



## Programa para el cálculo de los regímenes de operación de la red soterrada

Manuel Barroso  
Elena Llimó

Mayo del 2001

### Resumen / Abstract

Este trabajo tiene como objetivo el desarrollo de software para el análisis de los regímenes de trabajo normales de la red soterrada; específicamente abarca el desarrollo y adecuación de algoritmos para flujo de carga, elaborando el producto informático propuesto empleando las técnicas de la programación visual. El programa obtenido permite analizar estudios completos del comportamiento de la red soterrada, nunca antes posible, pues se carecía de la herramienta adecuada para realizar tales estudios, o bien por falta de capacidad suficiente en cuanto a memoria requerida para modelar la red completa, lo cual sucedió en las décadas anteriores o porque los programas que existían entonces eran desarrollados para la transmisión.

Palabras clave: flujo de carga

*This work has as objectives the software development for the analysis of the normal load flow of the underground secondary network, specifically sandal the development and adaptation of algorithms for load flow, elaborating the proposed computer product using the techniques of the visual programming. The obtained program allows to analyze complete studies of the net behavior it was never before possible, because you lacked the appropriate tool to carry out such studies, or for lack of enough capacity as for memory required to model the complete net, that which happened in the previous decades or because the programs that existed then were developed for the transmission. As a result final of this project a software will be reached that using a base data common to other technical studies, facilitate to make any of the mentioned analysis, responding to the particularities of the underground secondary network.*

*Key words: load flow*

### INTRODUCCIÓN

Este es el resultado de un proyecto de investigación convenido entre la Organización Básica Eléctrica Soterrada perteneciente a la Empresa de Transmisión y Distribución de Ciudad de La Habana y el Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas, a través del cual se desarrollaron una serie de herramientas computacionales para la determinación de los regímenes de trabajo en estado estable de la red soterrada de La Habana.

La red soterrada de La Habana fue construida en el año 1928, su desarrollo y diseño fueron concebidos por especialistas norteamericanos, en aquel entonces se suponía que dicha red estaba prevista para asimilar el crecimiento de la carga en los 50 años venideros.

Desde aquel entonces han pasado ya más de 70 años, la carga creció y la red básicamente es la misma: este crecimiento no ha estado en muchas ocasiones bien planificado, pues responde a varios intereses.

La necesidad de conocer cómo opera esta red en detalle es de gran importancia, si se tiene en cuenta que a pesar de su grado de automatismo, sus equipos fueron concebidos para un nivel de carga inferior al actual y que además muchos de ellos ya sobrepasaron en algunos años su período de vida útil.

Conocido es el que el nivel de fallos que ocurre en esta red está por encima del esperado para redes de este tipo, ello puede ser motivado por las causas citadas con anterioridad; en muchas ocasiones, la herramienta para determinar y justificar esta hipótesis es la que no se tenía hasta el momento, por tanto, se requiere del conocimiento de los flujos de potencia que circulan por cada alimentador, transformador y por cada cable de baja tensión de la red soterrada, así como de los niveles de voltajes en los distintos regímenes de operación de la misma.

Por tal motivo, se desarrolla este proyecto de investigación con el propósito de dar respuesta a dicha problemática con la cual se persigue el objetivo siguiente:

- Obtener un programa de computación mediante el cual pudieran obtenerse los flujos de carga de la red soterrada, de forma tal que la información solicitada como datos y la arrojada como resultados, fueran acordes a las exigidas para los análisis en las redes de distribución.

#### ALGORITMO EMPLEADO

Existen un gran número de métodos para el cálculo de flujo de carga de potencias, pero todos están enmarcados en tres algoritmos generales: Método  $Y_{bus}$ , método  $Z_{bus}$  y método de Newton.

El método que se ha empleado para el flujo de carga en la red de La Habana, es el método de Newton Raphson acoplado rápido.<sup>1,2</sup>

Este método permite obtener la solución del estado de operación de la red eléctrica que se analice, cualquiera que sean las condiciones especificadas para la red, siendo capaz de analizar redes con cualquier relación X/R.

#### Método Newton-Raphson Acoplado Rápido

Partiendo de las siguientes expresiones del Newton-Raphson formal:<sup>1</sup>

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{p-1} \\ \Delta Q^{p-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H^{p-1} & N^{p-1} \\ J^{p-1} & L^{p-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta^p \\ \Delta V^p / V^{p-1} \end{bmatrix} \quad \dots(1)$$

y los términos de la jacobiana:

$$H_{km} = \frac{\partial P_k}{\partial q_m} = V_k V_m (G_{km} \text{sen } q_{km} - B_{km} \text{cos } q_{km}) \dots(2)$$

$$H_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} = -Q_k - B_{kk} V_k^2 \quad \dots(3)$$

$$N_{km} = V_m \frac{\partial P_k}{\partial V_m} = V_k V_m (G_{km} \text{cos } q_{km} + B_{km} \text{sen } q_{km}) \quad \dots(4)$$

$$N_{kk} = V_k \frac{\partial P_k}{\partial V_k} = P_k + G_{kk} V_k^2 \quad \dots(5)$$

$$J_{km} = \frac{\partial Q_k}{\partial q_m} = -V_k V_m (G_{km} \text{cos } q_{km} + B_{km} \text{sen } q_{km}) \quad \dots(6)$$

$$J_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} = P_k - G_{kk} V_k^2 \quad \dots(7)$$

$$L_{km} = V_m \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} = V_k V_m (G_{km} \text{sen } q_{km} - B_{km} \text{cos } q_{km}) \quad \dots(8)$$

$$L_{kk} = V_k \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = Q_k - B_{kk} V_k^2 \quad \dots(9)$$

Se puede observar que los términos de la jacobiana dependen del módulo y ángulo de los voltajes los cuales varían en cada iteración. Para mantener constantes estos términos se toman las siguientes suposiciones:

$$V_k \text{ y } V_m \approx 1,0 \text{ pu}$$

$$\text{cos}(q_k - q_m) \approx 1,0$$

$$\text{y } \text{sen}(q_k - q_m) \approx q_k - q_m \approx 0$$

ya que la diferencia angular de una línea en condiciones normales de operación es muy pequeña.

Teniendo en cuenta las anteriores suposiciones, sustituidas en las expresiones anteriores, el problema formulado en (1) adopta la forma siguiente:

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{p-1} / V^{p-1} \\ \Delta Q^{p-1} / V^{p-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B^{serie} & G^{total} \\ G^{serie} & B^{total} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta^p \\ \Delta V^p \end{bmatrix} \quad \dots(10)$$

El modelo obtenido se conoce como el método de la matriz jacobiana constante o acoplado rápido, en el mismo, como puede apreciarse, la matriz jacobiana depende solo de la topología de la red y solo es necesario la factorización de la misma una vez, por ello es mucho más rápido que el Newton formal. Se consideró adecuado para la red soterrada pues es una red mallada que puede alcanzar los cientos de nodos y ramas, y presenta una alta relación R/X.

### CARACTERÍSTICAS DEL PROGRAMA

El programa desarrollado permite analizar las redes soterradas que como ya se ha mencionado son redes de medio y bajo voltaje, o sea, redes de distribución, por tanto sus interfaces deben estar acorde con aquellas que emplean los programas desarrollados para tales tipos de redes.

### ENTRADA DE DATOS

El programa exige para su ejecución la confección de cuatro ficheros, donde se almacenen los datos de la red. Estos ficheros quedan estructurados de la forma siguiente:

- Fichero de nodos: Este fichero con extensión "NOD" contiene los datos, de potencia activa, factor de potencia, voltaje nominal y dirección de los nodos (cajas seccionales, registros y T) de la red (figura 1). En el caso de la Red Oeste de La Habana, este contiene 592 nodos.

- Fichero de ramas: Este fichero con extensión "RAM" es creado a partir de los datos de las ramas: nodo inicial, nodo final, calibre del conductor, longitud, estado (abierto o cerrado); los cuales son introducidos en el programa y tiene el mismo nombre del fichero de nodos (figura 2). Para este trabajo el número de ramas es 910.

- Fichero de transformadores: Este fichero con extensión "TRA" es creado a partir de los datos de los transformadores (106 en total). Datos necesarios para este caso son: nodo inicial primario, nodo secundario, capacidad, reactancia en porcentaje, tap, fabricantes, estado (abierto o cerrado), etcétera (figura 3).

- Fichero de capacitores: Este fichero es el de menor tamaño (13 elementos) y tiene extensión "CAP". Está creado con los datos de los bancos de capacitores de la red: nodo al que está conectado, capacidad del banco de capacitores y su estado (abierto o cerrado). Al igual que el caso de los ficheros anteriores (ramas y transformadores) este fichero lo crea el programa con el mismo nombre del fichero de nodos (figura 4).

Una vez conformados todos los ficheros, se procede al cálculo del flujo de potencia. Para corregir posibles errores en la entrada de los ficheros de datos, tales como: nodos aislados, repetición de nodos, el programa posee protecciones para su detección; en caso de no existir errores, el programa calculará el flujo de carga sin más contratiempos.

No.	Ramas	Vpp, kv	P, kw	Lo.	Ybase	Dirección/Observaciones...
1	T-138	14.500	0	0.82	13.8	TALLAPIEDRA
2	CS 375	0.203	0.22	0.82	0.208	REINA
3	CS 393	0.204	59.93	0.82	0.208	INDUSTRIA/S JOSE
4	CS 393-1	0.207	0	0.82	0.208	INDUSTRIA/S JOSE
5	CS 394	0.210	42.74	0.82	0.208	INDUSTRIA
6	CS 394-1	0.213	0	0.82	0.208	INDUSTRIA/S RAFAEL
7	CS 395	0.213	38.61	0.82	0.208	INDUSTRIA/S MIGUEL
8	CS 396	0.214	70.04	0.82	0.208	INDUSTRIA/NEPTUNO
9	CS 405	0.211	26.75	0.82	0.208	CRESPO/MARLUDES
10	CS 406	0.209	25.87	0.82	0.208	ANIMAS/CRESPO
11	CS 407	0.207	14.59	0.82	0.208	CRESPO/BERNAL
12	CS 408	0.198	52.72	0.82	0.208	CRESPO/TROCADERO
13	CS 409	0.202	37.52	0.82	0.208	CRESPO/ACOLON
14	CS 411	0.201	61.99	0.82	0.208	CRESPO/S LAZARO
15	CS 412	0.198	67.04	0.82	0.208	MALECON/AGUILA
16	CS 413	0.210	38.39	0.82	0.208	MONTE
17	CS 414	0.213	111.42	0.82	0.208	AMISTAD/ESTRELLA
18	CS 415	0.209	25.11	0.82	0.208	REINA
19	CS 415-1	0.202	159.34	0.82	0.208	AMISTAD 470
20	CS 415-2	0.203	6.24	0.82	0.208	AMISTAD 470
21	CS 416	0.201	48.85	0.82	0.208	AMISTAD/DRAONES
22	CS 416-1	0.192	168.29	0.82	0.208	INDUSTRIA/DRAONES
23	CS 417	0.198	65.98	0.82	0.208	AMISTAD
24	CS 417-1	0.202	30.71	0.82	0.208	AMISTAD/BARCELONA
25	CS 418	0.205	44.63	0.82	0.208	S JOSE/AMISTAD
26	CS 419-1	0.209	85.85	0.82	0.208	S RAFAEL/AMISTAD
27	CS 419-2	0.210	10.48	0.82	0.208	S RAFAEL

Ventana de entrada de datos de nodos.

Soterradas

Files Ejecutar

nodos1.nod

Nodos Ramas Transformadores Capacitores Transferencias Reporte general

No.	Nodo Inicial	Nodo Final	Calibre	Long. mts.	I(JAMP) (result.)	Estado A/C	% Carga
883	CS550	CS526	250	90.0	40.1	C	
884	CS551-1	R143S	250	90.0	117.2	C	80.8
885	CS552	R209S	500	90.0	190.6	C	115.5
886	CS559	R141S	750	90.0	89.4	C	51.1
887	CS577	CS578	250	90.0	27.9	C	19.3
888	CS581	CS551-1	250	90.0	59.5	C	41.1
889	CS585	R213S	500	90.0	203.1	C	123.1
890	CS587	CS586	250	90.0	26.5	C	18.3
891	CS605	R131S	750	90.0	210.5	C	120.3
892	CS608	R260S	500	90.0	101.6	C	61.6
893	CS622	CS658	500	90.0	13.1	C	7.9
894	CS626	R188S	500	90.0	84.1	C	51.0
895	CS626	R188S	500	90.0	84.1	C	51.0
896	CS628	CS627	250	90.0	20.0	C	13.8
897	CS636	R229S	500	90.0	87.9	C	53.3
898	CS657	CS656	250	90.0	79.8	C	55.1
899	CS657	R234S	250	90.0	101.2	C	69.8
900	CS658	CS657	250	90.0	35.6	C	24.5
901	R258S	SP626	500	90.0	34.8	C	21.1
902	R149S	R181S	250	90.0	17.2	C	11.9
903	R149S	R181S	250	90.0	17.2	C	11.9
904	R181S	R149S	250	90.0	17.2	C	11.9
905	R181S	R149S	250	90.0	17.2	C	11.9
906	OP13	OP13	500	168.0	50.6	C	30.6
907	CS393-1	CS394	500	90.0	87.3	C	52.9
908	R258S	SP626	500	90.0	34.8	C	21.1
909	R258S	R190S	500	180.0	13.1	C	7.9
910	1P14	2P14	500	399.0	64.2	C	38.9

Ventana de datos y resultados correspondientes a las ramas.

2

Soterradas

Files Ejecutar

nodos1.nod

Nodos Ramas Transformadores Capacitores Transferencias Reporte general

No.	Nodo Inicial	Nodo Final	KVA	%	Tsp	Fabricante	I(JAMP)	Estado A/C	% Carga
78	R211P13	R211S	500.0	5.0000	0.0		2.8	C	24.6
79	R219P13	R219S	500.0	5.0000	0.0		6.1	C	53.1
80	R223P13	R223S	500.0	5.0000	0.0		8.9	C	75.8
81	R234P13	R234S	500.0	5.0000	0.0		13.3	C	115.5
82	R237P13	R237S	500.0	5.0000	0.0		7.1	C	61.7
83	R242P13	R242S	500.0	5.0000	0.0		6.2	C	53.4
84	R248P13	R248S	1500.0	5.0000	0.0		5.6	C	16.1
85	R258P13	R258S	315.0	5.0000	0.0		3.1	C	42.9
86	R260P14	R260S	500.0	5.0000	0.0		8.1	C	70.0
87	R62P14	R62S	500.0	5.0000	0.0		6.1	C	52.4
88	R67P14	R67S	500.0	5.0000	0.0		2.2	C	19.2
89	R101P14	R101S	200.0	10.0000	0.0		1.1	C	23.7
90	R105P14	R105S	200.0	10.0000	0.0		3.6	C	77.5
91	R114P14	R114S	200.0	10.0000	0.0		1.2	C	25.6
92	R130P14	R130S	200.0	10.0000	0.0		1.2	C	26.7
93	R131P14	R131S	300.0	5.0000	0.0		8.6	C	124.3
94	R132P14	R132S	225.0	10.0000	0.0		3.2	C	61.8
95	R136P14	R136S	225.0	10.0000	0.0		3.7	C	72.1
96	R148P14	R148S	300.0	5.0000	0.0		24.8	C	357.0
97	R150P14	R150S	500.0	5.0000	0.0		2.7	C	23.0
98	R162P14	R162S	500.0	5.0000	0.0		2.8	C	24.2
99	R198P14	R198S	300.0	5.0000	0.0		4.2	C	60.8
100	R224P14	R224S	500.0	5.0000	0.0		8.0	C	69.5
101	R231P14	R231S	500.0	5.0000	0.0		4.5	C	39.2
102	R244P14	R244S	500.0	5.0000	0.0		8.9	C	75.6
103	R253P14	R253S	500.0	5.0000	0.0		0.2	C	1.4
104	R260P14	R260S	500.0	5.0000	0.0		10.2	C	70.0
105	R262P13	R262S	500.0	5.0000	0.0		12.6	C	109.3

Datos y resultados correspondientes a los transformadores.

3

## RESULTADOS OBTENIDOS

El programa desarrollado se ha aplicado en el estudio de la red soterrada del Oeste de La Habana, la cual consta de 910 ramas, 592 nodos, 105 transformadores y 14 bancos de capacitores. Esta red nunca antes se pudo analizar pues se carecía de herramientas adecuadas para ello.

En las figuras 1, 2, 3 y 5 aparecen algunos de los datos y resultados correspondientes a esta red.

## BENEFICIOS DERIVADOS DE LA IMPLANTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA PROPUESTA

La red soterrada, como se conoce, fue diseñada para cierto nivel de carga, el cual en estos momentos ha sido sobrepasado, por tanto, el estudio de las condiciones en que opera dicha red son de vital importancia, ello podría fundamentar la correcta ubicación o restitución de nuevos equipos, así como la toma de medidas de corte operativo que pudieran mejorar tales condiciones.

Beneficio social: Este proyecto tiene su impacto social en la mejora del servicio que se presta a la

población, así como al sector productivo y de servicios, por disminución de las averías e incremento de la confiabilidad en la red soterrada.

Beneficio científico: Contar con las citadas herramientas equivale a un salto cualitativamente superior en cuanto al empleo de los avances científicos en la planificación de la operación de la red soterrada. Desde el punto de vista nacional resultará totalmente novedoso, pues garantizará un método adecuado para la realización de las tareas mencionadas. Puede plantearse con absoluta certeza que tales tareas son de plena actualidad científica a nivel internacional.

Beneficio económico: Actualmente las tareas citadas se realizan en forma empírica, lo cual no asegura que se alcance el óptimo en cada caso, por consiguiente, se puede deducir que con las herramientas planteadas pueden obtenerse ahorros significativos con una inversión mínima, que corresponderá fundamentalmente con la ejecución de la investigación.

No	Nodo	kVAR	Estado	Observaciones...
1	R97S	30.0	C	MAL ESTADO
2	R109S	60.0	C	MAL ESTADO
3	R109S	60.0	A	BUEN ESTADO
4	R138S	60.0	A	BUEN ESTADO
5	R135S	60.0	C	BUEN ESTADO
6	R135S	60.0	C	BUEN ESTADO
7	R108S	60.0	A	BUEN ESTADO
8	R107S	60.0	A	BUEN ESTADO
9	R107S	60.0	A	BUEN ESTADO
10	R150S	60.0	C	BUEN ESTADO
11	R114S	60.0	C	BUEN ESTADO
12	R114S	60.0	C	BUEN ESTADO
13	R121S	60.0	C	BUEN ESTADO
14	R121S	60.0	C	BUEN ESTADO
15				
16				
17				
18				
19				
20				
21				
22				
23				
24				
25				
26				
27				

Datos de los capacitores.

Nodo	Nodo	P envio	Q envio	P recibo	Q recibo	KVA	Perd.	Perd.
Envio	Recibo	kW	kVAR	kW	kVAR		kW	kVAR
01P13	1P13	3544.3	2577.5	3542.9	2575.7	4382.4	1.46	1.76
01P14	1P14	3512.8	2778.4	3510.1	2775.1	4478.8	2.76	3.33
0P13	01P13	1772.8	1289.5	1772.2	1288.8	2192.2	0.57	0.68
0P14	01P14	3513.8	2779.7	3512.2	2777.6	4480.4	1.67	2.02
1A1P11	2P11	2683.5	1890.0	2682.6	1878.9	3276.5	0.92	1.11
1A1P9	2P9	2202.3	1559.9	2201.1	1558.3	2698.8	1.29	1.56
1AP10	1HP10	192.6	129.3	192.6	129.3	232.0	0.00	0.00
1AP10	2P10	1675.3	1218.6	1674.2	1217.3	2071.6	1.07	1.29
1AP12	1BP12	2706.9	1993.7	2705.5	1992.0	3361.8	1.37	1.65
1AP9	1CP9	761.2	589.9	761.2	589.9	963.0	0.00	0.00
1AP9	R203P9	116.0	63.6	117.6	64.4	132.3	1.52	0.81
1BP12	2P12	2494.6	1844.7	2493.7	1843.6	3102.6	0.93	1.12
1BP12	R70P12	212.2	148.8	211.2	147.6	259.2	0.97	1.17
1C1P9	R107P9	712.4	557.7	711.7	557.4	904.8	0.72	0.31
1CP10	1DP10	159.4	119.3	159.4	119.3	199.1	0.00	0.00
1CP10	R34P10	367.7	246.8	368.1	247.3	442.9	0.37	0.45
1CP13	1DP13	666.7	581.3	666.7	581.3	884.6	0.00	0.00
1CP14	1DP14	113.5	115.6	113.5	115.6	162.0	0.00	0.00
1CP14	R33P14	-295.4	-449.7	-295.6	-449.8	538.0	0.18	0.10
1CP9	1C1P9	712.1	557.6	712.1	557.6	904.4	0.00	0.00
1CP9	R197P9	48.5	31.9	48.5	31.9	58.1	0.00	0.00
1DP10	R158P10	159.9	119.5	159.5	119.3	199.6	0.41	0.18
1DP13	1EP13	68.5	38.8	68.5	38.8	78.7	0.00	0.00
1DP13	1FP13	597.8	542.3	597.4	542.0	807.1	0.42	0.30
1DP14	1FP14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00
1DP14	R138P14	113.6	115.7	113.6	115.7	162.2	0.00	0.00
1EP13	R147P13	68.6	38.9	68.6	38.9	78.9	0.00	0.00
1FP13	R262P13	425.1	344.0	425.1	344.0	546.9	0.00	0.00

Transferencias obtenidas por las ramas.

5

## CONCLUSIONES

En general, puede estimarse que el beneficio es obvio, aunque extremadamente difícil de cuantificar, no obstante pudiera tomarse como base el costo de un transformador de este tipo de redes en unos 6 000,00 USD, suponiendo que por la utilización de estos programas en los análisis expuestos, se evite la falla al menos en un equipo, lo cual es totalmente aceptable.

## REFERENCIAS

1. Srinivasan, N. *et al.*: "Some New Algorithms for State Estimation in Power Systems", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS 93, No. 3, pp. 982-987, May/June, 1984.
2. Zamora, Salvador: "Flujo de carga acoplado rápido", Tesis de Maestría, Universidad Central de Las Villas. 1998.

## AUTORES

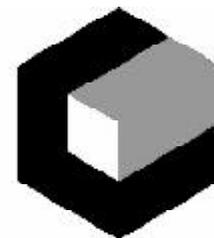
Manuel Barroso Baeza, Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Investigador Auxiliar, Centro de

Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, (ISPJAE)

e-mail:barroso@cipel.ispjae.edu.cu

Elena Llimó Bravo, Ingeniera Electricista, Investigadora Auxiliar, CIPEL, ISPJAE, Ciudad de La Habana

e-mail:elena@cipel.ispjae.edu.cu



Instituto Superior Politécnico  
José Antonio Echeverría  
**cujae**