recolección de datos

Existen dos técnicas de recolección de datos para determinar los ciclos de conducción, la *chase-car technique*, en donde un vehículo persigue al autobús durante todo su recorrido, y la segunda, en donde se incluye la instrumentación de un *autobús on-board*, en donde el vehículo en estudio es instrumentado con los equipos necesarios que describen su trayectoria [5]. Este estudio, utiliza la segunda técnica, instrumentando un autobús con un equipo de geo posicionamiento global (GPS), cuyas características se muestran en la Tabla III. El equipo almacena todas las posiciones del autobús en cada segundo en 34 viajes, con retorno al punto de partida.

Tabla I: Especificaciones del Navegador GPS [11].

Parámetro	Valor
Sensibilidad	-163 dBm (arranque), -175 (readquisición)
Voltaje de entrada	3.7 VDC
Tasa de Lecturas	Hasta 10 lecturas/segundo
Precisión de velocidad	0.1 m/seg
Precisión temporal	50 ns RMS
Precisión de coordenadas	3m horizontal, 5m vertical
Función Altimetro	
Resolución	1 pie.
Rango	-2.000 a 30.000 pies

**B. Procesamiento y Análisis de datos.**

La recolección de datos por medio del GPS, permite registrar las coordenadas la altitud, latitud, longitud, y, las variables físicas como: espacio de recorrido, tiempo y velocidad del autobús, aceleración, desaceleración, entre otras. Para el análisis de estos parámetros se utiliza un software libre de geo referenciación, que permite obtener la gráfica de la ruta, mostrada en la Fig. 3.



Fig 3. Ruta de la línea 4: Uchupucun-Terminal Terrestre.

En el filtrado y corrección de posibles errores de las bases de datos, un software matemático exclusivo programado y validado, es el encargado de discriminar valores que no correspondan al recorrido del autobús en caso de que el autobús desvíe su recorrido normal. Las variables consideradas en esta etapa del estudio son altitud, longitud y latitud. En los equipos de geo posicionamiento, pueden

existir errores de funcionamiento debido a pérdidas de conexión con satélites, cuando el autobús atraviesa zonas con alta densidad poblacional. Para disminuir el error, el software programado compara los valores de altitud del GPS con los valores del modelo digital del terreno (MDT) de la ruta, como se muestra en la Fig. 4 [3], y que ha sido proporcionado por el departamento técnico de avalúos y catastros del Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Azogues [21].

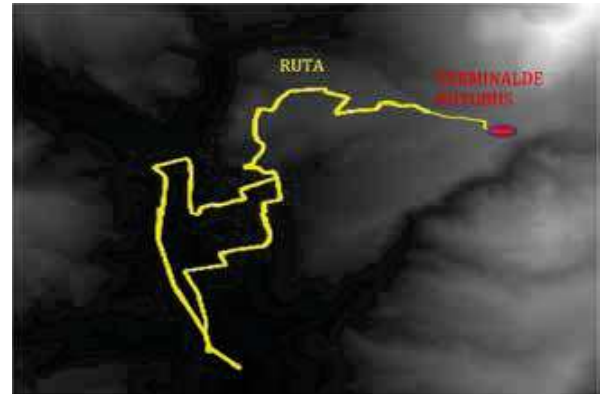


Fig 4. Modelo Digital del Terreno y Ruta Uchupucun-Terminal Terrestre [21].

En las Fig. 5 y 6, se aprecia un ejemplo del perfil de los recorridos realizados por el autobús usando los datos de altitud del GPS y del MDT, durante un día de recorrido del autobús en ruta. Según se observa, cada cresta superior se encuentra a 2665 m.s.n.m y cada cresta inferior 2425.33 m.s.n.m y representa un viaje de origen y destino en el mismo punto.

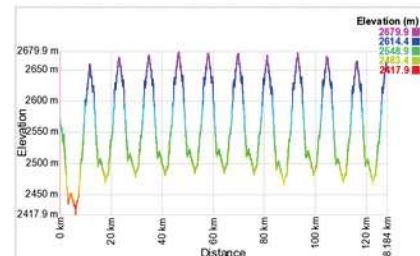


Fig 5. Perfil de altura GPS

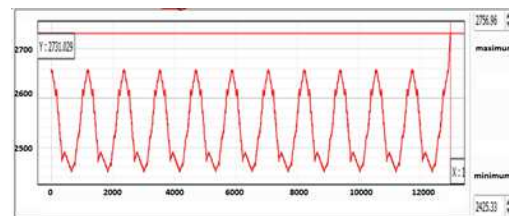


Fig 6. Perfil de altura MDT.

Para determinar la cantidad de viajes, que representan una muestra confiable de los viajes origen-destino en ruta, se utiliza el método de diferencias mínimas ponderadas [14]. Este método permite establecer el tamaño de la muestra de los datos que deben ser analizados [18]. Este método plantea la determinación de las diferencias mínimas relativas de los

predictores, utilizando una regresión lineal múltiple, para este caso de análisis, los predictores se evidencian en la Tabla II, y la variable a predecir o dependiente es la Fuerza en Rueda.

La metodología plantea, disminuir la afección debido a la correlación entre variables independientes o productores, como, por ejemplo, el espacio, la velocidad y la aceleración, además de las magnitudes de las unidades de las variables independientes. Con esta metodología se calcula una matriz ortogonal con alta correlación a la matriz de variables independiente original, pero, sin correlación entre las variables que la conforman, y que disminuye la afección de las unidades. Las diferencias mínimas calculadas con los registros de altitud del modelo digital del terreno (MDT), y los registros de altitud aportados por el navegador GPS, se evidencian en la Tabla II, en afección en la fuerza en rueda, y se utilizan para la aplicación del método de mínimas diferencias ponderadas [15].

Los parámetros resumen necesarios para representar los viajes del autobús y calcular el coeficiente de variación en este caso son 12, que indica si el número de viajes analizados son una muestra adecuada para determinar los ciclos de conducción siempre y cuando el valor del error sea del 20% o menor [15].

Tabla II. Valores de diferencias mínimas ponderadas.

Variable	GPS	MDT
Velocidad promedio	10.95	13.06
Velocidad Máxima	5.90	1.79
Tiempo en ralentí	15.09	16.76
Número de paradas	7.27	2.85
Tiempo total recorrido	4.23	6.36
Distancia recorrida	10.42	10.26
Aceleración positiva máxima	2.58	5.13
Tiempo con aceleración positiva	7.19	6.43
Resistencia a la inercia promedio	12.53	5.62
Resistencia a la rodadura promedio	8.53	12.58
Resistencia a la pendiente promedio	6.48	8.40
Resistencia aerodinámica promedio	8.78	10.69

Para el cálculo de las ponderaciones de los parámetros de la regresión lineal múltiple aplicada se utiliza la metodología citada en [14], se muestran en la Tabla III [3].

### III. Análisis y resultados

En la Fig. 7 se muestra el ciclo de conducción obtenido, se representa con una curva de velocidad vs. tiempo, esta refleja que refleja el modo típico de conducción de un autobús en una ruta en la ciudad de Azogues, en el recorrido de Uchupucun-Terminal Terrestre, y los valores de los parámetros resumen son ilustrados en la Tabla IV.

Tabla III: Matriz de Variables.

Variables Descriptoras	Variables Calculadas	Variables de Ingreso
Fuerza en rueda MDT [N]		
Resistencia de Inercia [N]		
Resistencia de Pendiente MDT[N]		
Resistencia de rodadura MDT [N]		
Resistencia Aerodinámica [N]		
Pendiente MDT [rad]		
Pendiente GPS [rad]		
Aceleración [m/s <sup>2</sup> ]		
Espacio [m]		
Velocidad [m/s]		
Altitud MDT [m]		
Altitud GPS [m]		
Velocidad [Km/h]		
Tiempo [s]		

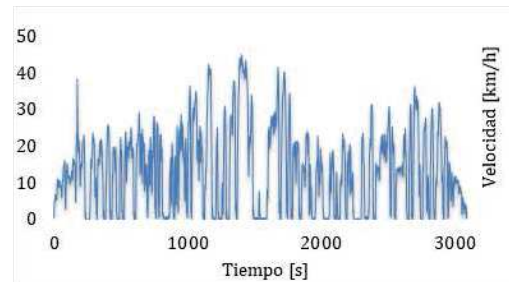


Fig 7. Ciclo de conducción de la ruta Uchupucun –Terminal Terrestre, de la ciudad de Azogues.

Tabla IV. Parámetros Resumen de la ruta Uchupucun –Terminal Terrestre.

Variable	Cantidad
Velocidad promedio [Km/h]	13.63
Velocidad Máxima [Km/h]	44.86
Tiempo en ralentí [s]	670
Número de paradas	36
Tiempo total recorrido [s]	3092
Distancia recorrida [Km]	11.78
Aceleración positiva máxima [m/s <sup>2</sup> ]	1.3667
Tiempo con aceleración positiva [s]	14.49
Resistencia a la inercia. [N]	2791
Resistencia a la rodadura. [N]	882.19
Resistencia a la pendiente [N]	7415
Fuerza en Rueda Promedio [N]	6226
Resistencia aerodinámica [N]	43.9854



#### IV. Conclusiones

El ciclo de conducción encontrado en la ruta Uchupucun -Terminal Terrestre, describe el estilo típico de conducción de un autobús urbano, en donde se puede observar que la velocidad máxima que desarrolla el autobús en toda la ruta es de 45 km/h, el tiempo de recorrido es de 3.092 segundos equivalentes a 54 minutos, con una velocidad promedio de 13,63 Km/h, en el cual el recorrido total es de 129 Km diarios.

El ciclo de conducción investigado, corresponde a una de las rutas con mayor demanda de servicio, de manera que, este ciclo de conducción permitirá desarrollar estudios significativos relacionados al diseño del tren de potencia de autobuses apropiados, permitiendo medir adecuadamente las emisiones de gases y el consumo de combustible de un autobús en la ruta Uchupucun-Terminal Terrestre.

El Ciclo Transiente Pesado Europeo (ECE-15 + EUDC y ECE-49), normado en la INEN 2207 e INEN 2202:2002, y empleado para homologar a los autobuses en Ecuador, no representa al ciclo de conducción que describe una ruta en la ciudad de Azogues, en donde las características geográficas y climáticas son variables, por estar ubicada en la cordillera de los Andes, por lo tanto, los autobuses que circulan en esta ruta, no podrían cumplir con las características de diseño de tren de potencia, para la circulación en la ruta Uchupucun-Terminal Terrestre.

#### V. Agradecimientos

Al personal del Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal Azogues, al departamento de avalúos y catastros por su colaboración en el proceso de validación de Modelo digital del terreno. Al Instituto Tecnológico Superior Luis Rogerio González, por su apoyo para la ejecución de este proyecto.

#### VI. Referencias

- [1] A. Vélez Aguilera, «Determinación de un ciclo típico de conducción en el municipio de Naucalpan, Toluca,» 2005.
- [2] D. Cordero Moreno, R. Rockwood, M Coello and D. Dávalos, «Proposed criteria to determinate typical vehicular driving cycles using minimum weighted differences» WIT Transactions on the Built Environment, vol. 176, pp 329-337,2017.
- [3] D. Cordero Moreno and R. F. Astudillo, «Obtención de ciclos de conducción para la flota de buses urbanos del cantón Cuenca,» Universidad del Azuay, 2016.
- [4] Z. A. Romero Vargas, Atlas del Cantón Azogues, Cuenca: Universidad del Azuay, 2015.
- [5] K. S. K.S Nesamani, «Development of a driving cycle for intra-city buses in Chennai, India, » Elsevier, p. 8, 2011.
- [6] E. Ericsson, «Variability in urban cycles. » Science Direct, vol. 5, nº 5, pp. 337-354, 2000.
- [7] A. U. S. E. Protection, «EPA Federal Test Procedure (FTP), » Agency Unites States Environmental Protection, [En línea]. Available: <https://www.epa.gov/emission-standards-reference-guide/epa-federal-test-procedure-ftp>. [Último acceso: 06 febrero 2019].
- [8] J. Martínez Forero, A. Cruz Valencia y C. A. Bedoya, «Evaluación de vehículos en carretera,» [En línea].
- [9] INEN, «Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2 205:2010,» de Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2 205:2010 Segunda Revisión, Quito, Servicio Ecuatoriano de Normalización, 2010, p. 27.
- [10] L. F. Tenesaca y P. E. Tenezaca, «Determinación de las unidades de transporte urbano apropiadas para la ciudad de Azogues,» de Determinación de las unidades de transporte urbano apropiadas para la ciudad de Azogues, Cuenca, Universidad Politécnica Salesiana, 2017, p. 23.
- [11] D. d. M. Azogues, Rutas Urbanas de la Ciudad de Azogues, Azogues: Departamento de Movilidad de Azogues, 1999.
- [12] Garmin, GPSMAP 64 Series /GPSMAP 64X serie owner`s manual, New York: GARMIN, 2019.
- [13] R. Astudillo, Obtención de los ciclos de conducción para las cooperativas de la ciudad de cuenca, Cuenca: Universidad del Azuay, 2017.
- [14] J. W. Johnson, «A Heuristic Method for Estimating the Relative Weight of Predictor Variables in Multiple Regression, » Multivariate Behavioral Research, vol. 25, nº 1, pp. 1-19. [2]: 10.1207/S15327906MBR3501\_1, 2000.
- [15] A. H. Restrepo, Y. A. Carranza y J. E. Tibaquirá, «Diseño y aplicación de una metodología para determinar ciclos de conducción vehicular en la ciudad de Pereira,» Scientia et Technica DOI:10.22517/23447214.4071, pp. 229-234, 2007.
- [16] W. H. H.Y Tong, «Development of a driving cycle for Hong Kong, » Elsevier, p. 13, 1998.
- [17] A. H. Restrepo, «Diseño y aplicación de una metodología para determinar ciclos de conducción en la ciudad de Pereira,» 2005.
- [18] W. Jhonston, A heuristic Method for Estimate the Relative Weigh of Predictor, New York: Multivariate Behavioral Reserch, 2000.
- [19] B. Luis, «Construcción de los ciclos de conducción de Bogotá para la estimación de factores de emisión vehiculares y consumo de combustible,» Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, Bogotá, 2013.
- [20] Z. A. Romero Vargas, «Atlas del Cantón Azogues,» de Atlas del Cantón Azogues, Cuenca, Universidad del Azuay, 2015, p. 8.
- [21] Departamenteo de Movilidad de Azogues, Rutas Urbanas de la Ciudad de Azogues, Azogues: Departamento de Movilidad de Azogues, 1999.
- [22] R. Sanabria Sandí, Desarrollo y validación de un ciclo de conducción para la ciudad de San José de Costa Rica, San José: Universidad de Costa Rica, 2012.
- [23] M. L. Berenson, D. M. Levine y T. C. Kreh, «Coeficiente de Variación,» de Estadística para administración, Mexico, Pearson Education, 2006, p. 619.
- [24] K. Cedillo Sanchez, Determinación de ciclos típicos de conducción, Toluca: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, 2013.
- [25] T. D. Gillespie., Fundamentals of vehicle dynamics, SAE, Ed., SAE, 1992.
- [26] U. S. E. P. Agency, «United States Environmental Protection Agency,» 2 Febrero 2013. [Online]. Available: [www.epa.gov/nvfel/methods/ftpdds.gif](http://www.epa.gov/nvfel/methods/ftpdds.gif). . [Accessed 24 06 2018].