

**Congreso Internacional de Distribución Eléctrica  
CIDEL Argentina 2014**

**ANÁLISIS DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA  
BASADOS EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS REPRESENTATIVOS**

A. Mazzoletti<sup>†</sup>, J. Olexen<sup>†</sup>, M. Oliveira<sup>†</sup>, H. Reversat<sup>†</sup> O. Perrone<sup>†</sup> D. Muguerza<sup>†</sup>  
*mazzoletti@fio.unam.edu.ar; oliveira@fio.unam.edu.ar; hreversat@fio.unam.edu.ar; perrone@fio.unam.edu.ar*

<sup>†</sup>*Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM).*

<sup>†</sup>*Centro de Estudios de Energía para el Desarrollo (CEED), Misiones-Argentina.*

**Resumen-** En el presente trabajo se propone un método para optimizar Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica (SDEE) con el objetivo de determinar la mejor solución técnica que admita el funcionamiento de los SDEE con adecuados parámetros de Producto Técnico. El análisis se realiza a partir de modelos de optimización desarrollados según las configuraciones de redes de mayor difusión que operan en el mercado eléctrico. Estos modelos se ajustan para lograr una red adaptada ideal, los Sistemas Eléctricos Representativos (SER), en función de las Área Típica de Distribución (ATD). Se presentan resultados de simulación obtenidos mediante el software *CYMDIST v5.04*®, a partir del cual, se determina la óptima solución técnica para diferentes regímenes de funcionamiento y según la dotación de recursos disponibles.

**Palabras claves-** Energía Eléctrica, Sistema de Distribución, Planificación, Área Típica de Distribución, Producto Técnico.

## 1. INTRODUCCIÓN

La tarea de alcanzar el óptimo régimen de operación de los Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica (SDEE) demanda una actividad compleja. Su adecuada funcionalidad implica la observación de la evolución de parámetros intrínsecos y variables externas, tales como: la demanda de potencia por área abastecida, configuración de red instalada, tipo de tecnología de conductores utilizados, ubicación de los centros de transformación de Media/Baja Tensión, operación de los equipos de protección y maniobra, crecimiento demográfico, entre otros [1]. En estos últimos años la eficiencia de los SDEE para cubrir la demanda energética se encontró comprometida en la calidad de la prestación del servicio eléctrico, inclusive el envejecimiento de los activos pone en riesgo la confiabilidad del suministro. Por otro lado, se advierte un constante incremento en el consumo de energía acompañado al uso irracional de la misma. Debido a estas razones, es conveniente

aplicar continuamente acciones mitigadoras para evitar la disminución del rendimiento y la pérdida de confiabilidad de estas instalaciones.

Por lo tanto, el monitoreo del estado de los SDEE es una tarea necesaria y a su vez exhaustiva, que permite planificar las inversiones próximas en busca de subsanar los problemas actuales de calidad de servicio. Un SDEE de funcionamiento eficiente implica un equilibrio entre la dotación de recursos requeridos para alcanzar el óptimo régimen de operación y los costos asociados para tal fin. Para ello existen métodos, que a partir del conocimiento de una red existente, permiten determinar una red de referencia teórica (red adaptada) capaz de funcionar de forma eficaz y con el costo mínimo.

Existen algunas técnicas de optimización que bajo este mismo principio calculan los parámetros inherentes de los SDEE. En [2] por ejemplo, se presenta una metodología que minimiza el costo de inversión y las pérdidas en transformadores y en conductores obteniéndose como resultado, el costo, la capacidad y ubicación de los transformadores y la configuración de las redes asociadas al mismo. Las metodologías de tipo lineal, en redes de Media Tensión (MT) o de Baja Tensión (BT), concentran las cargas con tal disposición. Esta herramienta es particularmente adecuada para zonas de baja concentración de carga. Pero para zonas de altas concentraciones urbanas y altas densidades de carga, es conveniente zonificar el mercado eléctrico mediante la segregación en rangos de densidad de demanda denominadas como Áreas Típicas de Distribución (ATD). Este método determina por cada sector, una red adaptada que permite abastecer adecuadamente la demanda con grados de energía homogéneos, calidad y confiabilidad cuando los SDEE operan bajo condiciones de funcionamiento normal y ante contingencias. Los sistemas que constituyen la solución para una red adaptada se denominan Sistemas Eléctricos Representativos (SER) [4]. Desde la solución de esta red ideal generalizada, es posible proyectar la evolución tendencial de la demanda y evaluar las inversiones necesarias para nuevos equipos e instalaciones.

En este trabajo se aplica una metodología para determinar cada SER en función de las ATD, capaz de brindar una solución técnica eficiente con adecuados parámetros de Producto Técnico (PT). El estudio se realiza a partir de las configuraciones de redes de MTBT de mayor difusión, luego se ajustan los modelos para lograr una red adaptada para las ATD. Con los modelos optimizados en BT, se puede obtener una zonificación apta para el diseño final de las instalaciones de MT que incluye la totalidad de los usuarios. A su vez, esta herramienta posibilita la planificación de los SDEE para operar en el mercado eléctrico con el mínimo costo de capital competitivo y con la última tecnología disponible. Se presentan los resultados obtenidos mediante el software de análisis de sistemas de distribución *CYMDIST v5.04*®. (Ver en Anexo A).

## 2. MARCO REGULATORIO

En el marco de la reglamentación nacional [3] se define la zonificación de la demanda de energía eléctrica y representada a través de la densidad de potencia activa ( $\delta$  [MW/ km<sup>2</sup>]) para las distintas ATD. En la Tabla I se presenta esta clasificación.

**TABLA I:** Zonificación del mercado eléctrico.

ATD	$\delta$ en BT [MW/km <sup>2</sup> ]	$\delta$ en BT +MT [MW/km <sup>2</sup> ]
Baja densidad rural	$\delta \leq 0,25$	$\delta \leq 0,5$
Baja densidad urbana	$0,25 < \delta \leq 0,5$	
Media/Baja densidad	$0,25 < \delta \leq 3$	$0,5 < \delta \leq 7$
Media/Alta densidad	$3 < \delta \leq 8$	$7 \leq \delta$
Alta densidad	$8 < \delta \leq 15$	
Muy Alta densidad	$15 \leq \delta$	

A su vez, la reglamentación vigente establece las siguientes cinco especificaciones bajo las cuales se fundamenta la metodología aplicada:

1. La variable a utilizar deberá ser la densidad de potencia máxima simultánea.
2. Se deberá realizar tomando los parámetros que caracterizan el mercado desde el punto de vista de los usuarios en BT a fin de obtener una zonificación apta para el diseño de instalaciones. Luego se efectuará una que engloba al total de los usuarios en MT y BT a los efectos de la zonificación necesaria para el desarrollo de instalaciones de media tensión.
3. La cuadrícula será de 500 metros de lado.
4. Se realizará una subdivisión de cualquier rango cuando la superficie asociada al ATD definida por el nuevo rango sea superior a 1 km<sup>2</sup>.
5. Los costos que se originan por decisiones ajenas a la concesionaria y que producen un apartamiento de la alternativa tecnológica que satisface menores costos totales para abastecer un ATD deberán ser estimados en forma separada.

## 2.1 Parámetros del Producto Técnico, PT

Los PT considerados en el presente estudio están definidos según [4] y establecidos a partir de los siguientes criterios:

### 2.1.1 Variaciones de tensión – régimen permanente

Los límites establecidos para las variaciones de tensión de régimen permanente considerando las caídas de tensión a lo largo de cada alimentador, los topes de regulación de los transformadores y los márgenes establecidos como la calidad de servicio técnico, se definen como:

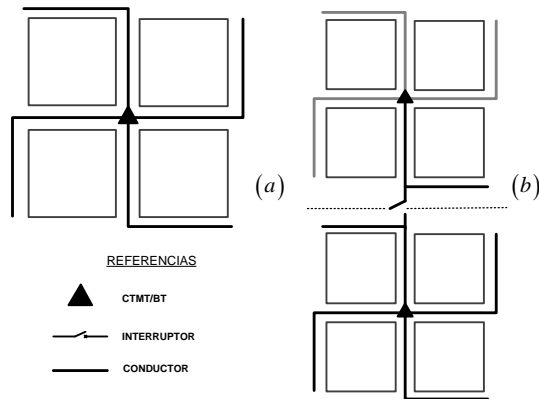
1. BT y MT: +5% en cabecera. -8% en extremo para red normal (Estado N).
2. BT: +5% en cabecera, -13% en extremo para red anormal (Estado N-1).

### 2.1.2 Corriente nominal en operación normal y bajo condición de contingencia

La operación de los SDEE generalmente se realiza a través de una red mallada la cual permite el servicio continuo ante la presencia de una falla, incrementando así la confiabilidad del sistema. Esta lógica de funcionamiento se logra sobrecargando los Centros de Transformación de media/baja tensión (CTMT/BT) próximos a la falla. Por tal motivo, la capacidad de suministro debe considerar un porcentual de reserva, con lo cual la corriente que deberá transportar el conductor asociado, no alcanzará el valor nominal. Los SDEE en estado de operación normal (Estado N) suministrarán una corriente de magnitud menor a la máxima admitida por el conductor. Ante un estado de contingencia (Estado N-1), se deberá disponer de una capacidad extra para abastecer la carga del transformador defectuoso. La corriente de suministro en condición de emergencia, generalmente alcanza el 100% de la máxima admitida, permitiéndose acrecentarse aún hasta un 130% durante no más de 100 horas acumuladas en 12 meses consecutivos ó 500 horas en la vida útil del cable [5], [6].

## 3. METODOLOGIA APLICADA

Para obtener los valores de referencia óptimos, inicialmente se obtienen una serie de índices que representan la potencia distribuida suministrada por unidad de área y por cada configuración topológica de red experimentada. En la Fig. 1 se muestran los modelos representativos básicos y adoptados para el presente estudio. En la figura 1(a) la celda base se conforma de 4 unidades/manzana de cuadrículas, en la figura 1(b) se muestra como se conforma una de celda de 8 unidades/manzana por la conexión de un dispositivo de maniobra para afrontar una eventual contingencia. Para ATD de mayores superficies se mantiene este mismo patrón de distribución.



**Fig. 1.** Modelos de celdas básicas adoptados. (a) 4 unidades de manzanas. Estado N (b) 4+1 unidades de manzanas. Estado N-1.

Cada unidad de cuadrícula representa una manzana y está recorrida por un único conductor que alimenta hacia ambos frentes, además los CTMT/BT se centran por cada configuración. Para obtener la distribución de demanda de potencia por unidad de área se considera que una cuadrícula se constituye longitudinalmente por 115 metros de lado, por lo tanto la unidad básica de área abarcará  $0,013225 \text{ km}^2$ . Entonces, la expansión de superficie para cubrir la unidad viene dada por:

$$1[\text{km}^2] = 75,61 \cdot 0,013225[\text{km}^2] \quad (1)$$

La potencia activa de suministro será de magnitud menor al máximo ideal teórico calculado por cada CTMT/BT. Este valor inferior se adopta con la finalidad de proteger el equipamiento y a su vez, considerar el estado de contingencia N-1.

Considerando un rendimiento cercano al 70% por cada CTMT/BT con potencia de salida de  $\cos\phi = 0,85$ , la potencia de suministro final será:

$$p[\text{kW}] = 0,7 \cdot S[\text{kVA}] \cdot \cos(\phi) \quad (2)$$

En la Tabla II se presentan los valores de densidad de potencia obtenidos para modelos representativos que abarcan 4, 8 y 16 unidades de manzanas, y considerando cada CTMT/BT normalizados. Los parámetros están asociados con la potencia máxima entregada a un área geográfica de igual ATD. Por último se especifica el flujo de carga que deberá soportar por tramo de conductor.

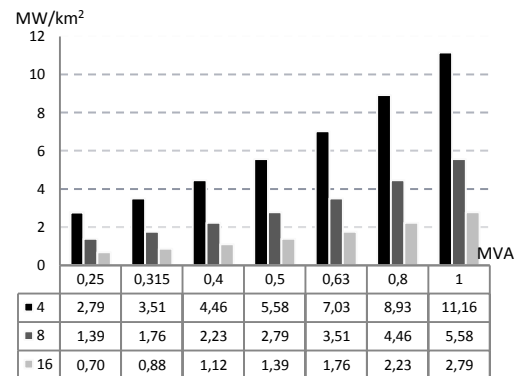
**TABLA II.** Potencias para diferentes topologías de red.

S [kVA]	P [kW]	kW por Manzana			kW por tramo		
		Manzanas/CTMTBT			1 Conductor/Tramo		
		4	8	16	4	8	16
250	148,75	37,2	18,6	9,3	18,6	9,3	4,6
315	187	46,9	23,4	11,7	23,4	11,7	5,9
400	238	59,5	29,8	14,9	29,8	14,9	7,4
500	298	74,4	37,2	18,6	37,2	18,6	9,3
630	375	93,7	46,9	23,4	46,9	23,4	11,7
800	476	119,0	59,5	29,8	59,5	29,8	14,9
1000	595	148,8	74,4	37,2	74,4	37,2	18,6

En la Fig. 2 se muestra los resultados obtenidos de expandir la distribución de la demanda de potencia mediante de los modelos propuestos para cubrir una unidad de superficie. Se puede observar que para 4 unidades de manzanas/CTMTBT, las ATD con alta densidad de potencia (entre el 8 y  $15 \text{ MW/km}^2$ ) mejor se ajustan los CTMTBT de elevada potencia (entre 800 y  $1000 \text{ kVA}$ ) para cubrir estas demandas. Por otro lado, para las ATD de baja densidad (entre el  $0,25$  y  $0,5 \text{ MW/km}^2$ ), CTMT/BT de baja potencia son los más adecuados para lograr un rendimiento aceptable.

Los SER se obtienen mediante el siguiente método:

1. Establecer las unidades de manzanas para la red de referencia ideal que mejor se ajuste a la zonificación del mercado eléctrico.
2. Determinar para la red adaptada su arquitectura, potencia nominal de los CTMT/BT, dimensión y tecnología de los conductores, los mecanismos de protección y control.
3. Verificar que los parámetros del PT presenten valores adecuados según normativa vigente para el Estado N y el Estado N-1.
4. Ajustar la dotación de recursos físicos para obtener la red de referencia optimizada.



**Fig. 2.** Densidad de potencia máxima distribuida por unidad de área para distintos CTMTBT.

La iteración del proceso descrito se realiza para cada ATD especificada. Esta red de referencia adaptada y eficiente representa a los SER, y opera con la última tecnología a un costo de mercado competitivo. Para el ajuste de esta red se analizó el comportamiento de distintas variables eléctricas, como ser: la caída de tensión en cada tramo de conductor y la acumulada, las corrientes de suministro de lo CTMT/BT, la máxima carga admisible equilibrada en condición óptima y en Estado N-1. Se utilizaron CTMT/BT normalizados por la norma IRAM 2250 [7]. En cuanto a los conductores cumplirán con lo especificado en la norma IRAM [8].

#### 4. RESULTADOS OPTIMIZADOS

Los resultados de simulación se obtuvieron mediante el software de análisis de sistemas de distribución *CYMDIST v5.04*®. Esta herramienta permitió simular y estudiar sistemas eléctricos bajo diferentes condiciones de operación, con el objetivo de evaluar el comportamiento de las redes para planificar y proyectar las inversiones necesarias frente a incrementos de la demanda. En esta sección se muestran los primeros resultados de un trabajo en continuidad, obtenidos para una configuración de celda básica conformada por 4 unidades de manzanas. A partir de este hipotético escenario se ajustan los ensayos de simulaciones para los SDEE en condiciones de operación normales y ante el estado de contingencias. Las siguientes Fig. 3 y Fig. 4 presentan las soluciones obtenidas cuando la red opera en condición normal (Estado N).

La Fig. 3 muestra la densidad de demanda de potencia [ $\text{kW}/\text{km}^2$ ] para distintos conductores según la demanda a la que están sometidos [kVA]. Con esta información es posible entonces determinar la solución tecnológica que mejor se ajuste a la demanda de potencia requerida por cada ATD. Se observa de la Fig. 3 que para atender ATD con una densidad de demanda alta (entre 5 y 8  $\text{MW}/\text{km}^2$ ), el mejor ajuste se obtiene para CTMT/BT de elevada potencia (entre el 630 y 1000 kVA) y conductores de elevada sección (120/240  $\text{mm}^2$ ). Por otro lado, para ATD que presenten índices de demanda entre 2 y 3  $\text{MW}/\text{km}^2$ , *a priori* es más adecuado utilizar CTMT/BT de menores potencias (entre 250 y 630 kVA) y conductores de menor sección (entre 50/70/95  $\text{mm}^2$ ).

La Fig. 4 muestra el intervalo de valores de corriente (en % de la  $I_N$ ) en cada uno de los conductores estudiados y en función de la potencia de los CTMT/BT. Puede observarse que los CTMT/BT de baja potencia son adecuados para ATD de bajo índice de densidad de demanda.

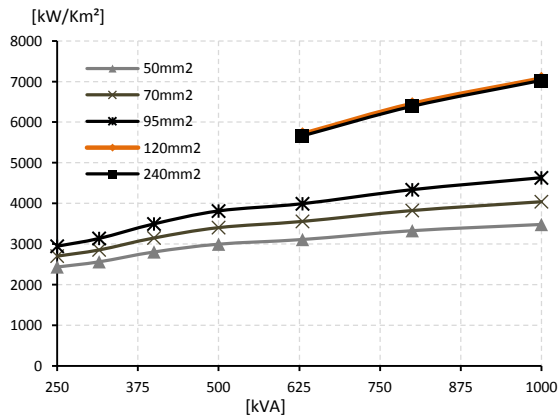


Fig. 3. Relación entre densidad de demanda de ATD y potencia de CTMT/BT para diferentes secciones de conductores. Estado N (4 manzanas/CTMTBT).

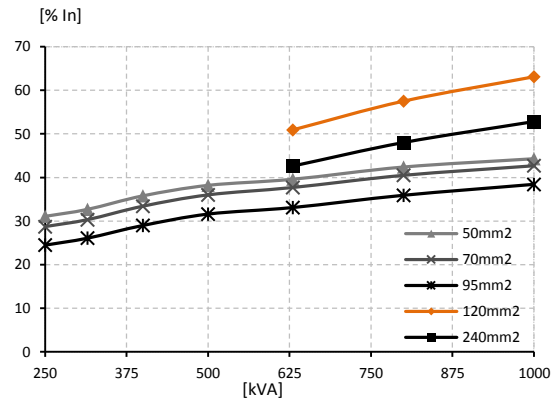


Fig. 4. Relación entre corriente solicitada y potencia de CTMT/BT para diferentes secciones de conductores (4 manzanas).

Sin embargo, en los conductores de mayor sección, 120/240  $\text{mm}^2$ , se observan diferentes valores de corrientes para CTMT/BT de potencias superiores a 630 kVA. En este sentido, para lograr un mejor aprovechamiento de los recursos disponibles se deberá incrementar la densidad de demanda de las ATD a través de la instalación de transformadores de mayor potencia. Se observa también que para ATD de medias y bajas densidad de demanda, es conveniente la utilización de conductores de menor sección (50/70/95  $\text{mm}^2$ ). Aunque, cualquiera sea la sección del conductor, la corriente para el estado normal de operación está por debajo de su valor nominal, lo cual deja un margen aceptable para soportar posibles contingencias en la red.

Las siguientes Fig. 5 y Fig. 6 presentan las soluciones obtenidas para la red en Estado N-1.

La Fig. 5 muestra la densidad de demanda de potencia [ $\text{kW}/\text{km}^2$ ] para distintos conductores según la demanda a la que están sometidos [kVA]. En este caso se evidencia que los conductores de sección 120/240  $\text{mm}^2$  son aptos para soportar la falla en ATD de demanda de media/alta densidad.

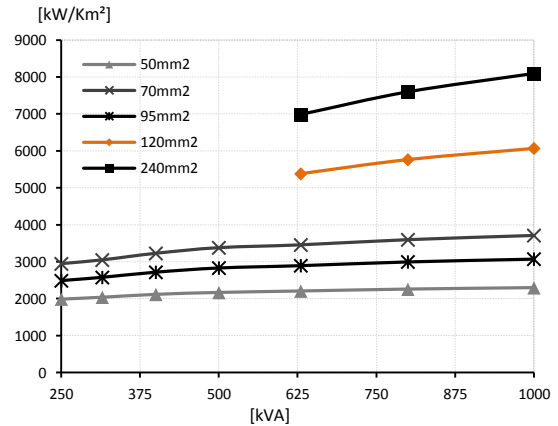


Fig. 5. Relación entre densidad de demanda de ATD y potencia de CTMT/BT para diferentes secciones de conductores. Estado N-1 (4 manzanas/CTMTBT).

Para ATD de media/baja densidad se aprecia que los conductores de sección 50/70/95 mm<sup>2</sup> mejor se ajustan a la solución tecnológica.

La Fig. 6 muestra el intervalo de valores de corriente (en % de la I<sub>N</sub>) en cada uno de los conductores estudiados y en función de la potencia de los CTMT/BT. En el estado de contingencia los conductores de mayor sección fueron sometidos a corrientes superiores a la nominal para entregar la potencia de los CTMT/BT mayores a 630 kVA. Aunque se debe advertir que en ambos casos superan en 1,4 veces la corriente nominal, lo cual no es conveniente para la vida útil del cable. Por otro lado, se observa que los cables de menor sección son subutilizados en condición normal de operación, pero alcanzan la corriente nominal para los CTMT/BT de gran potencia. Se debe tener en cuenta que las ATD de media/baja (menores a 3 MW/km<sup>2</sup>) generalmente se adaptan a demandas de potencia que abarcan grandes superficies, lo cual implica que los conductores de mayor sección (120/240 mm<sup>2</sup>) no serán convenientes por su alto costo asociado en la instalación.

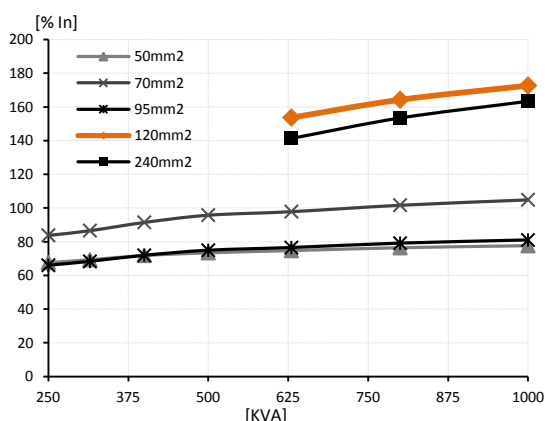


Fig. 6. Relación entre corriente solicitada y potencia de CTMT/BT para diferentes secciones de conductores. Estado N-1.

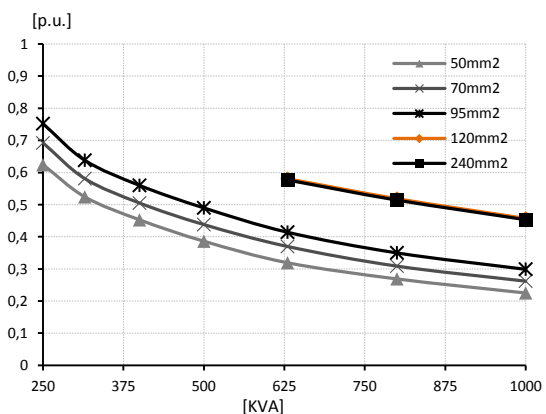


Fig. 7. Demanda de carga por transformador en [p.u.] para cada ATD y en función del tipo de conductor utilizado. Estado N.

En la Fig. 7 se muestra la relación entre la demanda de carga por transformador (en por unidad p.u.) en función de las ATD y de la sección de los conductores para el estado de operación normal. Se puede observar que cuanto mayor es la potencia de los CTMT/BT menor será su demanda de carga en p.u. para una determinada ATD. Por otro lado, las mayores secciones de conductores presentan un mayor aprovechamiento de los recursos dado que permiten suministrar energía a ATD con mayor densidad de potencia.

En la Fig. 8 se muestra la relación entre la demanda de carga por transformador (en por unidad p.u.) en función de las ATD y para diferentes secciones de conductores para el estado N-1. En esta situación, los CTMT/BT incrementan su factor de demanda dado que el transformador atiende mayor cantidad de manzanas y proporcionalmente aumenta la densidad de demanda de potencia entregada para soportar la carga del equipo dañado.

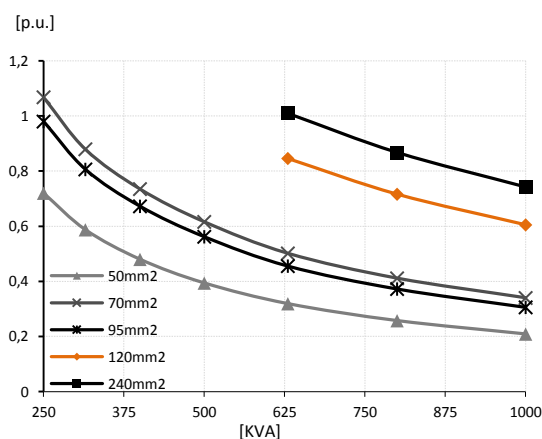


Fig. 8. Demanda de carga por transformador en [p.u.] para cada ATD y en función del tipo de conductor utilizado. Estado N-1.

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó un método para determinar los Sistemas Eléctricos Representativos SER en función de Áreas Típicas de Distribución ATD. La metodología aplicada considera solamente el trazado vial de la red ideal y toma como punto de partida valores de referencia obtenidos para modelos representativos que abarcan 4, 8 y 16 unidades de manzanas. Se analizó una red adaptada de referencia que permitió determinar la mejor solución técnica, donde el cambio tecnológico se inicia a consecuencia de la propia optimización.

Para obtener los resultados de simulación se utilizó como herramienta el software de análisis de redes de distribución CYMDIST v5.04®, el cual permitió diagramar el trazado de la red adaptada, analizar la eficiencia bajo distintas condiciones de funcionamiento, determinar la mejor solución para distintas configuraciones de red con adecuados niveles de Calidad de PT y, por último, visualizar

los resultados mediante una amplia variedad de reportes gráficos.

En los resultados presentados se evidencia que los CTMT/BT de elevada potencia y conductores de gran sección, brindan una mejor solución tecnológica para la configuración analizada.

En los futuros trabajos se pretende avanzar en el análisis de optimización de carácter técnico económico, como así también determinar nuevos valores de referencias para otros SER que abarquen mayores rangos de superficies.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Centro de Estudios de Energía para el Desarrollo (CEED) por el apoyo y financiamiento otorgado para desarrollar el presente trabajo.

## 7. BIBLIOGRAFÍAS

- [1] Lakervi & Holmes, “Electricity Distribution Network Design,” *Ed. Peter Peregrinus*, 2<sup>nd</sup> Edition, ISBN 0-86341-308-0, 1995.
- [2] A. Navarro, H. Rudnick, “Large-Scale Distribution Planning—Part I: Simultaneous Network and Transformer Optimization,” *IEEE Trans. Power App. Syst*, vol. PAS-98, pp. 1061–1065, May 2009.
- [3] Anexo Resolución N° 556/2001 ENRE. *Criterios para la presentación de la propuesta tarifaria*.
- [4] Anexo Resolución N° 184/2000 ENRE. *Base Metodológica para el Control de Calidad del Producto Técnico*.
- [5] AEA - 95201. *Reglamentación Líneas Aéreas Exteriores de Baja tensión*.
- [6] H. N. Tram and L. Wall, “Optimal conductor selection in planning radial distribution systems,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 3, no. 1, pp.200–206, Feb. 1988.
- [7] IRAM 2250 – 2005. *Transformadores de distribución. Tipificación de características y accesorios*.
- [8] IRAM 2263 – 2005. *Cables preensamblados con conductores de aluminio aislado con polietileno reticulado para líneas aéreas de energía de hasta 1,1 kV*.

## ANEXO A

El software de “Análisis de sistemas de distribución, CYMDIST v5.04®” permite realizar el estudio y análisis de los sistemas eléctricos bajo distintas condiciones de funcionamiento y distintos escenarios, facilitando las etapas de planificación y de explotación en las redes de distribución. El programa incluye múltiples funciones, algunas de las cuales se indican a continuación:

- Flujo de carga y caída de tensión.
- Análisis exhaustivo de fallas (cortocircuitos).
- Distribución y evaluación de cargas.
- Ubicación óptima de condensadores.
- Optimización de la configuración eléctrica
- Crecimiento de carga.
- Modelación de la generación distribuida

En la Fig. A1 se muestra una imagen de la interfaz gráfica que facilita el dibujo del diagrama unifilar de la red en pantalla y define los parámetros de sus componentes.

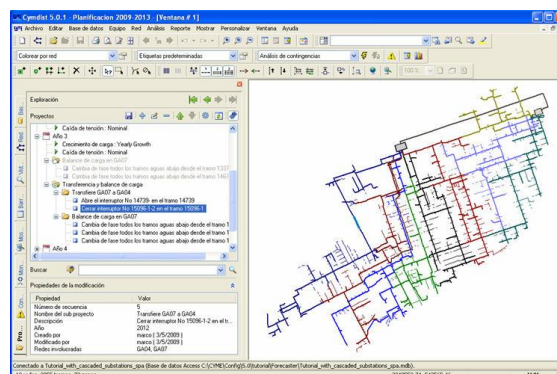


Fig. A1. Interfaz gráfica principal.

Los módulos adicionales de CYMDIST v5.04® permiten realizar estudios especializados, como ser:

- Evaluación y análisis de confiabilidad. (RAM)
- Análisis de contingencias. (CAM)
- Restablecimiento de servicio. (SRM)
- Análisis de armónicos. (CYMHARMO)
- Configuración óptima del sistema eléctrico. (SOM)
- Modelación de redes secundarias, subestaciones y de subredes.
- Coordinación de dispositivos de protección.

La información se visualiza mediante una amplia variedad de reportes gráficos y códigos de colores del diagrama unifilar para indicar condiciones de sobretensión o subtensión, tramos aislados, equipos sobrecargados, niveles de falla, niveles de falla, etc.