

DESARROLLO DE UN CASO PRÁCTICO DEL ANÁLISIS MODAL DE FALLAS Y EFECTOS (AMFE) COMO METODOLOGÍA DE APRENDIZAJE EN EL CURSO DE INGENIERÍA DE LA CONFIABILIDAD

Ing. Félix Badilla Murillo, MEng
fbadilla@itcr.ac.cr
Profesor, Escuela de Ingeniería
en Producción Industrial
Instituto Tecnológico de Costa
Rica

Rocío Fernández Chaves
rocio.fc02@estudiantec.cr
Estudiante, Escuela de Ingeniería
en Producción Industrial
Instituto Tecnológico de Costa Rica

Introducción

Para Leite et al. (2011), los programas de ingeniería deben promover el razonamiento argumentativo, es decir, se deben enfocar en la evaluación como una forma de establecer en qué medida se da el razonamiento en los procesos de enseñanza y aprendizaje, donde la resolución de problemas constituye un elemento estructural en la organización curricular de los programas de ingeniería y está fuertemente relacionada con las habilidades argumentativas que pueden adquirir los estudiantes. Como parte de su análisis, pudo concluir

que los estudiantes demuestran y explican ampliamente, pero no discuten, posiblemente porque sus profesores no los invitan para hacerlo en situaciones de evaluación.

Mora Pedreros y Zapata Hoyos (2021) proponen una estrategia de gamificación (incorporar juegos) que permita incorporar nuevas prácticas educativas en el aula para fomentar el proceso creativo y la motivación en los estudiantes para que realicen sus actividades de una forma más atractiva. Por otra parte, para Cortazar et al. (2021), el aprendizaje en línea basado en proyectos fomenta el desarrollo del pensamiento crítico, mientras que proporciona un andamiaje regulatorio socialmente compartido.

Teniendo en consideración estos aspectos sobre el proceso de enseñanza y aprendizaje en el área de ingeniería, es importante incorporar evaluaciones en el curso de Ingeniería de la confiabilidad donde los estudiantes desarrollen proyectos prácticos que los enfrenten a situaciones reales y los motiven a un razonamiento creativo.

Para Filz et al. (2021) es posible analizar la predicción del comportamiento de fallas de componentes específicos, o incluso el producto, mediante la metodología de Análisis Modal de Fallas y Efectos (AMFE), la cual fue aplicada en este estudio. Por su parte, Moyahabo y Opeyeolu (2021) mencionan que el mantenimiento juega un papel muy importante en el logro de los objetivos de producción y el rendimiento del sistema productivo, en vista de que se espera que los equipos electromecánicos y la infraestructura de las instalaciones en las industrias de fabricación de motores funcionen con una eficiencia óptima, para lo cual aplica el AMFE con el fin de predecir el comportamiento que estas tendrán y mejorar su desempeño.

El objetivo de este trabajo es desarrollar la modelo de aprendizaje práctico del Análisis Modal de Fallas y Efectos (AMFE) que aumente la confiabilidad del diseño de un producto dado, mientras los estudiantes desarrollan atributos como el trabajo en equipo y diseño de ingeniería.

Metodología

El experimento se realizó con el objetivo de medir la vida útil y la confiabilidad del diseño original de un carro fabricado por estudiantes de Ingeniería en Producción Industrial del Tecnológico Costa Rica. El ensayo consistió en deslizar el carro de forma manual (con la fuerza mano-brazo) por una pendiente de concreto de 5.15m de largo y 8.21° de inclinación, y verificar si lograba resistir intacto el trayecto completo, si se desviaba del camino, o bien, si se detenía en alguna parte de este.

La prueba fue realizada en Santa Clara de San Carlos, bajo una temperatura de $(26 \pm 0,1) ^\circ\text{C}$ y un porcentaje de humedad de $(93 \pm 1) \% \text{HR}$. Primeramente, se realizó un muestreo preliminar de 10 repeticiones en donde se asignó un responsable para ejecutar el lanzamiento de un carro hecho en MDF

con llantas de acrílico, mientras que otra persona se encargaba de medir las distancias recorridas por el mismo con una cinta métrica. El objetivo de este muestreo fue obtener el tamaño de muestra necesario para realizar el experimento de manera ideal; este resultó ser de 29 repeticiones.

Una vez obtenido del tamaño de muestra, se repitió el procedimiento de la toma de las medidas de la distancia recorrida, pero, en esta ocasión, con el fin de medir la confiabilidad y la vida útil del prototipo original. Los resultados de la prueba se sometieron a un AMFE, en donde se evaluaron como causas posibles de las fallas en el carro: el material, el método, el operario, el medio ambiente y la medición.

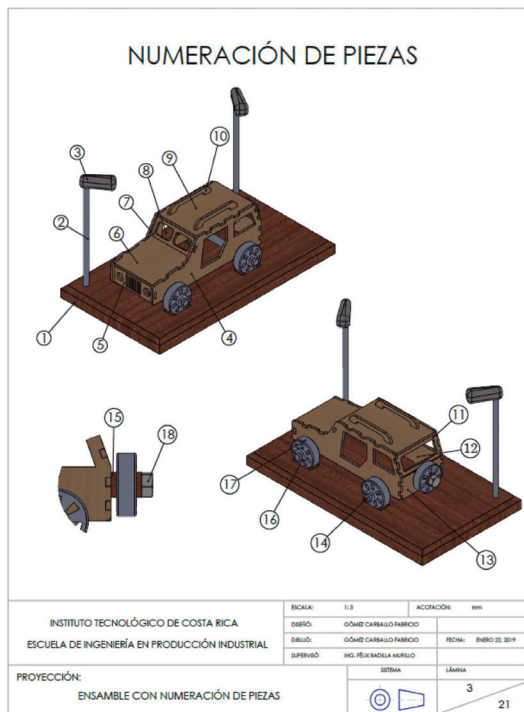
Con base en lo anterior, se realizó un nuevo diseño para el carro utilizando los equipos disponibles

en el Laboratorio de Sistemas Integrados de Manufactura (SIMTEC), con el fin de reducir la falla más significativa y lograr que el vehículo cumpliera su meta de recorrer los 5.15m de la rampa. La factibilidad de esta solución se midió nuevamente mediante un análisis de confiabilidad y vida útil del producto. Se compararon los resultados obtenidos del deslizamiento del prototipo de carro original contra los del nuevo diseño para generar las conclusiones.

El diseño original del carro que debió mejorarse es el que aparece en la Figura 1. Este diseño fue elaborado por el estudiante Fabricio Gómez Carballo para utilizarlo en el laboratorio SIMTEC. La Figura 2 presenta la lista de piezas, materiales y cantidades requeridas.

Figura 1. Numeración de piezas que componen el diseño original del carro.

Figura 2. Lista de piezas, materiales y cantidades para el ensamble del carro.



LISTA DE PIEZAS DEL ENSAMBLE DEL CARRO

Nº de Pieza	Nombre de la Pieza	Material	Cantidad
1	Base del Ensamble	Madera (Pino)	1
2	Poste de Luz	Barra Acero 1/4	2
3	Lámpara	PLA	2
4	Lateral Carro	MDF (3mm)	2
5	Parrilla	MDF (3mm)	1
6	Capó	MDF (3mm)	1
7	Porta Parabrisas Delantero	MDF (3mm)	1
8	Parabrisas Delantero	Acrílico (3mm)	2
9	Techo	MDF (3mm)	1
10	Rack	MDF (3mm)	2
11	Porta Parabrisas Trasero	MDF (3mm)	1
12	Parabrisas Trasero	Acrílico (3mm)	1
13	Porta Repuesto	MDF (3mm)	1
14	Eje	Acero	2
15	Arandela	MDF (3mm)	6
16	Seguro Eje	Acrílico (3mm)	4
17	Llantas	PLA	5
18	Seguro Llanta Repuesto 1	Tornillo Hexagonal $\varnothing 1/4 - 1,5$	1
19	Seguro Llanta Repuesto 2	Tuerca Hexagonal $\varnothing 1/4$	1

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA	ESCALA: 1:1	ACORDÓN: mm
ESCUELA DE INGENIERÍA EN PRODUCCIÓN INDUSTRIAL	DEBID: GÓMEZ CARBALLO FABRICIO	FECHA: ENERO 20, 2019
	DEBID: GÓMEZ CARBALLO FABRICIO	
	SUPERVISÓ: ING. FÉLIX BADELLA MURILLO	
TABLA: LISTA DE PIEZAS, MATERIALES Y CANTIDADES PARA EL ENSAMBLE DEL CARRO	SISTEMA	LÁMINA 4
		21

Resultados

Del muestreo preliminar se obtuvieron las mediciones de 10 distancias recorridas por el carro desde su lanzamiento hasta su frenado. Estas distancias fueron las siguientes:

Tabla 1. Datos obtenidos en el muestreo preliminar

N° Muestra	Distancia recorrida (m)
1	2,57
2	3,25
3	2,54
4	4,77
5	3,47
6	5,25
7	2,44
8	2,60
9	2,72
10	5,21

Fuente: Muestreo preliminar

Los datos anteriores se sometieron a análisis estadísticos utilizando Minitab 19 para conocer su distribución de probabilidad y con ella realizar un estudio de probabilidades de supervivencia. Resultó ser que la distribución que mejor se ajustaba a los números corresponde a la lognormal de 3 parámetros, con un Anderson-Darling de 1,56. Posteriormente, se realizó un análisis de distribución paramétrica mediante máxima verosimilitud, y se concluyó que la probabilidad de supervivencia del estudio fue de un 12.8%. Es decir, en un 87.20% de los lanzamientos el diseño original del carro no cumplió la meta de recorrer los 5.15m de la rampa. En promedio el carro se detenía al completar los 4.06m.

Por otro lado, se realizó un plan de prueba de estimación con base en los parámetros de ubicación y escala que indicó que para que el procedimiento tuviera un nivel de confianza del 95% el tamaño de

muestra debía ser igual a 29 repeticiones, con una precisión de 4%.

En la siguiente tabla, se muestran las distancias recorridas por el carro tras los 29 lanzamientos, se incluye además el modo de falla por el cual el artículo se detuvo:

Tabla 2. Datos obtenidos durante el muestreo de la prueba realizada

N° Muestra	Recorrido (m)	Fallo	N° Muestra	Recorrido (m)	Fallo
1	3,53	Frenó	16	5,38	Frenó
2	2,07	Frenó	17	4,30	Frenó
3	5,30	Frenó	18	3,90	Desvió
4	5,15	Desvió	19	3,98	Frenó
5	2,68	Desvió	20	4,87	Desvió
6	5,34	Frenó	21	3,60	Desvió
7	4,50	Desvió	22	5,33	Frenó
8	2,70	Frenó	23	4,50	Desvió
9	5,40	Frenó	24	5,34	Frenó
10	5,38	Frenó	24	3,50	Frenó
11	5,37	Frenó	26	4,93	Desvió
12	5,37	Frenó	27	4,54	Desvió
13	2,77	Desvió	28	4,85	Desvió
14	4,60	Desvió	29	4,53	Desvió
15	5,40	Frenó			

Fuente: Muestreo realizado durante la prueba aplicada al diseño original del carro

Una vez obtenida la muestra, se procedió a repetir el procedimiento efectuado con el muestreo preliminar. En este caso, se concluyó que la distribución de probabilidad que mejor se ajustaba a los datos corresponde a la Loglogística de 3 parámetros, la cual se utilizó como base para realizar el análisis de

confiabilidad. Este indicó que la probabilidad de supervivencia fue de 0.25; es decir, únicamente en un 25% de los lanzamientos el carro logró cumplir su meta de recorrer los 5.15m de la rampa, un rendimiento realmente bajo. La distancia media de falla fue de 4.57m con un

intervalo de confianza del 95% de (4.22, 4.93) metros.

Debido al bajo rendimiento mencionado anteriormente, se procedió a realizar la matriz AMFE, en la cual se evidenció que las piezas que contaban con el mayor Número de Prioridad de Riesgo (NPR) eran las

llantas del carro y el portarepuesto, con índices de 75 y 15, respectivamente.

La falla encontrada en el portarepuesto fue el desprendimiento del mismo durante la trayectoria. Si bien esto no interfiere directamente con la distancia alcanzada del carro, es perjudicial para la calidad de este. La causa de esta falla corresponde a un error en la medición de la pieza, siendo esta desproporcional con respecto a las demás partes de la carrocería a las cuales iba conectada. Además, a lo anterior se le puede añadir la ausencia de pegamento para el ensamblaje de las piezas.

Por otro lado, la falla más representativa se identificó en las llantas y es atribuible tanto al diseño de estas como a su material, conocido como PLA, el cual no tiene mucha capacidad de rodaje sobre concreto y ocasionó que el carro se detuviera por completo en varias de las corridas. Con respecto al diseño original de la llanta, se evidenció que este causó inestabilidad en el vehículo haciendo que se desviara hasta

salirse de la rampa o se detuviera. Ambos factores que debieron haberse considerado antes de la fabricación de la pieza. En las llantas se encuentra la principal razón por la cual el carro no logró alcanzar su trayectoria.

Una vez encontradas las fallas y sus respectivas causas, se procedió a elaborar las mejoras en el diseño. Resultando que:

- Se rediseñaron las medidas del portarepuestos, ajustándolo a las posiciones correctas. Además, se agregó pegamento en las partes a la hora del ensamble, evitando el desprendimiento de piezas.
- El material de las llantas fue cambiado por termoplástico, caracterizado por tener buena capacidad de rodaje en superficies de concreto. Adicionalmente, se le incorporaron tacos en los bordes, obteniendo una llanta con relieve mucho más estable y con menos posibilidades de desviarse.



Figura 3. Diseño de la nueva rueda para mejorar la confiabilidad del carro.

Posterior a las mejoras implementadas en el diseño, se procedió nuevamente a hacer el muestreo respectivo para realizar los análisis de confiabilidad y vida útil del nuevo carro, y evaluar si se había logrado mejorar el alcance de la trayectoria de este. Los resultados del muestreo se muestran a continuación:

Tabla 3. Datos obtenidos durante el muestreo del nuevo diseño del carro

N° Muestra	Recorrido (m)	Fallo	N° Muestra	Recorrido (m)	Fallo
1	5,20	Frenó	16	5,40	Frenó
2	5,27	Frenó	17	5,29	Frenó
3	5,18	Frenó	18	5,30	Frenó
4	5,26	Frenó	19	5,27	Frenó
5	4,91	Frenó	20	5,33	Frenó
6	4,95	Desvió	21	4,87	Frenó
7	5,54	Frenó	22	4,97	Frenó
8	5,32	Frenó	23	5,30	Frenó
9	6,15	Frenó	24	4,82	Frenó
10	5,22	Frenó	24	5,29	Frenó
11	5,28	Frenó	26	5,19	Frenó
12	5,66	Frenó	27	4,94	Desvió
13	5,40	Frenó	28	5,20	Frenó
14	5,05	Desvió	29	5,30	Frenó
15	5,57	Frenó			

Fuente: Datos obtenidos en la prueba aplicada al carro.

De los datos anteriores se concluye que la distribución que mejor se ajusta a ellos es la Loglogística de tres parámetros, con un Anderson-Darling de 1.91 y los percentiles más altos. Una vez realizada la

prueba de supervivencia, se obtuvo una probabilidad promedio de 0.66 con un intervalo de 95% entre (0.50, 0.79), lo cual quiere decir que en este caso el nuevo diseño del carro cumplió su trayectoria esperada de

5.15m en un 66% de los lanzamientos. Para esta ocasión la distancia media recorrida fue de 5.26m.

Tabla 3. Resumen de resultados obtenidos según tipos de muestra realizados

Tipo de Muestra	Tamaño (réplicas)	Confiabilidad	MTTF (m)
Preliminar	10	12,83%	4,06
Prototipo Original	29	25,12%	4,57
Diseño Nuevo	29	66,21%	5,26

Fuente: Muestras realizadas durante el estudio.

Conclusiones

1. Con el proyecto realizado, los estudiantes tuvieron la oportunidad de desarrollar atributos como el trabajo en equipo, análisis de problemas y la aplicación de herramientas de ingeniería para plantear soluciones.
2. El equipo de trabajo logro aplicar los diferentes pasos requeridos para elaborar un AMFE para el diseño del carro, siendo posible priorizar como principales fallas las llantas del carro y del porta repuesto.
3. Fue posible evaluar el impacto de las mejoras teniendo como referencia la confiabilidad del diseño original y el diseño con las mejoras propuestas por los estudiantes al pasar de 25% a 65%. Además, fue posible

identificar como el Tiempo Medio de Falla (MTTF, por sus siglas en inglés) pasó de 4.57 metros a 5.26 metros.

Referencias

- Cortazar, C., Nussbaum, M., Har-cha, J., Alvares, D., Felipe, L., Julian, G., & Cabezas, V. (2021). Promoting critical thinking in an online, project-based course. *Computers In Human Behavior*. 119(10675), 361-378
- Filz, M.-A., BernhardLangner, J. E., Herrmann, C., & Thiede, S. (2021). Data-driven failure mode and effect analysis (FMEA) to enhance maintenance planning. *Computers in Industry*. 129(103451)

- Leite, C., Mouraz, A., Trindade, R., Martins Ferreira, J., Faustino, A., & Villate, J. (2011). A place for arguing in engineering education: A study on students' assessments. *European Journal of Engineering Education*. 36(6), 607-616.
- Mora Pedreros, T., & Zapata Hoyos, E. (2021). Gamification as a motivating and creative axis in pedagogical practice in engineering. *Revista Educacion en Ingenieria*. 16(31), 64-71.
- Moyahabo, D. R., & Opeyeolu, T. L. (2021). Optimization of condition-based maintenance strategy prediction for aging automotive industrial equipment using FMEA. *Procedia Computer Science*. 180(2021), 229-338.