

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

TRABAJO DE GRADUACIÓN

**DETERMINACIÓN DE LA RESPONSABILIDAD EN UN ACCIDENTE
AUTOMOVILÍSTICO, POR MEDIO DE PRINCIPIOS FÍSICOS**

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

INGRID MARISOL FLORES ESTRADA
ASESORADO POR EL LIC. AMAHÁN SÁNCHEZ ÁLVAREZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA INDUSTRIAL

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de Lòpez
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Milton de León Bran
VOCAL V	Br. Isaac Sultán Mejia
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Edwin Danilo González Trejo
EXAMINADOR	Ing. Edwin Echeverría Marroquín
EXAMINADORA	Inga. Karla Martínez de Castañon
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DETERMINACIÓN DE LA RESPONSABILIDAD EN UN ACCIDENTE AUTOMOVÍLISTICO, POR MEDIO DE PRINCIPIOS FÍSICOS,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial, el 21 de abril de 2008.

Ingrid Marisol Flores Estrada

ACTO QUE DEDICO A

DIOS

El Ingeniero más grande del universo, por haberme permitido culminar mis estudios

MIS PADRES

Julio Armando Flores A. Edith Amabilia Estrada D.
A quienes debo todo lo que soy, que éste triunfo sea una recompensa a sus esfuerzos

MIS HERMANOS

Julio, Cesar y Gustavo, por el apoyo fraternal que me han dado siempre.

MIS SOBRINOS

Cristian y Pamelita, que éste sea su ejemplo.

MIS TIOS

Janneth, Alicia y Cecilia, Oswaldo y Hugo, con cariño

MIS AMIGOS:

Guillermo Alexander Morataya y Vivian Morataya, por compartir esta experiencia y ser mis aliados.

AGRADECIMIENTOS A:

LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

Por haberme permitido ser miembro de esta casa de estudios.

LA ESCUELA DE MECÁNICA INDUSTRIAL

Por formarme como profesional, en especial y con cariño al Ing. Danilo González e Ing. Roberto Valle.

MI ASESOR DE TESIS Y AMIGO

Lic. Amahan Sánchez Álvarez por el apoyo brindado durante todo el trayecto de mi carrera.

EL ING. MURPHY PAIZ

Por su amistad y ejemplo de positivismo que me ha regalado.

MIS PADRINOS:

Luís Arturo Pérez, Rosy Estrada, por su cariño y apoyo.

LOS INGENIEROS:

Jeovany Miranda y Santiago Méndez
Por su apoyo y ayuda incondicional.

MIS COMPAÑEROS Y AMIGOS

Jair Ramírez y Julio Alonzo, por compartir la vida de estudiantes y ser incondicionales.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
RESUMEN	VII
OBJETIVOS	IX
INTRODUCCIÓN	XI

1. DATOS SOBRE LOS ACCIDENTES VIALES EN EL ÁREA METROPOLITANA DE GUATEMALA

1.1 Panorámica general de los accidentes viales en Guatemala.	01
1.2 Regulación legal de responsabilidad, según la Ley y Reglamento de Tránsito	02
1.3 Estadísticas	02
1.4 Clasificación de los accidentes viales	03
1.4.1 Por el lugar de ocurrencia	04
1.4.2 Por la clase de automotores involucrados	08
1.4.3 Por las personas involucradas	10
1.4.4 Por la hora del día de ocurrencia	11
1.4 Predicciones futuras sobre los accidentes viales	12

2. LA FÍSICA DE LOS ACCIDENTES VIALES

2.1 Introducción	16
2.2 La conservación del <i>momentum</i> lineal en un accidente vial	17
2.3 La conservación de la energía en un accidente vial	18
2.4 Las características del terreno donde ocurre el accidente vial	20
2.4.1 La fricción	21
2.4.2 La calidad de los neumáticos de los automóviles involucrados en el accidente vial	23
2.4.3 El derrape de los neumáticos	26
2.5 La reconstrucción “en reversa” de un accidente vial	27

3. LAS CONSECUENCIAS FÍSICAS EN UN ACCIDENTE VIAL

3.1 La masa del vehículo	32
3.2 La velocidad del vehículo	34

3.3	La energía del vehículo	36
3.4	Medición y graficación en la escena de un accidente vial	37
3.5	Medición experimental de frenadas	40
3.6	La interpretación estadística de la evidencia	41
3.7	La interpretación de datos	43
4. LAS HERRAMIENTAS DE LA ACCIDENTOLOGÍA VIAL		
4.1	Consideración en tercera dimensión en un accidente vial	44
4.2	La técnica de Monte Carlo	52
4.3	Aplicación de integrales dobles	68
4.4	Simulaciones numéricas	85
4.5	Aplicación de la fotogrametría digital	86
4.6	La estadística en la investigación de accidentes viales	94
5. PLAN DE MERCADEO PARA UN SERVICIO NUEVO		
5.1	Análisis de la situación	103
5.1.1	El mercado	103
5.1.2	Actividad del mercado	103
5.1.3	Mejora en el servicio	104
5.1.3.1	Etapas en el ciclo de vida	105
5.1.3.2	Tiempo muerto para el diseño y desarrollo de un nuevo servicio.	106
5.1.3.4	Impacto en el mercado	107
5.1.4	Aspectos sociales y gubernamentales	108
5.1.4.1	Clima legislativo	108
5.2	Estrategia de mercado	108
5.2.1	Cliente objetivo	110
5.2.2	Competidor objetivo	111
5.2.3	Estrategia central	111

5.3 Documentos financieros	112
5.3.1 Presupuesto publicidad y promociones	113
5.3.2 Presupuesto de ventas	114
5.3.3 Presupuesto de desarrollo del producto	114
CONCLUSIONES	117
RECOMENDACIONES	121
BIBLIOGRAFÍA	125

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

01. Accidentes de tránsito según lugar de mayor reincidencia	05
02. Accidentes de tránsito ocurridos según zona	07
03. Accidentes de tránsito ocurridos según tipo de vehículos	09
04. Representación vectorial de objetos involucrados en un accidente	15
05. Reconstrucción en reversa de un accidente	27
06. Posición de un vehículo para describir huellas	28
07. Deformación de un vehículo al experimentar una colisión	32
08. Energía disipada de un vehículo durante una colisión	37
09. Ventana de software para interpretación de datos	43
10. Gráfica de energía inicial y deformación	47
11. Gráfica de la función de energía con un grado de correlación 0.9	48
12. Gráfica de la energía absorbida considerando el área deformada	49
13. Gráfica de comparación de modelos según los resultados de velocidad	51
14. Croquis de un accidente de tránsito	54
15. Histograma de valores de velocidad, variando el punto de impacto	60
16. Histograma de valores de velocidad, determinada por las masas	61
17. Histograma de valores de velocidad inicial determinada por las masas de los autos	63
18. Histograma variando cinco parámetros a utilizar	64
19. Histograma de velocidad inicial determinada por la variación en los coeficientes de fricción	65
20. Rangos totales de variación promedio y desviación típica	66
21. Deformación de la estructura del rodado constante	70
22. Relevamiento de las posiciones finales de un accidente	71
23. Gráfica de simulación de un accidente	72
24. Diagrama de frecuencias absolutas de velocidad en una simulación	75
25. Diagrama de frecuencias absolutas proyectadas sobre el eje ordenado	77

26. Diagrama de frecuencias absolutas proyectada sobre el eje de las abscisas	79
27. Diagrama de frecuencias considerando ocho variables de error	82
28. Esquema de medidas tomadas en lugar de frenada	88
29. Pantalla del Programa <i>Photomodeler</i> para marcar las frenadas	89
30. Reconstrucción del escenario de frenadas con textura y sin ella	89
31. Entorno virtual explorado desde <i>Photomodeler</i>	90
32. Entorno virtual para el proceso de animación y reconstrucción final	92
33. Ilustración de ubicaciones mediante el trazado vectorial	93
34. Etapa de ciclo de vida	106
35. Ciclo de Innovación y tiempo de mercado	106
36. Gráfica de la estrategia de mercado	111
37. Curva teórica de la respuesta de publicidad	114

TABLAS

I. Lugar más frecuente de ocurrencia de los accidentes de tránsito	04
II. Accidentes de tránsito según zona municipal	06
III. Accidentes de tránsito según automotores involucrados	08
IV. Clasificación de los accidentes según personas involucradas	10
V. Accidentes de tránsito según la hora y el día de ocurrencia	11
VI. Valores de constante de rozamiento de neumáticos	22
VII. Valores de ensayo según la profundidad y altura del daño	46
VIII. Comparación de modelos aplicados para determinar un accidente	50
IX. Valores centrales de cada variable a considerar	74
X. Estimaciones de velocidad media y error	83
XI. Estimación de velocidad media y error para el 2do. automotor	83
XII. Velocidad haciendo variar fuente de error a sus extremos	84
XIII. Velocidad del segundo vehículo variando errores extremos	84
XIV. Comparación de valores reales y los obtenidos en fotogrametría	90
XV. Medidas de fotografías	93
XVI. Desviación de medidas reales y fotogrametría	94
XVII. Plan estratégico corporativo a utilizar	111

RESUMEN

Al estudiar la ocurrencia según datos estadísticos de los accidentes de tránsito, se logra determinar que la tasa de éstos es muy alta y en Guatemala no hay ningún ente privado ni gubernamental que pueda determinar la responsabilidad en un percance vial, esta responsabilidad se puede determinar a través de la medición de las consecuencias físicas, tales como la velocidad, la masa del vehículo, la conservación del *momentum* lineal, la conservación de la energía, la fricción y el momento de inercia.

Para el análisis del accidente se toma en cuenta las consecuencias físicas y se analizan los factores físicos, volitivos del entorno del accidente vial, para posteriormente utilizar herramientas físico-matemáticas, tales como las simulaciones numéricas o la Técnica de Monte Carlo para poder predecir como ocurrió el percance. La responsabilidad del accidente no se puede determinar en datos puntuales sino en rangos de probabilidad.

Además se propone un modelo computacional para la recreación del accidente vial por medio de la fotogrametría digital y un modelador llamado *Photomodeler*, que es un *software*, en el cual, según las evidencias recolectadas en el lugar de los hechos, se puede recrear el accidente, todo esto coincidiendo con los cálculos matemáticos que se han determinado.

En la parte final de este trabajo se plantea un plan de mercadeo para poder introducir el servicio para determinar la responsabilidad de un accidente automovilístico como un producto innovador, ya que en Guatemala es un campo virgen de aplicación.

OBJETIVOS

General:

Determinar las consecuencias físicas de los accidentes automovilísticos e implantarlo como un servicio.

Específicos:

1. Enumerar los recursos que tiene la física para concluir sobre un accidente vial.
2. Describir cómo, a partir de evidencias físicas detectadas en el lugar del accidente automovilístico, se puede concluir por qué se dio el accidente vial.
3. A partir de las evidencias físicas, concluir de manera fundamental sobre la responsabilidad de un accidente.
4. Considerar con las evidencias, las responsabilidades, según la Ley de Tránsito.
5. Realizar cálculo de costos y beneficio de propuesta de implementación del nuevo servicio.
6. Establecer un plan de mercadeo para el servicio planteado.
7. Establecer un sistema de implementación de procedimientos al servicio propuesto.

INTRODUCCIÓN

Guatemala es un país donde el crecimiento demográfico ha traído como consecuencias el crecimiento del parque vehicular, este crecimiento ha generado problemas importantes tales como: la incapacidad del sistema vial para la movilización de los vehículos y el incremento de los accidentes viales.

A pesar de los esfuerzos de las autoridades Municipales y Estatales, estos percances se incrementan cada año, siendo éstos proporcionales al número de automotores.

En el presente trabajo de graduación se analiza los factores físicos, volitivos y del entorno para poder analizar los accidentes viales, para ello primeramente se analiza estadísticamente el historial de los percances ocurridos en el área metropolitana, tomando como datos la información proporcionada por la Policía Municipal de Tránsito, para después analizar los accidentes viales a través de los principios físicos involucrados y utilizar herramientas físico-matemáticas para poder determinar la responsabilidad en el accidente.

En este país, el análisis científico vial, no se da a nivel estatal o privado, por lo que se propone un plan de mercadeo que permita prestar un servicio a la población en general, instituciones públicas o privadas involucradas en un accidente vial.

1. DETERMINACIÓN DE LA RESPONSABILIDAD EN UN ACCIDENTE AUTOMOVILÍSTICO POR MEDIO DE PRINCIPIOS FÍSICOS

1. Datos sobre los accidentes viales en el área Metropolitana de Guatemala.

En la actualidad el parque vehicular de Guatemala ha aumentado considerablemente, a tal grado que en el mes de febrero del año dos mil ocho, asciende a casi un millón doscientos mil de las cuales el ochenta por ciento (80%) se hallan en el área metropolitana. Para tener una idea general del marco que encuadra la presente investigación, es necesario definir de forma clara todos los eventos relacionados a la dinámica vehicular, teniendo como objetivo entender todos los campos que conforman el sistema de tránsito.

1.1 Panorámica General de los Accidentes Viales en Guatemala.

Debido a la falta de cultura vial entre los guatemaltecos, la mayoría de conductores no tiene conciencia de su responsabilidad a la hora de ir frente al volante, lo cual se traduce en altas tasas de accidentes de tránsito. Las consecuencias de esas irresponsabilidades al conducir dejaron cuatro mil seiscientos ochenta accidentes de tránsito en la capital, y al menos mil setecientos noventa en el resto del país, durante el año dos mil siete, según cifras del Instituto Nacional de Estadística (INE), según se cita en la figura dos del presente capítulo.

En la capital, siete mil quinientos vehículos se vieron involucrados en esos accidentes, así como mil ciento veintiséis autobuses urbanos, El mes con más accidentes registrados fue diciembre, con quinientas setenta y tres colisiones, y el más bajo fue febrero de este año, con doscientos noventa y siete, Guatemala es el

departamento que encabeza la lista con más accidentes al registrar un mil ochocientos once accidentes.

1.2 Regulación legal de Responsabilidad, según la Ley y Reglamento de Tránsito

En nuestro país se encuentra regulado el tránsito por La Ley de Tránsito y su reglamento, no estando tipificado directamente los accidentes viales, mas sin embargo el Artículo 30 de esta ley cita. “Constituyen infracciones en materia de tránsito la inobservancia, incumplimiento y violación de las normas establecidas en esta ley y sus reglamentos, salvo el caso de acciones u omisiones tipificadas como faltas o delitos. Cuando la infracción no esté específicamente contemplada, se sancionará con amonestaciones o multas conforme la norma de esta ley, y se impondrá sanción tantas veces como se cometan infracciones aun cuando se trate de la misma persona o vehículo. El artículo 95 del Reglamento de Tránsito regula las Normas de Conducta para personas implicadas en un accidente de tránsito. Al tener determinada la responsabilidad de de un accidente se aplicara lo establecido por el Código Penal, artículo 12. El delito es culposo cuando con ocasión de acciones u omisiones lícitas, se causa un mal por imprudencia, negligencia o impericia.

1.3 Estadísticas

Aunque las causas de accidentes de tránsito son, por lo general, una combinación de factores exógenos, también existen otros elementos que pueden traducirse en la realidad como determinantes de una colisión. Los actos anteriores al choque, son factores simultáneos que comienzan a mover la cadena de sucesos imponderables, los cuales pueden ser clasificados en dos grandes grupos

- Factores de Orden Operacional
- Factores de Orden Condicional

Dentro del primer grupo, podemos colocar las siguientes situaciones

- Táctica evasiva inapropiadamente seleccionada
- Excesiva velocidad de circulación
- Estrategia elegida tardíamente
- Falla en el diseño de la vía

Dentro de los factores condicionales tenemos:

- La obscuridad
- La niebla y el humo
- La lluvia y la nieve
- Pavimentos irregulares
- Velocidad crítica en curva

1.4 Clasificación de los accidentes viales

Para poder entender los accidentes y hacer un análisis de cómo ocurrieron se mencionan estadísticas proporcionadas por la Policía Nacional y la Policía Municipal de tránsito de los lugares que más ocurren accidentes en la ciudad de Guatemala, así como el tipo de vehículos y personas involucradas la hora y el día de más frecuencia.

1.4.1 Por el lugar de ocurrencia

Tabla I. Lugar más frecuente de ocurrencia de los accidentes de tránsito

LUGAR DE REINCIDENCIA	CANTIDAD
TOTAL	546
PUENTE EL TREBOL (1)	114
6 AVE. 24 CALLE Z.1 (2)	71
5 AVE. ROSS. Z. 11 (3)	70
PUENTE EL INCIENSO (4)	69
11 AVE. 5 CALLE Z. 2 (5)	60
7 AVE. 21 CALLE Z.1 (6)	57
LIBERACIÓN 15 AVE. Z.13(7)	53
BOLIVAR 40 CALLE Z. 8 (8)	52

Fuente: Policía Municipal de Tránsito -PMT- (año 2007)

**Figura 1. ACCIDENTES DE TRÁNSITO OCURRIDOS EN LA CIUDAD CAPITAL
SEGÚN LUGAR DE MAYOR REINCIDENCIA**

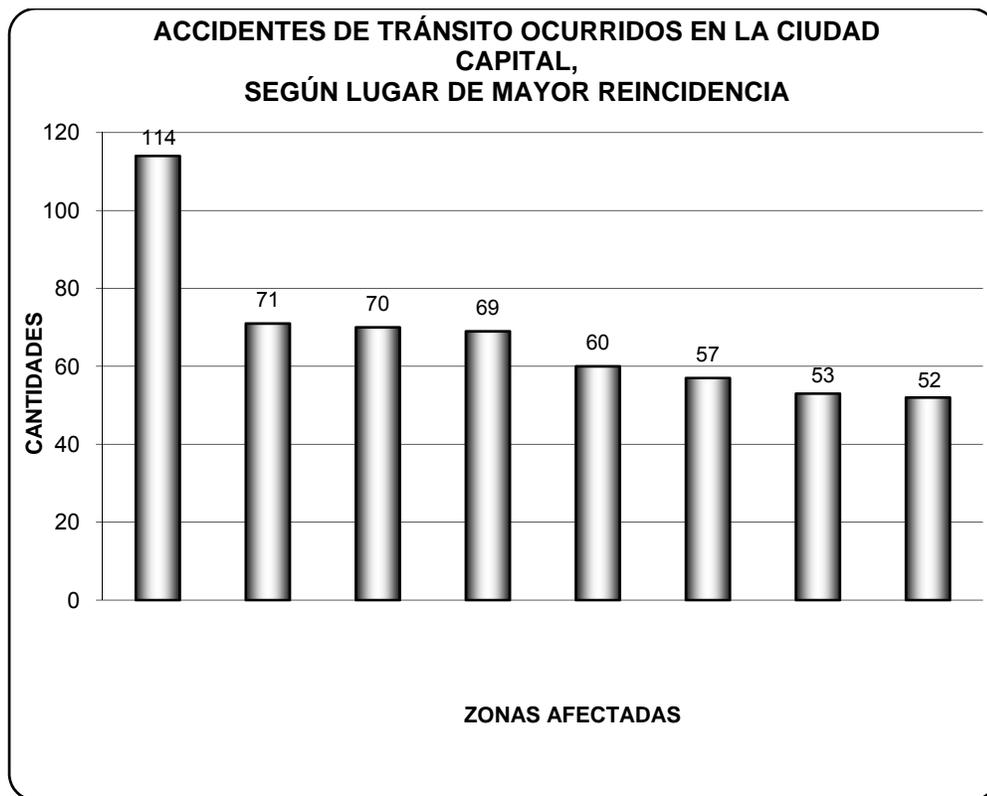


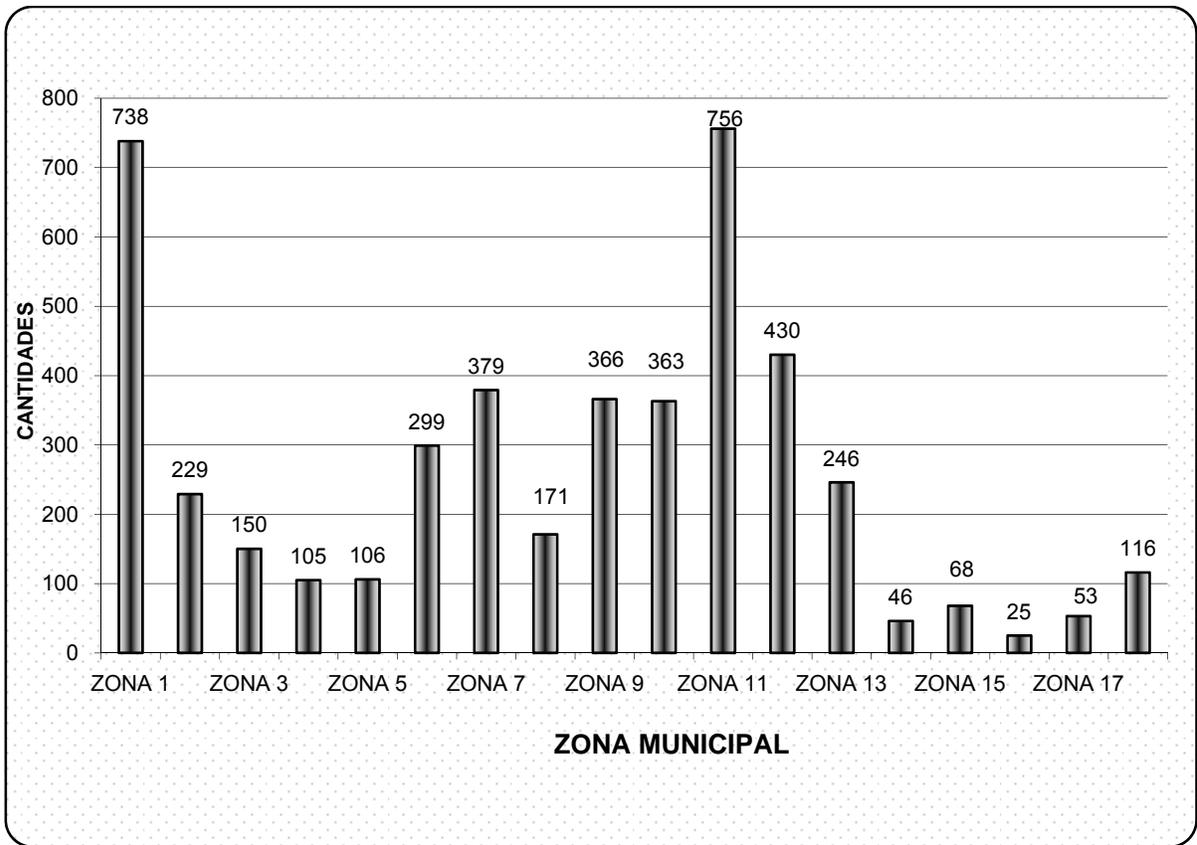
Figura según datos de tabla I

Tabla II. Accidentes de tránsito según zona municipal de ocurrencia

ACCIDENTES DE TRÁNSITO OCURRIDOS	
EN LA CIUDAD CAPITAL, SEGÚN ZONA MUNICIPAL,	
AÑO 2007	
ZONA MUNICIPAL	CANTIDAD
ZONA 1	738
ZONA 2	229
ZONA 3	150
ZONA 4	105
ZONA 5	106
ZONA 6	299
ZONA 7	379
ZONA 8	171
ZONA 9	366
ZONA 10	363
ZONA 11	756
ZONA 12	430
ZONA 13	246
ZONA 14	46
ZONA 15	68
ZONA 16	25
ZONA 17	53
ZONA 18	116
TOTAL	4,646

Fuente: Policía Municipal de Tránsito

**Figura 2. Accidentes de tránsito ocurridos en la ciudad capital.
según zona
año 2007**



Datos según tabla II

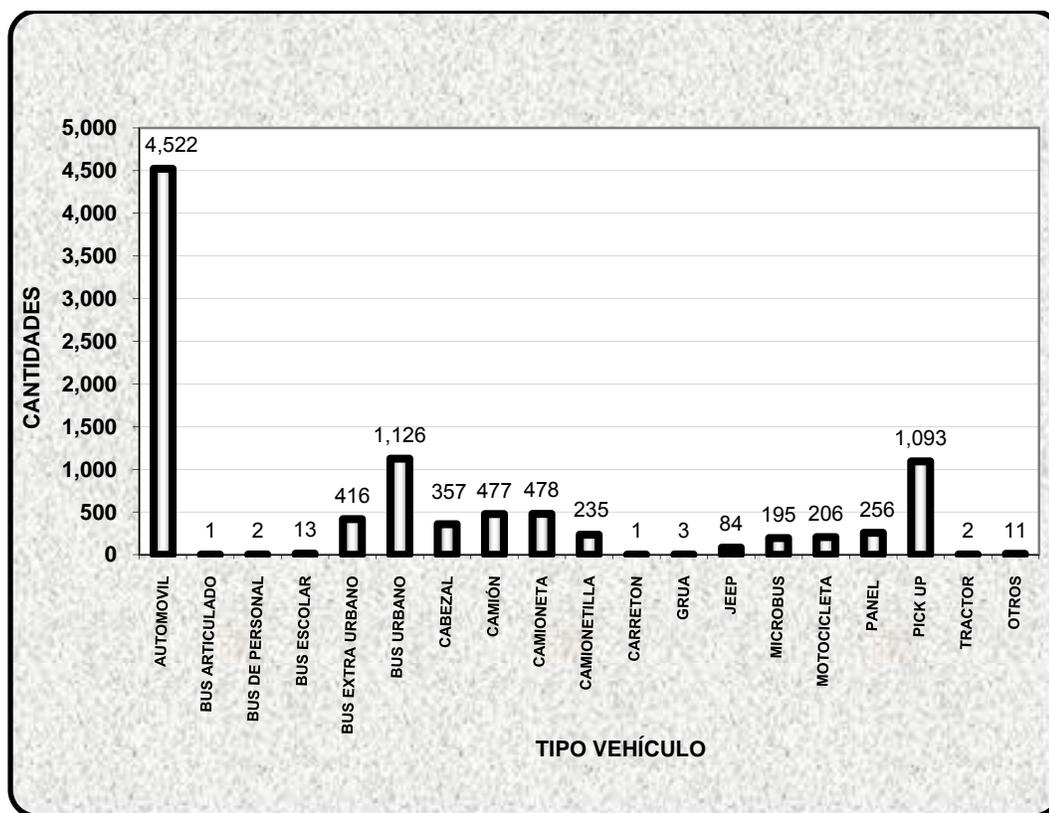
1.4.2 Por la clase de automotores involucrados

Tabla III. Accidentes de tránsito ocurridos en la ciudad capital,
por mes , según tipo de vehículo,
Año 2007

TIPO DE VEHÍCULO	TOTAL	MES											
		EN	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
TOTAL	9,478	407	544	884	746	724	778	864	834	835	830	998	1,034
AUTOMOVIL	4,522	207	258	417	353	334	371	404	403	391	395	477	512
BUS ARTICULADO	1	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BUS DE PERSONAL	2	-	-	-	-	1	-	-	-	1	-	-	-
BUS ESCOLAR	13	-	1	2	-	-	-	4	-	2	1	2	1
BUS EXTRA URBANO	416	17	25	38	33	31	37	33	31	45	33	46	47
BUS URBANO	1,126	42	76	113	85	72	85	111	103	100	114	120	105
CABEZAL	357	8	11	40	26	30	26	32	39	26	30	41	48
CAMIÓN	477	20	24	45	43	41	36	40	44	35	48	47	54
CAMIONETA	478	12	27	43	41	47	56	36	42	33	37	56	48
CAMIONETILLA	235	11	16	14	18	17	9	26	18	26	22	30	28
CARRETON	1	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-
GRUA	3	1	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1
JEEP	84	-	10	9	8	5	6	11	4	9	4	13	5
MICROBUS	195	6	11	22	16	17	14	21	28	17	10	14	19
MOTOCICLETA	206	7	13	12	16	21	24	16	17	15	15	23	27
PANEL	256	9	13	23	23	23	21	19	21	29	28	27	20
PICK UP	1,093	67	59	105	84	83	93	109	81	104	88	102	118
TRACTOR	2	-	-	-	-	1	-	-	1	-	-	-	-

Fuente: Policía Municipal de Tránsito

Figura 3. Accidentes de tránsito ocurridos en la ciudad capital,
por tipo de vehículo
año 2007



Datos según tabla III

1.4.3 Por las personas involucradas

Tabla IV. Lesionados en accidentes de tránsito ocurridos en la República,
por estado patológico y sexo, según mes
año 2007

MES	TOTAL			ESTADO PATOLÓGICO Y SEXO					
				EBRIO			NO EBRIO		
	TOTAL	HOMB	MUJER	TOTAL	HOM	MUJER	TOTAL	HOMB	MUJER
TOTAL	2,586	1,780	806	190	176	14	2,396	1,604	792
ENERO	251	176	75	15	14	1	236	162	74
FEBRERO	286	186	100	20	18	2	266	168	98
MARZO	247	181	66	22	21	1	225	160	65
ABRIL	237	163	74	19	19	-	218	144	74
MAYO	206	145	61	16	16	-	190	129	61
JUNIO	252	171	81	10	7	3	242	164	78
JULIO	202	143	59	11	8	3	191	135	56
AGOSTO	162	113	49	17	17	-	145	96	49
SEPTIEMBRE	210	143	67	16	13	3	194	130	64
OCTUBRE	201	133	68	16	15	1	185	118	67
NOVIEMBRE	156	105	51	10	10	-	146	95	51
DICIEMBRE	176	121	55	18	18	-	158	103	55

Fuente: Policía Nacional Civil

1.4.4 Por la hora del día de ocurrencia

Tabla V. Accidentes de tránsito según hora y día de ocurrencia

MUERTOS EN ACCIDENTES DE TRÁNSITO OCURRIDOS EN LA REPÚBLICA, POR HORA, SEGÚN DÍA												
AÑO 2007												
DÍA	TOTAL	HORA										
		0H 1M	2H 1M	5H 1M	8H 1M	11H 1M	13H 1M	15H 1M	17H 1M	19H 1M	21H 1M	23H 1M
		A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
		2 H	5 H	8 H	11H	13H	15H	17H	19H	21H	23H	24H
TOTAL	581	12	36	83	69	46	70	84	49	83	30	19
LUNES	78	-	9	17	7	8	9	9	6	9	3	1
MARTES	54	-	3	15	3	6	7	7	7	3	2	1
MIÉRCOLES	62	1	3	9	10	5	10	9	7	4	3	1
JUEVES	91	3	14	12	5	3	9	18	5	14	2	6
VIERNES	84	2	-	7	15	3	10	18	10	10	6	3
SÁBADO	119	2	6	12	23	14	10	12	3	27	5	5
DOMINGO	93	4	1	11	6	7	15	11	11	16	9	2

Fuente Policía nacional Civil

1.5 Predicciones futuras sobre los accidentes viales

Las técnicas de Reconstrucción Virtual, aplicadas a la investigación de siniestros viales, constituyen en la actualidad una de las herramientas tecnológicas más importantes dentro de las ciencias forenses y de la accidentología. Y esto debido a que justamente, por medio de esta tecnología es posible recrear ante los ojos, el medio perceptivo más importante, distintas inferencias de cómo se sucedieron los acontecimientos del siniestro que está siendo investigado.

Cabe acotar, con relación a estos hechos, que las modalidades y medios empleados por sus autores y protagonistas, varían en gran manera, en función también al tipo de accidente. Pero de cierto es que en cada circunstancia del accidente, siempre existe un objetivo, un objeto o valor, un medio, víctimas y un espacio definido, todo esto comprendido en un intervalo de tiempo donde se desarrolla el hecho. Por lo que las técnicas de Reconstrucción Virtual de Accidentes de Tránsito permitirán conjugar todos estos elementos en disputa en cada caso o infracción de leyes. De lo que resulta entonces que todo lo que sea material y haya estado involucrado significativamente en el hecho a investigar, puede ser representado virtualmente.

De manera conceptual podemos entender que, la Reconstrucción Virtual, es la reproducción de cómo ocurrieron los hechos desde la inferencia metódica y fundamentada de un experto en la materia. A tales características debemos añadir, que esta reproducción se centra básicamente en una tecnología de la informática que recibe el nombre de INFOGRAFÍA, la cual contempla todos los aspectos del dibujo asistido por ordenadores. La infografía viene entonces a asistir

o a proveer de la herramienta necesaria para el confeccionamiento del hecho que se quiere reproducir.

Sin embargo, nada puede resolver sola esta parte de la informática sin los conocimientos de la física, para la resolución del problema. En este sentido, la Reconstrucción Virtual, debe ser contemplada como la resultante de la suma combinada de especialidades entre la Informática, quien provee los medios; y la Accidentología que establecerá las verdades deducidas e inferidas para posteriormente volcarlas a la tarea de la interpretación de los juristas y demás personas.

Reconstrucción Virtual del Accidente de Tránsito, es una metodología de investigación que se contempla en el estudio retrospectivo de un hecho a partir de inferencias abductivas y deductivas sobre indicios materiales que permiten emitir un diagnóstico fundamentado de la dinámica del hecho, reproducible por medio de un instrumento virtual. Instrumento virtual, es el conjunto de software y hardware que agregado a una PC permite al usuario interactuar con el ordenador.

Confeccionar la Reconstrucción Virtual de cualquier siniestro vial implica crear, en principio, una serie de imágenes fotorealista del hecho y poder a continuación reproducirlas en forma secuencial, de manera que el espectador pueda percibir el hecho en forma de una película. El proceso de creación de las imágenes fotorealistas, consiste, primeramente, en el dibujado de la escena del lugar o escenario del hecho a reconstruir. Este proceso contempla la creación de figuras (proyecciones) tridimensionales que poseen propiedades a las cuales se le van a semejar a las cualidades reales de los objetos que intervinieron en el hecho.

Esto quiere decir, que cada objeto que se coloca en la escena y que luego es observado en la Reconstrucción Virtual, representa no solo la morfología del elemento, sino que además, cuenta con las propiedades relevantes del mismo.

En la Reconstrucción Virtual de un accidente de tránsito, se intentará confeccionar a través de gráficas, figuras fotorealistas que constarán con las siguientes propiedades:

- a) Es proyección tridimensional: esto implica que la figura posee volumen (proyectado) y que puede ser apreciados desde cualquier ángulo de visión.

- b) Sus dimensiones son proporcionales (posee una escala) a las dimensiones del objeto real.

- c) Posee colores, materiales y texturas que también son proporcionales a las del objeto real.

- d) La escena del lugar representado adquiere las características principales de iluminación, acorde con las condiciones climáticas, de iluminación y visibilidad del lugar real en el momento del hecho.

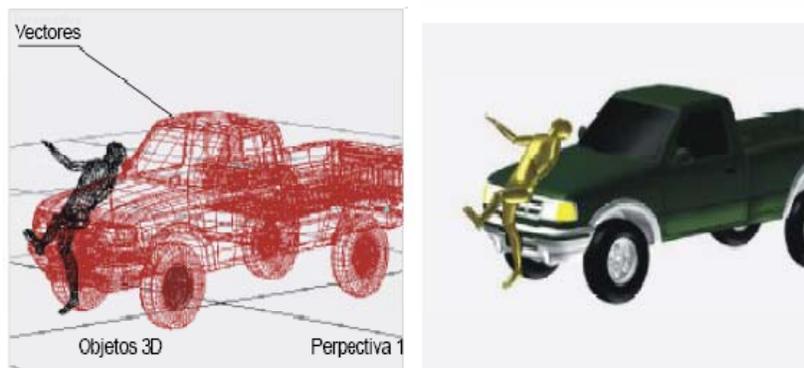
Al poder construir con el ordenador una imagen que contemple todas las características anteriormente mencionadas, no sólo se está logrando dibujar el escenario, ya que las imágenes logradas presentan la posibilidad de poder ser contempladas por cualquiera de sus lados. Esta circunstancia permite colocar al operador en la posibilidad de “ubicarse”, a través de la percepción, en un espacio que presenta propiedades muy semejantes a las del lugar real.

En términos más sencillos, se pueda decir que al dibujar una escena con estas propiedades, por medio de un ordenador, se está, a la vez dibujando infinitas imágenes del mismo objeto o escenario pero desde distintos puntos de vistas, tal cual como si se estuviera en el mismo lugar. De hecho, esto es justamente lo que hacemos cada vez que simplemente se mira un lugar; se recoge visualmente enormes cantidades de imágenes que se proyectan en nuestra retina, con la diferencia de que por medio de la Reconstrucción Virtual, se percibe el lugar análogo del crimen, ahora limitados por los márgenes de la pantalla.

Sin embargo lo primero que se debe discriminar para la realización de una Reconstrucción Virtual, es la condición de los objetos a representar según sus propiedades de inercia y movilidad; esto significa que debe tenerse presente todos y cada uno de los elementos que se encuentran en movimiento en la consumación del hecho y aquellos que no poseen tal condición. Lo que requerirá realizar, antes de la reconstrucción, el análisis de la dinámica de los objetos en movimiento en la escena.

En la figura 4 se observa la representación vectorial de dos objetos involucrados en el hecho que se investiga (automóvil y peatón) en una vista en perspectiva donde se aprecia sus proporciones y tamaño a escala, representados en forma tridimensional y en la siguiente se mejoró la representación de los objetos añadiéndoles las texturas.

Figura 4. Representación vectorial de objetos involucrados en el accidente.



La tarea de Reconstrucción concluye, cuando se procesa cada imagen vectorial, con sus respectivas propiedades y respectivas posiciones, en un rango de tiempo seleccionado, con una determinada longitud; donde se reproduce la dinámica de los hechos investigados previamente, realizar esta última tarea, requiere de un estudio preliminar de definición en tiempo y espacio, de cada objeto que se infiere estuvo en movimiento en la consumación del hecho. Lo que implica conocer la dinámica de los mismos, para solo después de esto, distribuir en el espacio y tiempo todos y cada uno de los objetos relevantes del hecho.

2. LA FÍSICA DE LOS ACCIDENTES VIALES

2.1 Introducción

En el marco de la investigación de un siniestro vial, la tarea de reconstrucción del accidente constituye el eje central de la tarea pericial y dentro de ella los cálculos tendientes a verificar la velocidad de circulación obliga necesariamente a todo perito a realizar un recorte metodológico del fenómeno a estudiar bajo las formas de un modelo físico, que le permita verificar los valores más probables de velocidad. En este sentido al retomar el concepto de probabilidad, el valor de la magnitud informada en el dictamen, será un resultado más ajustado en la medida de que el o los modelos físicos utilizados se planteen con mejores consideraciones y contemplando a la vez, mayores circunstancias del caso investigado. Surge entonces la necesidad de pasar de modelos sencillos a sistematizaciones más complejas donde se consideren otros fenómenos que han sido descartados por los primeros modelos tradicionales con la finalidad de minimizar el rango de probabilidades del valor informado.

Las modelizaciones tradicionales de cálculos basadas en las huellas de frenada se centran en las consideraciones propias de la mecánica del punto la cual conlleva una serie de consideraciones que el perito debe realizar para su utilización y que ya fuera señalada por el perito recolector de evidencia, en particular en aquellos casos donde la producción de la huella se genera no en forma rectilínea sino ésta señala traslación y rotación del vehículo, los cálculos propios de la mecánica del punto no posibilitan la contemplación de la energía disipada en la rotación.

Es aquí donde el empleo de la dinámica del sólido posibilita examinar el fenómeno de la rotación para mejorar los resultados del cálculo.

2.2 La conservación del momentum lineal en un accidente vial

Analizando el momento de inercia se observa que este depende fundamentalmente del centro de rotación y de la forma del cuerpo que rota. Una primera consideración del modelo propuesto, está relacionado con contemplar al vehículo como un paralelepípedo, si consideramos al vehículo como un sólido con forma de paralelepípedo que rota alrededor de su centro de masas coincidente con el centro del volumen, el momento de inercia respecto al eje “z” será:

$$I_o = M \cdot \frac{(a^2 + b^2)}{12} \quad (1)$$

I_o: momento de inercia propio respecto al eje vertical “z”.

M: masa total del vehículo.

a: ancho del vehículo.

b: largo del vehículo.

Reemplazando en las ecuaciones de la conservación de la energía se llega a una expresión con la cual se puede determinar el valor de la velocidad al inicio de la huella en función de parámetros medibles:

$$v_o = \sqrt{2 \cdot \mu \cdot g \cdot \left[x + \frac{(a^2 + b^2) \cdot \theta^2}{12 \cdot x} \right]} \quad (2)$$

Esta ecuación es el algoritmo general para el caso ideal de interpretar al vehículo como un paralelepípedo que rota alrededor de su baricentro, como en la mayoría de los casos reales no sucede esto, es necesario hacer las correcciones correspondientes aplicando el Teorema de Steiner:*

$$I = I_0 + M \cdot d^2 \quad (3)$$

2.3 La conservación de la energía en un accidente vial

El trabajo durante la traslación está vinculado con el rozamiento durante el desplazamiento longitudinal del centro de masa del vehículo, el cual se convierte en calor. En tanto que la energía de rotación tiene que ver con la energía necesaria para que el vehículo rote alrededor de un punto que puede ser o no coincidente con el centro de masa del vehículo:

$$E_{c(\text{inicial})} = W_r + E_r \quad (1)$$

Donde:

$E_{c(\text{inicial})}$: es la energía cinética del vehículo al inicio de la huella.

W_r : es trabajo de rozamiento consumido en la traslación del centro de masa.

E_r : es la energía de rotación del vehículo.

La ecuación del Principio de la Conservación de la Energía podemos escribirla de la siguiente manera:

$$E_{c(\text{inicial})} = (\mu \cdot g \cdot M) \cdot x + \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2$$

$$\frac{1}{2} \cdot M \cdot v_0^2 = (\mu \cdot g \cdot M) \cdot x + \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2 \quad (2)$$

*Teorema de Steiner, también conocido como teorema de los ejes paralelos

M: es la masa total del vehículo.

vo: es la velocidad del vehículo al inicio de las huellas.

μ : es el coeficiente de fricción neumático-superficie elegido de tabla.

x: es la distancia o extensión de las huellas de los neumáticos.

g: es la aceleración de la gravedad.

2.4 Las características del terreno donde ocurre el accidente vial

La investigación de Accidentes en el Tránsito, es la realización de Informes Técnicos que ayuden al esclarecimiento de los accidentes de tránsito. Estos Informes Técnicos sirven de base a las personas encargadas de la defensa del accidente y a los Jueces encargados de establecer las responsabilidades, dándoles a conocer distintos aspectos del accidente que generalmente no han sido tenidos en cuenta y que develamos con los informes. El Informe Técnico consta de análisis de terreno, levantamiento planimétrico, estudio de los daños de los vehículos, evolución del accidente, cálculo de velocidades, causalidad y se complementa con fotografías y la búsqueda de testigos.

Levantamiento Planimétrico:

En muchas ocasiones el hombre necesita tener una representación del territorio en el que se encuentra por el simple hecho de ubicarse o también querer edificar en algún terreno de esto se encarga la Topografía.

La topografía es la ciencia que estudia los métodos necesarios para llegar a representar un terreno con todos sus detalles naturales o creados por el hombre, así como el conocimiento y manejo de los instrumentos que se precisan para tal fin.

Al conjunto de operaciones necesarias para representar topográficamente un terreno se denomina Levantamiento y la señalización necesaria para llevar los datos existentes en un plano a terreno se denomina Replantero.

El levantamiento realizado esta dentro del marco de la planimetría, que es la parte de la topografía que estudia el conjunto de métodos y procedimientos destinados a representar la superficie del terreno como un plano horizontal sobre el cual se proyectan los detalles y accidentes prescindiendo de las alturas.

Con este levantamiento se puedes determinar los ángulos de elevación esto de gran ayuda para poder determinar responsabilidades con criterios físicos según la ultima ubicación de los vehículos, respecto a la que deberían de tener al inicio.

2.4.1 La Fricción

La primera ley de Coulomb implica que se puede definir un número que es el cociente entre la fuerza de fricción entre dos superficies que se desplazan una respecto a la otra y la fuerza que aprieta a las dos entre si. Este coeficiente de rozamiento o fricción, usualmente denominado por la letra griega μ , se mide y se tabula para pares de superficies (según la segunda ley). En rigor este coeficiente llamado dinámico, pues se mide con las dos superficies con movimiento relativo. Si se mide la máxima fuerza de roce que puede aplicarse al cuerpo de arriba sin que se empiece a mover, y se la divide por la fuerza que aprieta a las superficies, se obtiene lo que se llama el coeficiente estático de roce μ_e . En todos los casos conocidos, este coeficiente estático es mayor al dinámico: es difícil poner en movimiento a un mueble empujándolo, que mantenerlo en movimiento una vez que arranca. Todo lo que sigue se refiere al coeficiente de fricción dinámico, que es el que se aplica cuando un neumático de ciertos tipos sobre tipos de calzada.

Es posible dar valores razonables para el coeficiente de fricción entre neumáticos de ciertos tipos sobre tipos de calzada. Algunos ejemplos relevantes son su rango de variación experimental, están contenidos en la siguiente tabla:

Tabla VI. Algunos valores de constantes de rozamiento de neumáticos de autos modernos sobre diversas superficies

neumáticos sobre	μ
asfalto seco	0,80–1,20
asfalto mojado	0,50–0,80
ripio firme	0,55–0,85
ripio suelto	0,40–0,70
hielo liso	0,10–0,25
nieve suelta	0,10–0,25
nieve compactada	0,30–0,55
barro	0,40–0,50

Estos valores dependen de las dos superficies que rozan tanto del tipo o condición de la calzada.

El fabricante de neumáticos se debate entre dos requerimientos técnicos contradictorios: alta fricción, para frenar y acelerar bien, lo que necesita compuestos blandos y larga vida útil, lo cual demanda una goma dura. Los vehículos sometidos a usos exigentes como camiones, camionetas y motos de enduro, suelen usar neumáticos de mayor dureza, cuyo coeficiente de fricción es correspondientemente menor que el neumático de un auto familiar, alrededor de 0.6 para camiones frente al 0.8 típico de autos.

2.4.2 La calidad de los neumáticos de los automóviles involucrados en el accidente vial

Otro tema que da origen a múltiples malentendidos es el desgaste de los neumáticos. Al estudiar un expediente judicial es común ver destacadas con resaltador las vidas útiles de cada neumático. El mismo dato se suele repetir en el resumen y en el fallo. La implicación pareciera ser que un juego de neumáticos con un 70% de desgaste implica un 70% de imprudencia por parte del conductor. La verdad es que no es así: un neumático con un 5% de vida útil es tan prudente como uno al que todavía le queda un 95%.

En circunstancias normales, con calzadas secas, el grado de desgaste de un neumático es irrelevante en el frenado, pues siempre roza con la calzada la misma superficie de goma, con la misma composición. En estas condiciones, inclusive un neumático liso, ya sin dibujos, frena exactamente igual que uno casi sin desgaste, siempre que no este exponiendo las telas, pues en ese caso sería otro el material que roza con la calzada. Este comportamiento está resumido en la segunda ley de Coulomb: la fuerza de roce no depende del área de contacto. Las demostraciones usuales que nos hacen los vendedores de neumáticos, doblando el dibujo para que admiremos su flexibilidad, carecen de sentido: las láminas salientes de goma no actúan como dedos que se aferran al asfalto. De hecho, los autos de carrera suelen usar neumáticos lisos, llamados *slicks* cuando las condiciones son favorables. Esto es cuando están seguros de que no va a llover. En efecto, los neumáticos tienen dibujos para mantener su contacto con la calzada cuando llueve, no porque mejoren la fricción neumático calzada. Cuando un neumático se apoya en la calzada mojada, tiene que apartar el agua de la zona de contacto antes de tocar el asfalto.

Para apartar el agua de la zona de contacto, el neumático tiene que apretar con una fuerza igual a la masa de agua por la aceleración que se le quiere imprimir. La masa de agua a apartar es proporcional al espesor de la capa y al ancho de la cubierta, y como hay que moverla una distancia del orden del ancho

de la cubierta en un tiempo inversamente proporcional a la velocidad del auto, la aceleración que hay que impartirle al agua es proporcional al cuadrado del ancho del neumático y al cuadrado de la velocidad del auto. El resultado es que la fuerza F necesaria para apartar el agua de la huella depende de la profundidad de la capa de agua, h , del *cuadrado* del ancho de la cubierta A , y del *cuadrado* de la velocidad del auto v ,

$$F \sim h \times A^2 \times v^2. \quad (1)$$

Pero la fuerza que aprieta el neumático contra la calzada esta limitada, es solo una cuarta parte del peso del auto, con la ayuda aerodinámica que pueda provenir de los alerones. Cuando la fuerza se hace insuficiente, el auto empieza a desplazarse sobre el agua, pues no la puede apartar por motivos puramente inerciales, que no tienen nada que ver con la fricción. Esto constituye el fenómeno de *hidroplaneo*. Va sin decir que, al perder el contacto con la calzada, el auto ya no es ni frenable ni manejable.

Para evitarlo se pueden atacar los distintos factores en la expresión de arriba: se puede reducir la profundidad de la capa de agua abovedando adecuadamente la calzada, rellenando los surcos que produce el transite, o prohibiendo los neumáticos con davos; se puede reducir la velocidad, la única medida inmediata que esta al alcance del conductor, y la mas efectiva; y finalmente se puede reducir el ancho del neumático. Esto último parece imposible, pues aumentaría la presión. Pero si se divide un neumático de ancho A en dos de ancho $A/2$, para mantener la presión, la fuerza inercial depende de $2 \times (A/2)^2 A^2/2$, es decir se ha dividido por dos.

Este efecto es el que buscan los dibujos en los neumáticos: imitan a una serie de neumáticos finos en paralelo, como si el neumático original se hubiera descompuesto en una serie de ruedas de bicicleta en paralelo, como una pila de platos. Como la derivación de los efectos inerciales esta muy simplificada, no es

de extrañarse que la forma de los dibujos también sea más complicada que una pila de ruedas de bicicleta, pero el principio es correcto. Así pues, los dibujos existen para presentar canales que dividan el ancho del neumático, de manera que no sea necesario apartar el agua todo el ancho de la cubierta, sino una distancia mucho menor, no hasta el borde exterior, sino solo hasta el próximo canal. El recurso funciona, pero a un canal se puede desviar agua solo hasta que se llena: si la capa de agua es demasiado honda, o los canales (dibujos) no son suficientemente profundos.

El grado de desgaste de un neumático expresa la profundidad de los dibujos en la zona central de su banda de rodadura. La ley prohíbe circular con neumáticos cuyos dibujos no alcancen una profundidad mínima, d_m , que depende del tipo de neumático. La vida útil de un neumático está determinada por el uso que gradualmente va desgastando su banda de rodadura, disminuyendo su espesor desde el valor inicial d_M hasta el mínimo permitido. El parámetro que da el gómero en su pericia, que no es más que una simple constatación, es el porcentaje de neumático que ya se ha gastado ("desgaste") o, alternativamente, que porcentaje queda por gastar ("vida útil"). Si la profundidad del dibujo que mide es d del desgaste D

$$D = \frac{d_M - d}{d_M - d_m} \times 100. \quad (2)$$

Y la vida útil es $100 - D$.

Este análisis muestra también que los dibujos importan solo cuando la calzada está mojada; sobre una calzada seca (sin lluvia, sin charcos), su presencia es irrelevante. Es verdad que el conducir con neumáticos lisos (que no muestren las telas) puede constituir una evidencia de una actitud negligente y de falta de prudencia, pero desde el punto de vista técnico y físico se ha de decir que los neumáticos gastados no habían contribuido.

2.4.3 El Derrape de los Neumáticos

Son diferentes los factores que pueden provocar que el vehículo derrape, por lo general un exceso de fuerzas provocadas por la aceleración, el frenado o el trazado de las curvas. La forma de salir de este tipo de situación comprometida dependerá de si conducimos un vehículo con tracción delantera o trasera.

El deslizamiento del vehículo está causado por la disminución de la adherencia de las ruedas al terreno. Esta falta o disminución de la adherencia puede haber sido provocada por distintos factores. Entre ellos cabe destacar el exceso de velocidad, que el suelo esté mojado o sucio, excesiva presión de inflado en los neumáticos, que éstos estén desgastados, la toma de curvas de forma incorrecta y con velocidad excesiva, etc.

Para evitar el deslizamiento es imprescindible, tener las ruedas en perfecto estado, con la presión de inflado adecuada al terreno sobre el que se conduce.

Tener en óptimas condiciones toda la mecánica del vehículo, y es muy importante estar muy atento a todos los cambios que se puedan producir en el terreno (agua, hielo, nieve, arena, obstáculos), con lo cual no nos cogerá desprevenidos y podremos anticipar la forma en que debemos reaccionar.

Cuando las ruedas patinan al pasar por un charco, se produce un fenómeno llamado aquaplaning. Esto sucede cuando las ruedas no pueden evacuar el agua, por lo que se forma una película líquida que se interpone entre el neumático y el asfalto impidiendo que el neumático esté en contacto con el suelo, provocando la pérdida de control del vehículo.

Si esto sucede en un tramo recto, bastará con sujetar con fuerza el volante y levantar suavemente el pie del acelerador, a la espera de que los neumáticos vuelvan a tener adherencia.

2.5 La reconstrucción “en reversa” de un accidente vial

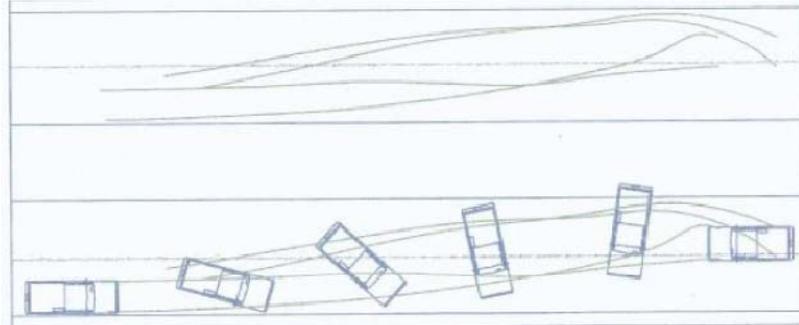
Si se considera el caso de un vehículo que circulando a una cierta velocidad, que se debe determinar, aplica los frenos y comienza a efectuar marcas de huellas sobre la calzada como lo muestran las Figuras del 1 al 5. Como se observa en las ilustraciones, el vehículo en cuestión, en el proceso de desaceleración no tiene una traslación pura; circunstancia esta que queda en manifiesto según las formas de las huellas de neumáticos.

En tal circunstancia una primitiva consideración surge al realizar una modelización considerando únicamente la traslación del centro de masa del vehículo. Sin embargo, una mejor aproximación del fenómeno debería contemplar, además de la traslación, la rotación que dicho vehículo realiza durante la transformación de su energía cinética.

Figura 5. Reconstrucción en reversa de un accidente según huellas



Figura 6. Se observa las diversas posiciones que el vehículo debió realizar para describir las huellas de las figuras anteriores donde se aprecia la combinación de su trabajo en traslación y rotación, dentro del proceso de frenado.



El trabajo durante la traslación está vinculado con el rozamiento durante el desplazamiento longitudinal del centro de masa del vehículo, el cual se convierte en calor. En tanto que la energía de rotación tiene que ver con la energía necesaria para que el vehículo rote alrededor de un punto que puede ser o no coincidente con el centro de masa del vehículo:

$$E_{c(\text{inicial})} = W_r + E_r \quad (1)$$

Donde:

$E_{c(\text{inicial})}$: es la energía cinética del vehículo al inicio de la huella.

W_r : es trabajo de rozamiento consumido en la traslación del centro de masa.

E_r : es la energía de rotación del vehículo.

La ecuación 1 del Principio de la Conservación de la Energía podemos escribirla de la siguiente manera:

$$E_{c(\text{inicial})} = (\mu \cdot g \cdot M) \cdot x + \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2$$

$$\frac{1}{2} \cdot M \cdot v_0^2 = (\mu \cdot g \cdot M) \cdot x + \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2 \quad (2)$$

M: es la masa total del vehículo.

v₀: es la velocidad del vehículo al inicio de las huellas.

μ: es el coeficiente de fricción neumático-superficie elegido de tabla.

x: es la distancia o extensión de las huellas de los neumáticos.

g: es la aceleración de la gravedad.

I: es el momento de inercia del vehículo respecto al centro de rotación.

ω: es la velocidad angular inicial en el punto de inicio de la rotación del vehículo.

De la ecuación 2 despejamos “v₀”:

$$v_0 = \sqrt{2 \cdot \mu \cdot g \cdot x + \frac{I}{M} \cdot \omega^2} \quad (3)$$

Se puede observar que en la resolución de casos de roto traslación, las modelizaciones tradicionales del fenómeno (mecánica del punto) solo contemplan el primer término del radicando de la ecuación. Esto significa, que de tener solución posible dicha ecuación, el cómputo aproximaría a valores mayores de “V₀” de los verificados por la ecuación $(2 \cdot \mu \cdot g \cdot x)^{1/2}$ correspondiente a la consideración única de traslación.-

Para la ecuación, el problema reside ahora en conocer los valores de “I” momento de inercia del vehículo y “ω”, velocidad angular inicial.-

Analicemos primeramente las posibilidades de conocer el valor de la velocidad angular “ω”. Los fenómenos de traslación y rotación se originan prácticamente en forma simultánea, por lo que el tiempo que transcurre en ir el vehículo desde la posición inicial hasta el extremo de la huella es el mismo en que experimenta la rotación.

Para la traslación, sin importar el valor de la velocidad del vehículo en el inicio de la huella, el espacio “x” que el centro de masa del cuerpo recorre durante la roto traslación, se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$x = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 \quad (4)$$

Luego el valor de la deceleración “a”, en nuestro caso responde a la deceleración producto de la fricción, por lo tanto podemos considerar:

$$a = \mu \cdot g \quad (5)$$

Reemplazando el valor de “a” en la ecuación y despejando el tiempo “t”, tendremos:

$$t = \sqrt{\frac{2 \cdot x}{\mu \cdot g}} \quad (6)$$

En este mismo tiempo “t” que sucede la traslación, el vehículo experimenta una rotación “θ” que podemos expresarla con la siguiente ecuación:

$$\theta = \frac{1}{2} \cdot \alpha \cdot t^2 \quad (7)$$

de donde el valor de la deceleración angular “α” es:

$$\alpha = \frac{2 \cdot \theta}{t^2} \quad (9)$$

Reemplazando t y α , tendremos:

$$\alpha = \frac{2 \cdot \theta}{\left(\sqrt{\frac{2 \cdot x}{\mu \cdot g}}\right)^2} = \frac{2 \cdot \theta}{\left(\frac{2 \cdot x}{\mu \cdot g}\right)} = \frac{\theta \cdot \mu \cdot g}{x} \quad (10)$$

La ecuación 10 vincula el valor de la deceleración angular del vehículo en su rotación, con el desplazamiento angular, la distancia de traslación y las características de adherencia del neumático-superficie.

Por ser la velocidad angular final es cero, la velocidad angular inicial puede ser computada con la siguiente expresión:

$$\omega^2 = 2 \cdot \alpha \cdot \theta$$

$$\omega = \sqrt{2 \cdot \alpha \cdot \theta} \quad (11)$$

Reemplazando ω en α

$$\omega = \sqrt{\frac{2 \cdot \theta^2 \cdot \mu \cdot g}{x}} \quad (12)$$

Con lo que queda determinado el valor de la velocidad angular inicial “ ω ” en función de parámetros conocidos

3. LAS CONSECUENCIAS FÍSICAS EN UN ACCIDENTE VIAL

3.1 La masa del vehículo

En lo que sigue se supone que el automóvil tiene una masa total M , que a los efectos de la modelización propuesta, se considera constituida por una masa m , propia del vehículo, y una carga transportada q , tal que se puede establecer las siguientes relaciones:

$$M = m + q \text{ y } r = M/m.$$

De acuerdo a este planteamiento, la porción deformada es una fracción variable de la masa propia m del automóvil, progresiva en el tiempo. Considerando una *unidad estructural* al sector que resulta afectado por la deformación (por ejemplo el volumen encerrado por el capot o por el baúl, en el caso del choque trasero, se puede definir la relación $m_d = m D(t)$, donde $D(t)$ es una función del tiempo.

$$m_n = m [1-D(t)]$$

Figura 7. Deformación de un vehículo al experimentar una colisión

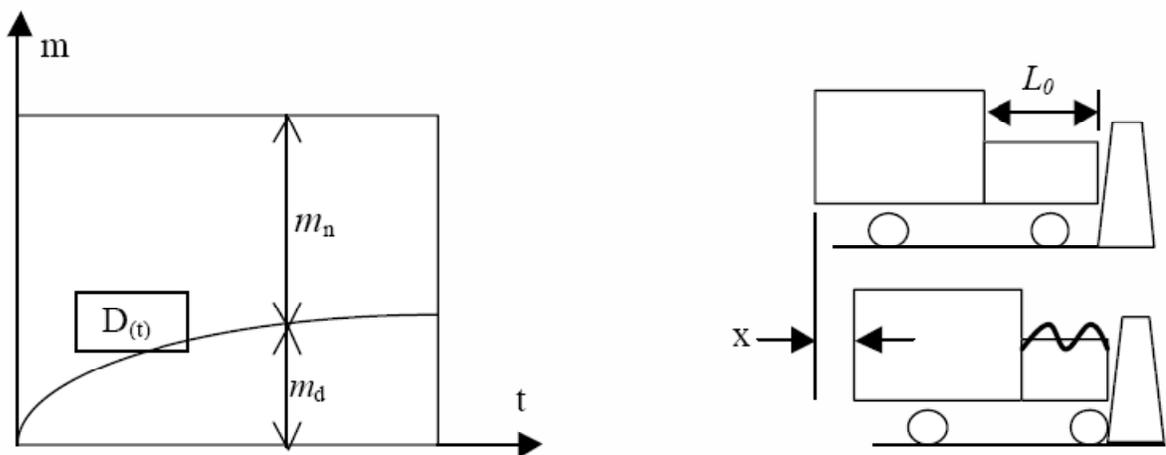


Figura 1

Antes del choque, la unidad estructural que resultará deformada parcial o totalmente, tiene una longitud inicial L_0 , y su masa es una fracción f de la masa total m . El acortamiento de la masa deformada es igual al desplazamiento $x(t)$ de la porción no deformada, de manera tal que se puede escribir la función $D(t) = (f/L_0) x(t)$, de donde se obtiene la ecuación de la masa no deformada:

$$m_n = m [1 - D(t)] = m [1 - (f/L_0) x(t)]$$

y la masa total expresada como una función del tiempo resultará:

$$M(t) = m [1 - (f/L_0) x(t)] + q$$

Donde operando resultará finalmente:

$$M(t) = m [r - (f/L_0) x(t)] [1]$$

Se asume como nula, la velocidad de la masa deformada durante la colisión. Esta es una hipótesis muy aproximada a la realidad, pues en la primer fase del choque, y mientras tiene lugar el crecimiento de la cantidad de la masa deformada, el desplazamiento del centro de masa de la misma en la dirección contraria al movimiento es despreciable. Análogamente se asume que la posición del centro de masa de la masa no deformada del vehículo, no varía durante la colisión.

A los efectos del modelo, la carga transportada q se mantiene solidaria con la porción intacta del vehículo durante la colisión.

3.2 La velocidad del vehículo

Cuando dos cuerpos en movimiento colisionan entre si, las consecuencias del impacto están en directa relación con la energía cinética que afecta a cada uno de ellos.

En física se conceptúa la energía cinética (E_c) como la propiedad que poseen los cuerpos en movimiento de producir trabajo (T) y se expresa según la fórmula:

$$E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2.$$

Autores de prestigio internacional como lo son Armando Beaux (Estudio y Realización de Levantamiento de los Lugares de Accidentes de Tráfico) y Charles O'hara y James Oesterburg (An Introduction to Criminalistics), coinciden en expresar que en la colisión de vehículos, la energía cinética debe ser totalmente transformada para que los cuerpos alcancen el estado de reposo (detenidos).

En estos casos, los factores que intervienen en la transformación de la E_c , son: La acción de frenado previo a la colisión, con o sin presencia de huellas de frenado, arrastre o derrape; trabajo mecánico necesario para producir las deformaciones plásticas de las carrocerías de los móviles participantes en el evento; transformación y posterior disipación energética en forma de calor y sonido producidos en el momento del impacto y el desplazamiento post-impacto de los rodados hasta su detención final, considerándose particularmente las direcciones, sentidos y formas de desplazamiento.

De todo lo expuesto se desprende que la mayoría de los datos necesarios para arribar a conclusiones fehacientes surgirán de una minuciosa y oportuna inspección ocular del lugar del hecho.

No obstante daremos algunos ejemplos de los cálculos utilizados comúnmente para estos casos, todo ello partiendo de la base, como ya se expresara que, todo vehículo en movimiento se encuentra afectado de Energía Cinética (E_c), directamente proporcional a su masa y a la velocidad de circulación, según la fórmula: $E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2$.

Para alcanzar el estado de reposo (detenido) el vehículo debe transformar totalmente esa E_c ($E_c = 0$), siendo las formas de transformación las siguientes:

- a) Frenado previo a la colisión, lo que se calcula teniendo en cuenta la distancia existente desde el punto donde el conductor del rodado comenzó la acción de frenado, hasta el punto de impacto o aquel en que la acción de frenado haya cesado, lo que se caracteriza generalmente por la existencia de las llamadas "huellas de frenado", ocasionadas por los neumáticos sobre el pavimento. Para ello se aplica la siguiente fórmula:

$$V = \sqrt{2 \times g \times \mu \times d}$$

Donde:

V = Velocidad reducida (desaceleración) durante el proceso de frenado.

g = Aceleración de la gravedad = 9,81 m./seg².

μ = Coeficiente de adherencia entre el neumático y la calzada, el que varía con el estado de las cubiertas y el tipo de suelo, naturaleza y estado de la calzada. Por ej., para hormigón seco y limpio y neumáticos en buen estado $\mu = 0,8$.

d = Longitud de la huella de frenado en metros.

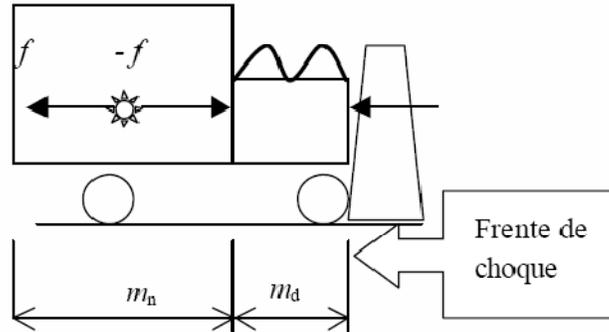
- b) Traslaciones post-impacto del rodado: Se refiere a los desplazamientos realizados por el rodado luego de producirse el desprendimiento (alejamiento) de ambas carrocerías, después del choque. La fórmula que se aplica es la misma que en el caso anterior, adoptándose el valor del coeficiente de adherencia (μ) correspondiente a las características del lugar, de los neumáticos y al tipo de desplazamiento producido (con acción de frenado, con bloqueo de ruedas, con arrastre lateral o derrape, con deslizamiento de partes metálicas, por rodado libre, etc.).

- c) Deformaciones plásticas de la carrocería del rodado: El punto de mayor discusión entre los técnicos es la evaluación de los daños y el cálculo de la E_c transformada en trabajo de deformación. Hoy existen trabajos desarrollados que permiten calcular la energía cinética transformada en trabajo de deformación.
- d) Distancia de proyección del cuerpo de la víctima en atropellamientos peatonales: En algunos casos de atropellamiento peatonal o colisión contra ciclistas puede determinarse la velocidad de impacto del vehículo embístete por la distancia de proyección del cuerpo de la víctima, utilizando para ello las fórmulas de "Trabajo", correspondiente a las ciencias físicas.

3.3 La energía del vehículo

Se asume que las fuerzas generadas entre los vehículos que toman contacto en la colisión (o entre un vehículo y una barrera rígida), iguales y de sentido contrario-, se aplican normales a un solo plano: el plano de contacto que denominamos *frente de choque*. En cada uno de los vehículos en colisión se puede agregar un sistema nulo $[f, -f]$, aplicado en el centro de masa. Se asume, que durante la colisión, la posición del centro de masa de cada uno de los vehículos no varía. De esta manera se puede concebir al vehículo que colisiona como un sólido compuesto por una *zona deformable* durante el choque, sometida a un esfuerzo de compresión f , y una segunda zona del mismo, la porción no deformada, bajo la acción de una fuerza f que induce la desaceleración de dicha masa no deformada.

Figura 8. Energía disipada de un vehículo durante una colisión



$$F(t) = M(t) A(t) - m (f/L0) [V(t)]^2 [2]$$

La energía cinética en el instante inicial de la colisión, en que el vehículo tiene la velocidad de impacto v_i , es $E_i = (m + q)/2 v_i^2$. Dicha energía disminuye a lo largo de la colisión, como consecuencia de la pérdida de velocidad v_i . Durante el transcurso de dicha colisión, el esfuerzo de compresión desarrolla un trabajo mecánico de deformación, debido a la compresión $x(t)$ experimentada en la zona deformada

3.4 Medición y graficación en la escena de un accidente vial

La escena del accidente debe ser estudiada metódica y detenidamente, para ello es fundamental realizar su inspección y toma de datos con la mayor precisión y diligencia posible, dado que el paso del tiempo juega en contra de la permanencia de determinados elementos y signos. Es necesario registrar de forma prioritaria aquellos restos y evidencias, como por ejemplo huellas, marcas, posiciones de los vehículos, etc., que presentan un mayor peligro de desaparecer o aquellos que puedan ser contaminados. Posteriormente se podrá tomar nota de aquellos otros aspectos que puedan perdurar horas o incluso días. Aún cuando

pueda parecer obvio, en la toma de datos del lugar del accidente es conveniente no confiar en nuestra memoria y realizar un conveniente registro de los distintos aspectos de la vía y de su entorno mediante anotaciones en formularios y modelos de recogida de datos, levantamientos de croquis, fotografías, incluso haciendo uso de soporte videográfico.

Aquellos primeros indicios que es necesario registrar por presentar un mayor peligro de desaparición serían:

. Las condiciones de visibilidad, de iluminación y meteorológicas, así como el estado de la superficie de la calzada por la incidencia de factores atmosféricos o por la existencia coyuntural de materias deslizantes. Un registro adecuado de todos estos elementos nos permitirá estudiar la posible influencia de cada una de estos factores en el accidente, bien por la existencia de elementos que restrinjan la visibilidad, (humo, polvo en suspensión, etc.); accidentes diurnos en los que se haya podido producir deslumbramientos debidos a la posición del sol o por reflejos, accidentes en horarios de menor iluminación diurna y accidentes nocturnos en vías iluminadas o carentes de cualquier tipo de iluminación. La inspección del lugar en relación con algunos de estos elementos habrá que realizarla en un corto espacio de tiempo, dado que sus condiciones podrían variar en pocos minutos, o bien, si ello no fuera posible, habría que volver al lugar del accidente en los próximos días y a una hora similar a la que se produjo el accidente, por ejemplo en los accidentes en los que se haya podido producir deslumbramientos por el sol.

. Condiciones del tráfico, es decir, intensidad, densidad, tipos de vehículos que hacen uso de dicha vía etc.

. La existencia de marcas de neumáticos o de otras partes del vehículo, por rodadura libre o por deslizamientos, que nos podrá permitir determinar las posibles trayectorias de los vehículos, antes, durante y después del accidente e incluso nos podría permitir realizar cálculos de velocidad en función de las características de dichas marcas.

. La localización y características de restos de los vehículos, tanto por rotura de elementos, desprendimientos de piezas, restos de materiales desprendidos de los bajos de los vehículos o desprendimientos de líquidos, que nos podría permitir localizar el lugar donde los vehículos contactaron.

. Dentro de esta misma categoría, la señalización y otros elementos que se encuentren en la vía de forma provisional.

Aquellos otros elementos fijos o perdurables, entre los que se incluyen:

- La localización geográfica del lugar del accidente, vía urbana o interurbana, nomenclatura o nombre de la vía y referencia al punto kilométrico o al número de la edificación más próxima, en caso de vías urbanas.
- Datos sobre la titularidad de la vía.
- Estructura geométrica de la vía, tanto en planta como en alzado, longitudinal y transversalmente, con mediciones precisas de anchura de calzada, carriles, medianas, aceras, arcenes, rasantes, desniveles, cambios de rasante, bombeo de la calzada, distancias de visibilidad, etc. Configuración de la vía, existencia de tramos rectos, tramos curvos y curvas de acuerdo, tipos de intersecciones a nivel. Régimen de circulación. Todos estos datos tienen una importancia capital dado que es el escenario físico en el que se produce el accidente.

- Descripción de los márgenes de la vía, uso del suelo colindante como la existencia de edificaciones, explanaciones, obras, elementos de contención, taludes, cunetas, etc.
- Tipo y estado del pavimento y las posibles modificaciones que se hayan producido en sus características y la existencia de marcas perdurables producidas en el accidente.
- Existencia de elementos de drenaje y de desagüe, etc. Accidentes en la calzada, bien en su estructura o en su trazado, existencia de baches, badenes, lomos, estrechamientos, reducciones de altura. Posible existencia de obstáculos en la calzada por depósitos de materiales o por obras, etc. Así como las características técnicas de la superficie, es decir, coeficientes de fricción y adherencia.
- Finalmente descripción de la señalización y localización exacta, así como cualquier otro aspecto que forme parte de la dotación viaria.

3.5 Medición experimental de frenadas

El dato más importante cuando se intenta reconstruir un accidente vial son las marcas de neumáticos. Vale la pena discutir un poco sobre la física de las frenadas, porque sobre este tema aparecen algunos razonamientos y expectativas incorrectos, de gran incidencia por lo comunes que son esta clase de casos. Estas marcas son producidas por frenadas o derrapes. La mayoría y seguramente las más visibles, son marcas negras, que generalmente se atribuyen a goma quemada, aunque sobre asfalto lo que realmente se ha derretido es el bitumen que liga el pavimento, si el croquis policial de un accidente muestra marcas de neumáticos, es probable que se pueda reconstruir satisfactoriamente, estas

marcas ofrecen la pista más sustancial al momento de determinar que ocurrió, la razón principal es que mientras se dispone de información final del accidente, las marcas dan información parcial de los estados intermedios por los cuales paso el proceso. Alcanza con la marca de un neumático, bien interpretada, para determinar donde estuvo un auto en una dada fase del choque, y donde no estuvo, lo que a veces es más importante.

La huella brinda mucha mas información que una simple sucesión de posiciones, en efecto el auto dibuja su huella la graba con procesos que demanda mucha energía, el conocimiento de estos procesos permiten asignar tiempos a cada punto de esa huella.

El proceso mas común que deja huellas de neumáticos sobre una calzada es el del frenado, otro proceso muy diferente que deja marca que las personas suelen confundir con las frenadas es el derrape causado por neumáticos que arrastran lateralmente por la calzada en la dirección del eje de las ruedas, para diferenciar las dos marcas hay que tener en cuenta que estas nunca son marcas negras homogéneas, sino que presenta detalles, estriaciones, en estas frenadas, estas estriaciones son longitudinales paralelas al eje de la marca, mientras que en los derrapes son oblicuas forman un ángulo con el.

Las marcas oscuras son producidas en general por neumáticos bloqueados, un auto puede frenar según el árbitro de conductor hasta un cierto limite, este limite se alcanza cuando los frenos detienen o bloquea la rotación de la rueda. A partir de ese punto la rueda es un trozo de goma que se desliza sin rotas sobre la calzada y no puede frenar más de lo que esta haciendo.

3.6 La interpretación estadística de la evidencia

El aspecto más importante de la reconstrucción es quizás, la posibilidad que este medio brinda para contemplar la dinámica de hecho, es decir apreciar con claridad los movimientos de cada uno de los objetos y personas que en el hecho han intervenido.

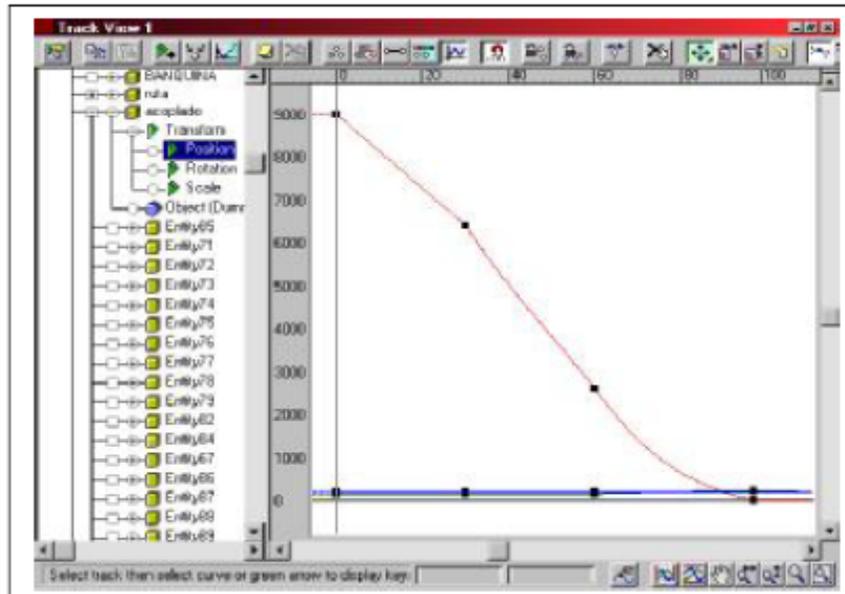
Pero siendo la dinámica un aspecto netamente técnico y físico para valorar, este solo es posible ser relevado desde un previo cálculo dinámico y cinemático del o de los cuerpos que estuvieron en movimiento durante la perpetuación del hecho. Por lo que resulta que cualquier animación de una Reconstrucción, indefectiblemente debe brindar la posibilidad de interpretar el estudio dinámico de los cuerpos en movimiento.

Este último aspecto indicado, constituye filtro de los softwares que van a ser empleados para la reconstrucción y animación, debido justamente a que no todos los productos permiten siquiera realizar un estudio dinámico - físico de los cuerpos que se van representar.

Cabe añadir también que los parámetros de cómo se mueven los cuerpos, ya sean estos movimientos variado o no, resulta de máxima importancia en el momento de la animación de los elementos dibujados en escena, pues si lo que se quiere es reproducir virtualmente el hecho, necesariamente este debe confeccionárselo con la realidad del movimiento con que fue desarrollado. Cualquier otra reproducción acorde a un movimiento de tipo diferente al de la realidad inferida conduce a un error en la apreciación de los hechos.

3.7 La interpretación de datos

Figura 9. Ventana general de un software donde se observa la curva del espacio en función del tiempo (fotogramas), para uno de los elementos animados



Esta curva brinda la posibilidad de poder estudiar el tipo de movimiento de cada uno de los cuerpos que son animados en la escena. Los puntos negros representan los "keyframes", fotogramas claves que permiten realizar cualquier modificación de los elementos que componen la totalidad de la animación.

La curva posición-tiempo, que se observa en la figura, es de suma importancia a la hora de evaluar la veracidad y coherencia. Al tratarse de un móvil, la curva explica el comportamiento del cuerpo a lo largo de un tiempo y se puede observar que este representa el movimiento rectilíneo del objeto dibujado en tres modalidades, dos movimientos rectilíneos con velocidades distintas y la última parte, un movimiento variado. Dentro del contexto del accidente, representar objetos que solamente se mueven con movimiento rectilíneo uniforme, sería un error y con ello la reconstrucción conllevaría a falsas interpretaciones, a la hora de elección de un aplicación informática habrá que tener presente entonces esta cualidad indispensable para la construcción de una representación con coherencia.

4. LAS HERRAMIENTAS DE LA ACCIDENTOLOGÍA VIAL

4.1 Consideración en 3D en un accidente vial

Los modelos lineales aplicados para la valoración de la energía absorbida en la deformación de un vehículo que colisiona contra barrera rígida, presentan consideraciones comunes y un mismo origen estableciendo como parte del conjunto de hipótesis que fundamentan a estos, que la deformación medida tenga una altura constante. La energía disipada en la deformación es estimada desde la valoración del área del daño o área deformada del vehículo, lo que implica considerar al frente del vehículo como un sólido con forma de un paralelepípedo y el vector deformación, con sus componentes de ancho y largo (profundidad).

En los casos de deformaciones irregulares, la estimación de la energía disipada depende de la valoración de ésta área irregular bajo la consideración siempre de que la altura del daño es la misma en cada sector del daño. Sin embargo el diseño de los vehículos tipo automóvil, bajo la exigencia de un mejor rendimiento aerodinámico, a modificado las dimensiones de sus frentes haciéndolas menos elevados en el sector del para golpe. En tales casos, cualquier deformación regular del frente del vehículo, definirá una altura mayor del daño cuanto mayor sea la penetración o profundidad del mismo.

Surge el interés de estimar la energía disipada a partir de un *volumen regular de deformación*, y comparar esta nueva estimación en 3D con la inferida por los modelos tradicionales en 2D, manteniendo las demás consideraciones e hipótesis de los modelos lineales. El frente del vehículo es considerado ahora como un *prisma* y una tercera variable (*altura*) es introducida en la estimación de la energía disipada. A diferencia de otras metodologías, son seleccionados cinco ensayos* de colisión contra barrera rígida de cinco vehículos distintos que colisionan a distintas velocidades. Se construyen los diferentes coeficientes de rigidez para dos modelos tradicionales en 2D y los nuevos coeficientes en 3D.

*Los cinco ensayos seleccionados, corresponden a los ensayos No. 206, 373, 509, 1118 y 1216 del U.S. Department of Transportation National Highway Traffic Safety Administration

Se estiman los E.B.S. (*velocidad equivalente a barrera*) para las cinco medidas de deformación en cada modelo y se los compara con los valores de velocidad de impacto en cada ensayo.

Al hacer varios ensayos prácticos con colisiones que afectan el total del frente del vehículo, distancia de solapamiento se hace igual a cero, ángulo de impacto se hace igual a cero y contra barrera rígida plana. Sin embargo a diferencia de procedimientos realizados, los cinco ensayos someten a cinco vehículos distintos sin repeticiones de colisión. Con relación al ensayo repetitivo, el cual se realiza sobre un vehículo que es impactado seis veces, solo el primer impacto es considerado en este análisis. Se señala el sistema de referencias adoptado cuyo centro del triedro coincide con el piso del extremo delantero derecho del vehículo. El frente del vehículo considerado como un prisma, presenta el capot del mismo como plano superior limitante del prisma paralelo al eje x. Este plano del capot del queda definido por la siguiente función

$$z(y)=52\text{cm} +1/50y$$

La ecuación, es estimada por ajuste de curva a partir de distintos valores de profundidad “y” en [cm] y altura “z” en [cm], medidas del vehículo.

Respecto a la profundidad promedio de la deformación de cada vehículo, se estima la altura del daño mediante la ecuación anteriormente planteada.

La siguiente tabla, muestra los distintos valores característicos de cada ensayo, definiéndose en las dos últimas columnas el valor promedio de la profundidad del daño y su altura correspondiente.



Tabla VII. Valores de ensayo según la profundidad y altura del daño

Vel. Impacto	Eng. Inicial	Masa	x	y	z
453 cm/s	128539838 (kg.cm ²)/s ²	1254 kg	170 cm	6 cm	54 cm
1306 cm/s	786615355 (kg.cm ²)/s ²	923 kg	161 cm	38 cm	60 cm
1319 cm/s	1114197531 (kg.cm ²)/s ²	1280 kg	163 cm	45 cm	61 cm
1350 cm/s	1002375000 (kg.cm ²)/s ²	1100kg	167 cm	46 cm	61 cm
1569 cm/s	1447104070 (kg.cm ²)/s ²	1175 kg	167 cm	58 cm	64 cm

Se construye la función principal de velocidad de impacto y la deformación promedio residual mediante ajuste de los datos volcados en la tabla anterior.

$$v(y) = b_0 + b_1 y$$

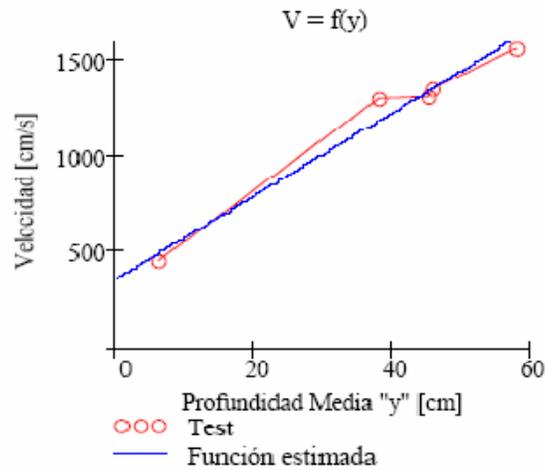
De donde:

$$b_0 = 359 \text{ cm/s}$$

$$b_1 = 22 \text{ s}$$

La ecuación es definida con un grado de correlación de 0.9.

Figura10. Gráfica de energía inicial y deformación.



Se construye seguidamente la ecuación que relaciona la energía inicial y la deformación media residual, mediante la siguiente relación:

$$\sqrt{\frac{2 \cdot E_0}{x}} = f(y)$$

Donde:

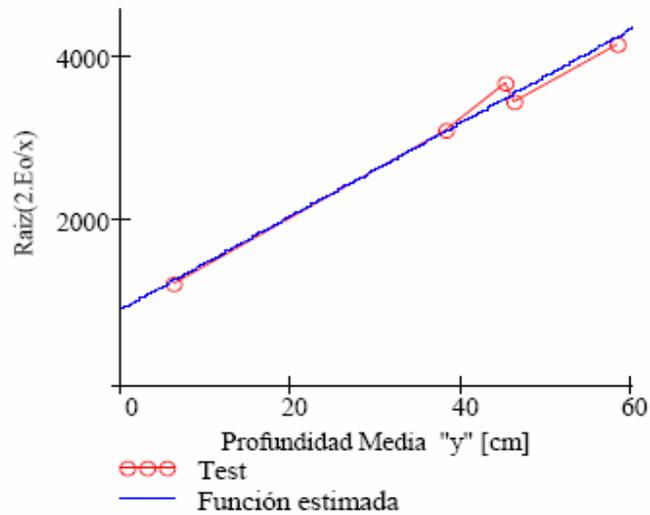
E_0 : es la energía inicial de cada ensayo en [kg.cm²/s²].

x : el ancho de cada vehículo coincidente con el ancho de la deformación según la Tabla de velocidad de impacto, en [cm].

y : la profundidad media del daños según tabla en [cm].

La función así hallada se muestra en la siguiente Figura, con un grado de correlación lineal de 0.9.

Figura 11. Grafica de la función de energía con un grado de correlación 0.9



De donde:

$$d_0 = 293 \text{ [kg}^{0.5} \cdot \text{cm}^{0.5} / \text{s]}.$$

$$d_1 = 181 \text{ [kg}^{0.5} \cdot \text{cm}^{0.5} / (\text{s} \cdot \text{cm})].$$

La energía absorbida en la deformación, es estimada para dos modelos, según los coeficientes de las ecuaciones de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$E_d \approx \frac{M}{x} \int_0^x \int_0^Y (b_0 \cdot b_1 - b_1^2 \cdot y) dy dx + \frac{1}{2} \cdot M \cdot b_0^2$$

MODELO 1: Estima la energía absorbida considerando el área de deformación

$$E_d \approx \frac{x}{2} \cdot (d_0 + d_1 \cdot Y)^2$$

MODELO 2: Estima la energía absorbida considerando el área de deformación

En donde:

Ed: energía estimada en la deformación en [kg.cm²/s²].

M: masa promedio del vehículo en [kg].

x: ancho promedio total de la deformación coincidente con el ancho del vehículo en [cm].

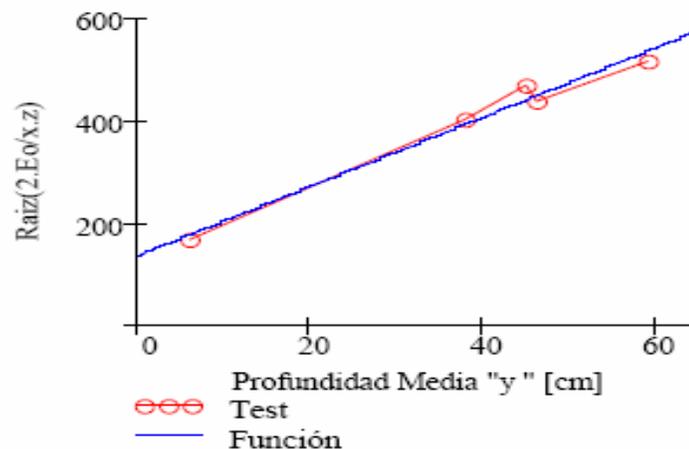
Y: profundidad media de la deformación en [cm].

Un nuevo diagrama de dispersión se construye considerando ahora la siguiente relación:

$$\sqrt{\frac{2 \cdot E_0}{x \cdot z}} \blacksquare f(y)$$

En donde “z” es la altura del daño estimada en [cm]. La función así hallada se muestra en la siguiente figura con un grado de correlación lineal de 0.9.

Figura 12. Gráfica de la energía absorbida considerando el área deformada



Finalmente, teniendo presente la ecuación $v(y) = b_0 + b_1 y$ y los coeficientes estimamos nuevamente la energía absorbida en la deformación mediante la siguiente expresión:

$$E_d = \frac{M \cdot Z}{2} \cdot (e_0 + e_1 \cdot Y)^2$$

MODELO 3: Estima la energía absorbida considerando un volumen regular de deformación.

$$E_d = \frac{M}{x \cdot z_0} \int_0^x \int_0^Y \int_0^{z(y)} (b_0 \cdot b_1 + b_1^2 \cdot y) dz dy dx + \frac{1}{2} \cdot M \cdot b_0^2$$

MODELO 4: Estima la energía absorbidas considerando un volumen regular de deformación, teniendo presente el promedio de las masas de los vehículos

Teniendo presente el promedio de las masas de los vehículos de los ensayos seleccionados, se calcula los E.B.S. (velocidad equivalente a cada barrera) para cada uno de los cuatro modelos. Las estimaciones de cada uno de los modelos con sus correspondientes desviaciones porcentuales respecto al valor de la velocidad de impacto de los ensayos, son:

Tabla VIII. Comparación de los modelos planteados

Modelo 1 [cm/s] [%]	Modelo 2 [cm/s] [%]	Modelo 3 [cm/s] [%]	Modelo 4 [cm/s] [%]
171 60	490 8	491 8	493 9
852 35	1165 11	1152 11	1232 6
1009 23	1325 0	1317 0	1403 6
1037 23	1357 0	1350 0	1419 5
1306 17	1626 4	1638 4	1723 10

Figura 13. Grafica de comparación de modelos según los resultados de velocidad.

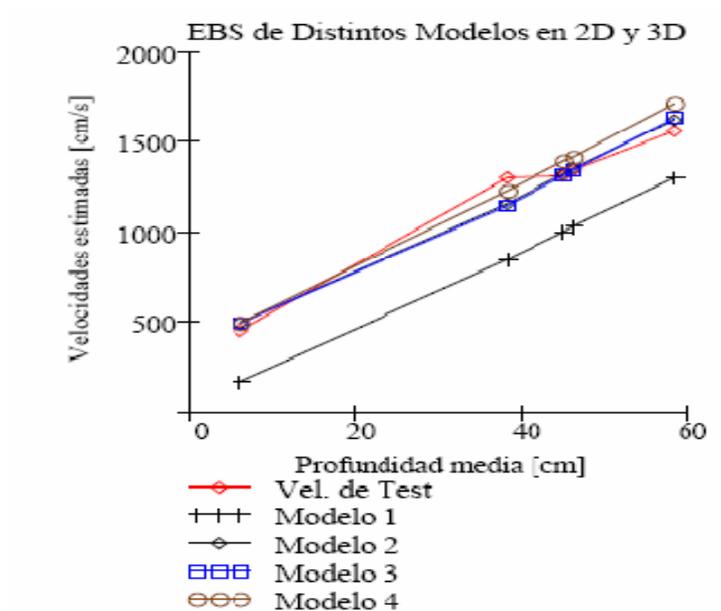


Figura 4

La figura anterior, muestra la proximidad de los distintos resultados de velocidad equivalente a barrera inferida mediante los cuatro modelos, respecto a los valores de velocidad de impacto de los ensayos seleccionados. Las velocidades E.B.S. de los cuatro modelos fueron inferidas utilizando la masa promedio de los cinco vehículos de ensayo. Las desviaciones porcentuales de los cuatro modelos disminuyen al realizar los cálculos con las masas correspondientes a cada vehículo de cada ensayo.

4.2 La técnica de Monte Carlo

La mayoría de las reconstrucciones de accidentes viales resultan en números (velocidades, distancias, ángulos) que están afectados de incerteza. Mientras que el cálculo de los valores numéricos en si es un problema técnico bien entendido por el profesional que lleva a cabo la reconstrucción, la estimación de la incerteza, es decir la fijación de las *cotas de error* de los valores finales, suele constituir un desafío aun para especialistas. En los informes periciales es común que estas cotas o no existan, o se basen más en observaciones empíricas del autor del cálculo que en bases cuantitativas firmes. Así en la práctica se fijan de manera implícita cotas demasiado pequeñas, y aparecen resultados que presentan tres o cuatro cifras significativas (cuando no son las doce que es capaz de mostrar la computadora); o demasiado grandes, lo que desmerece la calidad del trabajo y le resta confiabilidad a los ojos de los usuarios finales.

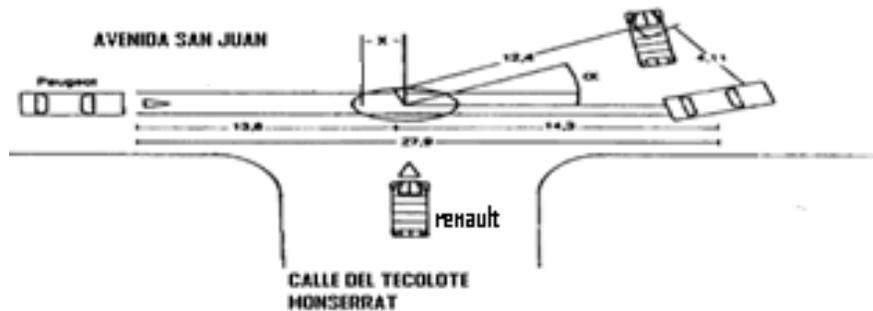
Un resultado final en una reconstrucción accidentológica se deriva, a través de argumentos científicos, de sucesos más simples que son medibles. Aun cuando la cadena de razonamientos científicos sea sana, el resultado final está afectado de un error que refleja las incertezas en las mediciones elementales. El método usual para estimar como los errores en mediciones parciales se traducen en el error de la magnitud final, se llama de *propagación de errores*. La esencia de este método es hacer un desarrollo de Taylor de la expresión matemática del resultado final en función de las magnitudes elementales, y quedarse con los términos de orden más bajo, considerando que los errores son pequeños. Las limitaciones prácticas de este método son múltiples: no siempre se tiene una expresión matemática cerrada de la magnitud final en función de las otras; aun si se la tiene no necesariamente es simple o posible un desarrollo de Taylor; finalmente los errores reales no tienen porque ser pequeños, En los últimos años se han desarrollado, especialmente en la Física de partículas elementales, métodos que permiten estudiar *experimentalmente* los intervalos de confiabilidad de un resultado. Estos métodos se llaman *de Monte Carlo*. Debido a la cantidad

de cómputo que demandan su aplicación esta se limita a centros de investigación; afortunadamente el uso generalizado de computadoras personales permite que hoy en día se puedan aplicar sin dificultades a los problemas accidento lógicos. En esta parte se explica la forma de hacerlo: como aplicar la técnica de Monte Carlo a la Accidentología con los programas en uso, así como los alcances y limitaciones de este procedimiento.

La Figura 14 ilustra las posiciones finales de dos autos luego de una colisión lateral en una intersección urbana. Un Peugeot 504 con una pareja joven abordo, embistió en el cruce un Renault manejado por una mujer joven, que no llevaba acompañantes, La "zona de impacto" que marca el croquis policial está dada por la mancha extendida de polvo fino y vidrios rotos; no se registraron marcas más definidas del impacto. La calzada es de asfalto en buenas condiciones, seco, limpio y frío. El Peugeot ha dejado marcas de frenada de 27,9 m de largo en total, mientras que el Renault no ha dejado marcas discernibles. Por lo que se sabe, ambos autos estaban en buenas condiciones mecánicas antes del accidente. No cabe duda de que el derecho de paso en la intersección le correspondía al Renault. La pregunta del juez fue ¿A qué velocidad circulaba el Peugeot antes del choque? La cadena de razonamientos que contesta esta pregunta es clara: el cálculo de la energía cinética que han disipado ambos autos por fricción luego del impacto permite hallar sus velocidades inmediatamente después de éste, mientras que la ley de conservación del *momentum* lineal en el choque asegura que todo el *momentum* lineal en el sentido de la avenida San Juan (horizontal en el gráfico de la Figura 5), aportó el Peugeot, excepto tal vez por una pequeña contribución debida a algún volantazo de último momento del Renault, que no consideraremos.

Finalmente, al adicionar apropiadamente la contribución del tramo de frenada pre impacto del Peugeot se obtiene su velocidad al comenzar a dejar marcas de frenada. Un croquis de las posiciones finales de ambos autos luego del choque. Las posiciones antes del choque son ilustrativas, representan solo las orientaciones de cada auto y no sus posiciones exactas.

Figura 14. Croquis de un accidente de tránsito.



En principio, solo hay que reemplazar los valores numéricos adecuados en la fórmula matemática que traduce lo dicho en palabras en el párrafo anterior para encontrar la velocidad del Peugeot v_p . Esta velocidad esta dada por:

$$v_p = 3.6 \sqrt{2g \left[\mu_{ES}(13.6 + x) + \left[\sqrt{\mu_P(14.3 - x)} + \frac{m_{ES}}{m_P} \frac{\sqrt{\mu_2(11.31 - x)}}{\sqrt{(11.31 - x)^2 + 4.93^2}} \right]^2 \right]}$$

Aquí g es la aceleración de la gravedad, m_p y m_{ies} son las masas de ambos autos, μ los coeficientes de fricción para cada auto, y x , la posición real del impacto en el sentido horizontal en el gráfico. Reemplazando valores en la Expresión se obtiene el valor de la velocidad del Peugeot, en kilometres por hora, cuando comenzó a dejar sus marcas de frenada, sin embargo, el resultado no es único, ya que intervienen diversas fuentes de error. La más aparente es la posición del impacto, que no está bien determinada a lo largo de la venida se ha marcado una zona posible. Por otro lado, los valores "adecuados" de magnitudes como las masas de los autos o los coeficientes de fricción neumáticos-asfalto son solo promedios, y es necesario considerar las fluctuaciones estadísticamente esperables alrededor de estos promedios. Las fuentes de incerteza nombradas son las más importantes, pero no las únicas: cabe esperar otras fuentes de error, pero ya de menor magnitud. Por ejemplo, las longitudes medidas en el lugar por la comisión policial seguramente adolecen de errores, aunque estén bien medidas. En el caso presente, la distancia entre los dos autos en sus posiciones finales es de 4.11 m; a nadie que haya trabajado experimentalmente le sorprendería que otra pareja de policías midiera 4.08m, o tal vez 4.15m, en exactamente la misma situación.

Las causas de estas diferencias son múltiples: los puntos de referencia están mal definidos, la tensión en la cinta métrica (que ya de por sí no es un instrumento de precisión) no es siempre la misma, al leer la escala siempre se aproxima y redondea. Estos errores, llamados *estadísticos*, son absolutamente inescapables, se mide en un laboratorio de física nuclear o en la escena de un accidente; en la segunda tienden a ser mayores. También puede ocurrir que las distancias no estén bien medidas, que se hayan cometido errores gruesos: la distancia entre los autos podría aparecer como 14.11m, o tal vez como 41,1m. Sobre la magnitud de esta clase de errores poco se puede decir. En general saltan a la vista al confeccionar un gráfico a escala, ya que tienden a situar a alguno de los autos en una posición claramente imposible. En este caso, los dos autos nunca podrían estar separados por 41 metros, si se cree en las otras medidas. Estos errores a menudo se generan en la transcripción de los valores del cuaderno de notas al croquis. Volviendo a los errores estadísticos, otra fuente de error menor podría ser la apreciación de que el lugar del accidente es plano, una estimación a ojo que muy probablemente sea cierta, dentro de tal vez un uno por ciento. Así podemos buscar algunas otras fuentes de error. Sin embargo, no encontraremos muchas, y todos estos factores tendrán errores probables del orden del uno por ciento o menores, mientras que los detallados antes son un orden de magnitud más importantes. Por lo tanto, y para simplificar, solo tendremos en cuenta las fuentes de error de más entidad, y se despreciarán las otras; su inclusión no cambiaría apreciablemente los resultados finales. Este análisis de la importancia comparativa de las distintas fuentes de incerteza depende críticamente del caso particular; es probable que en otro caso resultara distinto. Así pues, debe tomarse como una ilustración, y no como una receta a seguir.

Consideraremos aquí que los errores esperables en los resultados provienen de la indeterminación del punto de impacto en el sentido de la calle, y de las fluctuaciones en las masas de los dos vehículos y en los coeficientes de fricción asignados a la situación. Respecto a la posición transversal del punto de impacto, en el sentido de la calle del tecolote, suponemos que las huellas del Peugeot y los datos en el costado izquierdo del otro vehículo lo sitúan con precisión suficiente, ¿Cómo se reflejan estas fuentes de error en el resultado final? , ¿Cuál es la distribución que podemos esperar estadísticamente para los valores de la velocidad inicial del Peugeot, con base a lo que conocemos sobre las fluctuaciones en las magnitudes que entran en su determinación? La propagación de errores convencional no es una buena opción. Por un lado, la derivación no es una tarea que se pueda tomar a la ligera; además, no tenemos ninguna garantía de que se cumplan los requisitos que permiten truncar el desarrollo de Taylor en el primer orden.

Existe un método alternativo muy poderoso. En vez de *calcular* la propagación de errores en la expresión que se citó al inicio para la velocidad del Peugeot, se puede *generar* una cantidad de diferentes soluciones, cada una con valores distintos de los parámetros que pueden fluctuar. Estos valores distintos deben ser elegidos dentro de los límites impuestos por nuestro conocimiento del problema, es decir que deben ser todos perfectamente posibles. Como elegirlos dentro del rango posible es el problema: mientras que un fiscal tal vez preferiría los que conducen a valores altos de la velocidad del Peugeot, al abogado defensor se contrata para que busque y recomiende los que deban a las estimaciones más bajas posibles. Está probado que los seres humanos, por imparciales que nos sintamos, no podemos elegir los valores de manera confiable. La estadística resulta mucho mejor si se deja que el azar elija los valores, que los números usados sean *aleatorios*. Se empezó a usar el método de Monte Carlo a partir de 1944, cuando el diseño de la primera bomba

atómica, y otro problema no menos arduo, la investigación operativa necesaria para montar las grandes invasiones de la Segunda Guerra Mundial, mostraron la necesidad de estos métodos. Las enormes cantidades de números aleatorios que demandan fueron provistos por las nuevas computadoras.

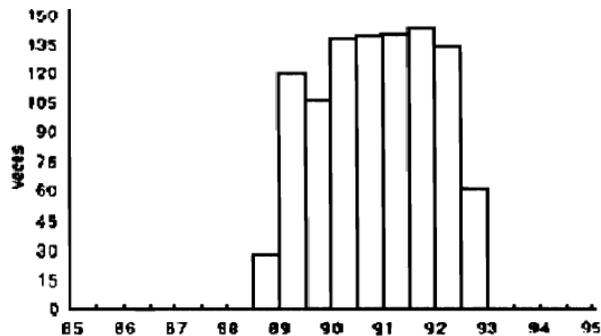
Parece un contrasentido que se generen números aleatorios con una computadora, la máquina más determinista creada por el hombre. Sin embargo, en todas ellas hay disponibles rutinas que proveen de números "seudo-aleatorios": aunque son producidos de manera totalmente determinista, y por lo tanto no son aleatorios en su origen, si lo pueden ser en la función, generalmente los generadores de números al azar que usan los idiomas de computación son del tipo *congruencial multiplicativo*. Los números que producen forman parte de una serie determinada por un algoritmo: si se le da a la máquina una determinada "semilla", a partir de ahí la serie producida será siempre la misma. Aunque los números son deterministas, su distribución le *parece totalmente* aleatoria al usuario. En el caso del Excel de Microsoft, una planilla de cálculos muy difundida entre usuarios de computadoras, un llamado a la función RAND entrega un número al azar distribuido uniformemente entre 0 y 1. Esto significa que la probabilidad de que el número caiga en un dado intervalo dentro del segmento 0, 1 es proporcional a la longitud del intervalo. Por ejemplo, estos diez números fueron producidos uno tras otro por la función RAND del Excel: 0.264, 0.484, 0.585, 0.814, 0.266, 0.460, 0.465, 0.731, 0.082, 0.798. La palabra inglesa para aleatorio es *random*, que originariamente significaba "al galope", o con poco cuidado; de ella vienen los nombres de estas funciones como RAND o RANDBETWEEN(a,b) (un número aleatorio entre *a* y *b*).

La limitada precisión que se requiere en la investigación accidentológica permite usar los generadores comerciales, sin que esto sea una recomendación para todos los que hay en existencia. Tal como ya se discutió, en la Expresión de V_p figuran por lo menos cinco parámetros cuyos valores aceptan variaciones al azar. El primero es la distancia x , la posición del impacto a lo largo de la avenida. Es apropiado dejarla variar en una zona de 3 m, de forma uniformemente distribuida. Eso quiere decir que x va de -1,5m a +1,5m, y que en términos de la función RAND esta variable aleatoria podría definirse por la instrucción:

$$x = \text{RAND()} * 3 - 1.5$$

El valor particular de esta variable determina los valores de las tres distancias del problema, así como el del ángulo. El histograma de 1000 valores de la velocidad inicial del Peugeot, obtenida de la Expresión V_p , con valores de x variando al azar según la expresión de arriba, mientras los otros parámetros permanecen fijos. Los valores extremos de la velocidad son 88,92 y 92,70 km/h, con un valor medio de 90,87 km/h. La desviación estándar (raíz cuadrada del segundo momento centrado) es $\sigma = 1,07$ km/h. Estos valores son propios de esta *realización*, de este conjunto particular de 1000 simulaciones, y otra corrida data otro conjunto de valores, con otros extremos, otro valor medio, y otra desviación estándar.

Figura 15. Histograma de 1000 valores de la velocidad inicial
Del Peugeot por la variación en el punto de impacto



Las masas de ambos autos también pueden variar, de forma independiente. Considerando los pesos de los autos en orden de marcha , mas los probables de sus ocupantes, las fluctuaciones aleatorias en las masas de los autos pueden modelarse por:

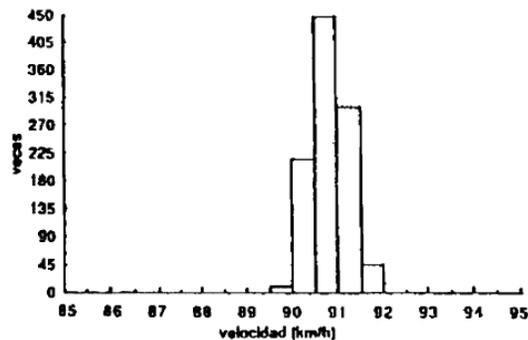
$$m_P = \text{RAND}() * 60 + 1267$$

$$m_{IES} = \text{RAND}() * 40 + 550$$

Esto es, consideramos que los autos pesan por lo menos 1267 Kg y 550 Kg, y a esos pesos se les puede sumar cualquier cosa entre cero y 60 o 40 kilos, según el auto. Las masas están expresadas en kilogramos, pero no se están usando unidades en la planilla de cálculos. En el caso de que se calcule con un programa como MathCad es conveniente usar las magnitudes con sus unidades, una costumbre que ayuda a evitar errores de cálculo al imponer la consistencia dimensional. De hecho, en este caso especial es irrelevante que unidades se usan para las masas, ya que en la Expresión aparece solo su cociente.

La siguiente figura muestra el histograma de 1000 valores de la velocidad variando solo estas masas. Los valores extremos son 89,93 y 91,77 km/h, con una media de 90,83 km/h y $\sigma = 0,40$ km/h. Este último valor deja en claro que los errores en las masas son de importancia menor que los provenientes del punto de impacto.

Figura 16. Histograma de 1000 valores de la velocidad inicial del Peugeot determinada por las masas de los autos.



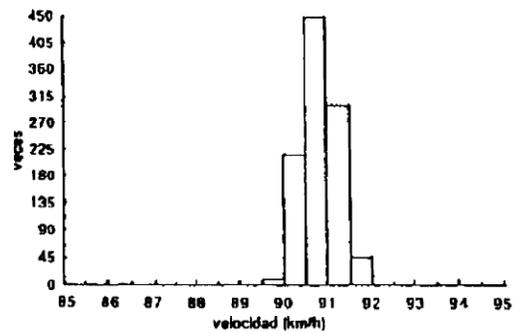
La variación en los coeficientes de fricción efectivos de cada auto reviste especial importancia. En las circunstancias del accidente un promedio razonable es 0.8, pero una variación en hasta 0.1 para arriba y abajo también es razonable:

$$\mu_p = \text{RAND}() * 0.2 + 0.7$$

$$\mu_{ES} = \text{RAND}() * 0.2 + 0.7$$

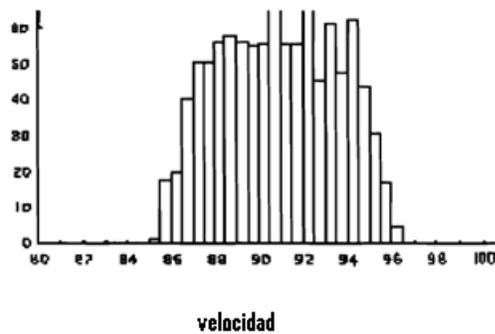
Nótese que, aunque las expresiones son iguales para ambos coeficientes de fricción, μ_p y μ_{ES} , los valores numéricos que toman son distintos e independientes, ya que la función RAND proporciona un número aleatorio distinto *cada* vez que se la invoca.

Figura 17. Histograma de 1000 valores de la velocidad inicial del Peugeot determinada por las masas de los autos



En el histograma de los 1000 valores determinados variando, μ y μ_{HS} con los otros parámetros quietos. Nótese el cambio de la escala horizontal, exigido por el rango mayor en la variación de la velocidad: sus valores extremos ahora son 85,44 y 96,21 km/h. El valor medio es de 90,88 km/h, y la desviación típica es de 2,69 km/h. Esta fuente de error es claramente la más importante.

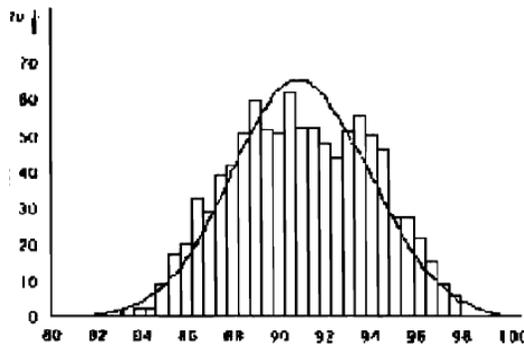
Figura 18. Histograma de 1000 valores de la velocidad inicial del Peugeot determinada por la variación en los coeficientes de fricción



Por último, la siguiente figura muestra el histograma de 1000 valores de la velocidad en los cuales han variado los cinco parámetros simultáneamente. Representa por lo tanto un resultado del modelo de variación total. Aquí los valores extremos son 83.71 y 98.21 km/h. El valor medio es 90.78 km/h, y $\sigma = 2.98$ km/h. Como era de esperarse, la distribución de velocidades en la cual varían todos los factores es más ruidosa, tiene mayor dispersión que cuando varían solo algunos de los parámetros. La desviación estándar total resulta ser muy aproximadamente la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las desviaciones

$$\sigma = 2.98 \approx \sqrt{1.07^2 + 0.40^2 + 2.69^2} = 2.92$$

Figura 19. Velocidad vrs. Veces, para un Histograma de 1000 valores
De velocidad inicial de peugeot determinada por las variación
Simultanea de los cinco parámetros considerados



La figura19, que muestra superpuesta al histograma una distribución gaussiana (o *normal*) con los parámetros adecuados ($N = 1000, \langle v \rangle = 90.78 \text{ km/h}, \sigma = 2.98 \text{ km/h}$), permite ver que el histograma ya ha adoptado una forma de campana típicamente gaussiana que no mostraban los anteriores. Esto es una consecuencia del efecto simultaneo de varias fuentes de fluctuación. Aunque ninguna de ellas obedece de por si una distribución gaussiana, su combinación hace que los valores extremos, que exigen valores extremos *simultaneos* en todas las variables, sean mucho menos probables que los moderados del centro. Este acampanamiento de la distribución de valores de la velocidad muestra el Teorema Central del Límite en acción: bajo condiciones muy generales (pero no universales), la combinación de numerosas fuentes de variación da origen a una distribución gaussiana de valores finales, satisfactoriamente a una gaussiana, no lo es exactamente, ya que su centro es demasiado bajo y sus alas demasiado altas. En efecto, el *coeficiente de curtosis* de esta distribución, definido como el cociente entre el momento de cuarto orden y el cuadrado del de segundo orden (ambos centrados) da 2, mientras que el de una auténtica distribución gaussiana

debería ser tres. La distribución de velocidades es *platicurtica* a pesar de ser de rango limitado. Esta propiedad proviene de que una de las fuentes de error, la variación en los coeficientes de fricción, predomina netamente sobre las otras. Como su forma es rectangular, la distribución final conserva un núcleo rectangular que las demás variaciones no han podido diluir, y confiere el carácter platicurtico a la distribución. En cuanto a la leve *asimetría* que muestra esta distribución, proviene de la raíz cuadrada que domina la Expresión de V_p , pero es tan pequeña, de 0.004, que no resulta relevante.

La simulación numérica brinda una manera rápida y muy poderosa de determinar rangos de variación, e inclusive formas de distribución, de resultados que pueden no ser accesibles a cálculos convencionales de propagación de errores. Ahora bien: hasta dónde se pueden creer estos resultados *experimentales*, para empezar, la computadora más poderosa del mundo no es mejor que quien la programe. Esto lo expresan los programadores en las siglas inglesas GIGO, que se podrían traducir como EBSA: si entra basura, sale basura. Si se parte de un modelo físico errado para la colisión, o no se estiman adecuadamente los rangos de variación de los parámetros, o se desprecia la variación en los parámetros realmente relevantes del problema, los resultados no valdrán nada. Pero estas reservas valen también para cualquier cálculo analítico tradicional. Hay que considerar los aspectos intrínsecos de la técnica de Monte Carlo.

El primer aspecto que debe cuidarse ya fue mencionado: los generadores de números aleatorios incluidos en los paquetes comerciales son pobres. Son adecuados para generar algunos miles de números, pero si se quiere algo más ambicioso se debe recurrir a rutinas mejores. El segundo aspecto es inherente al carácter estadístico del método: si cada realización nos provee de N valores

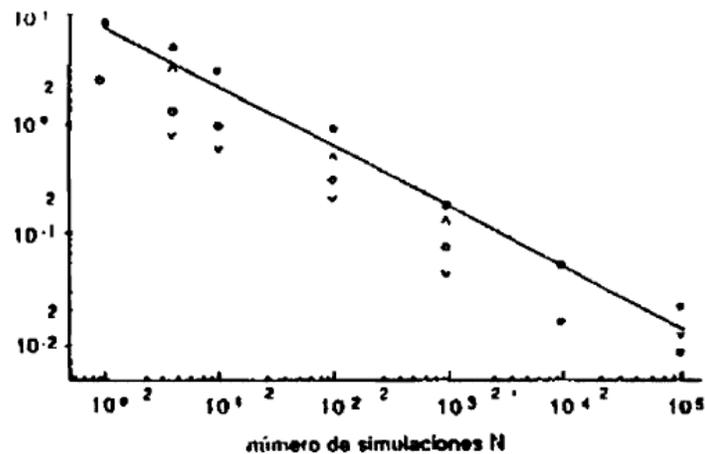
distintos de la velocidad del Peugeot, y estos N valores dan su propio valor medio y desviación, a cual realización habría que creerle?

La respuesta la da la estadística: las fluctuaciones en estos valores son inversamente proporcionales a la raíz cuadrada de N . Esto significa que al hacer simulaciones con N cada vez mayores, las cifras en los resultados que dependen del conjunto, sea el promedio o la desviación estándar, se van quedando fijas desde la izquierda. Es un problema de muestreo, presente en todas las encuestas: en cada simulación obtenemos solo un número finito, N , de respuestas, sean velocidades posibles o intenciones de voto. Si son pocas, los parámetros de interés (valores extremos, promedio y desviación estándar) están muy sujetos a las variaciones del azar. Al aumentar el tamaño de la muestra los caprichos del azar tienden a compensarse, y los parámetros calculados se toman más confiables.

Para mostrar esta tendencia, se hacen 10 realizaciones distintas, cada una de N simulaciones, y se ha repetido las simulaciones para N de 1 a 100000. Se ha calculado el promedio y la desviación estándar para cada realización. La Figura muestra, en escalas logarítmicas, la diferencia entre los *valores extremos* en cada grupo de 10 realizaciones, del promedio y de la desviación estándar, esta diferencia entre los valores extremos es la medida mas radical posible de las fluctuaciones, el rango total de variación, no el estadísticamente significativo que, por supuesto, es menor. La recta, dada por uno la sobre raíz cuadrada de N , sirve de comparación. Se ve claramente que los rangos de dispersión de ambas magnitudes son efectivamente inversamente proporcionales a la raíz de N , y que para aumentar en un factor 10 la precisión estadística de los resultados, es decir para asegurar una cifra decimal más, hay que calcular 100 veces más. Las técnicas de Monte Carlo son de fuerza bruta: se basan en el poder de calculo rápido y barato para reemplazar al mas artesanal y caro, pero no porque el calculo sea barato hay que derrocharlo, La pregunta en este caso

es ¿Qué precisión es *necesaria* en el problema que se está tratando? Técnicamente, se especifica la desviación típica de un resultado con una o dos cifras significativas, nunca con más. ¿Cuánto debe ser N para obtener esta precisión? La Figura 11 muestra que con $N = 100$ ya se ha fijado la primera cifra de 0, igual a 3, pues todos los valores caen cómodamente entre 2,8 y 3,3. Con $N = 10000$ ya sobra para tener dos cifras seguras, igual a 3,0, pues los valores caen entre 2,97 y 3,04. Las 1000 simulaciones usadas en las Figuras 2 a 5 parecen ser un buen número, y aseguran dos cifras significativas si se usa el criterio estadísticamente más realista de la dispersión cuadrática media, en vez del rango total de variación.

Figura 20. Rangos totales de variación del promedio y de la desviación típica y desviación típica del promedio y la desviación típica para 10 realizaciones de N simulaciones, la recta sirve de referencia.



Usar dos cifras significativas en la desviación estándar de un cálculo accidentológico (o de cualquier otro tipo) es hilar demasiado fino, y que basta con una. En efecto, usar dos cifras significativas en la desviación estándar equivale a asegurar que conocemos el efecto de los errores mejor que el 10%,

y eso parece exagerado. Así pues, es razonable decir que la desviación estándar de los resultados es 3 km/h. Consecuentemente, el promedio debería redondearse a este grado de precisión, con lo cual quedaría 91 km/h. Desde un punto de vista estadístico, entonces, se puede expresar el resultado diciendo que la velocidad del Peugeot al comenzar a dejar marcas de frenada era de 91 ± 3 km/h.

Estadísticamente, esto significa que el 68% de las soluciones están comprendidas dentro de este rango. Para propósitos forenses, el 32% que queda afuera es demasiado (en realidad, lo que puede preocupar a la defensa, o al perito que trata de no perjudicar a un imputado, es solo la mitad, el 16% que queda por *debajo* del rango; del 16% que cae por *arriba* la defensa prefiere ni hablar). Parece más razonable, en este ámbito, aumentar el rango de error, por ejemplo a 3u. Este intervalo comprende el 99.7 % de los casos. El uso de un intervalo de error de 3u en cada sentido daría un resultado final de 91 ± 9 km/h. Y como ya el 1 del 91 resulta algo pedante comparado con el error de 9 km/h, sería preferible redondear y decirle al juez que la velocidad más probable era de 90 km/h, Y seguramente estaba entre 80 y 100 km/h.

4.3 Aplicación de integrales dobles

Los estudios referentes al análisis de la deformación de la estructura de un rodado protagonista de un accidente de tránsito, datan de mediados de la década del 70 del siglo pasado, encontrándose entre sus iniciadores el Dr. Campbell, quien estableció empíricamente la relación proporcional entre velocidad de impacto y profundidad de la deformación, quedando además verificadas dos fenómenos claramente diferenciados: una deformación elástica y una deformación plástica que precede al anterior (cuantitativamente mucho

mayor a la primera) y que, empíricamente se demuestra que las cargas de tensión son proporcionales a la deformación registrada en ambos fenómenos. Las ecuaciones Cambelianas establecidas en pruebas de colisión de rodados contra una barrera rígida son:

$$v(x) = b_0 + b_1x \quad \text{Ec1}$$

$$F/w(x) = A + Bx \quad \text{Ec2}$$

Donde:

v(x): es la velocidad de impacto del rodado en función a la profundidad (x) de la deformación.-

b0: es la velocidad de impacto sin deformación permanente.-

b1: el valor de la pendiente de la función empírica.-

F/w: es la fuerza de carga por unidad de ancho de deformación.-

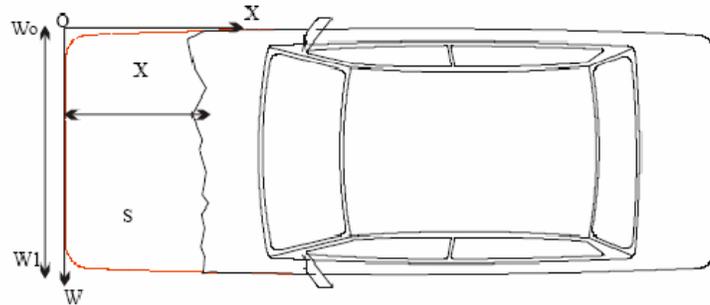
A: es la máxima fuerza de carga por unida de ancho de deformación que el vehículo puede recibir sin deformación permanente.-

B: es una constante de dureza del rodado, que depende de cada vehículo y de la zona de impacto sobre la estructura del vehículo.-

De los distintos ensayos de colisión contra barrera rígida, realizados sobre cada rodado, se estiman estadísticamente los valores de b0, b1, A y B.

1)- Consideremos inicialmente donde la deformación de la estructura del rodado es constante para todo el ancho de la deformación.

Figura 21. Deformación de la estructura del vehículo

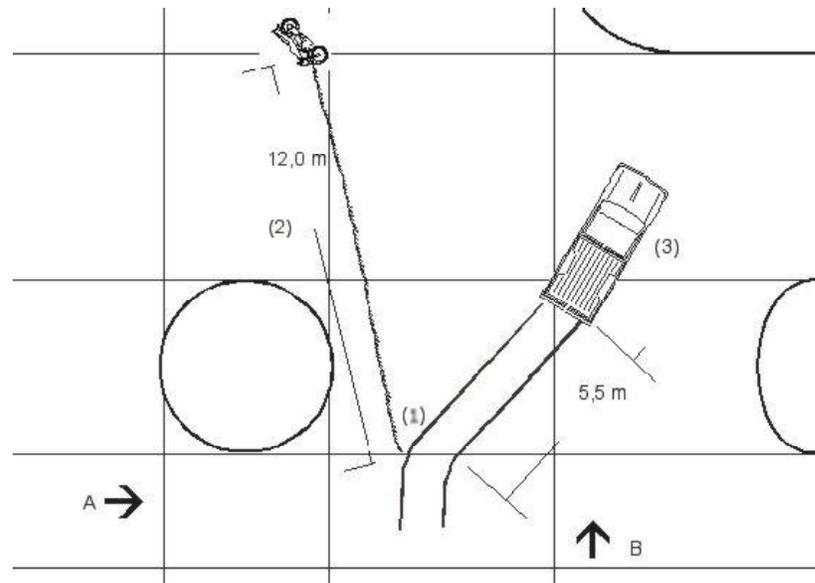


En las colisiones producidas entre vehículos cuyas diferencias de masas son importantes y se desarrollan en encrucijadas, la determinación de los rangos de valores de velocidad, previas al impacto, se encuentra afectada de una serie de variables que hacen al cálculo muy inestable. Establecer las cotas de error sencillamente reemplazando los valores extremos de los parámetros que varían, no es suficiente para apreciar el rango del desvío. Por otro lado se verifica que la sensibilidad del sistema responde a tres variable principales como lo son la diferencia de las masas, los ángulos post impacto y los valores de coeficiente de fricción. Esta sensibilidad no resulta tan notoria ante el desarrollo de los algoritmos tradicionales de computo (aplicación directa del principio de la cantidad de movimiento), y solo puede ser apreciada mediante la utilización de técnicas de Monte Carlo. Si bien existen otras técnicas para el cómputo de las cotas de error, su aplicación se hace muy engorrosa dada la necesidad de encontrar un algoritmo que contenga todas las derivadas parciales de las variables intervinientes, además de las limitaciones que se han mencionado.

Para comprenderlo se trabajará sobre un caso real, introduciendo en el cálculo de las respectivas velocidades, la variabilidad que presentan tanto las coordenadas del ángulo post impacto como así también el coeficiente de

fricción y las masas respectivas. La Figura 21 se muestra las posiciones finales de los rodados según relevamiento realizado por la prevención policial en el lugar de los hechos.

Figura 21. Relevamiento de las posiciones finales del accidente



Aunque algunas medidas fueron recolectadas mas tarde, del mismo lugar donde ocurrió el accidente, tomando como referencias las juntas de dilatación de las calzadas y las fotografías existentes en el expediente penal, es inevitable verificar una cierta incertidumbre en torno a la ubicación del punto de impacto de ambos rodados. Si bien es cierto que el cambio de dirección de las huellas de frenado de una camioneta señalaría el punto de impacto, en realidad, este indicio tan solo señala donde la camioneta recibe el primer impacto sobre su lateral izquierdo delantero. Existiendo sobre este mismo lateral del vehículo un segundo impacto reflejo del costado derecho de la motocicleta sobre el costado izquierdo de la camioneta. La figura 22 ilustran una imagen, montada de la

motocicleta sobre la fotografía del expediente penal, ilustrando la correspondencia de los daños del costado referido de la camioneta

Figura 22. Ilustración de imágenes montadas sobre las fotografías del expediente, confrontando los daños de la camioneta con la formas de impacto de la motocicleta con su frente y su costado (segunda colisión).



La rotura del parabrisas y el descubrimiento de restos de vidrio en la parte interna del vehículo más grande, hacen pensar que alguna parte del cuerpo del conductor de la motocicleta impacta sobre el parabrisas, hipótesis reforzada por la ubicación final del sujeto y sus lesiones. El inicio de las fracciones de la motocicleta (1) no coincide exactamente con el punto de cambio de dirección de la huella de frenada de la camioneta; que además señala que este último rodado empezó a detenerse unos centímetros antes del impacto. Todo esto nos conduce a verificar una incertidumbre de las componentes de la proyección post impacto sobre el eje de las abscisas, tanto para la motocicleta como para el vehículo de mayor porte.

Por otro lado, el desconocimiento de si las huellas de frenada de la camioneta culminan o no detrás de las ruedas traseras del mismo (3), o si también se produjo el bloqueo de alguna de las ruedas delanteras, nos da argumentos para contemplar una variable de error sobre el eje de la ordenada de la proyección

post impacto de la camioneta. Habiendo ya planteado como fuentes de error las proyecciones en el eje de las abscisas para los dos vehículos y en el eje de la ordenada para la camioneta; sería prudente también considerar que las fracciones de la motocicleta (2) pueden extenderse unos centímetros mas allá de los 12m (por debajo de su estructura).

Otras dos fuentes de error mas se conforman en el desconocimiento de los valores exactos de peso de los vehículos mas sus ocupantes, y los valores de adherencia en el trabajo de roce post impacto de los mismos. Son entonces ocho las fuentes de error que van a ser consideradas en este caso teniendo presente además, la diferencia de masas entre la motocicleta y su acompañante y la camioneta, el cual esta en el orden de los 17/100. Todo esto se establece según lo explicado en la aplicación de la técnica de Monte Carlo

A los fines metodológicos del presente caso, descartamos los 90cm de huellas previas al impacto de la camioneta, para trabajar con mayor rapidez en las ecuaciones de colisiones en el plano y obtener de esta manera una medida central de las velocidades de los rodados al momento del impacto y las dispersiones respectivas.

A pesar de la colisión refleja en el momento del choque y dada la poca diferencia de tiempo entre el primer y segundo impacto, partimos de la consideración que el vector cantidad de movimiento de ambos rodados, previo al primer contacto, coincidían con los ejes coordenados. Al variar las componentes de proyección post impacto en el eje de las x e y , se modifica también los ángulos de proyección y las componentes vectoriales de cantidad de movimiento posteriores a la colisión.

Buscamos entonces las ecuaciones de estimación de velocidades previas al contacto, poniendo las variables de dirección de proyección (ángulos post

impacto) en función de las componentes en la ordenada y la abscisa, evitando trabajar con las funciones trigonométricas.

$$V_m = \frac{(2 \cdot g \cdot \mu_m)^2 \cdot x_m}{\left[(x_m)^2 + (y_m)^2 \right]^{\frac{1}{4}}} + \frac{M_c}{M_m} \cdot \frac{(2 \cdot g \cdot \mu_c)^2 \cdot x_c}{\left[(x_c)^2 + (y_c)^2 \right]^{\frac{1}{4}}} \quad \text{Ec. 1}$$

$$V_c = \frac{M_m}{M_c} \cdot \frac{(2 \cdot g \cdot \mu_m)^2 \cdot x_m}{\left[(x_m)^2 + (y_m)^2 \right]^{\frac{1}{4}}} + \frac{(2 \cdot g \cdot \mu_c)^2 \cdot x_c}{\left[(x_c)^2 + (y_c)^2 \right]^{\frac{1}{4}}} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde x_c e y_c son las componentes de la proyección de la camioneta en metros luego del contacto; al igual que las variables x_m e y_m lo son para la motocicleta. Las variables μ_m y μ_c , señalan los valores de adherencia *metal asfalto* y *caucho-asfalto*. Por último las variables M_m y M_c , representan los valores de masas en kilogramos de la motocicleta y la camioneta. Los valores medios de cada variable señaladas arriba, junto con sus desvíos (S_i)

Tabla IX. Valores centrales de cada variable a considerar con sus respectivos extremos de variación .

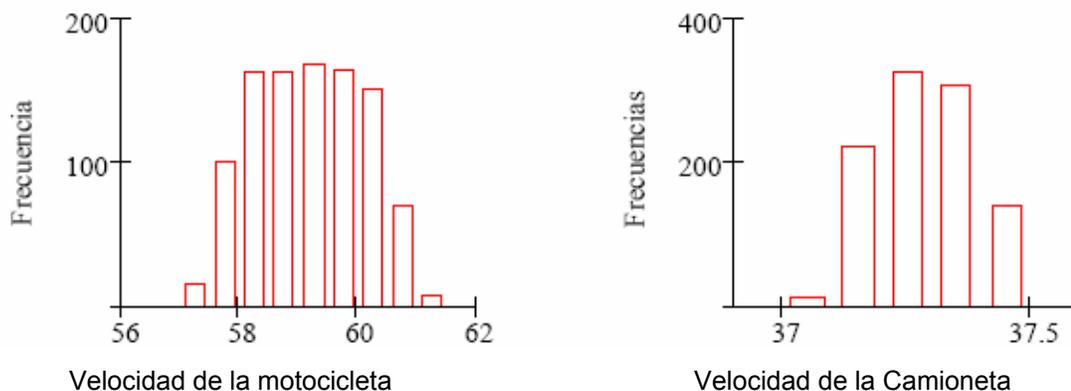
Variables	Valores medios	Desvíos $S(i)$
x_m	-1,9	$\pm 0,1$ m
y_m	11,7	$\pm 0,25$ m
x_c	2,5	$\pm 0,5$ m
y_c	6,5	$\pm 0,5$ m
μ_m	0,5	$\pm 0,1$
μ_c	0,6	$\pm 0,1$
M_m	221	± 5 kg
M_c	1235	± 10 kg

Seguidamente se procede a estimar los valores centrales de velocidad previos al impacto V_c y V_m de los vehículos haciendo variar las masas de los mismos. La orden *rnd* en el paquete de Mathcad devuelve un número aleatorio entre cero y uno; al igual que la función *ALEATORIO*= en el paquete de Excel. Los mil (1000) valores de velocidad en unidades de [km/hr] simuladas para cada rodado son ilustrados en las Figuras 4 y 5 seguidamente, haciendo variar simultáneamente el valor de las masas.

Los valores medios son de 59.2km/hr para la motocicleta con un valor de la triple desviación $3Sv= \pm 2.7\text{km/hr}$. Para la camioneta el valor medio es de 37.2km/hr con una valor de $3Sv=\pm 0.3\text{km/hr}$. Llama la atención, aún no siendo importantes los errores estimados, la diferencia que existen entre ellos, para un vehículo y para el otro.

Notamos que la desviación simple para la camioneta es de $\pm 0.1\text{km/hr}$ mientras que para la motocicleta es de $\pm 0.9\text{km/hr}$.

Figura 23. Diagrama de distribución de frecuencias absolutas de velocidad en [km/hr] (motocicleta y camioneta) para mil valores de masas respectivas.

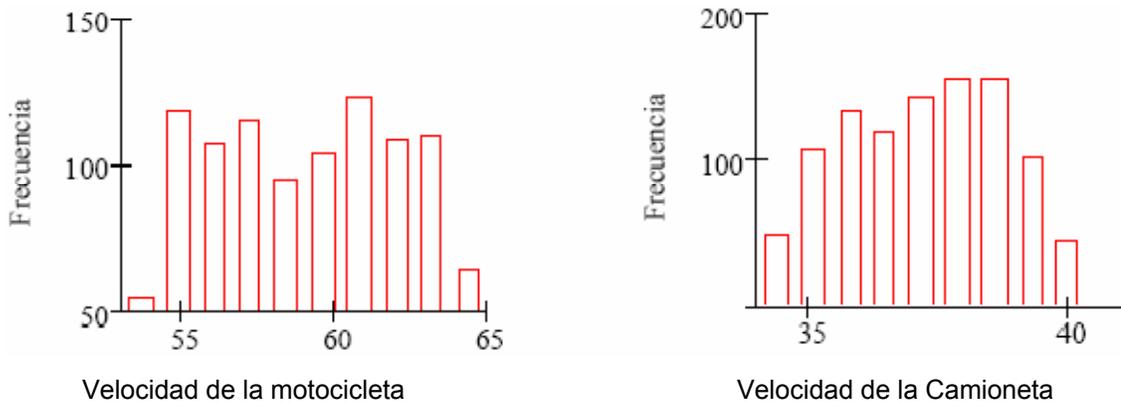


La importante diferencia de las desviaciones no se debe a que los extremos de variación de la masa de la camioneta sean el doble que la variación de masa de la camioneta, según la Tabla IX, pues se verifica que aún siendo iguales estas variaciones la diferencia entre el error para la camioneta será mucho menor que el error para la motocicleta. La razón está en la diferencia de masas que existe entre estas unidades. Tengamos presente que

$Mm/Mc = 0.17$ mientras que $Mc/Mm = 5.58$. Aún cuando las masas tomen sus valores extremos, el primer cociente va a estar comprendido entre 0.17 Mm/Mc 0.18 para la ecuación 2, en tanto que el segundo cociente lo hará entre 5.42 Mc/Mm 5.76 para la ecuación 1. Cualquier número c que se multiplique mil veces entre valores que van de 0.17 a 0.18 arrojará una variabilidad mucho menor que si se lo multiplica mil veces entre valores de 5.42 a 5.76 . Se entiende entonces que si no existiera tanta diferencia entre las masas existiría una equidad en las desviaciones para un vehículo y el otro, y el valor de las (S_v) desviaciones computadas arriba, si dependerían mas del rango de variabilidad de las masas y no de las diferencias entre ellas. Esto último es rápidamente comprobable al igualar Mm con Mc .

El segundo procedimiento, se realiza haciendo variar únicamente los valores de adherencia según la Tabla IX. Los mil (1000) valores de velocidad en unidades de [km/hr] simuladas para cada rodado son ilustrados en la siguiente figura.

Figura 24. Diagrama de distribución de frecuencias absolutas de velocidad en [km/hr] (motocicleta y camioneta) para mil valores de masas respectivas.



Los valores promedios de cada rodado, sus desviaciones simples y el valor total del error (triple valor de la desviación estándar) son señalados seguidamente. Para la motocicleta $V_m = 59.1 \pm 9.5 \text{ km/hr}$ con una desviación estándar de $S_v = \pm 3.1 \text{ km/hr}$. Para la camioneta $V_c = 37.1 \pm 4.5 \text{ km/hr}$ con una desviación $S_v = \pm 1.5 \text{ km/hr}$. Inicialmente notamos que los valores medios se mantienen pero como era de esperarse, las cotas de error aumentaron. Nuevamente llama la atención la diferencia entre las desviaciones finales de velocidad para la motocicleta $S_v = \pm 3.1 \text{ km/hr}$ y el de la camioneta $S_v = \pm 1.5 \text{ km/hr}$. Si bien es cierto que podemos comprender que el error propagado en la proyección post impacto de la camioneta será un poco mayor en comparación con la de la motocicleta, por el coeficiente de adherencia [1], ambas variables se encuentran en las dos ecuaciones 1 y 2, y no podemos explicar, con este argumento, la diferencia entre las desviaciones de ambos cálculos. Pareciera cerca otra vez la respuesta está en la importancia de la diferencia de masas. Al observar las ecuaciones 1 y 2, vemos que los cocientes de las masas van a afectar a cualquier valor que resulte de las raíces cuadradas de los numeradores

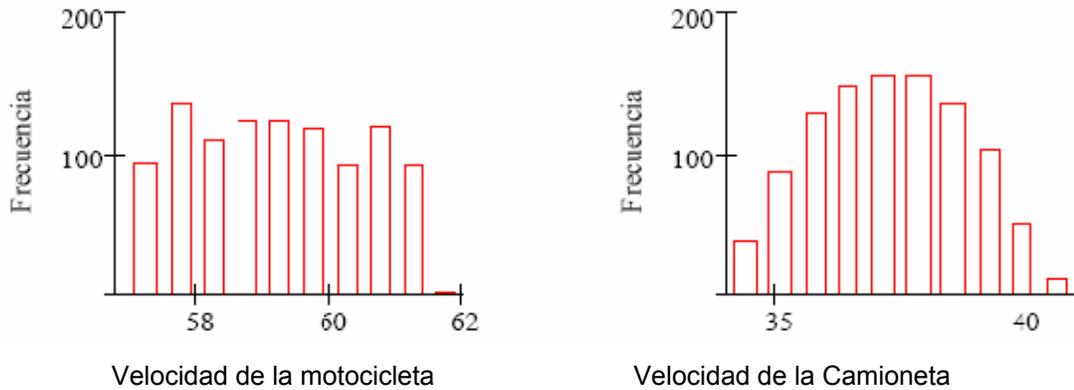
donde están contenidos los mil valores simulados de adherencia, y este resultado a su vez será afectado por los términos en los denominadores. Pero como ambas ecuaciones tienen los mismos divisores, la explicación está en los numeradores.

Recordemos que, cualquier número $c > 1$ que multiplique a cualquier otro número d , lo hará mayor, mientras que cualquier número $c' < 1$ que multiplique al mismo número d , lo hará menor. Generalizando este axioma matemático diremos que, cualquier número $c > 1$ que multiplique a mil valores comprendidos en un entorno numérico, hará que el rango de dicho entorno sea mayor; mientras que cualquier número $c' < 1$ que multiplique a mil valores del mismo entorno, hará que su rango sea menor. En nuestro caso, a pesar de que x_c , x_m son números menores que y_c , y_m , sucede que M_c/M_m en la ecuación 1, es considerablemente mayor que M_m/M_c . Podemos predecir entonces que, si la razón de las masas de ambos rodados fuera muy próxima a la unidad y los valores de las componentes de proyección post impacto de ambos vehículos, sobre los ejes de la abscisa fueran aproximadamente igual a las correspondientes componentes sobre el eje de las ordenadas; entonces las desviaciones estimadas arriba deberían ser iguales.

Cuestión esta que puede verificarse haciendo $x_c = y_c$, $x_m = y_m$ y $M_c = M_m$.

Para poder apreciar como se comporta la cota de error respecto a las variables de posición post impacto y ángulo de proyección, hacemos variar los valores de desplazamiento posteriores al impacto, sobre el eje de las ordenadas, de acuerdo a las variaciones indicadas en la Tabla IX. Los mil (1000) valores de velocidad en unidades de [km/hr] simuladas para cada vehículo son ilustrados en la siguiente figura.

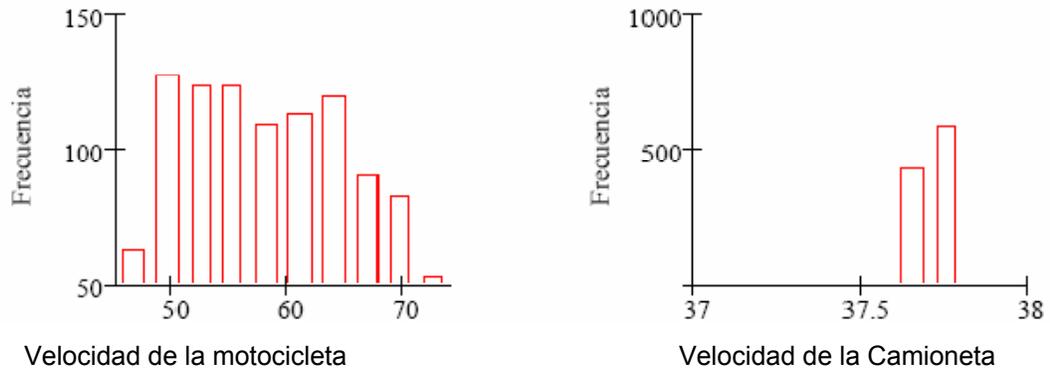
Figura 25. Diagrama de distribución de frecuencias absolutas de velocidad en [km/hr] (motocicleta y camioneta) para mil valores respectivos de valores de las componentes de proyección sobre el eje ordenado.



Los valores promedios de cada vehículo, sus desviaciones simples y el valor total del error (triple valor de la desviación estándar) son señalados seguidamente. Para la motocicleta $V_m = 59.2 \pm 3.7 \text{ km/hr}$ con una desviación estándar de $S_v = \pm 1.3 \text{ km/hr}$. Para la camioneta $V_c = 37.2 \pm 4.5 \text{ km/hr}$ con una desviación $S_v = \pm 1.5 \text{ km/hr}$. Al igual que en las dos simulaciones anteriores, una rápida explicación de la proximidad entre las desviaciones, puede resultar de analizar los producto y cocientes de los números que se tratan en la ecuación 1 y 2.

La corrida numérica que contempla la variación de las componentes de proyección sobre el eje de las abscisas, se detalla a continuación en siguiente figura.

Figura 25. Diagrama de distribución de frecuencias absolutas de velocidad en [km/hr] (motocicleta y camioneta) para mil valores respectivos de valores de las componentes de proyección sobre el eje de las abscisas.



Los valores promedios de cada rodado, sus desviaciones simples y el valor total del error son señalados seguidamente. Para la motocicleta $V_m = 58.7 \pm 22.2 \text{ km/hr}$ con una desviación estándar de $S_v = \pm 7.4 \text{ km/hr}$. Para la camioneta $V_c = 37.7 \pm 0.3 \text{ km/hr}$ con una desviación $S_v = \pm 0.0 \text{ km/hr}$. No solo la diferencia del error entra ambas magnitudes es significativo; sino que además nos encontramos con la fuente de error mas importante, aún mas fuerte que los supuestos errores que producen los valores de adherencias.

La función que hace variar la componente x_c de la motocicleta dentro de los parámetros señalados en la tabla 1 es: $1.8, 2.0 \text{ rnd}(1)$ Ec. 3

Esta función, cada vez que se la opera, devuelve un valor entre 1.8 y 2.0 que, multiplicada por la unidad en metros y computada tantas veces como queramos (unas mil veces por ejemplo), da como resultado un entorno numérico comprendido entre $1.8m$ y $2.0m$. La amplitud de este entorno (su rango) es de $0.2m$ y el promedio de los desvíos es muy bajo $S = \pm 0.059m$. Si a este mismo entorno le sumamos cualquier cantidad, por ejemplo la cantidad ym^2 , su amplitud y desviación media no cambiará, debido a una propiedad de la

varianza. Sin embargo la potencia fraccionaria de $1/2$ de este entorno hace que su rango aumente a $1.0m$ y disminuya su desviación a $S= \pm 0.021m$.

La ecuación 3 está ubicada en el numerador y el denominador del primer término de la ecuación 1. Si tenemos presente estos cambios, multiplicado además por el término $(2.g.mm)^{0.5}$ y el factor de 3.6, veremos que el primer término de la ecuación 1 da como resultado un error o desviación promedio bajo de $S_v = \pm 0.18km/hr$, equivalente a un error del 3% respecto a la media de V_c . Sin embargo el mismo análisis sobre el segundo término de la ecuación 1, da como resultado un error de $S = \pm 7.53km/hr$ equivalente a un error del 11.5% respecto a la media de V_c ; debido a que nuestra función que hace variar el término es: $(2, \square 1rnd(1))$ Ec. 4

La amplitud de la función contenida en la ecuación 4 es ahora de $1.0m$ y su desvío es de $S = \pm 0.29m$, notoriamente mayor a la desviación de la función en la ecuación 3. Si consideramos ahora que toda variación que resulte en el segundo término de la ecuación 1 será multiplicada, además de los términos 3.6 y $(2.g.mc)^{0.5}$, por el cociente M_c/M_m , entendemos porque el error debería aumentarse significativamente.

Nuevamente verificamos que es el cociente M_c/M_m el término responsable de amplificar las desviaciones, comparando el error resultante en el primer término de la ecuación 1 del 3% con el segundo término de la misma ecuación del 11.5%. Un análisis similar en la ecuación 2, demostraría exactamente lo mismo, teniendo presente que ahora el cociente M_m/M_c va a disminuir cualquier desviación promedio que resulte de las funciones de variación de proyección sobre el eje de la ordenada. Luego, como utilizamos para nuestros fines forenses el triple valor de las desviaciones promedios, las diferencias entre los errores estimados para cada vehículo se hacen más significativas. Como último procedimiento contemplamos todas las fuentes de error señaladas y computamos los valores medios de velocidad para cada vehículo y sus

desviaciones promedios correspondientes. Para la motocicleta $V_m = 59.7 \pm 24.7 \text{ km/hr}$ con una desviación estándar de $S_v = \pm 8.2 \text{ km/hr}$. Para la camioneta $V_c = 36.9 \pm 6.2 \text{ km/hr}$ con una desviación $S_v = \pm 2.0 \text{ km/hr}$. Finalmente los mil valores de velocidad en [km/hr] estimados para la variación de las ocho variables contempladas como fuentes de error, se ilustran a continuación.

Figura 27. Diagrama de distribución de frecuencias absolutas de velocidad en [km/hr] (motocicleta y camioneta) para mil valores respectivos de las ocho variables consideradas como fuentes de error.

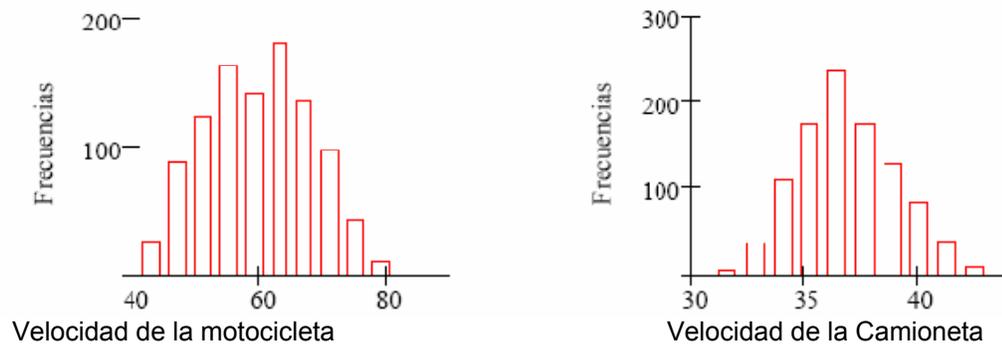


Tabla X. Resumen de las estimaciones de velocidad media y error en [km/r] para cada variable de error, de la motocicleta.

	Variando las Masas	Variando las adherencias	Variando la coord en "y"	Variando la coord en "x"	Variando la cor. en "x,y"	Variando todas las variab.
Valor menor	57,0	53,0	57,0	45,0	44,0	41,0
Valor mayor	62,0	65,0	62,0	74,0	76,0	81,0
Rango	5,0	12,0	5,0	29,0	32,0	40,0
Valor medio	59,2	59,1	59,2	58,7	59,1	59,7
Desviación (Sv)	0,9	3,1	1,3	7,4	7,7	8,2
Cv(%)	1,5	5,4	2,1	12,6	13,0	13,8
3.(Sv)	2,7	9,5	3,7	22,2	23,1	24,7
3.Cv(%)	4,6	16,2	6,3	38,0	39,2	41,5
Velocidad	59,2 ± 2,7	59,1 ± 9,5	59,2 ± 3,7	58,7 ± 22,2	59,1 ± 23,1	59,7 ± 24,7

Tabla XI. Resumen de las estimaciones de velocidad media y error en [km/r] para cada variable de error, de la camioneta.

	Variando las Masas	Variando las adherencias	Variando la coord en "y"	Variando la coord en "x"	Variando la cor. en "x,y"	Variando todas las variab.
Valor menor	37,0	34,0	34,0	37,0	33,0	31,0
Valor mayor	38,0	41,0	41,0	38,0	42,0	43,0
Rango	1,0	7,0	7,0	1,0	9,0	12,0
Valor medio	37,2	37,1	37,2	37,7	37,2	36,9
Desviación (Sv)	0,1	1,5	1,5	0,0	1,5	2,0
Cv(%)	0,26	4,0	4,0	0,1	4,0	5,6
3.(Sv)	0,3	4,5	4,5	0,1	4,5	6,2
3.Cv(%)	0,8	12,1	12,0	0,3	11,9	17,0
Velocidad	37,2 ± 0,3	37,1 ± 4,5	37,2 ± 4,5	37,7 ± 0,3	37,2 ± 4,5	36,9 ± 6,2

La última columna de las Tablas X y XI muestran los resultados finales estimados para cada vehículo.

Verificándose además, para cada vehículo, que la suma de los cuadrados de las desviaciones promedias resultante de cada simulación individual, es aproximadamente igual al cuadrado de la desviación promedio final, resultados típicos de las distribuciones gaussianas. Numéricamente: (0.92 + 3.12 + 1.32 +

7.42)0.5 \square 8.2 y (0.12 + 1.52 + 1.52 + 0.02)0.5, \square 2, paralelamente a los cálculos realizados arriba, se computaron los valores de velocidad de cada rodado para cada variable de error, tomando únicamente sus valores extremos señalados en la Tabla VI, como otro método para estimar la amplitud del error. Las cotas de esta manera estimadas se muestran en las Tablas X y XI.

Tabla XII. Velocidad de la motocicleta en [km/hr] haciendo variar cada fuente de error hacia sus valores extremos.

	Variando las Masas	Variando las adherencias	Variando la coord en "y"	Variando la coord en "x"	Variando la cor. en "x,y"	Variando todas las variab.
Menor valor de V_m	60,1	54,2	61,5	47,0	48,9	45,5
Mayor valor de V_m	58,2	63,8	57,1	70,8	68,5	67,5
Rango	-1,9	9,6	-4,4	23,8	19,6	22,0
Velocidad de V_m	$59,2 \pm 0,95$	$59,1 \pm 4,8$	$59,2 \pm 2,2$	$58,7 \pm 11,9$	$59,1 \pm 9,8$	$59,7 \pm 11$

Tabla XIII. Velocidad de la camioneta en [km/hr] haciendo variar cada fuente de error hacia sus valores extremos.

	Variando las Masas	Variando las adherencias	Variando la coord en "y"	Variando la coord en "x"	Variando la cor. en "x,y"	Variando todas las variab.
Menor valor de V_c	37,1	34,0	35,8	37,7	36,2	35,9
Mayor valor de V_c	37,3	40,3	38,6	37,6	38,2	43,6
Rango	0,2	6,3	2,8	-0,1	2,0	7,7
Velocidad de V_c	$37,2 \pm 0,1$	$37,1 \pm 3,1$	$37,2 \pm 1,4$	$37,7 \pm 0,05$	$37,2 \pm 1,0$	$36,9 \pm 3,85$

Si comparamos los resultados de las últimas filas de las Tablas XII y XIII, con las velocidades estimadas para cada caso, según las Tablas X y XI, podrá apreciarse que las cotas de error inferidas tomando únicamente la combinación de los valores extremos de cada fuente de error, dan como resultados cotas considerablemente menores a las estimadas mediante las simulaciones numéricas. La explicación radica en que existen combinaciones de valores

individuales de las variables de error que producen una mayor variabilidad al resultado final, cuestión esta que no se aprecia combinando únicamente los extremos de las fuentes del error.

Por otro lado, si las fuentes de error solo fueran dos, podríamos encontrar una cota similar a la verificada con las simulaciones numéricas si combinamos los valores extremos pero en forma cruzada. Por ejemplo, el resultado de la velocidad de la motocicleta tomando en cuenta las variaciones de las masas, tendrá un valor aproximadamente igual al extremo inferior estimado en las simulaciones, según la Tabla XIII, si calculamos V_m primero con la siguiente relación de masas $1225/226$ y luego con el cociente $1245/216$, es decir combinando el menor valor de la masa de la camioneta con el mayor valor de la masas de la motocicleta; de igual forma pero relacionando las cantidades inversas podemos verificar el valor del extremo superior de V_m . Sin embargo este rápido procedimiento solo es posible de realizar cuando contemos con una ecuación donde existen una o dos fuentes de error; caso este que no es el nuestro, pues habría que realizar varias combinaciones posibles entre los extremos de cada fuente de error para encontrar la cota final.

4.4 Simulaciones numéricas

En las colisiones producidas entre vehículos cuyas diferencias de masas son importantes y se desarrollan en encrucijadas, la determinación de los rangos de valores de velocidad, previas al impacto, se encuentra afectada de una serie de variables que hacen al cálculo muy inestable. Establecer las cotas de error sencillamente reemplazando los valores extremos de los parámetros que varían, no es suficiente para apreciar el rango del desvío. Por otro lado se verifica que la sensibilidad del sistema responde a tres variable principales como lo son la diferencia de las masas, los ángulos post impacto y los valores

de coeficiente de fricción. Esta sensibilidad no resulta tan notoria ante el desarrollo de los algoritmos tradicionales de cómputo (aplicación directa del principio de la cantidad de movimiento), y solo puede ser apreciada mediante la utilización de técnicas de Monte Carlo.

Si bien existen otras técnicas para el cómputo de las cotas de error, su aplicación se hace muy engorrosa dada la necesidad de encontrar un algoritmo que contenga todas las derivadas parciales de las variables intervinientes, además de las limitaciones que se han señalado anteriormente.

4.5 Aplicación de la fotogrametría digital

Se define a la fotogrametría como la "... técnica para estudiar y definir con precisión la forma, dimensiones y posición en el espacio de un objeto cualquiera, utilizando medidas realizadas sobre una o varias fotografías..." Esta ciencia se encuentra hoy en día totalmente ligada a disciplinas, entornos y sistemas digitales. Este desarrollo espectacular de la fotogrametría digital está íntimamente ligado a la rápida y constante evolución de la microelectrónica, al incremento de la potencia de las computadoras, la optimización en los registros obtenidos con cámaras digitales, la aparición de software especializado en el tratamiento de imágenes y al abaratamiento general de todos estos elementos. Asociadas a las dos grandes ramas de la fotogrametría - la terrestre y la aérea- se encuentran una gran diversidad de aplicaciones:

En el caso de la ReVAT, con la fotogrametría digital no solo se consigue medir con precisión posiciones o formas posteriores a los hechos, sino que también permite incorporar las fotografías dentro del escenario virtual, mostrando así no solamente información objetiva, sino también un mayor realismo en la

reconstrucción. En este trabajo, presentamos un ejemplo de la potencia de esta herramienta con el software *Photodeler*® Lite.

Materiales y métodos

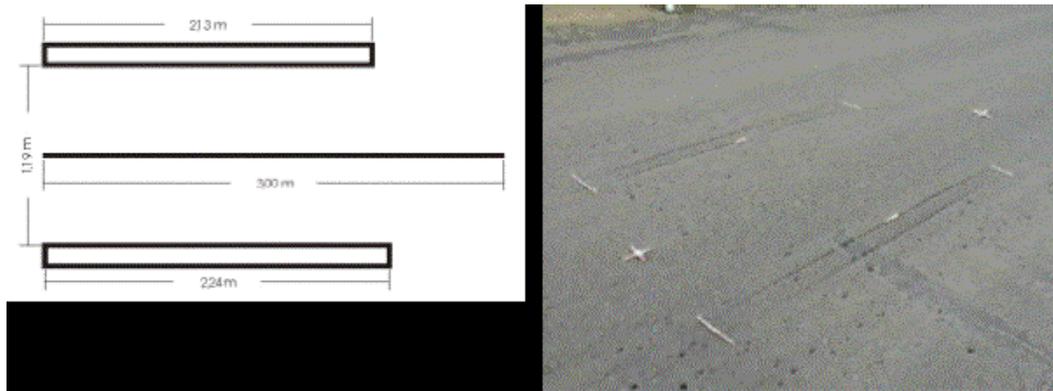
Para la construcción del entorno virtual se usaron los siguientes elementos:

- Computador PC compatible con procesador Celeron® de 333 MHz con 64 MB de RAM
- Cámara de Video JVC® GR-AX 730
- Placa Editora de Video Miro® DC 10 Plus
- Software GIMP® para procesamiento de imágenes.
- Software Photodeler® Lite
- Strata 3D® y Caligari TrueSpace® 3 para animación de Automóvil

A los fines de poder realizar la prueba de precisión en las medidas que se realizarían en un caso real, se deja marcada una huella de frenado sobre pavimento con un automóvil. Se marcan los puntos de inicio y final de la huella con una tiza junto con una marca de longitud conocida que se toma de referencia para realizar las demás medidas. Con el propósito de comparar las mediciones que se realicen posteriormente *in silico* se mensura la longitud de huella, ancho de la ruta, etcétera.

Se filmaron desde distintos puntos al escenario tratando de tener la mayor cantidad de puntos de interés en cada plano tomado. Con la placa editora de video se congelaron las imágenes que se usarán para la reconstrucción del escenario virtual en una resolución de 640 por 480 pixeles. Este paso también puede ser realizado con el uso de una cámara digital o una cámara analógica. Dada la calidad de las imágenes obtenidas a partir del video, éstas fueron filtradas con el software de procesamiento de imágenes (Gimp®) con el propósito de mejorar su definición.

Figura 28. Esquema y medidas tomadas en el lugar de la frenada. El segmento comprendido entre las dos huellas corresponde al segmento cuya medida se conoce. A la derecha, una de las fotografías con la que se trabaja para realizar las mediciones.



Siguiendo los procedimientos detallados en el manual del software de fotogrametría, se ingresaron las imágenes al programa y se procedió a la marcación de los puntos de interés y a su correlación con los mismos en las otras fotografías. Posteriormente se identifica y se ingresa el segmento de longitud conocida y se calculan las medidas desconocidas. El último paso es aplicar las texturas extraídas de las fotografías. El escenario virtual obtenido es exportado a los programas de animación (Strata 3D®, Caligari True Space®) para su inclusión de esta información dentro de la reconstrucción virtual.

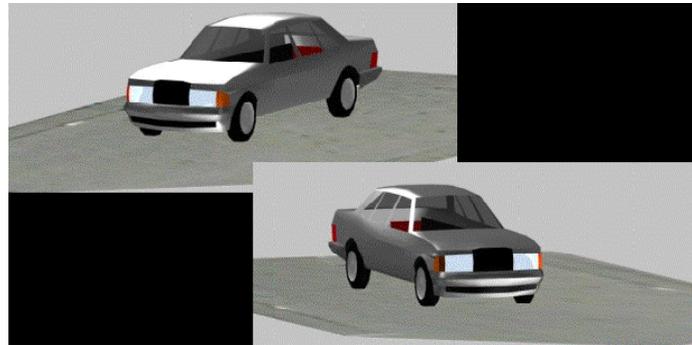
Figura 29: Pantalla del programa Photomodeler ® Lite con los puntos de interés marcados y sus correspondientes en las demás fotografías.



Figura 30: Reconstrucción del escenario (en este caso solo huella) sin textura (superior) y con textura (inferior)



Figura 31. Entorno virtual exportado a Caligari Truespace® o Strata 3D® desde Photomodeler Lite ® para el proceso de animación y reconstrucción final



Discusion de resultados

Tabla XIV. Comparación de valores reales y los obtenidos en fotogrametría

: Comparación entre los valores reales y los obtenidos por fotogrametría		
Parámetro	Valor Real (m)	Valor Estimado (m)
Longitud de huella 1	2.13	2.14
Longitud de huella 2	2.24	2.22
Separación entre huellas	1.19	1.17

La Tabla XIV ilustra la comparación de las medidas con las obtenidas con el software de fotogrametría contra las reales. Nótese la precisión de las mismas. La diferencia entre los valores obedece más a la poca nitidez de las imágenes (que dificultad la ubicación de los puntos) que a un error del método.

Para una precisión mayor se requiere el uso de una cámara digital megapixel o una mayor resolución en el escaneo de las fotografías.

Las ventajas del uso de la fotogrametría digital en la construcción de escenarios virtuales son innegables: permiten una valoración objetiva de las medidas y por sobre todo la realización de medidas post facto. También permite una mayor rapidez en el registro de la información en el lugar del accidente (inclusive se pueden tomar las líneas de separación de carriles como información de referencia).

Un ejemplo de esta aplicación, se puede dar al fijar una calle de dimensiones conocidas, en donde se ubico a cuatro personas a distancias predeterminadas como indica la Figura 31, estas distancias (en metros) se toman entre las personas y un objeto fijo de vía, entre las personas entre sí , y las mismas con el fotógrafo.

Las tomas fotográficas se realizaron con una cámara tipo réflex analógica, con un objetivo de 50 mm.

Referencias:

Iluminación: natural.-

Velocidad de obturación: 1/60f/5.6

Distancia de enfoque: las correspondientes para cada medida.-

Ancho de la calle 6,55 mts (metros).

Las medidas conocidas a verificar son (ver Figura):

A =10 mts B =10 mts C =10 mts D =2,20 mts

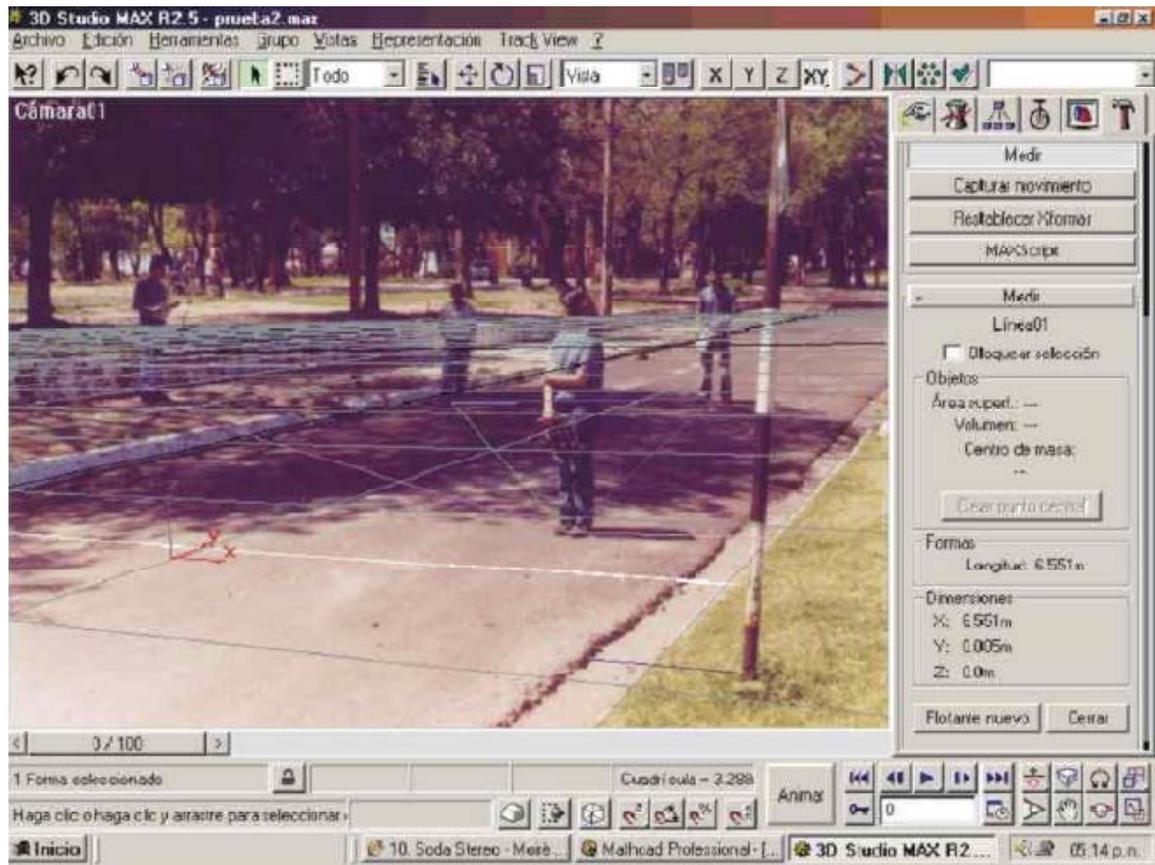
E =3,30 mts F = 4 mts G =1,20mts H =0,65 mts.

Figura 32. Entorno virtual para el proceso de animación y reconstrucción final.



Fotografía de la escena a medir

medidas a verificar, la medida de Referencia es el ancho de la calle



Vista de la pantalla de trabajo. Se observa mediante el tramado de las líneas la superposición de la perspectiva de la cámara virtual sobre la perspectiva de la imagen de la fotografía y los distintos vectores (líneas de color) trazados entre

las personas. A la derecha se observa la lectura del vector trazado sobre el ancho de la calle.-

Figura 33. Ilustración de ubicaciones mediante trazado vectorial

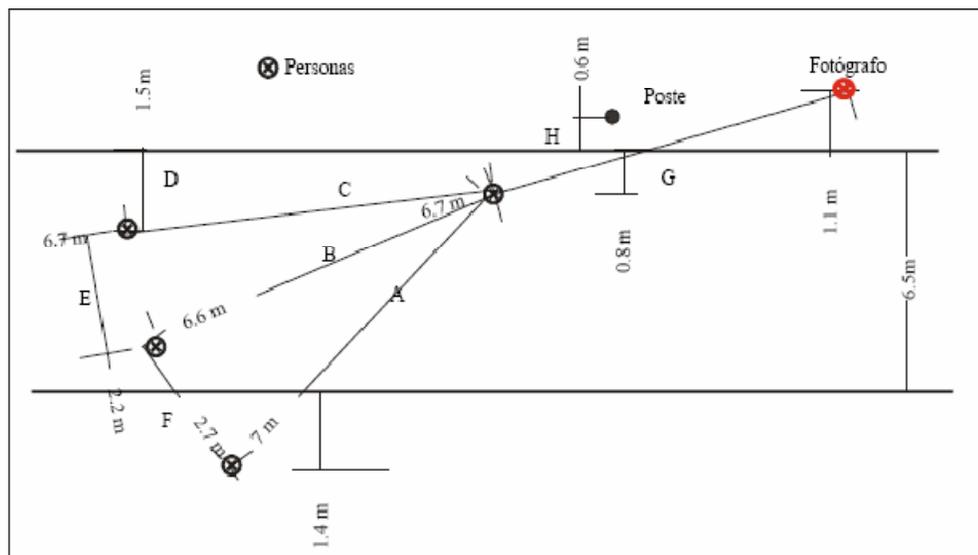


Ilustración de la ubicación de las personas, fotógrafo y medidas correspondientes en la experiencia.-

Sobre cada longitud a verificar se obtuvieron cinco mediciones sobre la aplicación mediante el trazado de vectores y la técnica indicada anteriormente.

Tabla XV. Valores medidos por el trazado de vectores, su media y error

Medidas	de A	de B	de C	de D	de E	de F	de G	de H
	11.9	9.7	9.2	2.2	3.7	5	1.2	0.6
	12.9	9.7	9.3	2.2	3.4	4.6	1.1	0.6
	12	9.5	9.2	2	3.4	4.7	1.1	0.6
	13	9.5	8.9	2.2	3.6	4.6	1.2	0.6
	12.7	9.7	9.1	2.2	3.2	4.6	1.2	0.6
Media	12.5	9.62	9.14	2.16	3.46	4.7	1.16	0.6
Error Tipo	0.23	0.05	0.06	0.04	0.08	0.07	0.02	0

Verificadas las medidas de las fotografías y teniendo en cuenta las mediciones que se recogieron del escenario de la experiencia, la cual consideraremos como la real; se computaron las siguientes desviaciones de las primeras con relación a las segundas las cuales se pueden observar en la siguiente Tabla comparación entre la medida real, la media su desviación correspondientes, para la primer experiencia.

Tabla XVI. Comparación de medidas de fotografías reales y software

	A	B	C	D	E	F	G	H
Media Real	10	10	10	2,2	3,3	4	1,2	0,6
Media Medida	12,5	9,62	9,14	2,16	3,46	4,7	1,16	0,6
Desviación (%)	25	4	9	1	1	7	1	0

4.6 La estadística en la investigación de accidentes viales

La última idea que tenemos de la estadística, es esa “cosa” que utilizan los científicos para tratar de obtener alguna conclusión sobre los resultados de sus mediciones. En general, no pensamos que en la práctica de investigar accidentes de tránsito; además, hace falta “saber sobre estadística”. Erróneamente podemos llegar a creer que nuestros resultados, de cálculos, desarrollados para determinar parámetros físicos de un accidente, como por ejemplo la velocidad de un vehículo; serán mas preciso cada vez que trabajamos con mas “decimales después de la coma” en nuestra calculadora. Estas ideas podrían se comparadas como *creencias no aplicables* a la accidentología, nada mas lejos de una actividad científica, es la de pensar que para investigar la mecánica de los accidentes, podemos prescindir de la

estadística. Esta, es una herramienta indispensable para el análisis físico de los accidentes de tránsito, debe conocer.

La precisión, en términos de resultados numéricos de parámetros físicos en toda reconstrucción analítica de accidentes de tránsito, erróneamente puede ser considerada como el hallazgo de un *único número* para cada parámetro a estimar, independientemente de la verosimilitud o grado de alcance del modelo físico empleado en el estudio de una colisión; todo proceso analítico en la reconstrucción; opera numéricamente con parámetros físicos. Y estos parámetros físicos no son, en su mayoría, identificados perfecta y realmente para las colisiones que se pretendan investigar. Todo lo contrario; una gran cantidad de parámetros son conocidos “aproximadamente”, y dicha “aproximación” es en realidad *una incertidumbre acotada*.

Reconocer que “sabemos cuanto vale un parámetro aproximadamente”; es reconocer que tenemos un conocimiento (fundado o no) de entre que y que valor puede adjudicarse a nuestro parámetro; el cual se convierte por esta cualidad, en una variable. Las variables son parámetros cuya incertidumbre están delimitadas por un entorno de valores que tiene una cierta probabilidad de ocurrencia.

Si reconstruir la mecánica de los cuerpos que colisionan en un accidente de tránsito, solo requiriera del manipuleo numérico de una única variable; las cuestión sería mucho mas sencillas y podríamos “arriesgar sin tanto riesgo” un resultado. Sin embargo, se sabe que esto no es así. Y además se sabe que se trabaja con un conjunto de variables que deben ser tratadas numéricamente, para obtener resultados sobre la dinámica de la colisión.

Una valoración crítica al trabajo de analizar la física de una colisión entre vehículos o vehículos y peatones/objetos; permite ver que debemos trabajar con un conjunto de variables a las cuales le asignamos valores que creemos son “aproximados”. ¿Aproximados a que?, bueno, son aproximados a un valor

ideal el cual creemos o suponemos debe ser así. Decidir cuál era el peso de uno de los vehículos de una colisión a analizar (ej. un sedan), es una cuestión que normalmente lo resolvemos mirando la ficha técnica del mismo vehículo y agregándole el peso promedio de un sujeto o de más, según la cantidad de ocupantes en el mismo; suponiendo que no hay cargas adicionales. El valor que le asignemos a esta variable, sabemos que no es el real y que en realidad es un valor “aproximado”. Es interesante analizar que pasa en la cabeza del investigador. Porque éste cree que su número se adjudica a un valor que se “aproxima” al valor real del peso del vehículo. Lo irónico es que nunca sabemos que tan “aproximado” estamos del valor real; sencillamente porque no lo conocemos.

Un investigador con criterio, prudente, va a reconocer esta limitación e intentará solucionarlo fijando límites a su incertidumbre. Como no sabemos “que tan aproximado” es el valor que le adjudicamos a esta variable (peso del sedan), entonces lo que intentamos hacer es fijar “que tan lejos” podemos estar de dicho valor. Sabemos que el sedan no puede tener el mismo peso de una motocicleta y que tampoco puede tener el mismo peso de un camión. Con este criterio, cualquier valor comprendido entre el peso de una motocicleta y el peso de un camión, se “aproxima” al peso de nuestro sedan en cuestión. Por supuesto que los extremos de la incertidumbre, tomada como ejemplo, son muy groseros; pero es válido el mismo para representar las diferencias visiblemente.

Podemos mejorar el criterio y pensar que nuestro sedan no puede ser más liviano que el mismo vehículo estándar en vacío; y al mismo tiempo no puede ser más pesado que cuando soporta su carga máxima. Pongámosles valores a estos extremos; ej. 950kg y 1250kg, la idea de que nuestro vehículo *no pesa exactamente* 950 o, 1250kg, que parece ser muy coherente, pero tiene origen absoluto en nuestra subjetividad; sentido común si lo que llamar de alguna

manera. Por ello, normalmente tomamos el riesgo de decir que el vehículo “pesaba 1100kg”; donde 1100 es un valor central. Es interesante observar que a pesar de que, con un muy buen criterio, se puede acotar la incertidumbre de la variable, muchas veces se puede decidir cual es el valor a emplear en los cálculos, basados únicamente en la subjetividad o en el sentido común.

La estadística, en el mejor de los casos, tratará de eliminar o minimizar, esa cuota de subjetividad. Algunas preguntas son validas de realizarlas respecto a esta situación.

¿Nuestro sedan, tiene la misma oportunidad de pesar cualquier valor entre 950 y 1250kg?

¿Habrá algún valor entre 950 y 1250kg que se ajuste más al peso real del vehículo?

¿Cómo hacemos para reconocer ese valor?

¿Qué tan grande es nuestra incertidumbre, y cómo esta puede repercutir en la verosimilitud de nuestros resultados?

Seguramente, encontrar las respuestas a estas preguntas nos colocará en la posición de adoptar decisiones más objetivas en el análisis, y tal vez podamos hallar algunas de estas respuestas utilizando algunas herramientas que nos ofrece la Estadística.

Si la situación que se plantea, no parece lo necesariamente motivan para adentrarse en el estudio de la estadística, se puede plantear otro problema. La masa del sedan no es la única variable de la cual no conocemos muy bien su valor; aunque como dijimos, podemos discutir con algunos fundamentos los valores extremos que puede tomar.

El problema que se refleja aquí, se refiere al empleo de varias variables que podrán estar acotadas o no, en los cálculos rutinarios del análisis físico de una colisión.

No es única la incertidumbre; todo lo contrario se debe lidiar con varias de ellas.

Si no es posible realizar ensayos sobre la unidad colisionada, la adherencia es otra variable.

Es interesante preguntarse algunas interrogantes.

Si en los cálculos utilizamos valores para cada variable, las que suponemos se aproximan a un valor real; ¿no es el resultado, una mera aproximación del parámetro que se quiere hallar?

Si el resultado es una aproximación, ¿cómo se sabe que tan aproximado está?

¿Cómo podemos informar un *valor único* de un parámetro, si no sabemos si existe otro mejor valor, más próximo al valor real?

Supongamos que un vehículo A cuya masa está entre 950 y 1250kg colisiona linealmente a otro vehículo B, inicialmente en reposo y cuya masa se sabe, puede valer entre 900 y 1150kg. Después de la colisión ambos vehículos se desplazan con la misma dirección y sentido que el vehículo A hasta detenerse. Habiéndose estimado la velocidad (5m/s) del conjunto formado por ambos vehículos (que no se separaron) después de la colisión, se intenta conocer cuál es la velocidad del vehículo A, justo antes del impacto. Pero además se intenta realizar alguna estimación para poder conocer el grado de incertidumbre de los datos que vamos a utilizar.

Se discuten los valores más “justos” para cada valor de masa de los vehículos y no hay acuerdo. Por esta razón hay tres opiniones y por ende, tres valores posibles de adjudicar a cada rodado.

Asignaremos la letra “x” e “y” para referirnos a los distintos valores de masa de los vehículos A y B respectivamente.

Las columnas muestran los valores propuestos para ser empleados, los valores centrales son los que usted escoge o bien los promedios.

$$x := \begin{pmatrix} 950 \\ 1100 \\ 1250 \end{pmatrix} \cdot \text{kg} \quad y := \begin{pmatrix} 900 \\ 1000 \\ 1150 \end{pmatrix} \cdot \text{kg}$$

En primer lugar se debe encontrar alguna medida que muestre que tan grande es la diferencia entre los pesos.

La varianza de las variables puede ayudar. Esta medida estadística, es un parámetro que da una buena idea del grado de dispersión que hay dentro de un conjunto acotado de valores.

La varianza, promedia todos los desvíos cuadráticos entre cada valor de un conjunto numérico, respecto de algún otro valor escogido como representativo del conjunto. Aquí supondremos que los valores que se escogieron, son los más representativos de nuestros conjuntos.

$$S(x)^2 = \frac{\sum (x - 1100)^2}{3} \quad \text{Ec. 01} \quad S(y)^2 = \frac{\sum (y - 1000)^2}{3} \quad \text{Ec. 02}$$

$$S(x)^2 = 15000\text{kg}^2 \quad S(y)^2 = 25000\text{kg}^2$$

Las ecuaciones 01 y 02 computan el promedio de los cuadrados de los desvíos entre cada propuesta de masa, respecto del valor escogido (1100kg y 1000kg para los vehículos A y B respectivamente).

La unidad del valor encontrado se expresa en la misma unidad de la variable original, pero al cuadrado.

Para terminar de conocer ahora, la medida que nos puede dar idea de la diferencia se obtiene el coeficiente de variación de cada variable. Esta es una

medida que trata de explicar porcentualmente, cuanto desvío promedio hay en el valor central escogido como valor representativo del conjunto de valores posibles.

$$Cv(x) = \frac{\sqrt{S(x)^2}}{1100\text{kg}} = 11.1\% \qquad Cv(y) = \frac{\sqrt{S(y)^2}}{1000\text{kg}} = 15.8\%$$

Esto quiere decir que al escoger el valor de 1100kg para el vehículo A, estaremos discrepando, en promedio, un 11% de ese valor. Toda opinión distinta a la de 1100 (pero contenida en el intervalo 950-1250), discrepa en promedio un 11%. Para el caso del vehículo B, la diferencia es de un 16% del valor que escogimos (1000kg).

¿Cuál será ahora, el grado de incertidumbre del valor de la velocidad del vehículo A, justo antes del impacto?, ¿Será igual a la incertidumbre de los datos que vamos a utilizar en el cálculo, o será mayor?

Bien; podemos encontrar un valor de dicha velocidad utilizando los valores centrales o mejor dicho, los valores que creemos son mas representativos.

$$v := \frac{5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot (1100 + 1000) \cdot \text{kg}}{1100 \cdot \text{kg}} \qquad v = 9.5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \qquad \text{Ec. 03}$$

La ecuación 03, nos muestra el valor inferido de la velocidad del vehículo A, justo antes del impacto.

Se puede pensar que para conocer la incertidumbre de el resultado, bastará con hacer el mismo cálculo de la ecuación 03, utilizando los valores de cada uno de los datos. Así por ejemplo, si empleamos los valores más bajos de la masas de cada vehículo, entonces encontraremos el valor más bajo de la velocidad del vehículo A; y si utilizamos los valores más altos de la misma variables, hallaremos el valor mas alto de la velocidad del vehículo. Al hacer la comprobación se comprueba de lo errático de esta idea.

Aquí se muestran los resultados.

$$v := \frac{5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot (950 + 900) \cdot \text{kg}}{950 \cdot \text{kg}} \quad v = 9.7 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad v := \frac{5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot (1250 + 1150) \cdot \text{kg}}{1250 \cdot \text{kg}} \quad v = 9.6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Notable no? Ambos valores son superiores al valor encontrado en la ecuación 03, ahora se pudiera pensar que todos los valores posibles se encuentran entre 9.5m/s y 9.7m/s; pues ya se consideraron los “casos extremos”. Sin embargo, que pasaría si se tratan de tomar el valor de la masa del vehículo A de 950kg, pero el del vehículo B es de 1150kg. ¿Se podría asegurar que esta nueva combinación posible arrojará un valor comprendido ya, entre 9.5 y 9.7m/s? Haciendo los cálculos

$$v := \frac{5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot (950 + 1150) \cdot \text{kg}}{950 \cdot \text{kg}} \quad v = 11.1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

¿Nos seguimos asombrando, no?

Como a esta altura se debe ya dudar de todo, procedamos a calcular el caso inverso al anterior.

$$v := \frac{5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot (1250 + 900) \cdot \text{kg}}{1250 \cdot \text{kg}} \quad v = 8.6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Muy bien, ahora ya sabemos que existen otros valores posibles que están mas allá del rango entre 9.5 y 9.7m/s, el cual creíamos correcto. En la mayoría de los dictámenes periciales no hay mucho cuidado en la valoración de la incertidumbre de los resultados. Estamos acostumbrados a arrojar números, sin saber muy bien que tan confiables o probables pueden ser los resultados de nuestros cálculos. Esto es lo más importante, por lo tanto se debe hacer un análisis estadístico para cada situación y no tener parámetros establecidos.

5. PLAN DE MERCADEO PARA UN SERVICIO NUEVO

5.1 Análisis de la situación

En Guatemala no se cuenta con ningún centro Privado que se dedique al análisis de accidentes de tránsito, probablemente el Gobierno puede hacer estos estudios a través del Instituto Nacional de Ciencias Forenses (INACIF) o el Ministerio Público pero solo en casos muy relevantes se hace estudio, por lo que la implantación de este servicio es innovador y tiene un mercado virgen de explotación, además muchas aseguradoras del país (por no decir todas) estarían dispuestos a contratar los servicios de determinación de responsabilidades en accidentes viales o bien para capacitar a sus peritos y poder darles herramientas para que las inspecciones sean más analíticas.

5.1.1 El mercado

Como mercado potencial se tiene: El Ministerio Público, el Instituto Nacional de Ciencias Forenses, las aseguradoras que funcionan en el país, así como toda la población interesada en que se de un dictamen después de analizar físicamente un accidente vial.

5.1.2 Actividad del mercado

Actualmente no hay actividad alguna ya que no existe un ente privado ni publico que se dedique a la determinación de responsabilidades en accidentes viales.

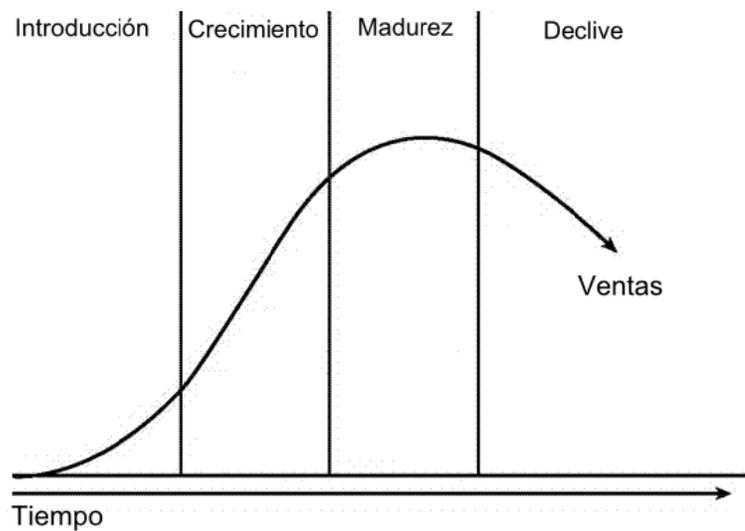
5.1.3 Mejora en el servicio

La fidelización de los clientes requiere un esfuerzo continuo de mejora que mantenga una ventaja competitiva. El proceso de mejora comienza por la identificación de los aspectos críticos y de los errores cometidos que disminuyen la calidad, para esto es preciso mantener la perspectiva del cliente.

Otro aspecto de la mejora de la calidad es comprometerse en proporcionar garantías. En los servicios la percepción de calidad por parte de los clientes se ve fuertemente influida por los tiempos de espera. La disminución de los tiempos de espera y la gestión de los mismos es un factor fundamental para la mejora del servicio, los servicios tienen un gran componente de interacción personal. En el servicio es tan importante el producto que se entrega como el proceso de entrega. Es por tanto esencial la formación y motivación de los empleados y su orientación hacia un servicio excelente

5.1.3.1 Etapa en el ciclo de vida

Figura 34. Gráfica de las etapas del ciclo de vida de un producto.



En este momento nos encontramos en una etapa de introducción, siendo esta etapa de costos muy altos ya que no se perciben ingresos y no hay ventas.

Las estrategias de marketing más recomendables para esta etapa se focalizan sectores internos y externos de la empresa.

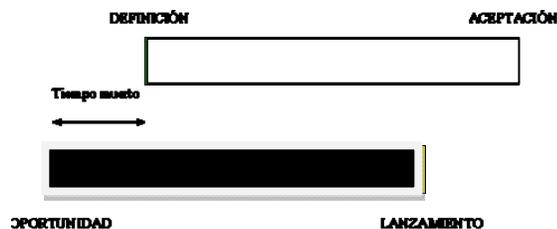
5.1.3.2 Tiempo Muerto para el diseño y desarrollo de un nuevo servicio.

Otro concepto íntimamente relacionado con el tiempo de mercado es el denominado ciclo de vida de la innovación, que hace referencia al lapso de tiempo que transcurre desde que se hace evidente la oportunidad del nuevo producto y el momento en que se satisface a los primeros clientes. Es decir, incluiría todas las fases enunciadas del proceso de desarrollo, desde la identificación de la oportunidad hasta la introducción del producto.

A diferencia del concepto de tiempo de mercado, definido de forma amplia, el ciclo de innovación comienza cuando aparece la oportunidad y no cuando comienza el desarrollo del producto y termina cuando se produce la primera venta y no cuando el producto alcanza su máximo potencial de ventas.

Si se comparan los conceptos de tiempo de mercado y ciclo de innovación se observa la existencia de un tiempo muerto que va desde la aparición de la oportunidad hasta la definición del producto.

Figura 35. Ciclo de la innovación y tiempo de mercado.



A este tiempo muerto se le conoce en la literatura anglosajona como *Fuzzy Front End* y se puede definir como el tiempo que transcurre desde el

momento en que se podría haber comenzado el proceso de desarrollo y el momento en el que comienza realmente

La gestión adecuada de este tiempo muerto puede conducir a importantes mejoras competitivas debida fundamentalmente a los siguientes motivos:

- Este tiempo muerto representa aproximadamente entre una tercera parte y la mitad del tiempo de desarrollo total.
- Los ahorros de tiempo en este período inicial son menos costosos de alcanzar, dado que el coste de reducir el tiempo se incrementa exponencialmente a medida que se avanza en el proceso de desarrollo del producto.
- Hasta el momento este tiempo muerto ha recibido escasa atención por parte de los equipos directivos, por lo que su adecuada gestión puede ser un importante factor de diferenciación y servir de fundamento a la obtención de ventajas competitivas.

5.1.3.4 Impacto en el mercado

Este será positivo ya que no a nivel centroamericano no hay ninguna entidad privada que cuente con este servicio, es preciso estudiar los costes ya que si estos son muy altos no podrán impactar ni penetrar el mercado de una manera positiva.

5.1.4 Aspectos sociales y gubernamentales

En este ámbito no tendremos negativa social ya que no hay ningún impacto negativo, y gubernamentalmente solo se necesita realizar el trámite para poder ser reconocidos por el Ministerio de Gobernación.

5.1.4.1 Clima legislativo

En este aspecto nos regiremos por el código mercantil para la institución, e inscripciones en la Superintendencia de Administración Tributaria (SAT), así como se ingresa escritura constitutiva en el Ministerio de Gobernación para obtener permiso de funcionamiento y tener credibilidad como ente que presta pruebas en la determinación de responsabilidades.

5.2 Estrategia de mercado

Las estrategias de marketing más recomendables para la etapa de introducción focalizamos sectores internos y externos de la empresa.

Para los clientes internos (personal de la organización):

- Crear cultura compartida de toda la organización.
- Seguimiento intensivo de todo el proceso.
- Estímulos, incentivos y premios, tanto cualitativos como cuantitativos, para esta etapa.
- Plan de contingencias para corregir o superar inconvenientes o problemas en el lanzamiento e introducción.

Para los clientes externos (compradores y consumidores):

- Definir de qué canales o puntos de ventas deberán incorporarse en la cadena de distribución.
- Diseño de la estrategia, qué política de precios, qué estrategias competitivas y qué metas y objetivos de negocios se fijarán para cada canal por utilizar.
- Promoción de ventas intensiva con objetivos y estrategias adecuados a los objetivos particulares de esta primera etapa de introducción
- Programación de reuniones o convenciones de presentación del producto, donde la empresa explique objetivos de negocios, beneficios y ventajas.
- Difusión y marketing directo a distribuidores y clientes finales considerados necesarios para esta etapa.

Figura 36. Planteamiento de la estrategia de mercado

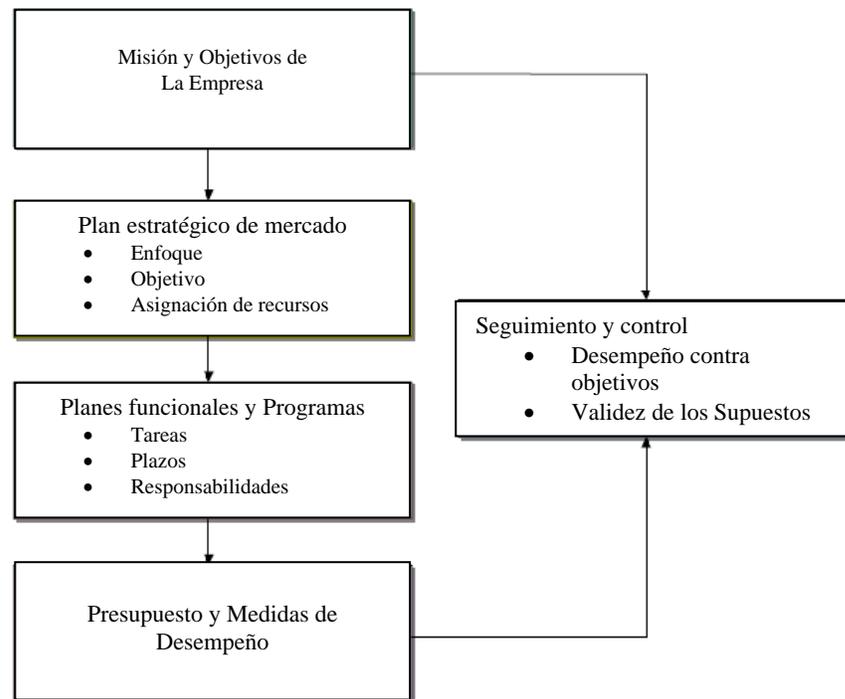


Figura 3

5.2.1 Cliente objetivo

Nuestro cliente es toda la población que necesite de asesoría para el esclarecimiento de un accidente de tránsito, aseguradoras del país, así como en la parte gubernativa podemos introducir este servicio al Ministerio Público

5.2.2 Competidor Objetivo

La competitividad directa no existe ya que es un servicio de innovador y único, si por esta innovación es lo que permite mantener una barrera temporal hasta que otro competidor u otro jugador copien este servicio, pero por el momento es una ventaja competitiva para la empresa.

5.2.3 Estrategia Central

La estrategia central de la organización se refleja en la declaración de sus objetivos superiores y en los medios por los cuales éstos serán conseguidos. Esta estrategia se declara generalmente de modo de dar a conocer la razón de su existencia, por ejemplo, su misión y el negocio en que está o desea estar. Aunque la estrategia de mercadeo no constituye una sola y la misma cosa, se puede argumentar:

“la selección de una estrategia de mercadeo por la empresa influirá y afectará todo lo que hace y, en este aspecto, la estrategia de mercadeo y la estrategia corporativa están inextricablemente encadenadas”.

Se enfatizara la importancia central del mercadeo y en verdad promueve la idea de que todos y cada uno de los aspectos de la empresa deberían estar dirigidos hacia el mercado, un mercadeo eficiente constituye una condición necesaria pero no suficiente para el éxito del negocio. Esta organización estará orientada hacia el mercado, se permitirá que el mercadeo influya otras áreas funcionales como investigación y desarrollo, producción, finanzas y personal, cada una de las cuales tendrá estrategias individuales aunque concertadas y en forma colectiva entran en la esfera de la estrategia corporativa.

Tabla XVII. Plan estratégico corporativo a utilizar.

PLANEAMIENTO CORPORATIVO	
Planeamiento estratégico	Planeamiento operacional
Características	Características
<ul style="list-style-type: none"> • Conforman la organización y sus recursos 	<ul style="list-style-type: none"> • Se ocupa de la asignación rutinaria de los recursos
<ul style="list-style-type: none"> • Estima el impacto de las variables ambientales 	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrolla tácticas antes que estrategias
<ul style="list-style-type: none"> • Asume una visión holística de la organización 	<ul style="list-style-type: none"> • Proyecta las operaciones corrientes al futuro
<ul style="list-style-type: none"> • Desarrolla los objetivos y estrategias superiores de la organización 	<ul style="list-style-type: none"> • Realiza modificaciones en las funciones del negocio pero no cambios fundamentales
<ul style="list-style-type: none"> • Es responsabilidad de la administración superior 	<ul style="list-style-type: none"> • Es la responsabilidad de los gerentes de funciones
<ul style="list-style-type: none"> • Se preocupa con el éxito de la organización en el largo plazo 	

5.3 Documentos financieros

En la etapa de introducción se manejarán únicamente proyecciones a seguir y lo referente a la asignación de recursos para la introducción del servicio y su funcionamiento ya que en este momento no se tienen ingresos, se contará con el capital de inversión por lo tanto el único documento financiero legal que existirá, será la escritura de constitución, donde se explicará los aportes de capital, luego se administrará este capital haciendo una planificación presupuestaria.

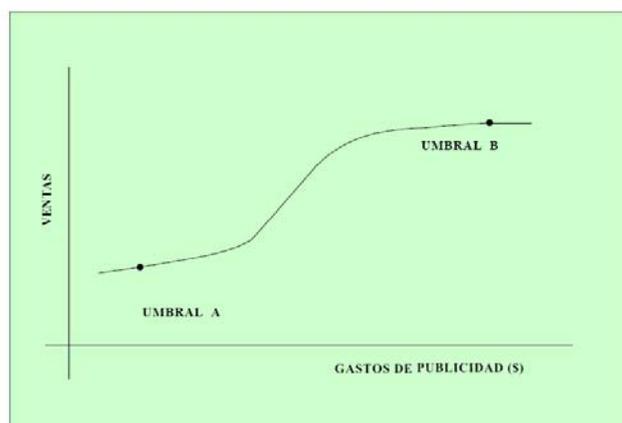
5.3.1 Presupuesto publicidad y promociones

Este es uno de los métodos más comunes. Consiste en la designación arbitraria de una partida para publicidad, definida por la Dirección General o el área de Finanzas.

La mayor ventaja de este método es que se tiene un control perfecto sobre los desembolsos de la empresa; sin embargo, su principal desventaja es que no se establece una relación directa con los resultados de mercadeo y ventas y, por ende, no atiende a las necesidades de crecimiento e inversión del negocio.

En este método no son consideradas las necesidades de mercadeo de la empresa, muestra que el negocio tiene una clara orientación hacia la parte financiera y no hacia la parte comercial, por tanto el presupuesto para publicidad estará restringido a la decisión financiera de la organización.

Figura 37. Curva teórica de la respuesta a la publicidad



5.3.2 Presupuesto de ventas

Es el método más utilizado por las pequeñas y medianas empresas. Tiene dos modalidades:

1. Porcentaje de ventas del año anterior. La empresa asigna un presupuesto que va desde el dos hasta el diez por ciento de las ventas que la empresa logró en el último ejercicio.
2. Porcentaje sobre pronóstico de ventas. Aquí, el porcentaje se asigna de acuerdo con las ventas que se esperan para el ejercicio en curso. Es decir, se pronostican las ventas y sobre el resultado de este pronóstico se asigna un porcentaje de entre el dos y el nueve por ciento para las actividades comerciales donde está incluida la publicidad.

Para nuestro caso y en la etapa de introducción se trabajara sobre pronósticos.

Estos métodos de determinación de presupuesto garantizan que el negocio invertirá en actividades de mercadeo sólo la cantidad que sea justificada por las ventas.

5.3.3 Presupuesto de desarrollo del producto

El presupuesto de inversiones y desarrollo considera aquellos movimientos contables y financieros de corto y largo plazo, que se producirán en la empresa como resultado de un programa de inversiones o desarrollo de nuevos proyectos. Se enfocan principalmente en la compra de activos fijos. Las inversiones responden a decisiones de largo plazo, en base a un planeamiento estratégico que requiere estudios especiales. Estas inversiones son necesarias para:

- Mantener y conservar la capacidad de producir un servicio satisfactorio al cliente
- Preservar o mejorar el rendimiento de los activos
- Expandir las operaciones, si la demanda lo permite.

El efecto de estas inversiones para el desarrollo en los programas de la empresa se reflejan en el Balance General (aumento de activo no corriente), en el presupuesto operativo (cambio en los costos de mantenimiento, de depresión; mayor capacidad de venta), en el presupuesto de gastos financieros (si la inversión se financia, debe considerarse intereses a pagar) y principalmente en el presupuesto de flujo de caja (desembolsos de dinero). La inversión que se hace para desarrollar este nuevo servicio también lleva consigo un beneficio al mediano y largo plazo que se detecta en un mayor volumen de ventas o en una disminución de los costos y gastos (por ahorros en costos). Generalmente la preparación de un presupuesto de inversiones para desarrollar este nuevo servicio corre a cargo de la función planeamiento, con la activa participación de la Alta Gerencia y del área donde se implementarán estos cambios.

CONCLUSIONES

1. Las consecuencias físicas que se toman en cuenta para la determinación de la responsabilidad en un accidente automovilístico son: la velocidad, la masa del vehículo incluyendo la de sus ocupantes, la conservación del *momentum* lineal, la conservación de la energía, la fricción, el momento de inercia.
2. Las evidencias físicas que se recolectan en el lugar del accidente automovilístico que nos sirven para determinar la responsabilidad son: marcas de las frenadas, la deformación de los vehículos, la planimetría del terreno, la posición final de los vehículos.
3. Las evidencias físicas que se encuentran en el lugar del siniestro sirven de base para poder hacer simulaciones matemáticas para poder determinar la responsabilidad del accidente, esta responsabilidad no se puede presentar en datos puntuales, sino en rangos de probabilidad.
4. La Ley de Tránsito no contempla procedimientos adjetivos para la aplicación de responsabilidades, sólo nos podemos remitir al Artículo 30 que señala violaciones generales a dicha Ley.
5. El costo que se debe hacer para la implementación del servicio es bajo, comparado con la Tasa Interna de Retorno que es alta.

6. El plan de mercadeo que se propone es: establecer el **enfoque** que se quiere dar, establecer **objetivos** del plan y por último la **asignación de recursos** para incursionar en el mercado.

7. La estrategia de Implementación se hace a través del desarrollo del servicio enfocado a la necesidad del cliente, la publicidad y promoción.

RECOMENDACIONES

1. Para determinar con plena certeza la responsabilidad en un accidente automovilístico, debe implementarse programas de capacitación a instituciones como la Policía Nacional Civil y la Policía Municipal de Tránsito en la recolección de evidencias físicas.
2. Se debe hacer estudios más serios en la planimetría del terreno cuando se recolectan pruebas, así como modelos informáticos y la fotogrametría digital, para poder concluir con certeza al momento de realizar el dictamen de un accidente vial.
3. Se sugiere a las autoridades judiciales competentes, la valoración como plena prueba de los parámetros dados después del estudio físico-matemático de las pruebas de un accidente vial.
4. Modificar la Ley de Tránsito para que ésta tipifique las responsabilidades en un accidente automovilístico.
5. Se debe solicitar al INACIF que capacite a personal en el área de accidentología, para la determinación veraz de todos los factores que se dan en el momento de un accidente.
6. Se debe solicitar al Departamento de Tránsito que toda persona previo a obtener Licencia de Conducir, se capacite en Técnicas de Manejo Defensivo (cómo evitar accidentes), esto con el fin de prevenir accidentes viales y que los conductores sepan cómo actuar ante una situación de peligro.

7. Se sugiere a todo conductor que se vea envuelto en un accidente de tránsito que tome fotografías del lugar de los hechos, antes de mover los vehículos del lugar del percance, para poder con éstas hacer mediciones y poder determinar la responsabilidad.

BIBLIOGRAFÍA

1. Alba J, Enciso Gustavo A. **Diversas Aplicaciones de las Integrales Dobles en el Cálculo del Área de Deformación de un Vehículo**. Junio 2001.
2. Blanco, Adrián O, Enciso Gustavo A: **Innovar para Sobrevivir**, Editorial Mac Graw Hill, julio 2004.
3. Custidiano Ernesto y Enciso Gustavo: **Propagation of the error in the estimate of the Speed off circulation of a vehicle for lost off Kinetic Energy**.
4. Enciso Gustavo A: **Una consideración en 3D de los Modelos Lineales de Deformación**.
5. Enciso, Gustavo A y Godoy Natalia: **Obtención de Longitudes en el Plano de Una Escena Fotografiada Mediante la Emulación de una Cámara Virtual**, noviembre de 2001.
6. Martínez, Ernesto N: **Accidentes Viales y la Mitología del Choque**
7. Montenegro, Ángel, Enciso, Gustavo A: **Dinámica con Rototraslación de vehículos en la Reconstrucción de Accidentes Viales**, abril 2003.
8. Serway Raymond A y Jewett John W: **Física para las Ciencias y la Ingeniería**, Editorial Thomson, Sexta Edición junio de 2005.

9. Aguilar Najarro, Marco N: **Lanzamiento productos y servicios nuevos**, Editorial Thomson, Tercera Edición, agosto 2004.

10. Alvarado, Ericicks y Torres Adolfo, Marketing, e-business para servicios Editorial Americana, septiembre 2006.