

CIDEL Argentina 2010
Congreso Internacional de Distribución Eléctrica

**ESTUDIO ESTADÍSTICO DE MEDICIONES DE NIVEL DE TENSIÓN EN REDES
DE DISTRIBUCIÓN**

Pedro E. Issouribehere, Juan C. Barbero, Gustavo A. Barbera

IITREE-LAT UNLP

ARGENTINA

pedroi@iitree-unlp.org.ar

Palabras clave

Calidad de Servicio – Distribución de Probabilidad – Grado de Cumplimiento – Medición – Nivel de Tensión – Producto Técnico.

1. RESUMEN

Para verificar el cumplimiento de los estándares de la calidad del servicio eléctrico – en este caso el Nivel de Tensión – con fines regulatorios [1] se aplican en Argentina criterios determinísticos.

No obstante, y a los efectos de evaluaciones globales de la performance en la prestación de un servicio por parte de un Prestador, particularmente en servicios extensos como los que cubren las redes de baja tensión – con grandes volúmenes de información – se tiende a utilizar tratamientos estadísticos.

Con el objeto de experimentar sobre modalidades que pudieran ser de utilidad futura en tal sentido, en este artículo se efectúa un completo análisis del comportamiento del Nivel de Tensión en distribución utilizando información disponible [2].

En primera instancia se describe cómo debe realizarse la correcta medición de la tensión en redes de BT y cuáles son los límites existentes en la Argentina en la actualidad. Luego de ello se presentan los resultados obtenidos de procesar estadísticamente un gran número de mediciones de campo de este parámetro. Dentro de ese marco, se efectúa un riguroso procesamiento de la información a efectos de encontrar la distribución de probabilidad que mejor represente el comportamiento de la tensión en este tipo de redes. Se estima el número de casos con niveles de calidad no adecuados. Se analiza la tendencia de este parámetro a lo largo del tiempo. Se comparan los niveles medidos en distintos Servicios. Se evalúan, además, los niveles medidos en distintos tipos de redes (aéreas / subterráneas) ya que éstas generalmente requieren distintas exigencias de calidad. Se cotejan los niveles de tensión medidos en distintas bandas horarias a lo largo del día.

2. INTRODUCCIÓN

Uno de los aspectos más importantes de la Calidad del Servicio Eléctrico es el Nivel de Tensión. Para

medir la calidad del Nivel de Tensión se debe ponderar cuánto se aparta la tensión existente en determinado punto de la red con respecto al valor nominal (220 V en Argentina).

En Argentina, desde comienzos de la privatización de los servicios eléctricos públicos en 1992, se han llevado cabo rigurosas campañas de medición con el propósito de controlar justamente el Nivel de Tensión que las Servicios proveen a sus respectivos usuarios.

Lo que se procura en el presente trabajo es analizar objetivamente el comportamiento de este parámetro, empleando mediciones de campo, por medio de estudios no tradicionales que escapan de la tarea habitual de llevar adelante campañas de control.

3. DESCRIPCIÓN DE LAS MEDICIONES

Generalidades

La variable que se emplea para ponderar el Nivel de Tensión es el valor eficaz verdadero (con armónicas incluidas) o valor eficaz de la onda de frecuencia industrial. Se requiere realizar las mediciones con equipos Clase 0,5. [1]

Si la instalación a medir es trifásica, se mide la tensión en las tres fases. Si ésta es monofásica, se mide solamente la fase en cuestión.

Se promedia el valor de tensión en períodos de 15'. La duración típica de una medición es de una semana. De este modo, cada medición consiste de 672 períodos de 15'.

Se consideran válidos aquellos períodos de 15' cuyo valor de tensión se encuentre por encima del 75 % del nominal (165 V). Por debajo de este valor se considera interrupción del suministro.

Los equipos de registro se instalan directamente en las acometidas de los usuarios, los que son seleccionados al azar.

Los límites existentes en la actualidad son los que se muestran en la Tabla I, que como puede observarse, son dependientes del tipo de instalación con que el servicio es prestado.

Estos límites pueden ser transgredidos hasta durante el 3% de la duración de la medición. Si se supera este porcentaje, la medición resultará penalizada.

El monto de las penalidades es proporcional al grado de transgresión presente y a la energía suministrada al usuario en dichas condiciones.

Tabla I. Límites existentes en la actualidad.

Tipo de Red	Banda Permitida	Límite Inferior	Límite superior
Subterránea	± 5 %	209 V	231 V
Aérea	± 8 %	202,4 V	237,6 V
Rural	± 10 %	198 V	242 V

A manera de ejemplo, en la Fig. 1 se muestra una medición semanal típica, en la que se han incluido además los límites inferior y superior existentes para usuarios provistos con instalación subterránea.

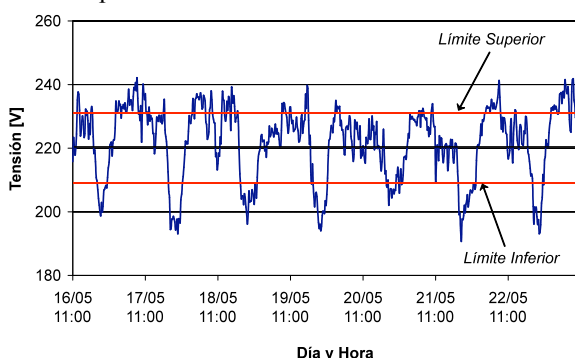


Fig. 1. Medición semanal de tensión, con límites superior e inferior.

Como puede observarse se presenta transgresión de los límites, tanto por baja como por alta tensión. La transgresión se ha producido durante un lapso superior al 3 % de la duración de la medición, por lo que naturalmente el punto ha resultado pasible de penalidad.

4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Distribución teórica del Nivel de Tensión

En este tipo de estudios resulta de suma utilidad poder obtener una distribución de probabilidades teórica que represente en forma correcta la variable de interés. La importancia radica en que conociendo dicha distribución, y los parámetros estadísticos que la caracterizan, sería posible predecir de manera fehaciente el grado de cumplimiento que cierto Servicio logrará.

De acuerdo a distintos autores encontrados en la bibliografía internacional existente sobre el tema, como por ejemplo [3], el Nivel de Tensión tendría un comportamiento de acuerdo a la distribución Normal, cuya media y desviación estándar son aquellas correspondientes al universo (Fig. 2).

Además, dichos autores indican que, debido a la simetría tanto de la distribución como de los límites existentes (*Li*: límite inferior y *Ls*: límite superior), la cantidad de usuarios con valores de tensión por

debajo del límite inferior sería equivalente a aquella con valores por encima del máximo establecido

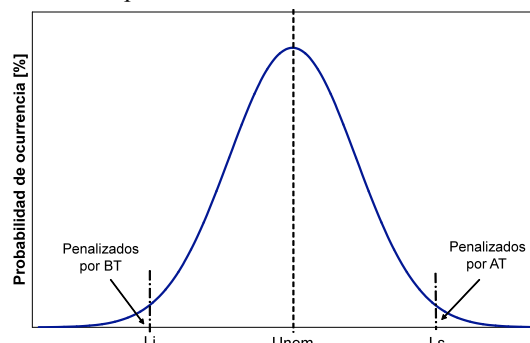


Fig. 2. Distribución teórica del Nivel de Tensión.

Distribución obtenida de las mediciones

Con el propósito de comprobar lo descrito en el apartado anterior, se procesaron 1000 mediciones de Nivel de Tensión en sitios elegidos al azar, correspondientes a distribución aérea (± 8%).

A efectos de obtener la distribución buscada se conformó un lote compuesto por la totalidad de periodos de 15' existentes en las 1000 mediciones semanales seleccionadas. De este modo, el lote analizado contó con aproximadamente 650.000 valores de tensión.

El resultado del procesamiento efectuado es el que aparece en la Fig. 3. Tal como puede apreciarse en el histograma obtenido, la distribución del Nivel de Tensión no resultó del tipo Normal. La principal diferencia radica en la asimetría presente, ya que la gráfica decae más lentamente hacia los valores bajos de tensión que hacia los altos.

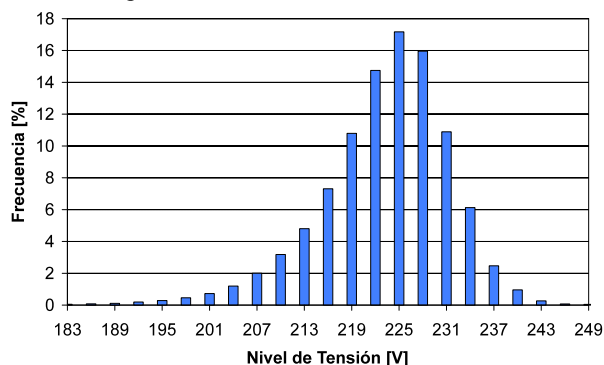


Fig. 3. Distribución real obtenida de procesar 1000 mediciones de campo.

Los parámetros estadísticos que se obtuvieron del lote son:

- Valor Medio = 221,7 V
- Desviación Estándar = 8,3 V
- Periodos con $U < 202,4$ V (-8%) = 2,45 %
- Periodos con $U > 237,6$ V (+8%) = 1,06 %
- Periodos con U dentro de ± 8 % = 96,49 %

Una forma directa de confirmar que el Nivel de Tensión no sigue esta distribución Normal es justamente graficar en una misma escala tanto el histograma correspondiente a los valores reales

como la distribución Normal teórica con los valores de media y desviación estándar obtenidos. Esta doble representación se muestra en la Fig. 4.

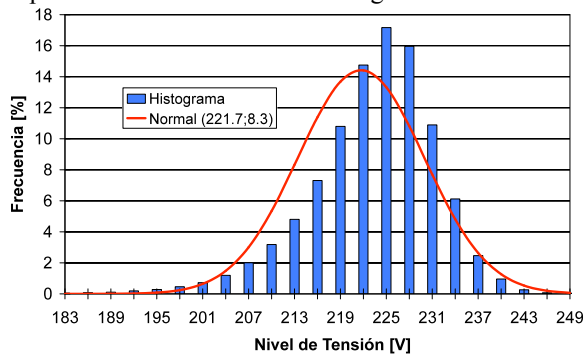


Fig. 4. Distribución real más la Normal con igual media y desviación estándar.

A simple vista se aprecia una importante diferencia entre ambas gráficas, por lo que se concluye que la representación teórica propuesta por distintos autores no es la apropiada.

Distribución de probabilidades propuesta

Puede comprobarse que la distribución de probabilidad que se ajustaría muy bien al universo de mediciones de campo sería la distribución de probabilidad **LogNormal** [4]. Sin embargo, existe una diferencia con respecto a la distribución obtenida del procesamiento de las mediciones: la asimetría se presenta hacia los valores más altos de la variable de interés, en lugar de hacerlo hacia los más bajos.

A efectos de adecuar la distribución obtenida del procesamiento a la distribución **LogNormal** se creó una nueva variable llamada “caída de tensión”, definida como la resta entre el valor máximo registrado (245,6 V) y los distintos valores de tensión individuales. Fue así que se obtuvo una distribución de tensión, cuyo rango de variación se encuentra entre 0 V y el máximo ΔU existente entre los 650.000 períodos de 15’ analizados. Esta nueva distribución sí presenta la asimetría del mismo modo que la **LogNormal**.

Para comprobar lo anterior se utilizó el programa de procesamiento estadístico *StatGraphics* [5]. El mismo posee una función de análisis, en la que el usuario le brinda una serie de datos y le propone además una distribución de probabilidades determinada, que podría representar a dichos datos. El programa analiza matemáticamente lo entregado aceptando o desechando luego la hipótesis propuesta.

En el caso analizado el programa aceptó que los datos provistos fueran correctamente representados por la función de distribución **LogNormal**, con media 23,9 V y desviación estándar 7,03 V. En la Fig. 5 se muestran la distribución de la “caída de tensión” real y la correspondiente distribución teórica, entregadas justamente por *StatGraphics*.

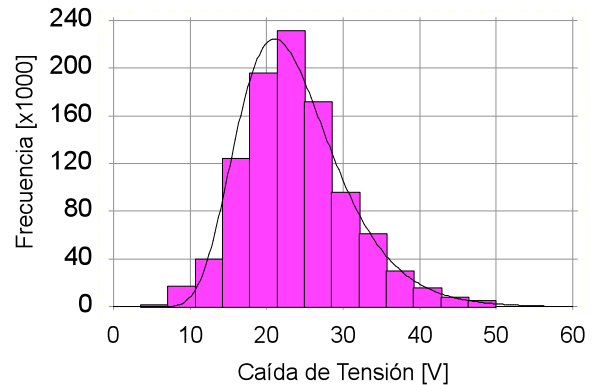


Fig. 5. Distribución de la “caída de tensión”.

Vinculación entre valores medios de tensión y las correspondientes desviaciones estándares

Es frecuente observar que para caracterizar una medición semanal particular se preste atención solamente al valor medio del Nivel de Tensión. Sin embargo, para efectuar una correcta determinación es necesario considerar además el correspondiente valor de la desviación estándar.

Es por ello que se utilizó la información de campo procurando encontrar alguna vinculación entre los valores medios y las desviaciones estándares.

Así, para cada una de las 1000 mediciones semanales, se calcularon ambos parámetros considerando a la “caída de tensión” como variable. Se obtuvo el gráfico de correlación que aparece en la Fig. 6.

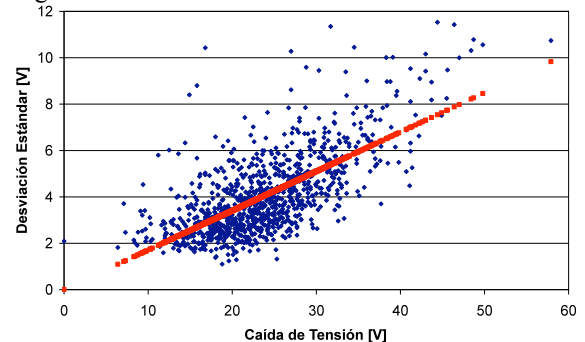


Fig. 6. Valores medios de caída de tensión vs. Desv. Est.

A simple vista se observa una importante correlación claramente ascendente entre ambos parámetros.

Esta correlación tiene su sentido físico ya que en zonas más cercanas al transformador la caída de tensión es pequeña y existe poca desviación en los valores. En cambio, en zonas alejadas al transformador, las caídas de tensión son elevadas y se produce una mayor desviación, debido a que la tensión en el punto se ve afectada por todas las variaciones aguas arriba presentes en la red.

A partir de una Planilla de Cálculo fue posible determinar la ecuación de la recta que mejor representa a la nube de puntos existente. Esta recta es $Desv. Est. = 1/6 \cdot \Delta U_{medio}$.

Como comprobación de esta estimación lineal, se verificó que al valor promedio de los valores medios semanales de la tensión (221,7 V, caída de tensión 23,9 V) le corresponde justamente la desviación estándar promedio (4 V).

Comparación entre tratamiento global y casos

Lo analizado hasta el momento ha sido efectuado desde un punto de vista netamente estadístico y a efectos de obtener la función de probabilidades.

Sin embargo, en términos de grado de cumplimiento por parte del Servicio, este tratamiento no resulta correcto. Para ello es necesario analizar independientemente cada una de las 1000 mediciones y determinar dentro de este lote qué número de casos resulta penalizado.

Este análisis fue efectuado obteniendo lo indicado en la Tabla II.

Tabla II. Trasgresión de límites agrupados por mediciones semanales. Red aérea.

Banda	Porcentaje de Med. Pen.	Causa
-8% / +8%	18 %	14 % por BT 4 % por AT

Es decir que un 18 % de las mediciones semanales resultó con calidad no apropiada. Como puede observarse, en la gran mayoría de los casos la penalidad se debió a problemas de baja tensión, lo que demuestra, una vez más, la asimetría existente en la distribución de la tensión.

Se recuerda que en el análisis llevado a cabo en el tratamiento global procesando la totalidad de períodos de 15' como un solo lote, el porcentaje de trasgresión resultó solamente 3,51 % (2,45 % por BT y 1,06 % por AT).

Con este criterio de tratamiento global, se mezclan las variables *tiempo* y *espacio* simultáneamente. Como los puntos con calidad satisfactoria "colaboran" en cierto modo con los de calidad no satisfactoria, el nivel de trasgresión general resulta sensiblemente menor. En cambio, al aplicar el criterio correcto dentro del marco regulatorio (el de ponderar las mediciones semanales), primero se utiliza la variable *tiempo* para determinar si cada medición individual es penalizada o no, y luego la variable *espacio* para cuantificar el número de mediciones penalizadas en determinado Servicio y/o zona.

Evolución de los resultados en el tiempo

Otra inquietud que surgió durante el desarrollo del presente estudio fue conocer si la distribución encontrada para las 1000 mediciones se mantendría constante al efectuar un procesamiento similar, pero separando la información en tres lotes independientes, según la fecha en la que se realizó cada medición.

Es decir, el primer lote contendrá las 333 mediciones más antiguas, el segundo las 333 posteriores y el restante las últimas 334. Los resultados obtenidos se muestran tanto en la Fig. 7, como en la Tabla III, en forma numérica.

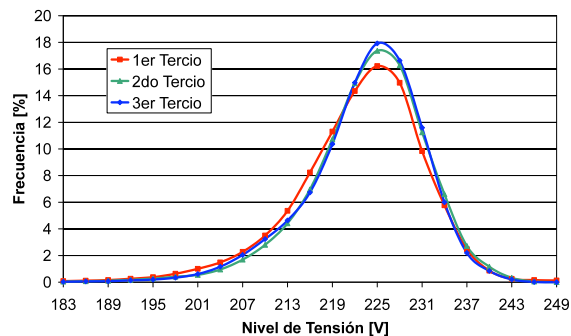


Fig. 7. Evolución de la distribución del nivel de tensión.

Tabla III. Resultados de la evolución temporal.

	1 ^{er} Tercio	2 ^{do} Tercio	3 ^{er} Tercio
Nº de Med.	333	333	334
Total de per. de 15'	220131	220618	221244
Valor Medio	221.07	222.18	221.97
DesvStd	8.85	8.15	7.82

Se observa un comportamiento similar (especialmente en lo concerniente al valor medio de cada lote), pero con una leve disminución en la desviación de los valores de tensión con el correr de los años.

Comparación de Servicios

Los resultados presentados hasta aquí corresponden a un único Servicio. Complementariamente, se efectuó un procesamiento enteramente similar para otros dos Servicios con la idea de comparar los niveles. Las tres distribuciones de probabilidad (A, B y C son los distintos Servicios) se muestran en la Fig. 8, las cuales son el resultado de procesar 1000 mediciones semanales en cada Servicio.

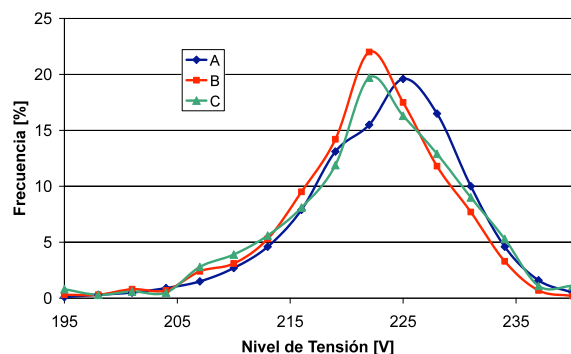


Fig. 8. Comparación de resultados en tres Servicios.

El comportamiento básicamente fue el mismo en los tres Servicios, principalmente en lo que se refiere a la asimetría descrita en los apartados anteriores y los valores de los parámetros estadísticos típicos (valor medio, desviación estándar; etc.).

Otra forma de comparar los resultados de cada Servicio es a través del “distribuidor equivalente”, lo que consta en simplemente ordenar los valores medios de las 1000 mediciones individuales en forma descendente y representarlos luego gráficamente. El término “distribuidor equivalente” se debe a que, al considerar que los puntos de la red de BT donde se realizaron las mediciones fueron elegidos al azar, podría pensarse en la conformación de un distribuidor de BT hipotético que contenga la totalidad de estos puntos separados uniformemente. El resultado de lo anterior aparece en la Fig. 9.

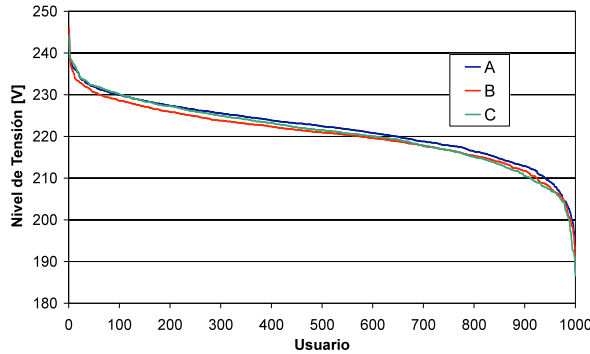


Fig. 9. Comparación de resultados en tres Servicios. Según “distribuidor equivalente”.

Nuevamente se concluye que el comportamiento del Nivel de Tensión, en términos generales, es independiente del Servicio que se analice. Esto le da un carácter más general a las conclusiones obtenidas.

Comparación según Tipo de Red

Un dato que no es menor en lo concerniente a la evaluación del grado de cumplimiento por Nivel de Tensión es que los niveles exigidos son dependientes del tipo de instalación que se trate. Simplemente observando lo presentado oportunamente en la Tabla I, se vislumbra que mientras que para redes aéreas la banda permitida es de $\pm 8\%$, para aéreas ésta es tan baja como $\pm 5\%$.

Lo anterior motivó a llevar a cabo un nuevo análisis con el fin de conocer si este requerimiento mayor en redes subterráneas tiene su efecto en los Niveles de Tensión medidos.

Para ello, en un único gráfico (Fig. 10) se representaron los resultados obtenidos en un mismo Servicio para los dos tipos de tendidos comentados. Sin embargo, las desviaciones estándares resultaron sensiblemente distintas. Naturalmente, la gráfica con menor desviación (claramente más angosta) es la del lote perteneciente a puntos con red subterránea. Esto implica que los Servicios ponen mayor empeño en brindar una Calidad del Servicio mejor en aquellos sitios en los que las exigencias son mayores.

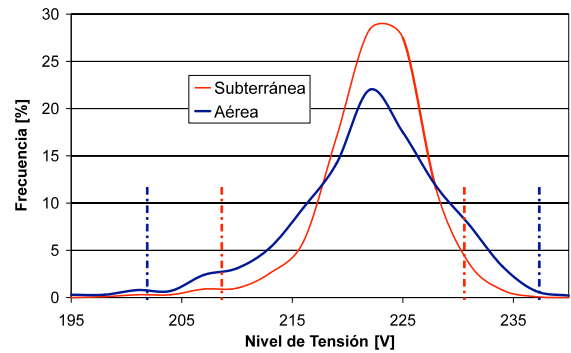


Fig. 10. Comparación de resultados en dos tipos de redes.

Este concepto puede también ser apreciado en las gráficas de “distribuidores equivalentes”, previamente descritos. Los resultados, mostrados en la Fig. 11, evidencian que el valor nominal de la tensión es alcanzado cerca de la “mitad” del distribuidor en ambos lotes. Sin embargo, la excursión presente en las redes subterráneas es sustancialmente menor.

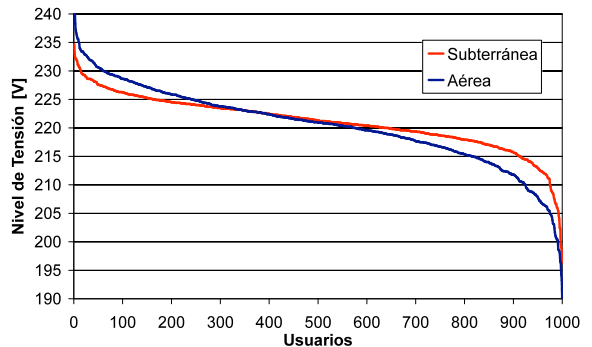


Fig. 11. Comparación de resultados en dos tipos de redes. Según “distribuidor equivalente”.

Comparación por Bandas Horarias

Un posterior análisis efectuado tiene que ver justamente con la evidente relación entre el Nivel de Tensión existente en la red y la carga tomada por los usuarios.

Resultó entonces de sumo interés obtener el comportamiento del Nivel de Tensión para tres horas netamente distintas en términos de carga: 05:00, 13:00 y 21:00, para 1000 mediciones con red de distribución aérea. Es decir, esto implicaría obtener la distribución de la tensión en función de la distancia al Centro de Transformación (variable *espacio*), empleando la variable *tiempo* como parámetro en las gráficas.

Nuevamente, el resultado obtenido tuvo estrecha vinculación con lo esperado. Las distribuciones son las que aparecen en la Fig. 12.

Las tres gráficas respetan la forma de campana asimétrica. Lo que sí es apreciablemente distinto en cada una de ellas son su valor medio y su desviación estándar. Obviamente los valores registrados a las 05:00 – con la red descargada – tienen un valor medio por encima del nominal y una escasa

dispersión. A las 13:00, por estar la red más cargada, la media cayó algunos volts y la dispersión fue mayor. Por último, cerca del pico de la demanda (21:00), el valor medio de la muestra fue aún menor y la dispersión más importante.

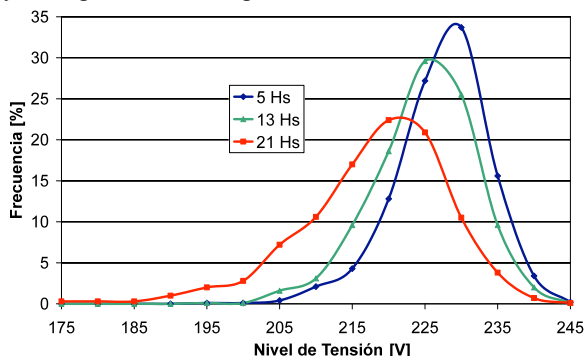


Fig. 12. Comparación de resultados según bandas horarias.

Esto confirma lo obtenido en la Fig. 6, donde se concluyó que la caída de tensión en un alimentador es directamente proporcional a la dispersión de los valores.

Comparación según Distintas Ubicaciones

El último análisis realizado es justamente el opuesto del anterior. Es decir, se verificó el comportamiento del Nivel de Tensión en función del *tiempo*, utilizando la variable *espacio* como parámetro.

Para ello se seleccionaron tres mediciones semanales realizadas en sitios ubicados en puntos del alimentador totalmente distintos. Uno próximo al CT, uno en el centro del alimentador (con $U_{med} \approx U_{nom}$) y el restante cercano al final del mismo. De esta forma, la variación del Nivel de Tensión en cada una de las tres distribuciones es debida exclusivamente a la variable *tiempo*.

Los resultados se presentan en la Fig. 13. Los comentarios en cuanto a valor medio y dispersión de cada una de las gráficas son totalmente análogos a los del caso anterior.

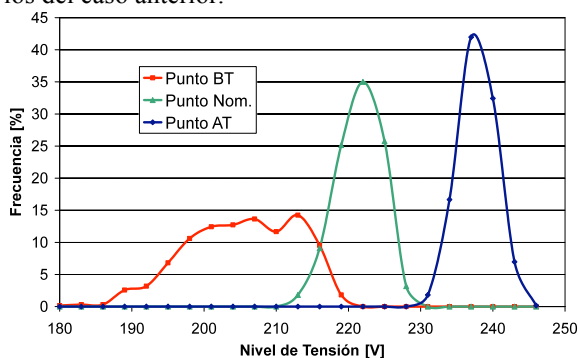


Fig. 13. Comparación de resultados en tres puntos del alimentador.

5. CONCLUSIONES

Luego de haber efectuado un detallado procesamiento estadístico de mediciones de Nivel de Tensión se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- El comportamiento del Nivel de Tensión en redes de BT no sigue la ley de distribución Normal, sino que posee una asimetría hacia los valores más bajos. La distribución de probabilidades que representa correctamente a la “caída de tensión” es la **LogNormal**.
- Se comprobó la proporcionalidad directa existente entre el valor medio de la “caída de tensión” y la desviación estándar, en distintos puntos de la red.
- El porcentaje de puntos con Nivel de Tensión no apropiado alcanzó el 18 %. La mayoría de ellos se debió a problemas por baja tensión.
- La distribución del Nivel de Tensión fue similar en tres Servicios distintos.
- No se observó un cambio sustancial de este parámetro con el correr de los años.
- En redes subterráneas la calidad del producto fue naturalmente mejor que en aéreas, tal lo planificado por los Servicios para cumplir con las mayores exigencias establecidas.
- La calidad del Nivel de Tensión resulta fuertemente dependiente de la hora del día y del punto del alimentador que se trate. Estos resultados son consistentes con los esperables en redes de MT y BT de tipologías radiales y desprovistas de mecanismos de control automático.

Se espera que algunos de estos resultados puedan ser de utilidad en un futuro para un eventual método de evaluación global – expectativas de compatibilidad con los estándares en el *espacio* y en el *tiempo* – de la prestación de los servicios de Distribución.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Anexo a la Resolución ENRE 184/00. “Base Metodológica para el Control de la Calidad del Producto Técnico. Etapa 2”.
- [2] “Power Quality in the Argentine competitive market. Five years of control experience”. P.E. Issouribehere, J. Martínez, Claudio Guidi y J. García. CIREN 1999. Nice. France. 1-4 June 1999.
- [3] “Understanding Power Quality Problems”. Math H. J. Bollen.
- [4] “Probability Concepts in Power Systems”. G. Anders.
- [5] Manugistics. StatGraphics PLUS.