

Métodos de bajo costo para cálculos en investigación de accidentes mediante generación de número aleatorios

Autor: Lic. Gustavo A. Enciso genciso@ceirat.com

RESUMEN

Con el desarrollo de la computación desde fines de siglos pasado, la reconstrucción de accidentes de tránsito mediante el método directo [1], se ha desarrollado en forma sostenida permitiendo la creación de herramientas informáticas que facilitan la solución cuando la información (evidencia) es escasa.

En América Latina, esta metodología de investigación directa de la colisión no ha sido empleada hasta el momento siendo el uso de método inverso el más empleado para determinar velocidades previas al impacto en las investigaciones judiciales de accidentes de tránsito. En muchas oportunidades, las incertidumbres de las variables (evidencias), no permiten arribar a soluciones seguras. En este trabajo se propone y discute un método de bajo costo denominado minimización del error por generación de números aleatorios [2] [3] (MEGNA), para poder encontrar mediante modelos físicos clásicos de colisiones, el resultado de velocidad inicial de colisión cuando los valores de las variables (evidencias) no pueden ser precisadas y se desconoce la distribución de probabilidad. Mediante la simulación de números aleatorios es posible encontrar las condiciones de las variables que permiten hacer mínimo la diferencia entre los resultados calculados y la distancia real desde el punto de impacto hasta la posición final de los vehículos.

Este método podría ser una mejor alternativa frente al problema de la incertidumbre en modelos determinísticos [4], aun cuando la cantidad de variables del modelo matemático no sea poca.

INTRODUCCIÓN

Cuando el investigador intenta calcular la velocidad inicial de los vehículos que participaron en accidentes de tránsito, debe proponer una metodología que en muchos casos está basada en un conjunto de ecuaciones que responden a modelos físicos o matemáticos. Aunque existen otras técnicas como la extracción de información desde registros electrónicos como EDR, los modelos físicos siguen siendo la principal forma de análisis de velocidad para metodologías determinísticas.

El conjunto de ecuaciones físicas puede emplearse en forma directa e indirecta, y su uso en la investigación puede simplificarse en la creación de un algoritmo. Este representa el conjunto de acciones o pasos de la cadena de cálculos que indican las ecuaciones a emplear en la búsqueda de la solución.

Hasta en la actualidad en América Latina, muchos expertos emplean los modelos físicos a partir de evidencias para poder evaluar las energías disipadas en cada etapa o fase del accidente; desde momentos previos a la colisión hasta la detención de los vehículos. En el método indirecto la utilización de las ecuaciones son empleadas desde la última etapa de transferencia de energía y finalización del desplazamiento de los vehículos (posición final), continuando el análisis para cada etapa de transferencia previas y sucesivas, hasta analizar finalmente la primera etapa de la colisión. Ver Figura 1.

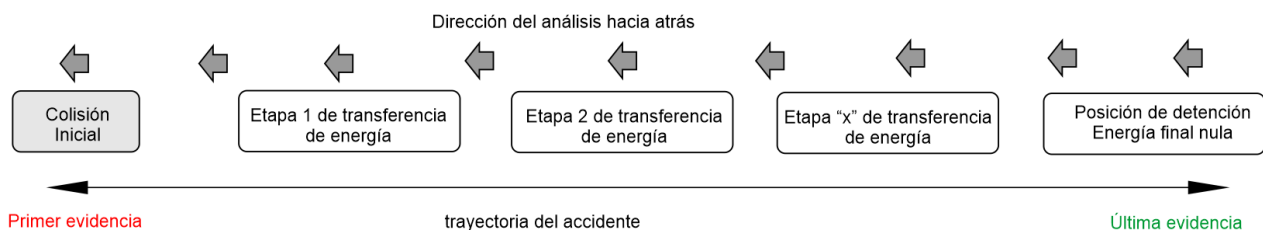


Figura 1: esquema de trabajo en el método indirecto.

Además de la información técnica necesaria que debe ser conocida en cada etapa del accidente, el método indirecto presenta la dificultad de carecer de una referencia de control en cada etapa de evaluación.

Si llamamos ΔE_i a la transferencia de energía del vehículo en la etapa “i”, y ΔE_{i-1} a la transferencia de energía de la etapa anterior del accidente, cualquier error introducido en el análisis de velocidad de la última etapa “i” se arrastrará y podrá amplificar el error en la etapa anterior “i-1”.

En oposición a ello el método directo nos permite controlar si las condiciones de transferencia de energía de cada etapa son correctas comparándolas con la evidencia (distancia de desplazamiento del vehículo en cada etapa)

Mientras que en el método indirecto el experto busca calcular el cambio de velocidad de cada etapa (ΔV), a partir de parámetros inferidos y/o extraídos de las evidencias (matriz de entrada); en el método directo el experto busca calcular la distancia que el vehículo recorre en cada etapa, a partir de velocidades hipotéticas que se proponen para el análisis, además de los parámetros inferidos y/o extraídos de las evidencias. Finalmente, el método validará el análisis si el vector distancia calculado, es igual en módulo y dirección al vector distancia de la evidencia. La Figura 2 representa el esquema de trabajo en el método directo.

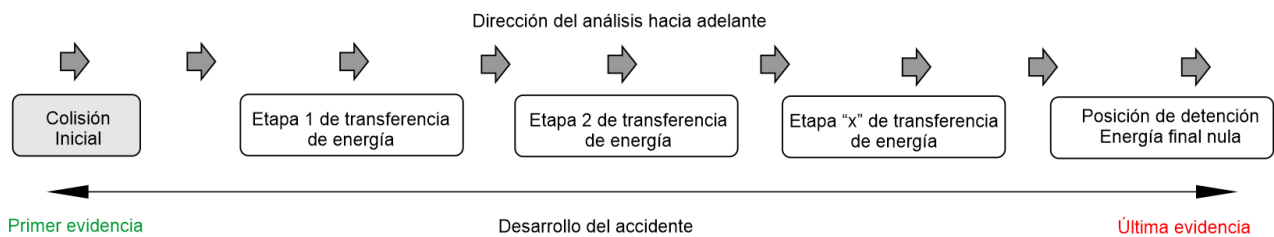


Figura 2: esquema de trabajo en el método directo.

En el método indirecto la matriz de entrada (conjunto de parámetros inferidos y/o extraídos de las evidencias), busca el resultado de cambio de velocidad ΔV ; mientras que la matriz de entrada del método directo (conjunto de parámetros inferidos y/o extraídos de las evidencias + velocidad propuesta), busca calcular el vector distancia de desplazamiento y compararlo con la evidencia.

Es claro que ambas matrices se diferencian por la variable “velocidad hipotética” que el experto debe proponer, y además el algoritmo del método directo busca calcular “distancia” y no velocidad.

Evidentemente el método directo solo puede ser utilizado con ayuda de la computadora que mediante un software nos puede ayudar a buscar los valores de velocidad hipotética que, en combinación de los demás datos de la matriz de entrada, encuentre el valor de desplazamiento correcto de acuerdo con la evidencia.

MEGNA, es la propuesta para buscar los valores de la matriz de entrada mediante el método directo que nos permita encontrar el resultado de desplazamiento del vehículo cuya diferencia con el valor de la evidencia sea mínima.

METODOLOGÍA

Las ecuaciones 1 y 2 son las típicas expresiones del PCCM para encontrar la velocidad de impacto por el método indirecto usadas en colisiones en cruces de calles para vehículos de masas similares:

$$m_1 \cdot v_1 \cdot \cos(a_1) + m_2 \cdot v_2 \cdot \cos(a_2) = m_1 \cdot v_1' \cdot \cos(b_1) + m_2 \cdot v_2' \cdot \cos(b_2) \quad \text{Ec.1}$$

$$m_1 \cdot v_1 \cdot \sin(a_1) + m_2 \cdot v_2 \cdot \sin(a_2) = m_1 \cdot v_1' \cdot \sin(b_1) + m_2 \cdot v_2' \cdot \sin(b_2) \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

m_1, m_2 : es la masa del vehículo #1 y #2 respectivamente en [kg].

v_1', v_2' : son las velocidades de separación de #1 y #2 respectivamente en [m/seg].

a_1, a_2 : son los ángulos de entrada de los vehículos #1 y #2 en [grados].

b_1, b_2 : son los ángulos de separación de los vehículos #1 y #2 en [grados].

Si después de la separación ambos vehículos se arrastran sobre una superficie sin pendientes y adherencia o factor de desaceleración conocida, las ecuaciones de cálculo de las velocidades posterior al impacto se pueden introducir en las ecuaciones 1 y 2. Resolviendo cada ecuación para conocer las distancias de arrastre posterior al impacto hasta la detención de los vehículos, obtenemos:

$$d_1 = \left(\frac{m_1 \cdot v_1 \cdot \cos(a_1) + m_2 \cdot v_2 \cdot \cos(a_2) - m_2 \cdot \sqrt{c \cdot d_2 \cdot \mu_2} \cdot \cos(b_2)}{m_1 \cdot \cos(b_1)} \right)^2 \cdot \frac{1}{c \cdot \mu_1} \quad \text{Ec. 3}$$

$$d_2 = \left(\frac{m_1 \cdot v_1 \cdot \sin(a_1) + m_2 \cdot v_2 \cdot \sin(a_2) - m_1 \cdot \sqrt{c \cdot d_1 \cdot \mu_1} \cdot \sin(b_1)}{m_2 \cdot \sin(b_2)} \right)^2 \cdot \frac{1}{c \cdot \mu_2} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

μ_1, μ_2 : son los coeficientes de fricción o factor de desaceleración después del impacto sin unidades.

d_1, d_2 : es el módulo del vector desplazamiento de #1 y #2 respectivamente, desde su separación hasta su posición final en [m].

c : es la constante = $2.9.81.m/s^2$.

La solución del sistema de ecuaciones 3 y 4, no resulta fácil de resolver, por lo tanto, se propone sustituir cada ecuación en la otra y resolver las distancias mediante agrupación de términos. De esta forma si agrupamos de la siguiente manera:

$$A_1 = m_1 \cdot v_1 \cdot \cos(a_1) + m_2 \cdot v_2 \cdot \cos(a_2) \quad B_1 = m_2 \cdot \cos(b_2) \quad C_1 = m_1 \cdot \cos(b_1)$$

$$D_1 = m_1 \cdot v_1 \cdot \sin(a_1) + m_2 \cdot v_2 \cdot \sin(a_2) \quad E_1 = m_1 \cdot \sin(b_1) \quad F_1 = m_2 \cdot \sin(b_2)$$

$$G_1 = c \cdot \mu_1$$

Los coeficientes de A_2 hasta G_2 corresponden a la agrupación de la ecuación 4 cuando la ecuación 3 se sustituye por la distancia d_1 .

$$A_2 = m_1 \cdot v_1 \cdot \sin(a_1) + m_2 \cdot v_2 \cdot \sin(a_2) \quad B_2 = m_1 \cdot \sin(b_1) \quad C_2 = m_2 \cdot \sin(b_2)$$

$$D_2 = m_1 \cdot v_1 \cdot \cos(a_1) + m_2 \cdot v_2 \cdot \cos(a_2) \quad E_2 = m_2 \cdot \cos(b_2) \quad F_2 = m_1 \cdot \cos(b_1)$$

$$G_2 = c \cdot \mu_2$$

La solución del sistema de ecuaciones formado por las ecuaciones 3 y 4 queda resulta de la siguiente manera, considerando los coeficientes formados por las agrupaciones:

$$d1 = \left[\frac{(A_1)^2 \cdot (F_1)^2 - 2 \cdot A_1 \cdot B_1 \cdot D_1 \cdot F_1 + (B_1)^2 \cdot (D_1)^2}{G_1 \cdot (B_1)^2 \cdot (E_1)^2 - 2 \cdot G_1 \cdot B_1 \cdot C_1 \cdot E_1 \cdot F_1 + G_1 \cdot (C_1)^2 \cdot (F_1)^2} \right] \quad \text{Ec. 5}$$

$$d2 = \left[\frac{(A_2)^2 \cdot (F_2)^2 - 2 \cdot A_2 \cdot B_2 \cdot D_2 \cdot F_2 + (B_2)^2 \cdot (D_2)^2}{G_2 \cdot (B_2)^2 \cdot (E_2)^2 - 2 \cdot G_2 \cdot B_2 \cdot C_2 \cdot E_2 \cdot F_2 + G_2 \cdot (C_2)^2 \cdot (F_2)^2} \right] \quad \text{Ec. 6}$$

Finalmente, si llamamos D_1 y D_2 al módulo de la distancia recorridos por los vehículos #1 y #2 respectivamente en metros, desde el inicio de la separación hasta su posición final; y los valores de las variables de entrada son los correctos, tendremos:

$$d1 - D_1 = 0 \quad d2 - D_2 = 0$$

Llamaremos a esta diferencia “error” y buscamos mediante el método MEGNA que el error sea cero o mínimo.

La matriz de entrada y salida con las 16 variables quedará definida en Excel® como se ilustra en la Figura 1.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
Vel impact #1	Mass #1	Approach #1	Departure #1	Distance #1	Friction #1	Vel impact #2	Mass #2	Approach #2	Departure #2	Distance #2	Friction #2	d1 calculated #1	d2 calculated #2	Error #1	Error #2
[km/hr]	[kg]	[degree]	[degree]	[m]	no unit	[km/hr]	[kg]	[degree]	[degree]	[m]	no unit	[m]	[m]	[m]	[m]

Figura 3: matriz de entrada y salida del MEGNA.

Los valores D_1 y D_2 que son determinados por las evidencias, se definen en las columnas “E” y “K”. Por otro lado, la comprobación de que los valores de entrada son correctos se realiza en las columnas “O” y “P”. Finalmente, las ecuaciones agrupadas que son auxiliares se pueden escribir en otras columnas del proyecto en Excel®.

El entorno de trabajo de Excel® tiene un bajo costo de aplicación, y además este software contiene una herramienta denominada función RANDBETWEEN, que facilita la generación de número aleatorios entre extremos de cada variable. Por lo tanto, las entradas en las columnas A, B, C, D, F, G, H, I, J y L, deben definirse entre un valor mínimo y máximo de hipótesis de acuerdo con la siguiente regla de Excel®:

$$=RANDBETWEEN(\text{valor mínimo}; \text{valor máximo})$$

Los valores de las columnas “O” y “P”, solo deben comparar en valor absoluto la diferencia entre los valores calculados en las columnas “M” y “N”, y las evidencias de distancia real ingresadas en las columnas “E” y “K” (que son los valores D_1 y D_2).

La Figura 4 muestra algunos resultados para 10 iteraciones y el objetivo es visualizar los resultados en las columnas “O” y “P”, donde buscaremos el menor error. Recomendamos iterar hasta 1000 veces.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
Vel impact #1 [km/hr]	Mass #1 [kg]	Approach #1 [degree]	Departure #1 [degree]	Distance #1 [m]	Friction #1 no unit	Vel impact #2 [km/hr]	Mass #2 [kg]	Approach #2 [degree]	Departure #2 [degree]	Distance #2 [m]	Friction #2 no unit	d1 calculated #1 [m]	d2 calculated #2 [m]	Error #1 [m]	Error #2 [m]
60	1240,00	2,00	22,00	8,97	0,61	24,00	1420,00	85,00	33,00	2,52	0,58	15,13400893	2,125109887	6,164009	0,39489
53	1240,00	2,00	18,00	8,97	0,68	15,00	1420,00	89,00	28,00	2,52	0,70	12,92792554	0,389918243	3,957926	2,130082
49	1240,00	0,00	20,00	8,97	0,62	25,00	1420,00	87,00	30,00	2,52	0,70	0,050440179	14,76542325	8,91956	12,24542
54	1240,00	2,00	21,00	8,97	0,55	23,00	1420,00	87,00	27,00	2,52	0,70	8,49671E-05	20,96067588	8,969915	18,44068
45	1240,00	1,00	20,00	8,97	0,51	26,00	1420,00	88,00	32,00	2,52	0,66	0,405243964	22,83224989	8,564756	20,31225
56	1240,00	0,00	19,00	8,97	0,55	14,00	1420,00	90,00	29,00	2,52	0,64	40,86370155	1,707615048	31,8937	0,812385
54	1240,00	2,00	21,00	8,97	0,68	10,00	1420,00	90,00	28,00	2,52	0,52	71,60990699	14,09492462	62,63991	11,57492
53	1240,00	1,00	20,00	8,97	0,60	30,00	1420,00	87,00	28,00	2,52	0,63	9,817997896	53,27638897	0,847998	50,75639
43	1240,00	2,00	22,00	8,97	0,56	16,00	1420,00	85,00	35,00	2,52	0,63	12,21990584	0,277278812	3,249906	2,242721
55	1240,00	1,00	19,00	8,97	0,51	20,00	1420,00	89,00	25,00	2,52	0,59	2,249293848	11,02461727	6,720706	8,504617
54	1240,00	2,00	21,00	8,97	0,70	17,00	1420,00	90,00	34,00	2,52	0,61	17,2815669	0,029874066	8,311567	2,490126

Figura 4: matriz MEGNA para 10 iteraciones (simulaciones).

Es importante recordar que la función de “RANDBETWEEN”, genera valores aleatorios entre los extremos indicados sin privilegiar ninguna distribución de probabilidad. Finalmente, luego de realizar las 1000 simulaciones, se puede filtrar los valores de las columnas de “Error” para buscar el menor error entre el resultado calculado mediante el método directo y la distancia de la evidencia con la cual se compara.

RESULTADOS

Para considerar la propuesta MEGNA, se analiza una colisión perpendicular entre dos vehículos de masas similares (Chevrolet Aveo 1.6 #1 circulando de derecha a izquierda; Fiat Bravo 1.8 #2 circulando de abajo hacia arriba). El punto de contacto inicial se encuentra en el extremo delantero derecho del vehículo #1 y extremo frontal izquierdo del vehículo #2. La información recogida de la investigación del accidente se detalla a continuación en la Tabla 1:

Vehículo #1: Chevrolet Aveo 1.6

Masa con ocupantes: 1240 kg.

Ángulo de entrada: entre 0° y 5°

Desplazamiento del CG post-impacto: 8.97 m.

Vehículo #2: Fiat Bravo

Masa con ocupantes: 1420 kg.

Ángulo de entrada: entre 85° y 95°

Desplazamiento del CG post-impacto: 2.52 m.

La Figura 5 muestra una parte de las 1000 simulaciones generadas y como se filtra las iteraciones de menor error.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
Vel impact #1 [km/hr]	Mass #1 [kg]	Approach #1 [degree]	Departure #1 [degree]	Distance #1 [m]	Friction #1 no unit	Vel impact #2 [km/hr]	Mass #2 [kg]	Approach #2 [degree]	Departure #2 [degree]	Distance #2 [m]	Friction #2 no unit	d1 calculated #1 [m]	d2 calculated #2 [m]	Error #1 [m]	Error #2 [m]
49	1240,00	1,00	21,00	8,97	0,59	20,00	1420,00	89,00	35,00	2,52	0,64	8,963412583	1,740364586	0,006587	0,779635

Figura 5: búsqueda del menor error en la simulación.

Al filtrar el menor error #1 y error #2 se obtienen los siguientes datos de la solución que se muestran en la Tabla 2:

VALORES DE ENTRADA		
Vehículo	#1 Chevrolet Aveo 1.6	#2 Fiat Bravo
Masa con ocupantes	1240 kg.	1420 kg
Ángulo de entrada	1°	89°
Velocidad	50.0	20.0
VALORES DE SALIDA		
Ángulo de salida	21°	35°
Desplazamiento total	8.96 m (error 0 m)	2.52 m (error 0.77 m)
Coefficiente de fricción promedio	0.59	0.5

Tabla 2: valores de entrada y salida (resultados) obtenidos mediante MEGNA.

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Los resultados obtenidos con Excel® por medio de la técnica presentada es comparada con la solución obtenida por el optimizador de colisiones del software PC-Crash®. La Figura 6 ilustra el área de trabajo de PC-Crash® para buscar la solución de esta colisión, escogiendo en la base de datos los mismos vehículos indicados en la Tabla 1. Como imagen de fondo se utilizó el diagrama de la colisión donde se muestra las posiciones finales de los vehículos.

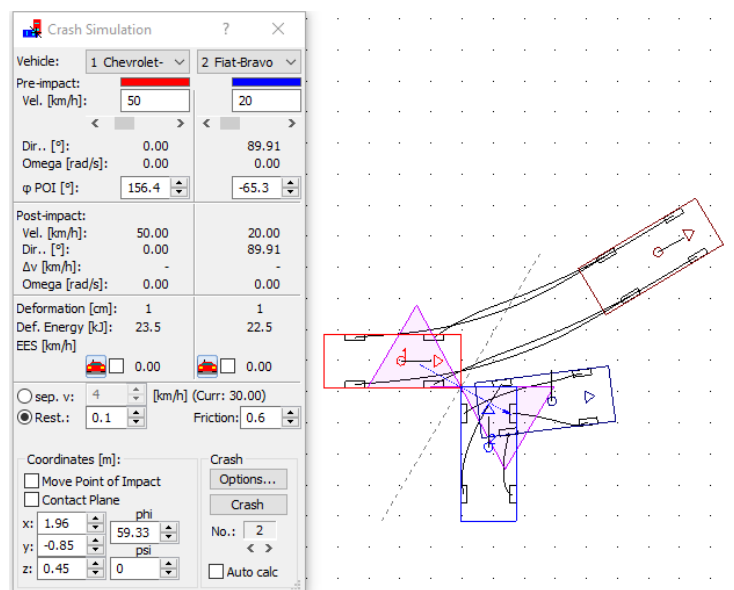


Figura 6: solución de la colisión en el área de trabajo de PC-Crash®

A continuación, se detallan los resultados más importantes extraídos del reporte del PC-crash®.

Vehículo:	Chevrolet-Aveo 1.6 -	Fiat-Bravo 1.8 Flex -
RecordID:	72297	67741
VALORES INICIALES		
Velocidad (v) [km/h]:	50.00	20.00
Peso total [kg]:	1240.00	1420.00
Centro de gravedad x [m]:	0.04	2.85
Centro de gravedad y [m]:	-0.01	-2.78
Velocidad dirección(β) [deg]:	0.00	89.91

VALORES FINALES		
Centro de gravedad x [m]:	8.30	4.89
Centro de gravedad y [m]:	3.49	-1.30
Velocidad dirección(β) [deg]:	20.47	31.55
Promedio de la aceleración de frenada [m/s^2]:	-4.91	-5.8
Promedio del factor de desaceleración:	0.5	0.59

Tabla 3: valores de entrada y salida (resultados) obtenidos mediante PC-crash®.

Aunque los valores de velocidad de entrada y ángulos de separación encontrados entre MEGNA y PC-Crash® son muy similares y están validados por la evidencia de la posición final de los vehículos, otras variables como el factor de desaceleración no presentan una total correspondencia.

La solución de colisión propuesta por PC-Crash® resulta en un modelo más completo [6], que el propuesto mediante las ecuaciones 3 y 4, las que corresponde al análisis simple de PCCM para partículas. Variables como el momento angular, momento de inercia de los vehículos, propias de la mecánica planar, no están siendo consideradas en este ejemplo. En forma adicional, este método no permite una verificación visual del resultado, tal como si lo permite el entorno de PC-Crash.

Sin embargo, MEGNA presenta la ventaja de su bajo costo de implementación y podría ser útil en modelos físicos para colisiones mas simples, aunque requiere que el experto tenga alguna habilidad para “programar” en plataformas de código bajo como por ejemplo Excel®.

CONCLUSIONES

El método MEGNA propuesto se basa en la construcción de un algoritmo donde el experto pueda controlar múltiples valores de entrada y buscar por comparación (diferencia) con las evidencias de desplazamiento posterior al impacto, la matriz de datos correctos que valida la solución del análisis.

El uso de low code para crear los algoritmos de cálculos pueden ser desarrollas en entornos de bajo costo como los es Excel®. Como desventaja de la técnica se indica la falta de una visualización gráfica, la necesidad de que el experto sepa cómo construir para cada tipo de colisión el algoritmo necesario para buscar la solución, y depender de su habilidad para representar el algoritmo de la solución en una plataforma donde pueda correr la simulación.

Esta herramienta podría también ser de preparación para muchos expertos de América Latina, que hasta en la actualidad siguen resolviendo el análisis de velocidad por el método indirecto, de forma tal de poder comprender los beneficios del método directo.

AGRADECIMIENTOS

A la Perito M. Gisela Insaurrealde por su permanente apoyo en la tarea de investigación.

A la comunidad de Peritos de la A.P.I.A.T.

Al Ing. Paulo Luccini Traverso por su ayuda en la traducción de este documento.

A la Comisión de Evaluación de EVU Congress 2022 por la oportunidad de compartir este trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1] Aparicio Izquierdo, et al. Accidentes de Tráfico: Investigación, Reconstrucción y Costes. ISBN 84-7484-149-6. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid.

- 2] Jame E. Gentle. “Random Number Generation and Monte Carlo Methods”. Electronic ISBN: 978-1-4757-2960-3. Journal of Statistical Software. September 2004, Volume 11, Book Review 8
- 3] Scott Hartshorn. “Excel Random Numbers: Quickly & Easily Generate and Use Random Numbers (Data Analysis With Excel Book 2)”. ASIN: B01BWT9BWA. Publication date: February 17, 2016. Kindle Edition.
- 4] Raymond M. Brach, Marek Guzek, Zbigniew Lozia. “Uncertainty of road accident reconstruction computations”. EVU-Annual meeting 2007.
- 5] T. Cormen, C. Leiserson, R. Rivest, C. Stein. “Introduction to Algorithm”. Cambridge: Mit Press, 2009, p. 26.
- 6] Dr. Steffan Datentechnik. “Operating and Technical Manual Pc Crash”. Version 13.0, August 14, 2020.