

ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL SUMINISTRO ELÉCTRICO DE UNA PLANTA INDUSTRIAL

C.E. BITEZNIK*
IITREE-LAT FI-UNLP**
Argentina

M.B. BARBIERI
IITREE-LAT FI-UNLP
Argentina

M.C. BEROQUI
IITREE-LAT FI-UNLP
Argentina

J. ALBARRAZIN
YPF
Argentina

P.L. ARNERA
IITREE-LAT FI-UNLP
Argentina

RESUMEN

Se plantea una metodología para el tratamiento de registros obtenidos ante perturbaciones en el sistema eléctrico de suministro a una planta industrial. Se clasifican y agrupan los distintos eventos de acuerdo con su origen y se evalúa para cada tipo de perturbación los cortes de carga asociados. Con estos resultados es posible diagnosticar el estado de la red de alimentación – en cuanto a su confiabilidad – y evaluar el equipamiento que resulta más sensible a los huecos de tensión producidos por dichas perturbaciones. El seguimiento a lo largo del tiempo de estos registros muestra la evolución del sistema eléctrico y permite dar pautas para una planificación adecuada que contribuya a mejorar la fiabilidad y seguridad de la planta.

Palabras clave: Huecos de tensión – Calidad de Energía – Confiabilidad – Industria

1 - INTRODUCCIÓN

La calidad de la energía en el suministro eléctrico resulta un elemento relevante en la operación de refinerías e industrias petroquímicas. Los micro-cortes y las caídas de tensión afectan a las plantas industriales de forma mucho más significativa que a otros tipos de demandas, tales como cargas residenciales o comerciales. En este tipo de instalaciones industriales, los riesgos asociados a estos fenómenos afectan la seguridad de las personas, producen fuerte impacto ambiental y cuantiosas pérdidas económicas.

Actualmente, las instalaciones eléctricas de las plantas cuentan con registradores de magnitudes eléctricas asociados a las nuevas protecciones digitales y/o a equipos diseñados específicamente para ese fin, los

cuales almacenan, en ocasiones de perturbaciones, las tensiones y/o corrientes en distintos puntos de la red. El análisis de estos registros tiene un valor importante pues evidencian posibles problemas en las redes eléctricas ya sean internas o externas a la planta.

Se presenta a continuación un análisis de las fallas ocurridas en la red interna y externa de un complejo industrial de refinado de gran demanda de potencia. El análisis se enfoca principalmente en los eventos externos, es decir en la red de la distribuidora o nodos del resto del Sistema de Interconexión Argentino (SADI), pues estos son uno de los parámetros determinantes de la calidad del suministro eléctrico. Para realizar este trabajo se cuenta con registros oscilográficos e informes de eventos ocurridos en el período Enero de 2006 a Septiembre de 2007.

2 - ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

2.1 - Datos de la instalación

La red eléctrica de la planta se alimenta a través de una subestación 132/33 kV (S.E.) localizada en el mismo predio industrial. Esta S.E. se conecta a los nodos de 132 kV de la Distribuidora, a través de una línea aérea de 34 km de longitud, y una línea (cable + línea aérea) de 1.1 km. El sistema de alta tensión, además de abastecer a las cargas industriales del polo petroquímico, comparte el suministro con las subestaciones pertenecientes a la distribución residencial de la ciudad aledaña.

A la S.E. también se conecta un generador a través de su transformador de máquina.

* Calle 48 y 116 La Plata, Bs. As., Argentina. CP B1900AMF – E-mail: cebiteznik@iitree-unlp.org.ar

** Instituto de Investigaciones Tecnológicas para Redes y Equipos Eléctricos – Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de La Plata.

El transformador es de 155 MVA - 132/11.5 kV, conectado rígidamente a tierra del lado 132 kV. El generador es de valores nominales 155 MVA, 11.5 kV y factor de potencia 0.85. La máxima potencia activa que puede erogarse la Central es del orden de 130 MW.

La S.E. posee dos transformadores de tres arrollamientos (TR1 y TR2), de 63/63/21 MVA (ONAF) con relación 132/35/13.8 kV con regulación automática bajo carga del lado de 132 kV.

La conexión de los arrollamientos de los transformadores es estrella/estrella/triángulo. El neutro de los arrollamientos de 132 kV se conecta rígidamente a tierra. En los arrollamientos de 35 kV el neutro se conecta a tierra a través de una resistencia limitadora de 19 ohms. Los arrollamientos de 13.8 kV de los transformadores, conectados en triángulo, tienen por objeto desvincular la red de secuencia homopolar del sistema de 132 kV de la red de secuencia homopolar del sistema de 33 kV. La Fig. 1 muestra el esquema general de la S.E.

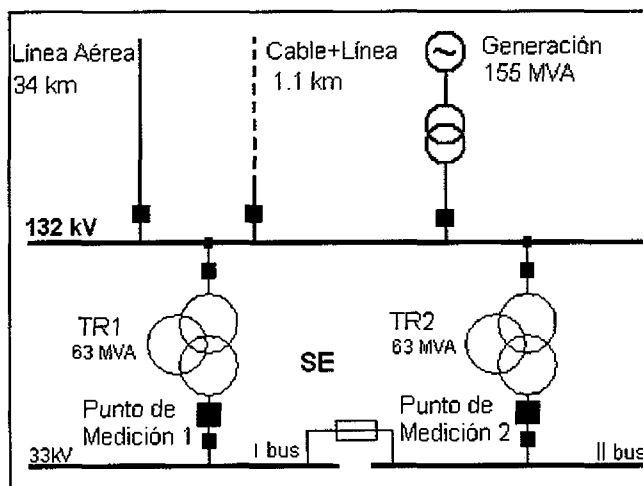


Fig.1: Esquema general de la S.E. y ubicación de los puntos de medición

En ambos transformadores de la S.E. se encuentran instalados puntos de medición que toman lectura tanto de las tensiones como de las corrientes en cada una de las fases, del lado de conexión a la barra de 33 kV, siendo esta información registrada y almacenada en dispositivos diseñados para ese fin (ver Fig. 1).

El registrador oscilográfico de transitorios y perturbaciones, es una herramienta muy versátil ya que posibilita la detección de situaciones anómalas que determinan el disparo de la grabación y almacenamiento de los datos previos a la ocurrencia de las fallas gracias a su pre-trigger.

Este equipo que en el nivel de 33 kV, registra tensiones y corrientes, posee un software que realiza un análisis detallado de los registros permitiendo obtener componentes de secuencia, valores eficaces, diagrama fasorial, etc.

2.2 - Análisis de los registros

Con la información disponible se procede a analizar los datos registrados de los eventos correspondientes al período 2006 hasta Septiembre de 2007. De la totalidad de eventos registrados se tomaron aquellos que produjeron variaciones en el valor eficaz de la tensión suficientes para ser consideradas caídas de tensión (según la clasificación de las Ref. [1] y [2]), ya que el registrador guarda todo tipo de evento como por ejemplo variaciones de frecuencia, registro de diferentes alarmas, etc.

Además de la información de los registros oscilográficos, el personal de la planta industrial confecciona un reporte por cada falla ocurrida que provoque corte de carga dentro del complejo. En estos reportes se especifica fundamentalmente el origen de la falla, discriminando si la misma se originó en la red interna del complejo o en la red externa de alta y media tensión.

De la totalidad de los registros durante 21 meses, treinta (30) correspondieron a caídas de tensión. La TABLA I muestra estos eventos y sus principales características:

a) Duración de la falla: la misma es estimada a partir de los registros, como el tiempo durante el cual la tensión permanece por debajo del 90% de su valor nominal.

b) Tensión mínima: se considera el valor eficaz de la tensión de fase que sufre mayor caída de tensión durante el evento.

c) Potencia perdida: potencia activa resultante de la diferencia entre la potencia que fluye hacia la barra de 33 kV registrada por el equipo de medición en cada uno de los transformadores (TR1 y TR2) en el instante inicial, previo al evento y el instante final del registro.

d) Ubicación: extraída de informes internos de la planta industrial.

En el evento del 18/09/2007 no se computó la carga perdida por problemas en el registro de la corriente.

* Calle 48 y 116 La Plata, Bs. As., Argentina. CP B1900AMF – E-mail: cebiteznik@iitree-unlp.org.ar

** Instituto de Investigaciones Tecnológicas para Redes y Equipos Eléctricos – Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de La Plata.

TABLA I - EVENTOS SELECCIONADOS PARA EL ANÁLISIS

Fecha	Hora	Duración (ms)	Tensión Mínima (kV)	Tensión mínima (pu)	Fase de mayor caída	MW perdidos	Ubicación
22/01/2006	08:46:43	115	10,56	0,55	R	3,20	Externo
28/01/2006	13:04:54	115	5,44	0,29	S	5,40	Externo
15/02/2006	23:11:08	75	16,22	0,85	T	0,00	Externo
07/03/2006	11:03:46	75	5,43	0,29	T	4,00	Externo
01/04/2006	07:00:32	90	13,20	0,69	S	8,13	Interno
05/06/2006	16:36:48	1485	14,05	0,74	R,S,T	3,50	Externo
18/06/2006	16:30:17	155	8,17	0,43	T	6,00	Externo
10/07/2006	14:29:11	400	6,66	0,35	T	10,50	Externo
02/08/2006	04:06:11	100	15,04	0,79	R	2,60	Interno
02/08/2006	11:43:49	180	15,17	0,80	S	16,80	Interno
24/09/2006	07:38:48	100	15,76	0,83	T	0,80	Externo
30/09/2006	03:49:23	75	12,21	0,64	T	4,00	Externo
30/09/2006	03:59:57	660	11,33	0,59	T	7,40	Externo
14/10/2006	06:19:39	150	6,87	0,36	R	8,50	Externo
30/10/2006	09:19:06	120	14,06	0,74	T	2,60	Externo
18/11/2006	05:32:31	75	13,79	0,72	S	6,20	Interno
24/11/2006	16:08:01	175	12,42	0,65	R	8,00	Interno
17/12/2006	04:11:54	170	5,01	0,26	S	7,80	Externo
17/12/2006	06:37:34	120	6,91	0,36	T	9,60	Externo
10/01/2007	04:59:16	125	6,1	0,32	R	7,80	Externo
10/01/2007	05:25:35	85	7,88	0,41	R	4,80	Externo
01/02/2007	06:00:06	150	9,66	0,51	R	7,80	Externo
23/02/2007	19:08:23	360	13,89	0,73	S	8,40	Interno
04/05/2007	04:27:25	120	14,23	0,75	R	3,00	Externo
04/05/2007	04:33:01	260	5,88	0,31	R	9,00	Externo
04/05/2007	04:35:42	100	14,62	0,77	R	0,80	Externo
04/05/2007	04:36:11	100	14,79	0,78	R	1,00	Externo
20/06/2007	15:19:06	75	14,80	0,78	T	0,00	Externo
25/08/2007	10:24:37	100	8,91	0,47	T	1,20	Interno
18/09/2007	08:46:18	150	7,14	0,375	T	no calc.	Externo

La Fig. 2 muestra un ejemplo de un registro de la falla ocurrida el 18/09/2007. Se presentan las formas de onda de la tensión en las tres fases y su valor eficaz. En el eje de abscisas se indica la variable tiempo. Este no comienza en cero pues el registrador recupera la información almacenada instantes antes del momento en que se detectó la situación anómala. Se observan una línea vertical con trazo a tramos y dos líneas verticales con trazo continuo.

La primera marca el instante de disparo del registro, mientras que las dos últimas marcan los puntos de lectura del cursor sobre los que se leen los valores absolutos volcados en el eje de ordenadas. Sobre la escala izquierda del eje de ordenadas y para cada curva se indica en primer término el nombre de la variable, luego el valor de la variable leída en el instante en que se ubica el primer cursor (trazo continuo), luego lo mismo pero para el instante donde se ubica el segundo cursor (trazo continuo), y luego la diferencia de estos dos valores. Por último las unidades de la variable. Sobre la escala derecha del eje de ordenadas y para las curvas de valor eficaz se indica en primer término el máximo valor que toma la variable dentro del intervalo de tiempo registrado, luego el

mínimo, ambos en las unidades correspondientes. Por último en la parte superior del gráfico se indica con T1 el valor del instante de tiempo correspondiente a la ubicación del primer cursor (trazo continuo), luego con T2 lo mismo pero para el instante donde se ubica el segundo cursor (trazo continuo), y luego con TD la diferencia de estos dos valores.

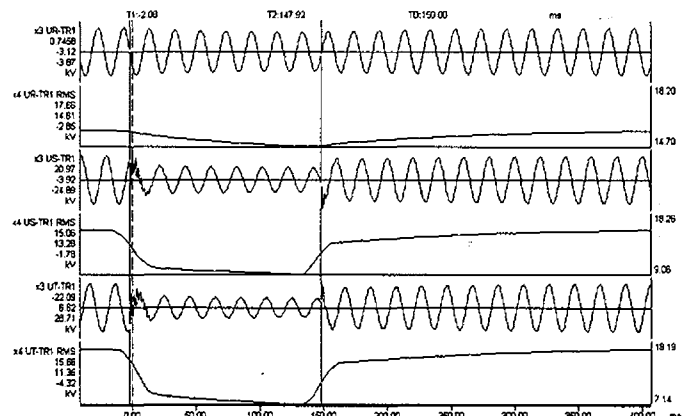


Fig.2. Registro osciloscópico de una falla ocurrida el 18/09/2007 en una línea de 132 kV

2.2 - Análisis de las fallas externas

En la TABLA II se muestra un resumen de las fallas externas a la empresa y de las cuales se disponía de registros de tensiones y/o corrientes en 33 kV.

A cada una de estas fallas se les realiza el análisis de componente de secuencia en la tensión de 33 kV, calculando la tensión de secuencia positiva U_+ , la de secuencia negativa U_- y la de secuencia cero U_0 y la evolución temporal de la misma.

Las fallas se han agrupado como: monofásicas (1f), bifásicas (2f) y trifásicas (3f). Las fallas donde sólo cambia la tensión U_+ y no aparece U_- y U_0 son consideradas trifásicas; las fallas donde aparece U_+ y U_- y no aparece U_0 son consideradas bifásicas (en principio sin contacto a tierra).

y las fallas donde aparece U_+ , U_- y U_0 son consideradas monofásicas (1f).

En la TABLA II, además de mostrarse los valores de secuencia y tipo de falla, se presenta el tiempo de duración, la tensión mínima de fase y la potencia cortada en cada evento.

La Fig. 3 corresponde al análisis de las componentes de secuencia, efectuado por el software del equipo, para el registro de la falla del 18/09/2007. Los tres primeros canales muestran la forma de onda de la tensión de las tres fases y los últimos el valor de la tensión eficaz de secuencia positiva, negativa y cero respectivamente. Se ve claramente que hay una caída en la componente de secuencia directa y un crecimiento en la secuencia negativa pero la secuencia cero permanece inalterada, esto da la indicación de que se trata de una falla bifásica sin contacto a tierra.

**TABLA II - EVENTOS OCURRIDOS EN LA RED
PERTENECIENTE A LA DISTRIBUIDORA**

Fecha	Hora	Tensión mínima [p.u.]	Tiempo de falla [ms]	U_+ [p.u.]	U_- [p.u.]	U_0 [p.u.]	Tipo de falla	Potencia cortada [MW]
22/01/2006	08:46:43	0,55	115	0,76	0,17	0,02	1f	3,20
28/01/2006	13:04:54	0,29	115	0,70	0,26	0,06	1f	5,40
07/03/2006	11:03:46	0,29	75	0,65	0,20	0,04	1f	4,00
14/10/2006	06:19:39	0,36	150	0,67	0,24	0,02	1f	8,50
17/12/2006	04:11:54	0,26	170	0,67	0,16	0,04	1f	7,80
10/01/2007	04:59:16	0,32	125	0,64	0,26	0,03	1f	7,80
10/01/2007	05:25:35	0,41	85	0,70	0,20	0,03	1f	4,80
01/02/2007	06:00:06	0,51	150	0,74	0,18	0,01	1f	7,80
04/05/2007	04:33:01	0,31	260	0,67	0,26	0,01	1f	9,00
18/06/2006	16:30:17	0,43	155	0,80	0,31	0,00	2f	6,00
24/09/2006	07:38:48	0,83	100	0,83	0,02	0,00	2f	0,80
10/07/2006	14:29:11	0,35	400	0,70	0,30	0,00	2f	10,48
30/09/2006	03:49:23	0,64	75	0,80	0,14	0,00	2f	4,00
30/09/2006	03:59:57	0,59	660	0,70	0,14	0,00	2f	7,40
17/12/2006	06:37:34	0,36	120	0,48	0,29	0,00	2f	9,60
04/05/2007	04:27:25	0,75	120	0,80	0,03	0,00	2f	3,00
04/05/2007	04:35:42	0,77	100	0,86	0,09	0,00	2f	0,80
04/05/2007	04:36:11	0,78	100	0,86	0,10	0,00	2f	1,00
20/06/2007	15:19:06	0,78	75	0,85	0,08	0,00	2f	0,00
18/09/2007	08:46:18	0,37	150	0,60	0,29	0,00	2f	-
15/02/2006	23:11:08	0,85	75	0,85	0,00	0,00	3f	0,00
05/06/2006	16:36:48	0,74	1485	0,74	0,00	0,00	3f	3,50
30/10/2006	09:19:06	0,74	120	0,74	0,00	0,00	3f	2,60

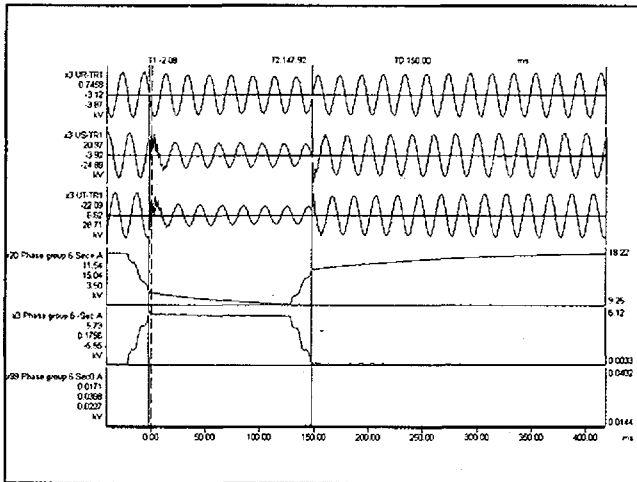


Fig.3. Componentes de secuencia de la tensión. Falla 18/09/2007

Para corroborar el criterio de clasificación del Tipo de falla, se realizan simulaciones de fallas francas (sin impedancia), en un modelo matemático en el que se encuentra caracterizada la dinámica de la red a la que se encuentra vinculada la planta. Las fallas son monofásicas (1f), bifásicas sin contacto a tierra (2fSCT), bifásicas con contacto a tierra (2fCCT) y trifásicas (3f), eligiéndose la barra de 132 kV de S.E. que interconecta la distribuidora con el sistema troncal de transporte en alta tensión y se analiza el valor de tensión en la barra de 132 kV y 33 kV del complejo industrial, indicados en la TABLA III.

TABLA III. EFECTO DE LAS FALLAS EN BARRA TESTIGO SOBRE LA SUBESTACIÓN DEL COMPLEJO INDUSTRIAL

Barra	Tipo de Falla	U+ [p.u.]	U- [p.u.]	Uo [p.u.]
132 kV	Monofásica (1f)	0.608	0.387	0.09
33 kV		0.625	0.339	0.031
132 kV	Bifásica sin contacto a tierra (2fSCT)	0.52	0.47	0
33 kV		0.55	0.41	0
132 kV	Bifásica con contacto a tierra (2fCCT)	0.27	0.22	0.012
33 kV		0.33	0.192	0.04
132 kV	Trifásica (3f)	0.0513	0	0
33 kV		0.14	0	0

Se observa en la TABLA II que las fallas en la red de la distribuidora presentan valores de secuencia con tendencias similares a los indicados en la TABLA III.

En el período de análisis se detectaron:

- Nueve (9) fallas monofásicas con tiempos de duración de 75 hasta 260 ms y potencias cortadas entre 3,2 MW y 9 MW.
- Once (11) fallas bifásicas con tiempos de duración de 75 hasta 660 ms y potencias cortadas entre 0 y 10,5 MW.
- Tres (3) fallas trifásicas lejanas con tensiones mínimas de secuencia directa de alrededor de 0.8 p.u. en 33 kV y tiempos de duración de 75 ms hasta aproximadamente 1,5 s y potencias cortadas entre 0 y 3,5 MW.

3- ANALISIS DE RESULTADOS

3.1 - Fallas en la red externa

Dado que uno de los objetivos planteados, corresponde a diagnosticar el estado de la red de alimentación en cuanto a su confiabilidad, se analiza exclusivamente el impacto de las fallas originadas en la red de alimentación. En el período de análisis, de un total de treinta (30) eventos analizados, veintitrés (23) resultaron ser fallas externas al complejo industrial, de las cuales nueve (9) correspondieron a fallas monofásicas, once (11) fallas bifásicas y tres (3) fallas trifásicas, correspondiendo a distribuciones porcentuales de 39%, 48% y 13 %, respectivamente.

Los resultados del análisis de los datos indican que en la red externa las fallas más comunes son las monofásica y bifásicas, que representan aproximadamente el 87% de los casos. Esto es algo esperable ya que generalmente las fallas son monofásicas derivando posteriormente a bifásicas, pero es poco probable que la misma logre convertirse en trifásica por la actuación de las protecciones previamente a que esto ocurra.

3.1 - Impacto en la planta ante fallas en la red externa

Una forma común de presentar los resultados, cuando se desea analizar las caídas de tensión, es expresando la frecuencia de caídas y su histograma correspondiente. Para ello se expresan, referidos a un año, los resultados del período de análisis, señalando los números de caídas según su severidad y su duración. El histograma es una herramienta muy práctica para la interpretación de los resultados. En la TABLA IV se presenta la frecuencia de caídas de tensión producidas por fallas externas en valores anuales. Se consideran los valores mínimos de tensión de fase en cada caso, no los de secuencia.

TABLA IV. FRECUENCIA DE CAIDAS (veces por año)

Magnitud	0-200 ms	200-400 ms	400-600 ms	600-800 ms	>800 ms
80-90%	1,142	0	0	0	0
70-80%	2,857	0	0	0	0,571
60-70%	0,571	0	0	0	0
50-60%	1,142	0	0	0,571	0
40-50%	1,142	0	0	0	0
30-40%	2,286	0,571	0,571	0	0
20-30%	1,713	0	0	0	0
10-20%	0	0	0	0	0
0-10%	0	0	0	0	0

Se puede ver que la mayor parte de las caídas poseen tiempos menores a los 200 ms. Esta característica es de esperar para el tipo de fallas analizadas, ya que se trata en su mayoría de eventos en la red de Alta Tensión perteneciente a la empresa prestadora del servicio eléctrico y estos tiempos están asociados a la operación en primera zona de las protecciones de impedancia de las líneas aéreas y cables subterráneos en este nivel de tensión.

En la Fig. 4 se presenta el histograma de frecuencias de caídas de tensión presentada en la TABLA IV.

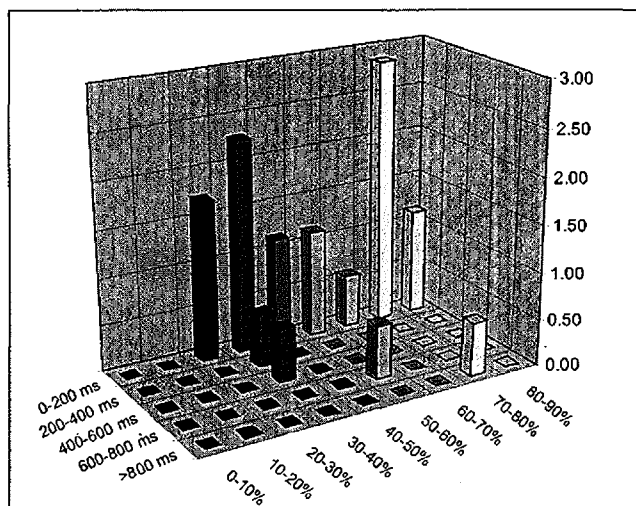


Fig.4. Histograma de frecuencias de caídas

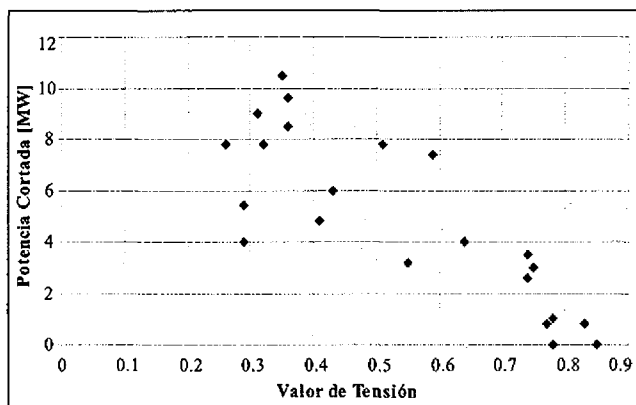


Fig. 5: Potencia cortada en función del valor de la tensión en el complejo.

El impacto que ocasionan las caídas de tensión dentro del complejo industrial es la pérdida de carga y consecuentemente el perjuicio en el proceso de producción. En la Fig. 5 se muestra un diagrama de dispersión de la potencia cortada en función del valor de la tensión dentro del complejo industrial debido a fallas externas. Es de notar que las mayores pérdidas se producen cuando la tensión cae por debajo del 75% de su valor nominal, rondando los valores de dichos cortes entre 3 y 10 MW sobre un valor promedio de demanda del complejo de alrededor de 42 MW. Para un mismo valor de tensión varía mucho el módulo de potencia que sale de servicio dependiendo del tiempo de duración de la caída de tensión.

4 - POSIBLES MEDIDAS DE MITIGACION

El hecho que el 83% de las fallas externas, posean caídas de tensión con tiempo de duración menor a 200 ms, se debe a que las fallas son despejadas en primera zona por las protecciones de impedancia del sistema de distribución en 132 kV del área, por lo tanto no resulta posible minimizar estos tiempos de operación para mitigar su efecto en las caídas de tensión.

Por otra parte, el control de tensión por parte del generador conectado en barras de la subestación no es efectivo para mejorar esta situación debido a que el tiempo de respuesta de su regulador de tensión es superior a los 500 ms. A su vez, la excitación se alimenta de bornes del generador, por lo tanto ante una falla cercana a la subestación del complejo, la capacidad de entregar potencia reactiva y recuperar la tensión de 132 kV disminuye.

Para evitar o disminuir el impacto de estas fallas sobre la red interna del complejo, sólo existe la posibilidad de tomar medidas en cuanto a la inmunización de los equipos sensibles a este problema. Una de estas medidas podría ser reemplazar los comandos de los contactores de los motores por alimentación independiente, o disponer de aparatos de maniobra que queden retenidos ante huecos de tensión.

Fallas en el sistema externo más severas que las registradas en el período de análisis, producen la salida del generador conectado en el nodo de 132 kV (por inestabilidad o actuación de sus protecciones). Para evitar esta situación se dispone de un sistema de formación de Isla eléctrica de la planta y el generador. En este sentido es importante disponer de un sistema de deslastre de carga que permita mantener sólo la carga prioritaria ante el pasaje a Isla para evitar el colapso de la planta.

5 - CONCLUSIONES

La utilización de equipos con capacidad de registrar eventos, junto con el análisis de dichos registros, permite evidenciar las posibles causas de indisponibilidades existentes en la red eléctrica y el impacto de las mismas en la calidad del suministro.

Se ha determinado que para minimizar los efectos sobre los equipos sensibles a las caídas de tensión, las medidas de mitigación a adoptarse deben ser implementadas mediante modificaciones internas de la planta.

De realizarse dichas modificaciones, el seguimiento a lo largo del tiempo de los registros, evidenciará la efectividad de las medidas adoptadas, permitiendo realizar una planificación adecuada que contribuya a mejorar la fiabilidad y seguridad de la planta.

[1] IEC. "Electromagnetic Compatibility (EMC). Part 2: Environment. Section 1: Description of the environment. Electromagnetic environment for low-frequency conducted disturbances and in public power supply systems" IEC 61000-2-1. Technical Report (1990).

[2] IEEE. "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality". IEEE Std. 1159-1995.