



Comité Nacional Paraguayo



Unión de Ingenieros de ANDE

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
19, 20 y 21 de Setiembre de 2012

---

## **Programa para la Simulación del Flujo de Carga y Análisis de Confiabilidad en redes de distribución de Energía Eléctrica**

**Hugo José González Villasanti**

**Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Asunción**

**Paraguay**

### **RESUMEN**

El presente trabajo presenta un programa computacional, desarrollado en la plataforma de licencia libre Scilab, que implementa dos herramientas fundamentales en la planificación de sistemas de distribución: la simulación de flujo de carga y el cálculo de índices de confiabilidad.

El flujo de carga se basa en el método de barrido inverso y directo con suma de corrientes, incorporándose al programa la capacidad de modelar, a más de las líneas de distribución, equipamiento tales como transformadores reguladores, banco de capacitores, así como cargas de potencia, corriente e impedancia constante. El cálculo de índices de confiabilidad es efectuado a través de un método analítico.

El programa es validado usando redes típicas encontradas en la literatura y una red urbana del sistema de distribución de la Administración Nacional de Electricidad (ANDE), la cual es utilizada en un estudio específico de software

El programa puede ser utilizado en el análisis de proyectos de nuevas redes de distribución o modificaciones de existentes, permitiendo también aplicaciones del tipo académico de soporte a los cursos de ingeniería eléctrica dictados en el área de distribución.

### **PALABRAS CLAVES**

Software, redes de distribución, flujo de carga, confiabilidad.



X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
19, 20 y 21 de Setiembre de 2012

---

## 1. FLUJOS DE CARGA EN DISTRIBUCIÓN

El estudio de flujo de carga de la red comprende la resolución del circuito eléctrico que representa la red y tiene por finalidad:

- El cálculo de las tensiones en las barras de la red.
- El cálculo de la corriente y de la potencia que fluyen por los tramos de línea de la red.
- El cálculo de las pérdidas, en términos de potencia

Los algoritmos basados en métodos numéricos utilizados para el estudio de flujo de carga en sistemas de transmisión, como el Gauss-Seidel directo e indirecto, Newton-Raphson y sus versiones desacopladas, no presentan buenas características de convergencia al ser aplicados a sistemas de distribución, ya que estos sistemas presentan valores similares de resistencia con el de reactancia, capacitancia despreciable en sus líneas, desequilibrios y cargas variables.

Métodos eficientes para solución del problema de flujo de carga en redes de distribución radiales están disponibles en la literatura especializada. Éstos métodos están divididos en dos grandes categorías:

- Métodos de Barrido inverso y directo
- Métodos basados en la matriz impedancia nodal implícita.

## 2. PROGRAMA DE FLUJO DE CARGA EN REDES DE DEE BASADO EN EL MÉTODO DE BARRIDO INVERSO Y DIRECTO CON SUMA DE CORRIENTES

En la formulación y confección del modelo que sigue, se asumen las siguientes premisas:

- La red constituye un sistema trifásico balanceado, de manera que es aplicable una representación monofásica.
- No existen interconexiones entre las diferentes ramas del sistema (red radial).

Las redes trifásicas simétricas y equilibradas son resueltas utilizándose el diagrama de secuencia directa con representación monofásica de la red. El algoritmo puede ser resumido en los pasos siguientes:

1. Se adquieren los datos de la red;
2. Se procede a la ordenación de la red con la lógica “padre-hijo”.
3. Se inicia el contador de iteraciones con  $ITER = 1$ , y se inicializan las tensiones de todas las barras, excepto la de la SE, en  $\dot{V}_i^{ITER}$  usualmente en  $1,0 \angle 0^\circ$ ;
4. Supuesto un perfil de tensión nodal en todo el alimentador, se calculan las contribuciones de la carga dependiendo de su naturaleza, de los generadores distribuidos, de los bancos de capacitores y de los transformadores en sus nodos de aplicación correspondientes.

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
19, 20 y 21 de Setiembre de 2012

5. Se calcula, partiendo de la última barra de la red ordenada y desplazándose en el sentido de la barra de la SE la corriente de los tramos a través de la ecuación:

$$(i_{kj}) = (i_k) + \sum (i_{kL})$$

donde:

$L$  : es todo nodo que conecte  $k$ , aguas abajo del nodo  $k$ .

$j$  : es todo nodo que conecta a  $k$ , siendo  $j$  el nodo aguas arriba del nodo  $k$ .

$i_k$  : corriente inyectada en el nodo  $k$  (corriente nodal).

$i_{kj}$  : Flujo de corriente por la línea  $k - j$  (corriente de rama).

$i_{kL}$  : Flujo de corriente por la línea  $k - L$ .

6. Se calcula, partiendo en la red ordenada de la barra inmediatamente posterior a la SE y dirigiéndose al fin de la red, en el sentido del flujo principal, la tensión en todas las barras a través de la segunda ley de Kirchhoff :

$$\dot{V}_k = \dot{V}_j - \dot{Z}_{jk} \cdot \dot{I}_{jk}$$

$\dot{V}_j$  : Voltaje del nodo de envío.

$\dot{Z}_{jk}$  : Impedancia entre los nodos  $j$  y  $k$ .

$\dot{I}_{jk}$  : Flujo de corriente por  $j - k$ .

donde:

$\dot{V}_k$  : Voltaje del nodo de recibo.

En el caso de líneas utiliza el circuito pi nominal, mientras que si se trata de un regulador de tensión, se utilizará su modelo correspondiente.

7. Se verifica, en todas las barras, el desvío entre los valores de la tensión en las dos últimas iteraciones, esto es:

$$\Delta = \left| \dot{V}_k^{(ITER+1)} - \dot{V}_k^{(ITER)} \right|$$

Comprobado dicho valor con la tolerancia, y en caso de que sea excedido dicho valor, se incrementa el contador de iteraciones ( $ITER = ITER + 1$ ) y se retorna al paso 4, siempre y cuando el número máximo de iteraciones no haya sido sobrepasado.

### 3. CALCULO DE INDICES DE CONFIABILIDAD

La confiabilidad representa la capacidad de un sistema de ejecutar las funciones para las que fue diseñada bajo las condiciones de operación encontradas en su tiempo de vida útil. En redes de distribución de energía eléctrica, es caracterizada por la continuidad del suministro de energía a los consumidores.

Los índices de confiabilidad abordados en este trabajo son clasificados de acuerdo con los parámetros del sistema utilizados para ponderar los datos relativos a la interrupción del suministro:

Índices de confiabilidad basados en consumidores:

- **FEC:** Índice de Frecuencia Equivalente de Interrupción por Unidad Consumidora, el cual mide el número de interrupciones promedio que cada consumidor considerado sufrió, en el periodo considerado.



X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
19, 20 y 21 de Setiembre de 2012

- 
- **DEC:** Índice de Duración Equivalente de Interrupción por unidad consumidora mide el espacio de tiempo en que, en promedio, cada consumidor en el área de estudio considerada quedó privado del suministro de energía eléctrica en el periodo considerado.

Índices de confiabilidad basados en la carga:

- **ASIFI:** Definido como la carga media interrumpida, en el período de observación considerado. Es equivalente al índice FEP (Frecuencia Equivalente por Potencia) usado por ANDE.
- **ASIDI:** Definido como el intervalo de tiempo, en que, en promedio, en el período de observación considerado, la carga instalada del conjunto sufrió de interrupciones. Es equivalente al índice DEP (Duración Equivalente por Potencia) usado por ANDE.

Índices de confiabilidad basados en la energía:

- **ENS:** El índice de Energía No Suministrada, corresponde a la energía no suministrada a los consumidores de un sistema durante un periodo de observación debido a interrupciones.

Indices de confiabilidad individuales:

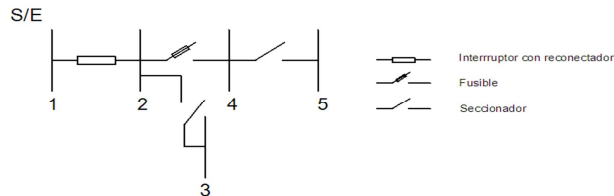
- **FIC:** El Índice de Frecuencia Individual de Interrupción por Unidad Consumidora mide el número de interrupciones ocurridas en cada unidad consumidora.
- **DIC:** El Índice de Duración Individual de Interrupción por Unidad Consumidora mide el intervalo de tiempo que en cada unidad consumidora ocurrió discontinuidad de la distribución de energía eléctrica.

Algunas hipótesis simplificadoras son asumidas de manera a implementar el método analítico:

- La protección contra sobrecorrientes está perfectamente coordinada y su actuación se da selectivamente, obedeciendo lo establecido en su proyecto.
- Para realizar los cálculos en las redes con llaves de transferencia normalmente abiertas (NA), será tenido en cuenta que los alimentadores de transferencia provienen de la misma subestación.
- Para estimar el tiempo medio de reparo, se consideraran los tiempos medio de búsqueda de defecto  $t_1$  y el tiempo medio de reparo  $t_2$  contenidos en las bases de datos de las empresas distribuidoras.
- Las tasas de fallas de un tramo de red serán consideradas como suma de las tasas de todos los equipamientos instalados en el tramo, incluyendo la línea.

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
19, 20 y 21 de Setiembre de 2012

Efectuadas esas consideraciones, y habiendo ingresados datos topológicos (longitud de líneas, protecciones, tasas de falla, tiempos de reparo) y de carga del alimentador (consumidores, potencia instalada, etc.), el método simula un número de fallas igual a la tasa de fallas asignada en cada barra de la red y el cálculo de los índices se realiza a través de los siguientes pasos, ejemplificados en la red de la Figura siguiente:



**Figura 2 – Red de Distribución ejemplo. Fuente: Propia.**

1. Sea una red con  $n_B$  barras. Se simula una falla en el tramo “ $j$ ” o en su barra final. A través de ciclos “for” se va barriendo el circuito desde el punto de falla identificando los tramos afectados, montando así la matriz de incidencia “ $A_p$ ”, con dimensiones  $n_B \times n_B$ , con  $a_{j,k} = 1$  si el tramo  $k$  es afectado por una falla en el tramo  $j$  durante el tiempo  $t_1$ . Asimismo se monta la matriz de incidencia secundaria “ $A_{pq}$ ”, si la barra continúa afectada durante el tiempo  $t_2$ . En caso de permitir transferencia de carga se simula la aislación de la falla mediante la apertura de dispositivos de maniobra aguas arriba y abajo de la falla y se procede a diferenciar a los consumidores que seguirán afectados por la interrupción durante
2. Luego de haber simulado fallas en todos los tramos de la red, y con las matrices de incidencia obtenidas para cada tramo se computan los índices de confiabilidad individuales a través de las siguientes ecuaciones:

$$DIC_i = \sum_{k=1}^{n_k} fat_{per,k} ND_k (t_{1,k} + t_{2,k}) \quad FIC_i = \sum_{k=1}^{n_k} fat_{per,k} \cdot ND_k$$

donde:

$k$  : es cualquier tramo que, en contingencia, afecta al tramo  $i$ .

$n_k$  : número de tramos que, en contingencia, afectan al tramo  $i$ .

$ND_k$ : Tasa de falla del tramo  $k$ .

$t_{1,k}$ : Tiempo de búsqueda del defecto en el tramo  $k$ .

$t_{2,k}$ : Tiempo de reparación del defecto en el tramo  $k$ .

Y a partir de ellos, los índices de conjunto de la red para los  $n_B$  tramos de carga de la red quedarán definidos como:

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^{n_B} DIC_i \times N_i}{C_s} \quad FEC = \frac{\sum_{i=1}^{n_B} FIC_i \times N_i}{C_s}$$

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
19, 20 y 21 de Setiembre de 2012

$$ASIDI = \frac{\sum_{i=1}^{n_B} DIC_i \times S_i}{S_s} \quad ASIFI = \frac{\sum_{i=1}^{n_B} FIC \times S_i}{S_s}$$

$$ENS_i = DIC_i \cdot (f_{dem} \cdot P_i)$$

donde:

$n_B$  : número de tramos de la red.

$N_i$  : Número de consumidores atendidos en el tramo  $i$ .

$C_s$  : Número total de consumidores de la red.

$S_i$  : Demanda atendida en el tramo  $i$ .

$S_s$  : Demanda total atendida en la red.

$P_i$  : Demanda máxima del tramo  $i$ .

$f_{dem}$  : factor de demanda del tramo  $i$ .

#### 4. VALIDACION DEL PROGRAMA

El programa de flujo de carga DISTFLOW cuya pantalla principal se presenta en la Figura 3, fue validado con el sistema de 70 barras publicado por Chiang (1990) presentado en la Figura 4:

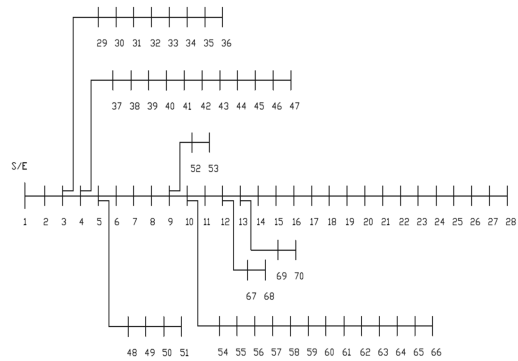
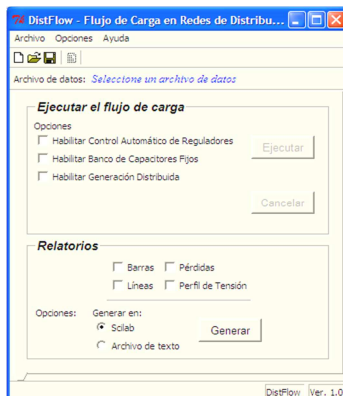


Figura 3: Pantalla principal DISTFLOW

Figura 4 - Red de Distribución de 70 Barras

La red presenta topología radial, con inclusión de transformadores reguladores en las barras 34, 9 y 42. La tabla muestra los resultados comparados del flujo de carga sin y con reguladores.

Tabla 1 - Resumen del estudio 70 Barras

Red 70 Barras	DISTFLOW s/ Regs.	Ref. [12] s/ Reguladores	DISTFLOW c/ Regs.	Ref. [12] C/ Reguladores
Pérdida Activa Tot. (MW)	0,927	0,927	0,841	0,857
Pérd. React. Tot. (MVAr)	0,656	0,656	0,594	0,605
Carga Total (MVA)	20,68	20,67	19,94	20,12
Iteraciones	8	4	8	106
Tiempo Computacional (s)	0,1	-	0,1	-
Posición de Tap's	Sin RTs	Sin RTs	9 / +4	9 / +4
			34 / +9	34 / +9
			42 / +9	42 / +9

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
19, 20 y 21 de Setiembre de 2012

Las diferencias entre los resultados de flujo de carga comparados a la referencia se encontraron en la utilización de los Reguladores de Tensión, debido a que en este trabajo se utilizó un modelo de Regulador simplificado que prioriza la convergencia rápida del estudio en sistemas pesados y la comprensión didáctica del mismo. Los resultados son considerados satisfactorios en virtud de la precisión y rápida convergencia en 8 iteraciones, mientras que en la referencia se obtuvo convergencia en 106 iteraciones.

En cuanto al programa de cálculo de índices de confiabilidad, DISTCONF, cuya pantalla principal se presenta en la Figura 7, fue validado utilizando la red RTBS – BUS2, “Basic Distribution System Data and Results”, publicado por Allan (1991) y cuyo esquema se muestra a continuación en la Figura 8:

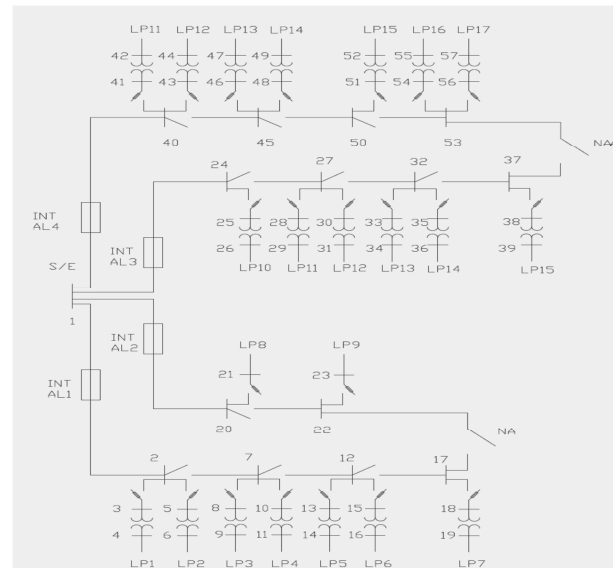


Figura 7 – Pantalla principal DISTCONF

Figura 8 - Sistema de Distribución Urbano típico RTBS2.

Tabla 2 - Datos comparativos de índices de confiabilidad de conjunto

Alimentador	DISTCONF FEC (Int/año)	Ref [22] FEC (Int/año)	DISTCONF DEC (Horas/año)	Ref [22] DEC (Horas/año)	DISTCONF ENS (kVAh/año)	Ref [22] ENS (kVAh/año)
AL-1	0,248	0,248	0,768	0,768	2783,81	2783,81
AL-2	0,140	0,140	0,523	0,523	1122,06	1122,06
AL-3	0,250	0,250	0,774	0,774	2351,09	2351,09
AL-4	0,247	0,247	0,755	0,755	2586,86	2586,86

Se observan idénticos resultados en los índices de confiabilidad de conjunto. En cuanto a los índices individuales, el FIC presentó la diferencia máxima en la barra 4, punto de carga 1, y fue de 0,63%. Por su parte, en el cálculo del DIC se tuvo una mejor aproximación, con diferencias máximas de - 0,01% en la barra 11, punto de carga 4 y de 0,01% en la barra 34, punto de carga 13. Idénticas



X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
19, 20 y 21 de Setiembre de 2012

diferencia se vieron en el cálculo del ENS por punto de carga mientras que en el cálculo de índices de conjunto por alimentador se encontraron coincidencias en todos los puntos de carga. Estas diferencias se dan principalmente a diferencias en las tolerancias decimales utilizadas.

El análisis de los resultados comparados permite concluir el adecuado funcionamiento del programa DISTCONF, obteniéndose resultados satisfactorios en el cálculo de índices de confiabilidad en redes de distribución.

## 5. CONCLUSION

Basándose en los resultados obtenidos para flujo de carga y método analítico para cálculo de índices de confiabilidad, SIMUDIST presenta buenas características de convergencia y tiempo computacional en computadora promedio, lo cual lo hace adecuado para su utilización con los fines didácticos trazados.

Fue probado que con el programa SIMUDIST pueden realizarse los siguientes estudios:

- Selección de conductores, protecciones y equipos de maniobra de sistemas de Media tensión.
- Estudio de técnicas de compensación de tensión en redes de distribución, como instalación de reguladores de tensión y corrección del factor de potencia con la inclusión de banco de capacitores.
- Análisis de flujos de carga ante la inserción de generación distribuida en redes de distribución.
- Cálculo de pérdidas en la línea y costos de energía no suministrada.
- Cálculo de índices de confiabilidad para su comparación con reglamentaciones internacionales.
- Estudios de planificación de redes de distribución en general.

Se concluye que SIMUDIST está preparado para convertirse en una importante herramienta en el estudio de redes de distribución en el ambiente académico, pudiendo realizarse ejercicios en las distintas cátedras que tienen como objeto de estudio a las redes de Media Tensión así como su aplicación en trabajos finales de grado.

## BIBLIOGRAFÍA

Muñoz, Cristian; “Flujo de Potencia Trifásico para Sistemas de Distribución” Trabajo Final de Graduación, Pontificia Universidad Católica de Chile. 1988

M.S. Srinivas, “Distribution Load Flows: A Brief Review”, *Proceedings of the 2000 IEEE PES Summer Meeting*, Singapore, Enero 2000.





Comité Nacional Paraguayo



Unión de Ingenieros de ANDE

**X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
19, 20 y 21 de Setiembre de 2012**

Piñeros, Luis y Castaño, Diego; “Estudio de Confiabilidad del Sistema de distribución de Pereira usando el método de de Simulación de Montecarlo”. Trabajo Final de Graduación, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. 2003

Shin, Hyun Ho y Britez, Cesar; “Programa Didactico para Simulacion de Flujo de carga y cortocircuitos en sistemas eléctricos de Potencia” Trabajo Final de Grado, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción. 2004

Kagan, Nelson; Barioni de Oliveira, Carlos; Robba, Ernesto;(2005) ”Introdução aos sistemas de distribuição de energía eléctrica”. Editorial Edgard Bluchner. 1ª edición.

Short, Tom; “Electric power distribution handbook” Editorial CRC Press. 1a edición. 2004

Chowdhury, Ali, “Power Distribution System Reliability”. Editorial IEEE Press, 2009.

Baudwin, Michael. “Introdution to Scilab”. Scilab Consortium, Enero 2010.

Nogueira, Carlos Alberto; “Alocacão ótima de reguladores de tensão em redes de distribuição de energía eléctrica”. Tesis de masterado. Universidade Estadual de Campinas, Brasil. 2009

Pilar, Marcio. “Alocacão de capacitores em sistemas de distribuição de energía eléctrica”. Tesis de masterado. Universidade Estadual de Campinas, Brasil. 2005

Vicentini, O; De Oliveira, H; OLing, L; Martinez, M; Saran, M; Bachega, R; Violin, A; Lefort, C; “Distribution Reliability Analysis Program”. Bulk power systems analysis and Control, Italia 2004.

ANEEL, Resolución 024/2000, Continuidade da Distribuição da Energia Elétrica.

Andrade, W; “Avaliação da confiabilidade de sistemas de Distribuição e Sub-transmissão considerando geração distribuída” . Tesis de Doctorado. Universidade Federal de Rio de Janeiro. 2007

Franco, David; Frutos, Miguel. “Confiabilidad del Suministro Eléctrico en la Industria Plástica Electointensiva INPET”. Trabajo final de grado. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción. 2008

Información provista por el departamento de planificación en distribución, ANDE, 2010.