

# Desarrollo Matricial en Hojas de Cálculo del Método DU-VAL para el Cálculo del Cortocircuito

Ing. Pedro Augusto Maldonado Dulcey  
*Ingeniero electricista*  
Bucaramanga, Colombia  
maldonado.elec2018@gmail.com

Ing. Isaac Peñaloza Valencia  
*UVSEIE 678 A*  
Guerrero, México  
penalois@yahoo.com.mx

**Abstract— Matrix methods in spreadsheets are more favorable for their implementation and development in an independent way like an alternative to the use of commercial software and as a comparison of the results produced by them.**

**Key words—cálculo cortocircuito, MVA, Hojas de Cálculo, Matrices**

## I. INTRODUCCIÓN

El presente artículo expone una técnica que combina el poder del cálculo matricial con el método tradicional de los MVA.

Así mismo, el uso extendido de las hojas de cálculo y su facilidad de acceso, constituye un recurso valioso como herramienta para la implementación del desarrollo de cálculos para los estudios de ingeniería de redes eléctricas.

## II. MOTIVACIÓN

### A. Para aplicaciones académicas de enseñanza

Tradicionalmente se ha enseñado el método mediante reducciones de la red de potencias de cortocircuito de los elementos interconectados a cada punto de interés de falla, cuyo proceso de solución se hace lento y tedioso, por lo que se propone con ésta mejora al método tradicional, evitar éstos inconvenientes que involucran un mayor riesgo de errores de cálculo del factor humano, y centrarse más que en el desarrollo matemático, en el análisis de los valores y su post proceso para otros estudios que se apoyan en el análisis de fallas como es la coordinación de protecciones, selección de equipos o conductores, teniendo en cuenta aspectos más relevantes como son las curvas de daño de dichos elementos.

### B. Para aplicaciones de diseño en instalaciones reales

Normalmente la enseñanza se ha soportado en Software que sin ser necesariamente de uso exclusivo para el ámbito académico, si ha servido como herramienta base en las investigaciones de los diferentes grados académicos de formación en ingeniería, pero no siendo relevante, al menos en nuestro medio para su aplicación en el ejercicio profesional en la industria, recurriéndose para ello a *software ad hoc* especializado para tal fin, siendo una restricción fuerte de acceso al uso, su elevado costo en la mayoría de los casos de su licenciamiento, también recurriéndose al uso de software gratis

pero con restricciones de uso comercial y que en la gran mayoría de casos funcionan como una caja negra debido a que no son de código abierto y el profesional no conoce con certeza los modelos o las aproximaciones usadas para cada uno de los módulos, salvo que lo indique en los manuales de usuario de dichas herramientas computacionales, aun así en muchos casos se obtienen resultados diferentes en cada estudio, que pueden ser debido a errores de diseño o aproximaciones de modelo o uso de uno u otro algoritmo.

Es por lo anterior que se requiere de una solución de bajo costo computacional que pueda ser implementada en cualquier computadora o dispositivo electrónico que cuente con una hoja de cálculo que permita validar o cotejar la solución en una primera instancia para validación de soluciones de software de código cerrado y que posteriormente permita migrar o desarrollar a usuarios para sistemas de pequeña y mediana escala que corresponde a un gran grupo de ingenieros de diseño para proyectos de ese mismo orden. Cabe destacar que las hojas de cálculo pueden estar amparados por derechos de autor como es Excel©, pero también las hay de código abierto disponible para su uso y que no distan mucho de la herramienta de MS©

## III. MODELACIÓN ELEMENTOS

Para los modelos, éstos se dan en el valor de los MVA's de corto circuito de cada uno de los componentes.

### A. Punto de alimentación MT del nuevo proyecto

El valor de la Potencia de Cortocircuito lo suministra el operador de la red en el punto de instalación del nuevo proyecto.

### B. Transformadores

Aunque normalmente se especifica a través de la impedancia serie en por ciento del ensayo de cortocircuito a tensión reducida, de una manera fácil se obtiene el correspondiente valor de la potencia de cortocircuito, de la siguiente manera:

$$P_{cc} 3\phi = \frac{S_n \times 100}{Z(\%)} \quad (1)$$

### C. Conductores

Para calcular la potencia de corto circuito de un arreglo de cables, basta con considerar la impedancia equivalente de éste, es decir, la magnitud de la impedancia para el método tradicional, y de acuerdo a la tensión aplicada elevarla al cuadrado y dividirla por el valor resultante de la impedancia propia del grupo de cables, dividiendo el valor entre el número de conductores por fase y multiplicarlo por la longitud del cable.

$$P_{CC} 3\phi = \frac{V_{fase}^2}{(|Z_{fase}| / \# \text{ Conductores de fase}) * L} \quad (2)$$

Note que en la ecuación (2), no se indica, pero se supone el voltaje nominal operativo de trabajo en su punto de instalación.

### D. Motores (CCM's)

Para calcular la potencia de cortocircuito de motores. En caso de desconocer la reactancia subtransitoria. Esta se toma con base a su potencia nominal y letra código o corriente de rotor bloqueado mostrado en la placa de datos del fabricante. Se hace referencia a la tabla 430.7 (B) NEC 2017 pág 497, la cual multiplicada por su potencia nominal, obtenemos la potencia de corto circuito.

### E. Otras fuentes de corrientes de corto circuito

Se deben tener en cuenta todos los elementos conectados a la red y en el escenario donde operen simultáneamente aquellos que aporten la mayor cantidad de corriente de falla en un momento dado a un punto de falla en particular al igual e independiente en que régimen de trabajo actúen normalmente, esto es, si es de generación o carga, de tal manera que al presentarse el evento de corto circuito, actúen como fuentes que inyecten o aporten corrientes al punto bajo falla, en dicha consideración es importante recalcar que los aportes de fuentes de generación distribuida hoy; y en un futuro harán que los diferentes componentes de la red, se vean estresados por mayores magnitudes de corrientes bajo condiciones de falla.

### F. Topología

En cuanto a la topología, cabe mencionar, que en el método tradicional, ésta, representa una gran restricción debido a que convierte el cálculo en engorroso y en el peor de los casos no lo hace factible a través de reducciones elementales de circuitos, requiriéndose un mayor grado de refinamiento y hacer aproximaciones que permitan su aplicación en el conjunto de las reglas tradicionales aplicadas, haciéndolo menos atractivo de aplicación para aquellas redes que presentan un alto grado de interconexión (altamente malladas), que a futuro podría presentarse a niveles de redes BT y MT.

El método expuesto goza de emplear la robustez, al manejar este aspecto de una manera similar a los métodos que se basan en matrices de red como la Y-bus.

Por otro lado, el método mejorado conserva el formato de los datos de trabajo de entrada como son las potencias de corto circuito de cada uno de los elementos sin necesidad de procesamiento adicional que se encuentran de una manera accesible o como dato proporcionado por el fabricante sin necesidad de recurrir a un modelo de impedancias.

También un punto fuerte del método está en que la relación de transformación de los transformadores no se tiene en cuenta al tratarse de modelo de potencia que llevados a un lado u otro del transformador son invariantes al tratarse de valores de potencia, caso contrario a modelos de red de impedancias, los cuales si requieren tener en cuenta este efecto a través de unas bases de tensión por zonas.

## IV. MODELACIÓN SISTEMA

Los valores así obtenidos en el aparte anterior se integran en un modelo matricial, cuya construcción siguen las sencillas reglas que se usan en la formulación de la matriz Y-Bus de un sistema de impedancias y la combinación del método de MVA en dónde los elementos conectados en paralelo, para obtener su equivalente se consideran en serie y viceversa:

$$MVA_{ii} = \sum mva_{ij} \quad (3.1)$$

$$MVA_{ij} = mva_{ij} \quad (3.2)$$

Cabe resaltar que en la ecuación (3.2), no se toma el negativo de la potencia de cortocircuito de los elementos que conectan a los dos nodos, siendo esto no trascendental para la aplicación de la técnica.

Una vez obtenido la matriz de potencias de corto circuito de nodo, se invierte ésta, para obtener una matriz de W:

## V. CÁLCULO DE LAS POTENCIAS DE CORTO CIRCUITO

La técnica se base se base en que, una vez obtenida la matriz inversa, los valores que están en la diagonal al invertirlos, representan las potencias de corto circuito en cada uno de los nodos:

$$[W_{bus}] = [MVA]^{-1} \quad (4.1)$$

$$P_{cc_i} = (w_{ii})^{-1} \quad (4.2)$$

Cabe destacar que la matriz de potencias de cortocircuito es invertible ya que las potencias de las fuentes se conectan a la referencia.

## VI. CÁLCULO DE LAS CORRIENTES DE CORTO CIRCUITO

Una vez obtenidas las potencias de cortocircuito trifásicas, las corrientes son obtenidas a través de la relación con el voltaje de línea:

$$I_{cc\ 3\varphi-línea} = \frac{(P_{cc\ 3\varphi-i})}{\sqrt{3} \times (V_{línea})} \quad (5)$$

## VII. EJEMPLO

El siguiente ejemplo de la Fig.1, solo tiene la finalidad de ilustrar el empleo del método propuesto, el cual consta de cuatro nodos:

Tabla.1 Datos de entrada de cada uno de los componentes del sistema ejemplo

DESCRIPCIÓN DE COMPONENTES	Z  Equivalente -Ω o %*-	Potencia de Corto Circuito -MVA-		
		1φ	2φ	3φ
Compañía de Suministro	0.952	100	100	200
Transformador 13,8/0.44 kV, 1.25 MVA	5 %	8.33	12.5	25
Transformador 0.44/0.22 kV, 800 KVA	6.67%	4	6	12
Cable 2/0 AWG, Cu, 1 Conductor por fase, Conduit PVC. 154 metros	3.32	0.650	1.66	3.32
Motor trifásico Inducción, 440 Voltios, 50 HP, letra código K (Norma NEMA)	---	0.105	0.186	0.316

\*Valor en por ciento en las bases nominales de máquina

Fuente: Los Autores

La ilustración Fig.1, representa el sistema en estudio y la Fig.2 representa su equivalente de potencias de corto-circuito en MVA conectadas:

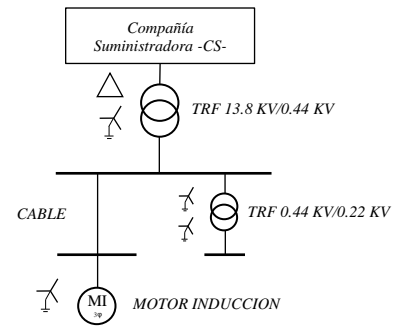


Fig.1 Sistema Ejemplo  
Fuente: Los Autores

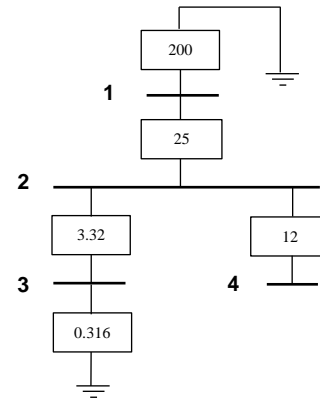


Fig.2 Diagrama MVA del caso ejemplo caso falla trifásica  
Fuente: Los Autores

Las expresiones matriciales (6.1) y (6.2), representan respectivamente las matrices de potencias de cortocircuito nodales y su matriz inversa:

### A. Caso falla trifásica

$$MVA_{cc-bus}^{3F} = \begin{bmatrix} 225 & 25 & 0 & 0 \\ 25 & 40.32 & 3.32 & 12 \\ 0 & 3.32 & 3.63 & 0 \\ 0 & 12 & 0 & 12 \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

$$W_{cc-bus}^{3F} = \begin{bmatrix} 0.0049 & -0.0049 & 0.00450 & 0.00493 \\ -0.0049 & 0.04442 & -0.0405 & -0.0444 \\ 0.00450 & -0.0405 & 0.31197 & 0.04055 \\ 0.00493 & -0.0444 & 0.04055 & 0.12775 \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

Una vez obtenida la matriz W en (6.2), se toma el valor inverso del elemento situado en la diagonal principal, que sería igual al valor esperado de potencia de cortocircuito nodal, por ejemplo:

$$P_{cc} 3F_2 = \frac{1}{0.04421} \quad (6.3.1)$$

$$P_{cc} 3F_2 = 22.511 \text{ MVA} \quad (6.3.1)$$

$$I_{cc} 3F_2 = 29.5387 \text{ kA} \quad (6.3.1)$$

$$MVA_{cc-bus}^{1F} = \begin{bmatrix} 108.333 & 8.333 & 0 & 0 \\ 8.333 & 12.98 & 0.650 & 4 \\ 0 & 0.650 & 0.756 & 0 \\ 0 & 4 & 0 & 4 \end{bmatrix} \quad (7.1)$$

$$W_{cc-bus}^{1F} = \begin{bmatrix} 0.00999 & -0.0098 & 0.00850 & 0.00988 \\ -0.0098 & 0.12841 & -0.1105 & -0.1284 \\ 0.00850 & -0.1105 & 1.41676 & 0.11054 \\ 0.00988 & -0.1284 & 0.11940 & 0.37841 \end{bmatrix} \quad (7.2)$$

Tabla.2 Datos comparativos usando el software ETAP para falla trifásica

nodo	1	2	3	4
Icc (kA)	8.379	29.538	4.420	20.541
Etap	8.380	29.578	4.418	20.547
Error %	-0.07596	-0.63961	0.863147	-0.24308

Una vez obtenida la matriz W en (7.2), se toma el valor inverso del elemento situado en la diagonal principal, que sería igual al valor esperado de potencia de cortocircuito nodal, por ejemplo:

$$P_{cc} 1F_2 = \frac{1}{0.12841} \quad (7.3.1)$$

$$P_{cc} 1F_2 = 7.7832 \text{ MVA} \quad (7.3.1)$$

$$I_{cc} 1F_2 = 30.642 \text{ kA} \quad (7.3.1)$$

Tabla.3 Datos comparativos usando el software ETAP para falla monofásica

nodo	1	2	3	4
Icc (kA)	6.672	30.642	2.778	20.804
Etap	6.697	30.534	2.777	20.773
Error %	-0.3634	-0.3554	0.0672	0.1502

### B. Caso falla monofásica

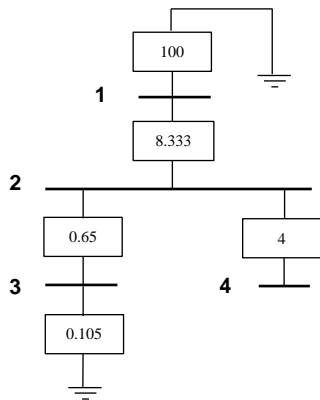


Fig.3 Diagrama MVA del caso ejemplo caso falla monofásica  
Fuente: Los Autores

Las expresiones matriciales (7.1) y (7.2), representan respectivamente las matrices de potencias de cortocircuito nodales y su matriz inversa, para el caso de la falla monofásica son respectivamente:

### C. Caso falla bifásica

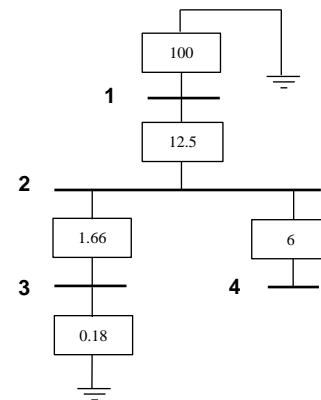


Fig.4 Diagrama MVA del caso ejemplo caso falla bifásica  
Fuente: Los Autores

Las expresiones matriciales (8.1) y (8.2), representan respectivamente las matrices de potencias de cortocircuito nodales y su matriz inversa, para el caso de la falla monofásica son respectivamente:

$$MVA_{cc-bus}^{2F} = \begin{bmatrix} 112.5 & 12.50 & 0 & 0 \\ 12.50 & 20.16 & 1.660 & 6 \\ 0 & 1.660 & 1.846 & 0 \\ 0 & 6 & 0 & 6 \end{bmatrix} \quad (8.1)$$

$$W_{cc-bus}^{2F} = \begin{bmatrix} 0.00998 & -0.00985 & 0.00856 & 0.00985 \\ -0.0098 & 0.088662 & -0.0797 & -0.08866 \\ 0.00885 & -0.07971 & 0.61324 & 0.07971 \\ 0.00985 & -0.08866 & 0.07971 & 0.25532 \end{bmatrix} \quad (8.2)$$

Una vez obtenida la matriz W en (8.2), se toma el valor inverso del elemento situado en la diagonal principal, que sería igual al valor esperado de potencia de cortocircuito nodal, por ejemplo:

$$P_{cc} 2F_2 = \frac{1}{0.08866} \quad (8.3.1)$$

$$P_{cc} 2F_2 = 11.2787 \text{ MVA} \quad (8.3.1)$$

$$I_{cc} 2F_2 = 25.564 \text{ kA} \quad (8.3.1)$$

Tabla.4 Datos comparativos usando el software ETAP para falla bifásica

nodo	1	2	3	4
Icc (kA)	7.2583	25.634	3.706	17.802
Etap	7.247	25.465	3.665	17.758
Error %	0.1567	0.6615	1.1201	0.2496

Nota: Para el cálculo de estas fallas, aplicando el método DU-VAL no se considera el efecto mutuo y otras variables en cables y demás elementos del sistema con respecto a ETAP

#### BREVE RESEÑA BIOGRÁFICA DE LOS AUTORES

Pedro Augusto Maldonado Dulcey, Ingeniero electricista Universidad Industrial de Santander, egresado en el año de 2005, entre sus áreas de interés se encuentra el análisis avanzado de Sistemas de Potencia Eléctrica.

Isaac Peñaloza Valencia, Ingeniero electricista ESIME-ZACATENCO-IPN, UVSEIE 678-A con base en la NOM-001-SEDE-2012

#### REFERENCIAS

- [1] IEEE Std 141-1986. "Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants". RedBook".
- [2] IEEE Std 551 2006 "Recommended Practice for Calculating Short-Circuit Currents in Industrial and Commercial Power Systems". Violet Book.
- [3] IEC 60909-0 (2001), "Short circuit currents in three-phase A. C. Systems; Part-0: Calculations of Currents"
- [4] IEC 60909-4 (2000-07), "Short circuit currents in three-phase A. C. Systems; Part-4: Examples for the calculation of short-circuit currents"
- [5] NEC HDB 2017, "National Electrical Code Handbook" Fourteenth Edition International Electrical Code® Series, Table 430.7 (B), page 497