

Confiabilidad de Componentes No Reparables

Carlos J. Zapata
Universidad Tecnológica de Pereira
Colombia

Introducción

En las sociedades modernas se utilizan muchos productos y servicios. La figura 1 presenta un ejemplo de éstos. Se denomina "falla" a la situación en que un producto o servicio:

1. Deja cumplir parcialmente o totalmente su función.
2. Presenta una diferencia inaceptable entre el desempeño ofrecido por su fabricante o proveedor o el establecido en la regulación y el observado por el usuario.

Las fallas ocurren debido a:

1. Defectos físicos o técnicos: Están relacionados con el diseño, materiales, manufactura y mantenimiento.
2. Errores operativos: Están relacionados con factores humanos.

Las fallas de un producto o servicio pueden:

1. Causar desde molestias e inconvenientes para algunos de los usuarios hasta un severo impacto en la sociedad.
2. Llevar a situaciones potencialmente peligrosas o de "riesgo" para los usuarios o el medio ambiente, diferentes a las aceptadas o permitidas.

Por lo tanto, se requiere que todo producto o servicio ofrezca:

Calidad: Se refiere a su desempeño respecto a unas normas técnicas. Ejemplo: Calidad de la imagen de televisión, calidad del material.

Seguridad: Que su uso no implique potenciales peligros o riesgos para los usuarios o el medio ambiente diferentes a los aceptados o permitidos.

Confiabilidad: Que cumpla su función durante el tiempo requerido bajo las condiciones operativas especificadas.

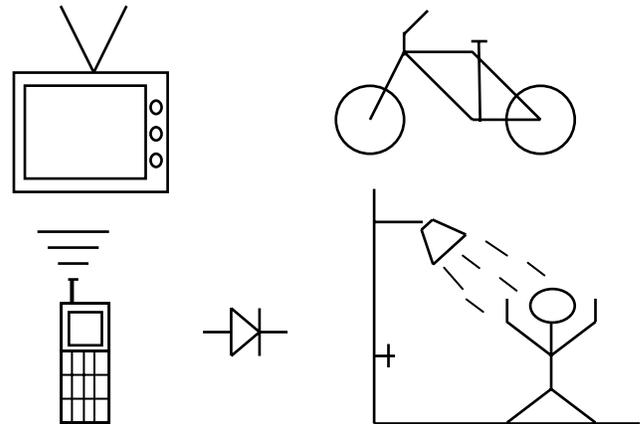


Figura 1. Algunos productos y servicios

Existe una estrecha relación entre estos tres aspectos: la confiabilidad se refiere a la operación del producto o servicio cumpliendo los requisitos de calidad y seguridad, por lo cual, las mejoras en calidad y seguridad conllevan a la mejora de la confiabilidad

Los eventos internos y externos que producen la falla de un producto o servicio son de naturaleza aleatoria ya que no es posible determinar el instante de su ocurrencia. Así, la posibilidad de su ocurrencia se mide en términos de probabilidad. Esto nos lleva a la definición clásica de confiabilidad para un producto o servicio: "Es la probabilidad de que cumpla su función en las condiciones operativas especificadas durante un intervalo de tiempo dado".

Para el análisis de confiabilidad se utiliza entonces el modelamiento probabilístico.

Concepto de componente y sistema

Los productos pueden ser simples o complejos, dependiendo de la cantidad de componentes que los conformen. Los servicios son suministrados por sistemas conformados por muchos componentes más las personas encargadas de su operación.

La confiabilidad de un producto o servicio dado depende de la confiabilidad de los componentes que lo conforman y de su configuración operativa o nivel de redundancia.

Si para un producto o servicio dado interesa estudiar el efecto sobre su confiabilidad de la confiabilidad individual de sus componentes y de su configuración operativa, éste tiene que ser tratado como un sistema. Si por el contrario, solo interesa estudiar su confiabilidad como un todo sin detallar en lo que sucede internamente, éste puede ser tratado como un componente.

Se denomina componente a un producto o servicio que será modelado en forma global como un todo. Se denomina sistema a un conjunto de componentes interconectados para cumplir una función.

Así, en el contexto de la confiabilidad, los términos componente y sistema son intercambiables ya que un producto o servicio puede ser tratado de una forma u otra dependiendo del objetivo del estudio. En la figura 2 se presenta un ejemplo de esto.

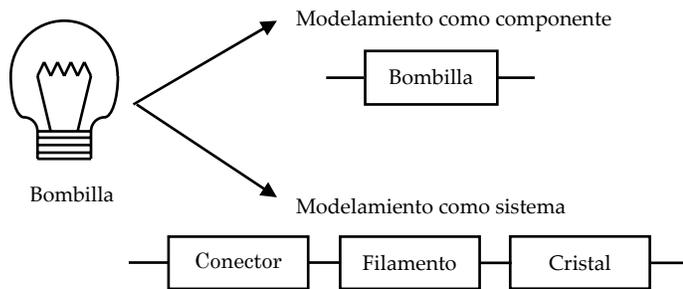


Figura 2. Ejemplo de un producto tratado como componente o sistema

Tipos de componentes y sistemas

Un componente o sistema puede ser:

No reparable: Aquel que se descarta la primera vez que falla. Ejemplos: aislador eléctrico, diodo, transistor, circuito integrado, empaque plástico, etc.

Reparable: Aquel que una vez falla puede ser restaurado al estado operativo mediante cualquier método (reparación, ajuste, etc.) excepto su reemplazo completo. Ejemplos: sistema eléctrico de potencia, sistema de acueducto, computador, refrigerador, etc.

Un componente es no reparable porque:

- Su reparación implica su re-manufactura
- Es fabricado como un producto desechable
- Su reparación es tan compleja que no se garantiza el retorno al estado operativo cumpliendo todos los requisitos de calidad y seguridad

- La regulación prohíbe su reparación por razones de seguridad o higiene.
- Su reemplazo cuesta menos o lo mismo que su reparación.

Confiabilidad de componentes no reparables

En la figura 3 se muestra la secuencia operativa de un componente no reparable.

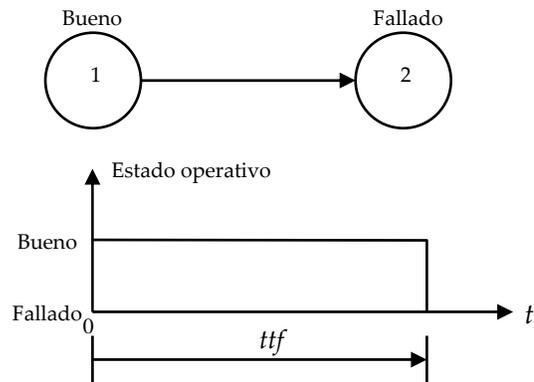


Figura 3. Estados operativos de un componente no reparable

La transición del estado bueno al estado fallado ocurre en un tiempo aleatorio t_{ff} (time to failure). Este tiempo indica cuánto vive o dura el componente.

Sin embargo, no es posible medir ni modelar la confiabilidad de un solo componente no reparable; para esto, se requiere una muestra representativa de tiempos para falla tomada de una población con N componentes idénticos al que interesa estudiar y en la cual n componentes fallaron.

Tal como se muestra en la figura 4, cada t_{ff} se mide con respecto al instante en el cual el componente fallado fue puesto en servicio estando nuevo. Sin embargo, en algunos casos el registro de datos puede estar restringido a un periodo T , omitiéndose algunas fallas.

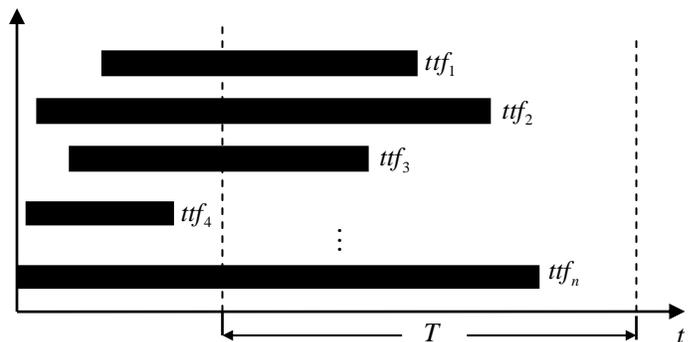


Figura 4. Muestra de tiempos para falla de componentes no reparables

La función de densidad de probabilidad de los tiempos para falla $f_{if}(t)$ o “modelo de vida” del componente no reparable se obtiene ajustando la muestra de tiempos para falla a una distribución de probabilidad. La función de distribución de probabilidad $F_{if}(t)$ permite calcular la probabilidad de que el componente falle en un tiempo menor o igual a un valor dado t :

$$F_{if}(t) = P\{t_{if} \leq t\} = \int_0^t f_{if}(t) dt \quad (1)$$

La confiabilidad $R(t)$ (Reliability) es el complemento de la probabilidad de falla:

$$R(t) = 1 - F_{if}(t) \quad (2)$$

A partir del modelo de vida del componente se obtienen los índices de confiabilidad de la siguiente forma:

- Tasa de fallas

$$\lambda(t) = f_{if}(t) / [1 - F_{if}(t)] \quad (3)$$

- Vida media esperada

$$E(t_{if}) = \int_0^t t \cdot f_{if}(t) \cdot dt \quad (4)$$

La tasa de fallas indica el estado de confiabilidad de los componentes de la población que representa. Esto se ilustra en la figura 5.

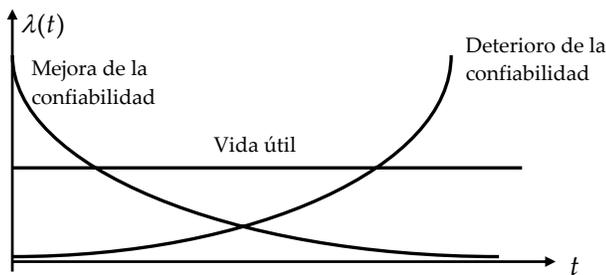


Figura 5. Tasa de fallas de un componente no reparable

En las aplicaciones de la vida real surgen algunos problemas que impiden hallar el modelo de vida del componente y aplicar (3) y (4). Entre estos se tienen:

1. No se encuentra ajuste a una distribución de probabilidad (No homogeneidad).
2. No se tienen los tiempos para falla, solo se conoce el número de fallas n registradas durante un periodo de observación o registro T .
3. Aunque se tiene registrado el tiempo en que fallan los componentes, no se conoce el instante en el cual estos componentes fueron puestos en servicio.

En el primer caso, la vida media esperada se puede estimar como el promedio estadístico de los tiempos para falla (5).

$$\hat{E}(t_{if}) \approx \overline{t_{if}} \quad (5)$$

En el segundo y tercer caso, la tasa de fallas se puede estimar aplicando (6) ó (7). La ecuación (7) se aplica cuando la población de componentes es variable y los datos cubren k periodos.

$$\hat{\lambda}(t) \approx n / [N \cdot T] \quad (6)$$

$$\lambda = \left(\sum_{j=1}^k n_j \right) / \left(\sum_{j=1}^k N_j \cdot T_j \right) \quad (7)$$

Una vez se estima uno de los índices, el otro se halla mediante la siguiente relación:

$$\hat{\lambda}(t) \approx 1 / \hat{E}(t_{if}) \quad (8)$$

El modelo de vida y los índices de confiabilidad se refieren a un componente típico o medio que representa a cualquiera de los individuos de la población.

Vida residual

La vida residual de un componente no reparable que ha operado durante un periodo T se mide mediante la probabilidad de que sobreviva a otro intervalo t . Esto se ilustra en la figura 6.

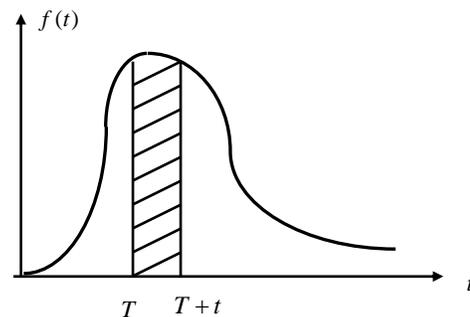


Figura 6. Análisis de vida residual de un componente

La probabilidad de falla en el intervalo de tiempo t es dependiente del comportamiento hasta el tiempo T . Así, definiendo:

- A : El evento de sobrevivir un periodo de tiempo t
- B : El evento de sobrevivir al tiempo T

$$R(t) = P[A | B] = P(A \cap B) / P(B) \quad (9)$$

$$R(t) = \frac{\int_{T+t}^{\infty} f(t) dt}{\int_T^{\infty} f(t) dt} = \frac{R(T+t)}{R(T)} \quad (10)$$

Clasificación de fallas

Del reporte que realiza el personal de mantenimiento cada que se reemplaza un componente no reparable, las fallas se clasifican en:

Internas: Aquellas originadas en el componente por deterioro, defectos de manufactura, etc.

Externas: Aquellas causadas por agentes externos al componente como vandalismo, fenómenos ambientales (descargas atmosféricas, granizo, etc.), contaminación, animales, mala especificación, operación incorrecta, etc.

Este análisis es de gran importancia ya que permite tomar acciones correctivas como:

- Mejora de las especificaciones técnicas
- Mejora en los diseños
- Estrategias de mantenimiento
- Estrategias operativas

Es usual el calcular los índices de confiabilidad para fallas internas, externas y globalmente (internas+externas).

Ejemplos

A continuación se presentan los resultados de cuatro estudios de confiabilidad de componentes no reparables, los cuales se realizaron con información operativa de tres empresas del sector eléctrico colombiano.

Estudio 1: Postes de redes secundarias de distribución de electricidad. Los registros operativos cubren de agosto de 2008 a julio de 2009.

Tabla 1. Poblaciones de postes de redes secundarias

Ítem	Cantidad
Postes de concreto 10 metros, 510 y 1050 kg	254633
Postes de madera 10 metros, livianos y pesados	286300

Estudio 2: Postes de redes primarias de distribución de electricidad. Estos postes tienen alturas de 10, 12 y 14 metros.

Tabla 2. Poblaciones de postes de redes primarias

Año	Postes de madera	Postes de concreto
2004	1386	10748
2005	980	11401
2006	520	12106
2007	490	12394
2008	350	12929
2009	296	13237

Estudio 3: Perchas y aisladores para redes secundarias de distribución de electricidad. Los registros operativos cubren los años 2000 a 2005. Los aisladores utilizados en estas redes son tipo carrete fabricados en porcelana

Tabla 3. Poblaciones de perchas y aisladores

Componente	Cantidad
Aislador tipo carrete urbano	22232
Aislador tipo carrete rural	10311
Percha urbana	5558
Percha rural	3437

Estudio 4: Aisladores de porcelana para redes primarias de distribución de electricidad a 13.2 kV. Los registros operativos cubren los años 2000 a 2005.

Tabla 4. Poblaciones de aisladores a 13.2 kV

Componente	Cantidad
Aislador tipo pin rural	12432
Aislador tipo pin urbano	6864
Aislador tipo suspensión rural	6048
Aislador tipo suspensión urbano	3348

Aunque todos componentes estudiados están fabricados de acuerdo con las normas técnicas colombianas, las poblaciones que conforman no son totalmente homogéneas ya que existen diferencias en edades, tipos constructivos (por ejemplo, el tipo de madera en los postes, el número de puestos en las perchas y la altura en los postes de redes primarias) y proceden de diversos fabricantes.

Con excepción de los postes de redes primarias, para los cuales se contaba con un inventario actualizado, las cantidades de los otros componentes se estimaron de los kilómetros de red y la distancia máxima entre postes permitida por las normas de construcción. También, se asumió que estas cantidades son constantes durante los años de estudio, ya que el crecimiento anual de usuarios en los sistemas estudiados es menor al 2%.

Para ninguno de estos componentes se contaba con el registro del instante en que fueron puestos en servicio; así, no fue posible obtener las distribuciones de los tiempos para falla; los índices de confiabilidad se calcularon entonces aplicando (5), (6) y (7).

Debido al poco detalle de la información operativa de las perchas y aisladores de redes secundarias de distribución, un gran porcentaje de las fallas reportadas no pudieron clasificarse, lo cual, impidió obtener índices para fallas internas y externas de estos componentes.

Tabla 5. Clasificación de fallas de postes de redes secundarias

Tipo de Falla	Postes de madera		Postes de concreto	
	#	%	#	%
1.0 Fallas Propias	99	82	65	39
1.1 Astillado, grietas	25	21	30	18
1.2 Partido, roto	36	30	24	15
1.3 Deteriorado	38	31	11	7
2.0 Fallas Externas	22	18	100	61
2.1 Vandalismo	1	1	6	4
2.2 Accidente de transito	0	0	60	36
2.3 Deslizamientos	6	5	11	7
2.4 Otras	15	12	23	14
Totales	121	100	165	100

Nota: Los porcentajes se calculan con respecto al total de salidas

Tabla 7. Clasificación de fallas de postes de redes primarias

Tipo de Falla	Postes de madera		Postes de concreto	
	#	%	#	%
1.0 Falla Interna (propia)	594	96.12	14	24.56
1.1 Poste partido	215	34.79	8	14.04
1.2 Poste con fisuras o grietas	379	61.33	6	10.53
2.0 Falla Externa	24	3.88	43	75.44
2.1 Huracanes	6	0.97	5	8.77
2.2 Vandalismo	0	0.00	2	3.51
2.3 Descargas atmosféricas	1	0.16	7	12.28
2.4 Accidentes de tránsito	0	0.00	9	15.79
2.5 Derrumbes	1	0.16	11	19.30
2.6 atentados	16	2.59	9	15.79
Totales	618	100	57	100

Nota: Los porcentajes se calculan con respecto al total de salidas

Tabla 6. Índices de confiabilidad de postes de redes secundarias

Índice	Unidad	Poste de madera	Poste de concreto
Tasa de fallas propias	fallas/(año-componente)	0.000346	0.000255
Tasa de fallas externas	fallas/(año-componente)	0.000077	0.000393
Tasa de fallas total	fallas/(año-componente)	0.000423	0.000648
Vida esperada por fallas propias	años para falla	2891.9	3917.4
Vida esperada por fallas externas	años para falla	13013.6	2546.3
Vida esperada	años para falla	2366.1	1543.2

Tabla 8. Índices de confiabilidad de postes de redes primarias

Índice	Unidad	Poste de madera	Poste de concreto
Tasa de fallas propias	fallas/(año-poste)	0.147688	0.000192
Tasa de fallas externas	fallas/(año-poste)	0.005967	0.000591
Tasa de fallas total	fallas/(año-poste)	0.153655	0.000783
Vida esperada por fallas propias	años para falla	6.77	5208.33
Vida esperada por fallas externas	años para falla	167.59	1692.05
Vida esperada	años para falla	6.51	1277.14

Tabla 9. Clasificación de fallas de perchas y aisladores tipo carrete

Tipo de falla		Aislador carrete urbano		Aislador carrete rural		Percha urbana		Percha rural	
		#	%	#	%	#	%	#	%
1.0	Falla externa	68	57.63	269	66.09	61	58.10	159	65.43
1.1	Línea reventada	21	17.80	185	45.45	14	13.33	92	37.86
1.2	Vegetación	8	6.78	43	10.57	1	0.95	20	8.23
1.3	Vandalismo	12	10.17	6	1.47	6	5.71	1	0.41
1.4	Accidentes de tránsito	13	11.02	2	0.49	5	4.76	3	1.23
1.5	Cortocircuitos	14	11.86	30	7.37	14	13.33	38	15.64
1.6	Viento	0	0.00	3	0.74	21	20.00	5	2.06
2.0	Fallas sin clasificar	50	42.37	138	33.91	44	41.90	84	34.57
Total		118	100	407	100	105	100	243	100

Nota: Los porcentajes se calculan con respecto al total de salidas

Tabla 10. Índices de confiabilidad de perchas y aisladores tipo carrete

Índice	Unidad	Aislador carrete urbano	Aislador carrete rural	Percha urbana	Percha rural
Tasa de fallas total	fallas/(año-componente)	0.0004	0.0022	0.0013	0.0041
Vida esperada	años para falla	2667.8	448.3	757.9	448.3

Tabla 11. Clasificación de fallas de aisladores de 13.2 kV

Tipo de falla		Pin rural		Pin urbano		Suspensión urbano		Suspensión rural	
		#	%	#	%	#	%	#	%
1.0	Falla Interna (Propia)	85	41.06	34	47.89	11	42.31	27	51.92
1.1	Flameado	9	4.35	4	5.63	1	3.85	0	0.00
1.2	Partido	10	4.83	1	1.41	0	0.00	0	0.00
1.3	Deteriorado (grietas, erosión, etc.)	66	31.88	29	40.85	10	38.46	27	51.92
2.0	Falla externa	122	58.94	37	52.11	15	57.69	25	48.08
2.1	Fenómenos naturales	52	25.12	16	22.54	10	38.46	12	23.08
2.1.1	Vegetación	43	20.77	12	16.90	4	15.38	10	19.23
2.1.2	Animales	6	2.90	4	5.63	0	0.00	0	0.00
2.1.3	Rayos	3	1.45	0	0.00	6	23.08	2	3.85
2.2	Eventos externos	70	33.82	21	29.58	5	19.23	13	25.00
2.2.1	Accidentes de tránsito	1	0.48	0	0.00	1	3.85	0	0.00
2.2.2	Línea reventada	42	20.29	4	5.63	0	0.00	6	11.54
2.2.3	Cortocircuitos	19	9.18	12	16.90	3	11.54	5	9.62
2.2.4	Otros	8	3.86	5	7.04	1	3.85	2	3.85
Total		207	100	71	100	26	100	52	100

Nota: Los porcentajes se calculan con respecto al total de salidas

Tabla 12. Índices de confiabilidad de aisladores de 13.2 kV

Índice	Unidad	Pin rural	Pin urbano	Suspensión urbano	Suspensión rural
Tasa de fallas propias	fallas/(año-aislador)	0.00113990	0.00082508	0.00054874	0.00074429
Tasa de fallas externas	fallas/(año- aislador)	0.00163609	0.00089788	0.00074828	0.00068916
Tasa de fallas total	fallas/(año- aislador)	0.00277599	0.00172297	0.00129702	0.00143345
Vida esperada por fallas propias	años para falla	877.27	1212.00	1822,36	1343.56
Vida esperada por fallas externas	años para falla	611.21	1113.73	1336.40	1451.04
Vida esperada	años para falla	360.23	580.39	771.00	697.62

Deficiencias en el registro de información

Como se observa en estos ejemplos, en la vida real existen graves deficiencias en el registro de la información operativa:

1. Por increíble que parezca, no se conoce la cantidad de componentes instalados en el sistema.

Al respecto, es importante tener en cuenta que algunos sistemas crecen con el transcurso del tiempo, por lo cual, es necesario actualizar esta información periódicamente.

2. No se tiene para cada componente una hoja de vida donde se registren su código de identificación en el sistema o empresa, fabricante, referencia, número serial, características técnicas principales y el instante en el cual fue puesto en servicio.
3. Cuando se reemplaza un componente que ha fallado no se registra su identificación, el instante de su falla o reemplazo ni una descripción del estado en que se encontró el componente que permita luego analizar las causas de su falla.

4. No se realiza un análisis "post-mortem" de los componentes que han fallado para establecer las causas de su falla y clasificarlas en interna y externas.

Otras deficiencias en el registro de la información comprenden:

- Errores en el registro de fechas, código de los componentes, ubicación de los componentes.
- Descripciones ilegibles o no entendibles por mala escritura o uso de términos no técnicos.
- Pérdida parcial o total de los documentos o archivos donde se registra la información.

Conclusiones y recomendaciones

Para los componentes no reparables, el modelamiento probabilístico presenta un completo método para representar su proceso operativo y valorar en forma cuantitativa y objetiva su confiabilidad.

Sin embargo, al momento de realizar un estudio de confiabilidad de componentes lo más común es que se encuentren grandes deficiencias en el registro de

información que impiden realizar un completo análisis de confiabilidad.

Así, se debe instruir a todo el personal involucrado en la operación del sistema, ingenieros, tecnólogos y técnicos sobre la importancia de llevar registros detallados tanto de los componentes como de los mantenimientos realizados.

La falta de información completa y correcta impide realizar un completo análisis de la confiabilidad de los componentes lo que a su vez impide tomar sobre una base objetiva medidas correctivas para el mejoramiento del sistema.

Bibliografía

- [1] Zapata C. J, Silva S. C, Burbano O. L, "Repair models of power distribution components", IEEE Transmission and Distribution Latin America Conference, 2008.
- [2] Zapata C. J, Kirschen D. S, Ríos M. A, Torres A, "Somme misconceptions about the modeling of repairable components", IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2009.
- [3] Zapata C. J, Confiabilidad de sistemas eléctricos, Universidad Tecnológica de Pereira, 2008.
- [4] Zapata C. J, Análisis probabilístico y simulación, Universidad Tecnológica de Pereira, 2010.
- [5] Zapata C. J, Vargas J. L, "Índices de confiabilidad de postes de redes secundarias de distribución", Mundo Eléctrico, No. 79, 2010.
- [6] Zapata C. J, Sánchez H, "Índices de confiabilidad de postes de redes primarias de distribución", Mundo Eléctrico, No. 81, 2010.
- [7] Zapata C. J, Medina C. A, "Índices de confiabilidad de aisladores de circuitos primarios de distribución a 13.2 kV", Mundo Eléctrico, No. 82, 2011.
- [8] Zapata C. J, Enríquez J. C, "Un estudio sobre la confiabilidad de perchas y aisladores tipo carrete", Mundo Eléctrico, No. 82, 2011.

Biografía

Carlos Julio Zapata Grisales (cjzapata@utp.edu.co) es ingeniero electricista de la Universidad Tecnológica de Pereira (1991), magíster en ingeniería eléctrica de la Universidad de Los Andes (1996) y doctor en ingeniería de la Universidad de Los Andes (2010). De enero de 1991 a enero de 2002 laboró para Consultoría Colombiana S. A - Concol S. A. Desde diciembre de 2001 labora como docente e investigador en la Universidad Tecnológica de Pereira.