

**ANÁLISIS DE DISTRIBUCIÓN DE LA COMPENSACIÓN EN UNA RED ELÉCTRICA  
CON CARGAS NO-LINEALES**

**Ing. Fabián Corasaniti (\*)**

**Ing. Omar Grosso - Ing. Alfredo Rifaldi**

IITREE-LAT(\*\*) - Universidad Nacional de La Plata

Tecpetrol - Techint S.A.

**RESUMEN**

Aplicados a la red de distribución eléctrica de un yacimiento petrolífero se desarrollaron estudios para analizar las modificaciones y planificación futura.

Se modelaron redes actual y futura (propuesta) y se desarrollaron estudios de flujos de carga que mostraron necesidad de corregir el factor de potencia.

Se propusieron diferentes alternativas de distribución de la compensación para lograr también mejor regulación de las tensiones, y otros efectos.

Al instalar capacitores en la red aparecen fenómenos de resonancia, se realizaron estudios de barrido en frecuencia, flujos de armónicas y verificación de distorsiones.

El trabajo se completa con una evaluación económica de las alternativas estimando costos de energía, penalizaciones, y costos de equipamientos.

Palabras claves: compensación, armónicas, resonancias, distorsiones, filtros.

**1.0 INTRODUCCIÓN**

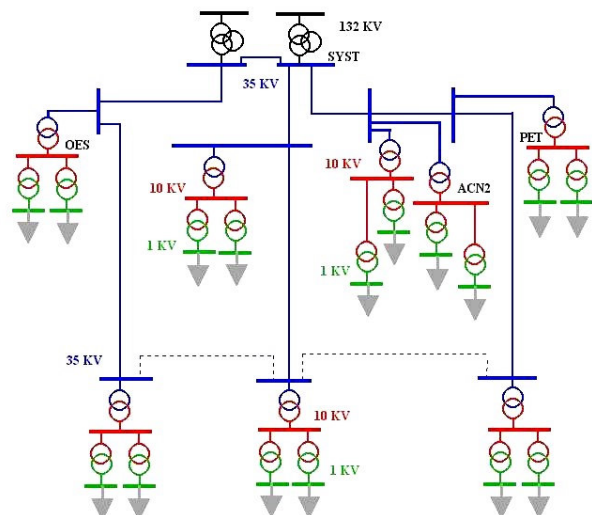
En la Figura 1 se presenta el esquema simplificado de la red futura del yacimiento.

La red tiene niveles de **tensión de distribución de 35 kV, 10,4 kV**. Los niveles de **tensión en los consumos** son en la **mayoría** de los casos de **1 kV**, aunque existen también **algunos en 2,3 kV y 0,38 kV**.

Las cargas de la red son equipos individuales de bombeo de petróleo AIB y se están instalando bombas electrosumergibles BES. Actualmente la carga es 70% AIB, en el futuro se puede llegar a 70% de BES .

Las bombas electrosumergibles BES poseen equipamiento de control a través de variadores de frecuencia alimentados por rectificadores, con características de carga no-lineal y establecen la circulación de corrientes armónicas. Para evaluar el estado actual se hicieron mediciones en diferentes

puntos de la red determinando las armónicas presentes.



*Figura 1.- Esquema de la red del yacimiento*

El esquema de alimentación de las bombas electrosumergibles BES es a través de transformadores de 10,4/0,4 kV a los cuales se conecta el equipamiento variador de frecuencia y luego un transformador 0,38/2,1-4,6 kV que alimenta a través de un cable el motor de la bomba.

El objetivo del trabajo es orientar con adecuada flexibilidad la solución futura más conveniente para la red.

**2.0 METODOLOGÍA**

Se realizó el estudio de la configuración de la Figura 1, correspondiente a operación normal de funcionamiento de la red. Así la red presenta un desarrollo radial, obsérvense los vínculos abiertos entre dos subestaciones de 35/10 kV.

(\*\*) Instituto de Investigaciones Tecnológicas para Redes y Equipos Eléctricos (IITREE-LAT)

### 2.1. Análisis a frecuencia industrial

La primera etapa del trabajo fue el modelado de la red de distribución eléctrica en el programa PSSE (Power System Simulator de PTI).

El flujo de carga básico se realizó sin ningún tipo de compensación con el fin de analizar el valor del factor de potencia en el punto de suministro. De los resultados se observó la necesidad de compensación de reactivo para respetar los valores establecidos.

Se propusieron diferentes alternativas de compensación.

- (a) Concentrada en el punto de suministro en 35 kV.
- (b) Concentrada en la red interna en MT (10 kV).
- (c) Distribuida en la red interna en MT (10 kV).
- (d) Distribuida en la red interna en BT (1 kV).

La concentración de la compensación de la alternativa (a) cumple solo con el objetivo de mejorar el factor de potencia en el punto de suministro.

Las compensaciones llevadas más cerca de las cargas planteadas en las alternativas (b) y (c), evitan la circulación del reactivo por la red de distribución interna, se disminuyen las pérdidas y mejora el funcionamiento de la red.

La compensación directa en los motores propuesta en alternativa (d) está restringida por los valores de potencia y velocidad de los mismos [1], llegándose a una compensación insuficiente vista en el punto de conexión al sistema.

Se desarrollaron entonces casos de flujos de carga con las diferentes alternativas de distribución de la compensación.

En estos se observó el factor de potencia en el punto de suministro, el funcionamiento de la red en los diferentes niveles de tensión (perfiles de tensión), pérdidas activas y reactivas en la red y aumento de capacidad de transporte.

### 2.2. Análisis a frecuencias armónicas

Dadas las características no lineales de las cargas existentes en la red, y el aumento previsto se debe verificar frente a la compensación la variación en la respuesta en frecuencia de la red y las distorsiones. Se observa el resultado de distribuir bancos de capacitores y lo que se obtiene con filtros.

La red fue modelada en el programa de transitorios electromagnéticos ATP (*Alternative Transient Program - by Can/Am user group*), con el fin de realizar estudios de barrido en frecuencia y flujos de armónicas.

Las futuras cargas mayores (y perturbadoras) se concentran en las áreas de mayor rendimiento.

La simulación consiste en realizar los barridos en frecuencia en puntos de la red donde se instalarán los equipamientos generadores de armónicas, teniendo en cuenta en cada uno de los puntos las diferentes alternativas de compensación.

Se observaron las resonancias y distorsiones en las formas de onda de tensión y corriente que aparecieron en la respuesta en frecuencia de la red para las

diferentes alternativas, poniendo principal atención en las resonancias cercanas a las frecuencias de las corrientes generadas por las fuentes perturbadoras.

**De los resultados obtenidos de análisis a frecuencia industrial y a frecuencias armónicas se definió la alternativa de distribución de la compensación más conveniente y la instalación de bancos de capacitores o filtros.**

### 2.3. Análisis y Resultados a frecuencia industrial

Se desarrollaron varios casos de flujos de carga, y en la Tabla I, presentada en el resumen, se muestran los resultados obtenidos:

#### Caso sc

Caso inicial sin ninguna compensación en la red, se determina el factor de potencia en el punto de suministro y la necesidad de compensación.

El organismo de control fija un valor mínimo aceptable de  $\cos \phi = 0,95$  para los valores de demanda pico y resto, siendo el valor actual del yacimiento 0,77. Se presenta entonces la necesidad de compensación. La fórmula para determinar la compensación necesaria es:

$$Q_f = P \cdot \left\{ \operatorname{tg} \left[ \cos^{-1}(\phi_i) \right] - \operatorname{tg} \left[ \cos^{-1}(\phi_f) \right] \right\} \quad (1)$$

donde

$P$ : potencia activa que surge del flujo de cargas (17,19 MW)

$\phi_i$ : factor de potencia inicial o sin compensación (0,77)

$\phi_f$ : factor de potencia final o requerido (0,95)

$Q_f$ : potencia reactiva de compensación (MVar).

En el caso surge  $Q_f \cong 8,6$  MVar. Se plantea entonces instalar 8 MVar.

#### Caso c35

Caso (a) donde se instalan los 8 MVar concentrados en el punto de conexión al sistema en 35 kV como se muestra en la Figura 2.

#### Caso c10

Los 8 MVar se instalan en dos puntos próximos donde se produce la mayor concentración de demanda de la red de 10kV, caso (b), como se muestra en la Figura 3.

#### Caso d10:

Los 8 MVar distribuidos en la red de 10 kV, como se muestra en la Figura 4, caso (c). Se fijaron módulos de 2 MVar y de 1 MVar. Dos módulos de 2 MVar y dos de 1 MVar instalados en la zona de mayor concentración de demanda y los restantes de 1 MVar se repartieron en forma simétrica con el desarrollo de la red.

#### Caso d1:

La compensación distribuida en 1 kV (BT - en bornes de los motores), caso (d). El valor de compensación en bornes de los motores está limitada por potencia y velocidad de los mismos [1].

La norma NEMA MG-1 limita la compensación y establece un valor  $\cos \phi = 0.95$  a plena carga.

De esto surge un valor de compensación total 4 MVar, que no alcanza el objetivo de 8 MVar.

El estudio de este caso se hizo sobre la red que muestra la Figura 5.

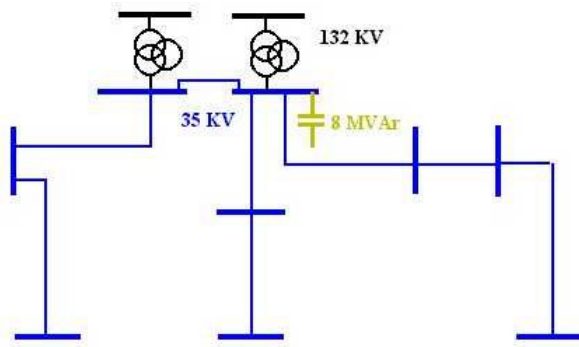


Figura 2.- Compensación concentrada en 35 kV

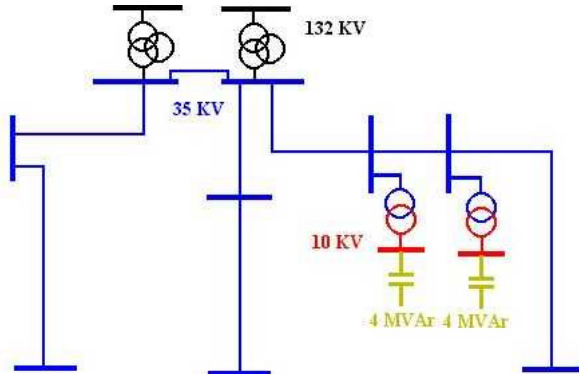


Figura 3.- Compensación concentrada en 10 kV

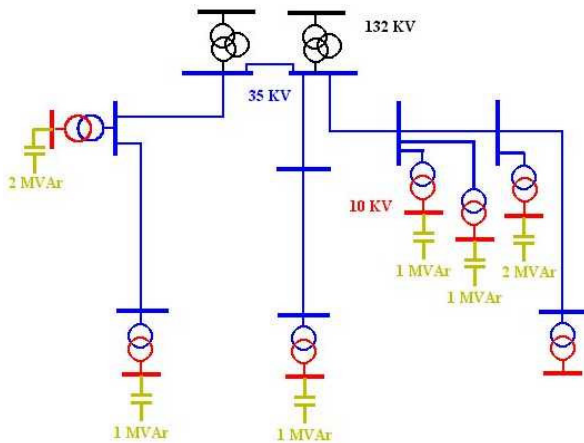


Figura 4.- Compensación distribuida en 10 kV

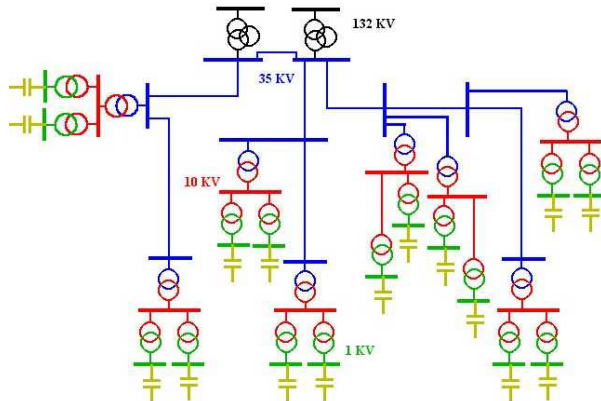


Figura 5.- Compensación distribuida en 1 kV

2.4. Resumen de los casos analizados a frecuencia industrial

La Tabla I, presenta el resumen de los resultados obtenidos en las alternativas analizadas.

Tabla I.- Resumen de los flujos de carga

Caso de compensación	sc	c35	c10	d10	d1	
Distribución	ninguna	concentrada		distribuida		
Compensación	U (kV)	-----	35	10	10	1
	Potencia (MVar)	0	8	8	8	4
Cargas	cosQ	0.85	0.85	0.85	0.85	0.95
Pérdidas en la red	Activas (kW)	542.5	477.3	667	430	422
	Reactivas (kVar)	5108.4	3700	3995	3470	3860
Tensiones	$\Delta U$ (%)	+3 / -5	+/-3	+/-5	+/-3	+5 / -3
Transformador de conexión	Carga (%)	122	96.5	98.5	96	105
Punto de suministro	P (MW)	17.19	17.12	17.31	17.08	17.07
	Q (MVar)	14.16	4.57	5.19	4.19	8.84
	cosQ	0.772	0.966	0.958	0.971	0.888

En los casos donde se excede el valor de  $\cos \phi$  de 0.95 se tiene un margen para permanecer dentro de los límites establecidos por los reglamentos con variación de valores de carga. Además con un solo transformador en el sistema se logra que funcione con más margen de la potencia ONAF (ventilación forzada).

Observando la mejora del factor de potencia en el punto de suministro, se cumple para los casos de compensación concentrada en 35 y 10 kV y distribuida en 10 kV.

Entre estas alternativas la que establece mejor condición de funcionamiento de la red interna (perfiles de tensión), mínimas pérdidas con el consecuente ahorro de energía y margen de capacidad en los transformadores y líneas, es la correspondiente compensación distribuida en 10 kV.

La compensación distribuida en 1 kV, requiere también compensación en media tensión (10 kV) para lograr el factor de potencia no objetable en el punto de suministro.

2.5. Análisis y resultados a frecuencias armónicas

El paso siguiente es estudiar el comportamiento de las alternativas a frecuencias armónicas.

2.5.1. Barrido en frecuencia

Para cada una de las cuatro alternativas de compensación, se realizaron barridos en frecuencia en tres puntos de la red "ACN2", "PET", "OES" y el punto de conexión denominado "SYST" (ver Figura 1), y también para el caso sin compensación tomado como referencia. Se desarrollaron en total 20 casos.

Caso acn2

La Figura 6 muestra el resultado para el punto denominado "ACN2". Del gráfico se deduce que las alternativas de compensación concentrada en 35 kV, distribuida en 10 kV y 1 kV, producen picos de resonancias próximos a las frecuencias inyectadas por los equipos de carga. Obsérvense las frecuencias de

250 Hz (5<sup>ta</sup> armónica ), 350 Hz (7<sup>ma</sup> armónica) y 550 Hz (11<sup>ra</sup> armónica).

En cambio la compensación concentrada en 10 kV (línea celeste) no produce picos de resonancias próximos a los valores indicados y se obtiene una distorsión menor al caso de referencia sin compensación.

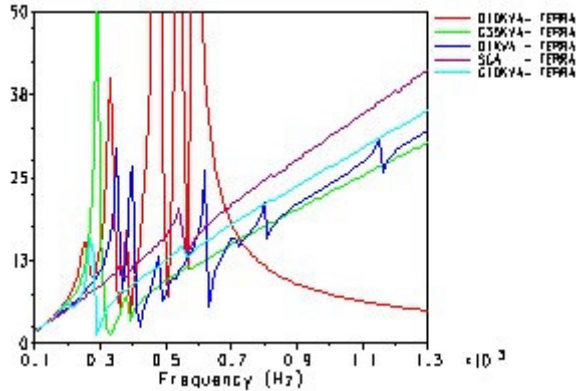


Figura 6.- Barrido en frecuencia en ACN2

**Caso pet**

Para el punto denominado "PET" ocurre algo similar al caso anterior aunque con picos de amplitudes mayores.

Las alternativas de compensación distribuida en 10 kV y 1 kV producen los picos de resonancias más elevados. Igualmente la compensación concentrada en 35 kV produce un pico menor cercano a la frecuencia 250 Hz (5<sup>ta</sup> armónica).

Sólo la alternativa de compensación concentrada en 10 kV no produce picos de resonancias para las frecuencias antes mencionadas y el pico de resonancia elevado se traslada a frecuencia del orden de los 150 Hz. (3<sup>ra</sup> armónica) que no es generada por las cargas perturbadoras y dadas las características de los grupos de conexión de los transformadores de la red no se establece su circulación. A su vez la distorsión resulta menor al caso sin compensación.

**Caso oes**

En el punto denominado "OES" también resultaron picos de resonancias en frecuencias críticas para las alternativas de compensación concentrada en 35 kV, la distribuida en 10 kV y 1 kV.

Sólo la alternativa de compensación concentrada en 10 kV no produce picos de resonancias para las frecuencias antes mencionadas aunque mantiene un nivel de distorsión similar al caso sin compensación.

**Caso syst**

La Figura 9 muestra el resultado para el punto denominado "SYST", no se presentan cambios significativos respecto al caso sin compensar no habiendo ventaja con respecto a las distorsiones alcanzadas en dicho punto.

**2.5.2. Resumen de los barridos en frecuencia**

La compensación **distribuida en 10 kV**, resulta la más conveniente desde el punto de vista de frecuencia industrial.

De los resultados de barrido en frecuencia analizados en cambio se concluye que la compensación **concentrada en 10 kV** es la mejor alternativa. Se deben verificar las distorsiones alcanzadas decidiendo el uso de bancos de capacitores o instalar filtros.

Se presentan resonancias para las frecuencias de interés de 350 Hz. y 550 Hz, 7<sup>ma</sup> y 11<sup>ra</sup> armónica respectivamente.

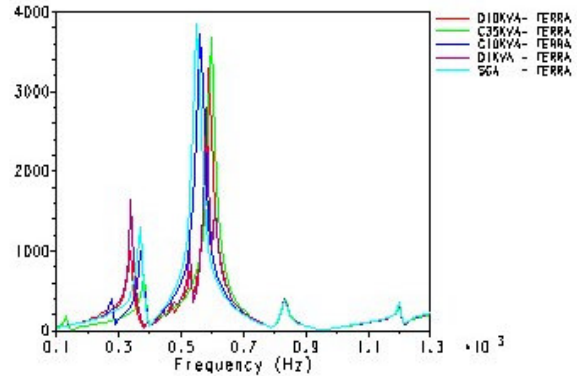


Figura 9.- Barrido en frecuencia en SYST

**2.5.3. Flujos de armónicas**

Se supuso la inyección de corrientes armónicas en los tres puntos donde se analizaron los barridos en frecuencia, que son los puntos de conexión de cargas alineales.

El espectro característico adoptado, ver Tabla II, es correspondiente a rectificadores de 6 y 12 pulsos utilizados en variadores de frecuencia de bombas electrosumergibles. Estas hipótesis fueron corroboradas con mediciones en diferentes cargas en 10 kV.

Tabla II.- Espectro de corrientes armónicas

I <sub>1</sub>	I <sub>5</sub>	I <sub>7</sub>	I <sub>11</sub>	I <sub>13</sub>	I <sub>17</sub>	I <sub>19</sub>	I <sub>23</sub>	I <sub>25</sub>
100	20	14.3	9	7.7	5.9	5.26	4.34	4

Para los flujos de armónicas se analizaron valores de potencia de las cargas perturbadoras del 30% y 70% de la potencia nominal en cada subestación por vez, correspondientes a los porcentajes actuales y futuros.

Las amplitudes de las corrientes armónicas se calculan con el valor 30% y 70% de la potencia nominal del transformador en cada una de las tres subestaciones ACN2, PET y OES. Las potencias en los tres puntos son 6300 kVA, 35/10.4 kV, surge el valor de  $I_1 = \sqrt{2}$  105 A e  $I_1 = \sqrt{2}$  245 A para 30% y 70%, respectivamente de carga en cada punto.

Se obtuvieron las distorsiones para los casos de distribución concentrada y distribuida en 10 kV.

En cada caso se presentan dos Figuras, la primera correspondiente al espectro y forma de onda de las tensiones en los capacitores, y la segunda correspondiente al espectro y las formas de onda de las corrientes en los capacitores.



Siempre los resultados corresponden al capacitor más cercano al punto de inyección de corrientes ya que es donde se producen las mayores distorsiones de tensiones y corrientes.

En todos los casos se considero 1 p.u. para la tensión de frecuencia industrial en el punto. Las formas de onda sólo son ilustrativas del nivel de distorsión, no son formas de onda reales ya que no se conocen los ángulos de fase de cada armónica. Sólo es de interés el valor eficaz tanto de la corriente como de la tensión.

Para la corriente, se considero el valor de corriente nominal del banco para un valor de 1 p.u. de la tensión a frecuencia industrial de alimentación.

En la Tabla III se presenta un resumen de los valores hallados.

**Caso acn2**

Las Figuras 10 y 11 presentan los resultados para el punto denominado "ACN2".

**Caso pet**

Los resultados para el punto denominado "PET" sólo se presentan en la Tabla III.

**Caso oes**

Los resultados de este punto no se presentan en la Tabla III por no ser representativos a los otros puntos.

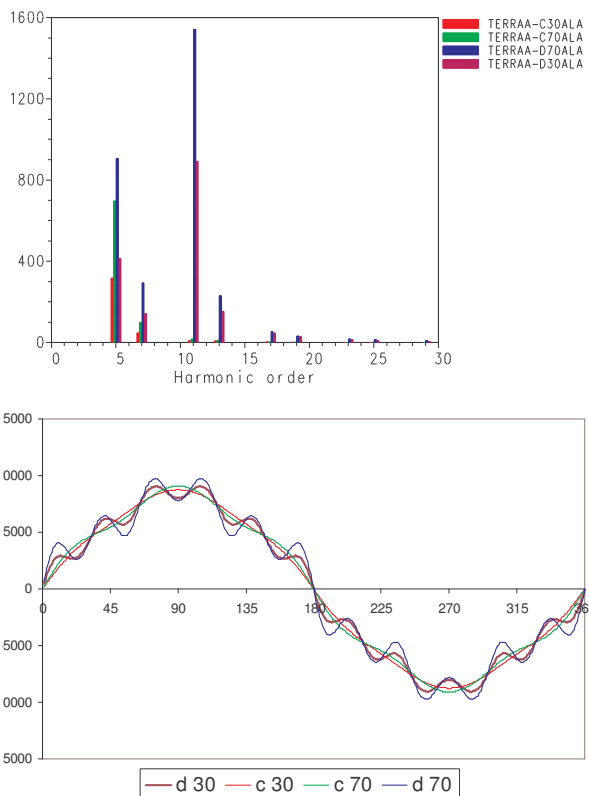


Figura 10.- distorsión en la tensión en ACN2

2.5.4. Resumen de los flujos de armónicas

Las distorsiones se comparan con los valores de referencia establecidos en las normas de capacitores [2], valores de tensión eficaz con armónicas, corriente eficaz con armónicas y potencia reactiva con armónicas.

Se puede observar en la Tabla III que en todos los casos analizados para la alternativa de compensación concentrada en 10 kV, no se superan los límites. Para la alternativa de compensación distribuida en 10 kV se superan los límites para los puntos más críticos de la red (ACN2 y PET).

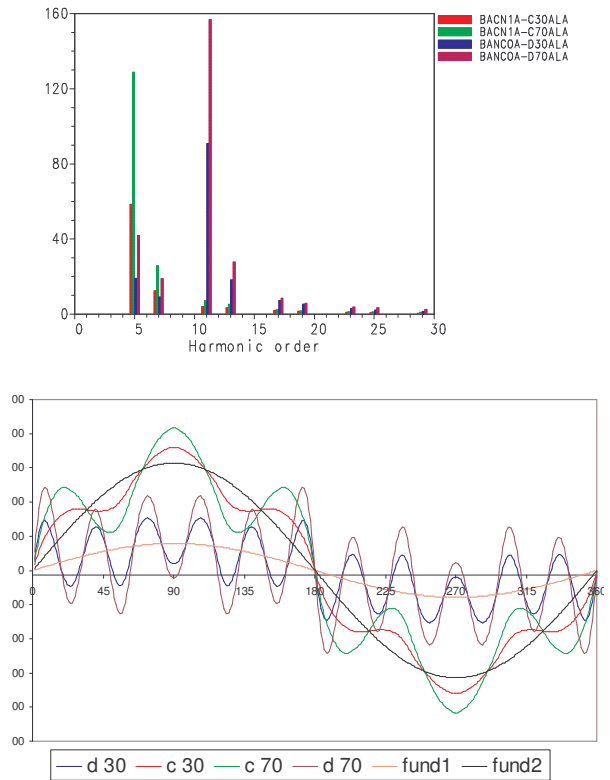


Figura 11.- corriente en el capacitor en ACN2

Además se debe tener en cuenta que en la compensación distribuida donde los valores de las distorsiones se encuentran más cercanos a los límites son resultado de flujos de armónicas realizados en la condición de inyección de carga perturbadora en un solo punto, sin tener en cuenta la contribución de cargas perturbadoras en varios puntos a la vez, lo cual empeoraría la situación.

De lo antes mencionado se concluye que la alternativa de compensación concentrada podrá ser realizada con bancos de capacitores y la compensación distribuida en 10 kV deberá ser realizada con filtros.

Se debe comprobar mediante los barridos en frecuencia y los flujos de armónicas, el desempeño de los filtros, con respecto a las resonancias y distorsiones.

2.6. Mitigación de armónicas

La frecuencia de sintonía de diseño de los filtros deberá ser para la menor frecuencia de las corrientes armónicas inyectadas por las cargas, en este caso 5<sup>a</sup> armónica (250Hz.).

Tabla III.- Resumen de distorsiones

Alternativa	Carga alineal (%)	Caso	Resultados		Límite (*)	Excede
				RMS %	%	
concentrada en 10 kV	30	Acn2	U	100.07	110	no
			I	101.82	180	no
			kVAr	101.89	135	no
		Pet	U	100.06	110	No
			I	101.72	180	No
			kVAr	101.78	135	No
	70	Acn2	U	100.34	110	No
			I	108.44	180	No
			kVAr	108.81	135	No
		Pet	U	100.28	110	no
			I	107.60	180	no
			kVAr	107.90	135	no
distribuida en 10 kV	30	Acn2	U	100.70	110	no
			I	157.67	180	no
			kVAr	158.77	135	si
		Pet	U	100.36	110	no
			I	110.15	180	no
			kVAr	110.54	135	no
	70	Acn2	U	102.29	110	no
			I	234.15	180	si
			kVAr	239.52	135	si
		Pet	U	101.67	110	no
			I	140.52	180	no
			kVAr	142.87	135	si

(\*) Valores extraídos de la norma ANSI/IEEE [2]. Existen otros valores aplicables a los capacitores siendo común por ejemplo el límite de 135% para RMS I [3] y no 180%.

La potencia de filtros tiene en cuenta el consumo del reactor a frecuencia industrial, con lo cual resultan de la misma potencia reactiva neta a frecuencia fundamental que los bancos de capacitores.

En la Figura 16 se muestra la respuesta en frecuencia para la compensación distribuida en 10 kV con filtros. Se presentan los resultados para cada uno de los tres puntos de la red analizados anteriormente, incluyendo para cada punto el caso sin compensación para observar el cambio en la impedancia.

De los resultados se observan las frecuencias de sintonía de los filtros en aproximadamente los 250 Hz. y los picos de resonancias producidos por los mismos por debajo de la frecuencia de sintonía. Además se puede observar que los mismos producen menores distorsiones que el caso sin compensar para frecuencias superiores.

A continuación se presentan las distorsiones en las formas de onda de la tensión y corriente para los puntos más críticos que son ACN2 y PET, y para las condiciones de carga alineal 30% y 70%.

La Figura 17 muestra las distorsiones de la tensión en bornes de los filtros y la Figura 18 las distorsiones en la corriente que circulan por los capacitores de los filtros. Estas se realizaron en las mismas escalas que en los casos anteriores para observar las diferencias en las amplitudes de las distorsiones entre la instalación de bancos y filtros.

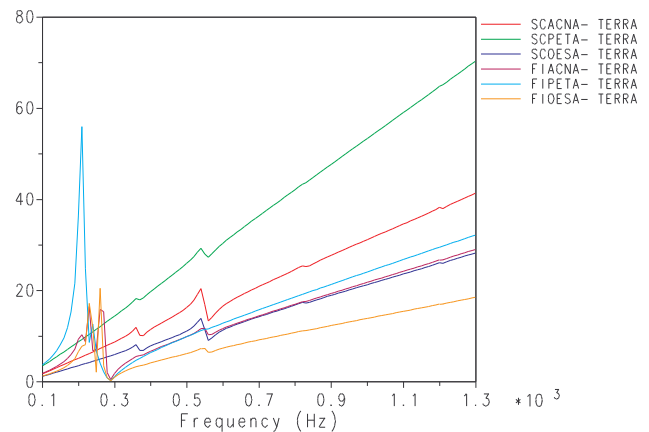


Figura 16.- Barrido en frecuencia con filtros

En la Tabla IV se presenta un resumen de los valores hallados. Se observa que en la compensación distribuida en 10 kV con filtros no se superan ninguno de los valores límites.

Por último se realiza una estimación económica entre las alternativas de compensación concentrada y distribuida en 10 kV, para encontrar la alternativa más conveniente.

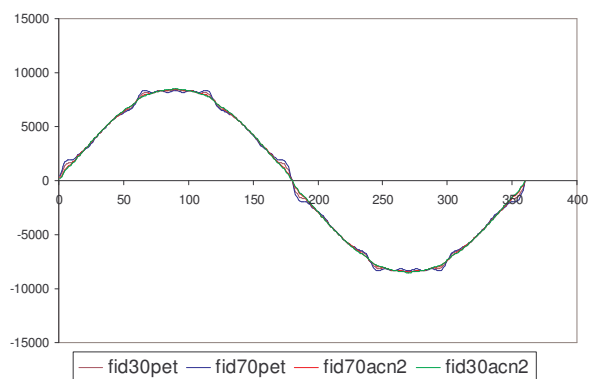
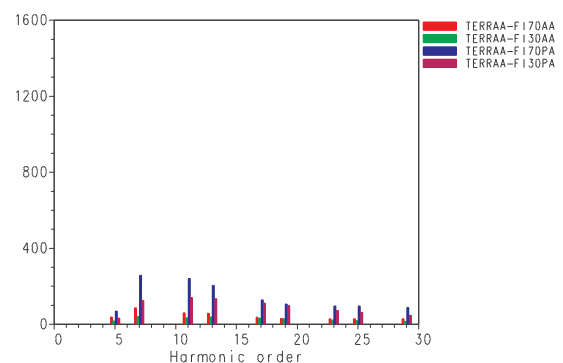


Figura 17.- distorsión en la tensión

### 3.0 EVALUACIÓN ECONÓMICA

Se realizó una evaluación de costo anual. Se tuvieron en cuenta ahorros en la facturación de energía debido a la variación de las pérdidas a frecuencia industrial (ver Tabla I), ahorros en las penalizaciones por mejora

del factor de potencia y los costos de inversión de bancos de capacitores o filtros.

En la Tabla V se presenta un resumen de valores calculados para ambas alternativas.

Los ahorros de energía y penalizaciones están referenciados al caso sin ninguna compensación.

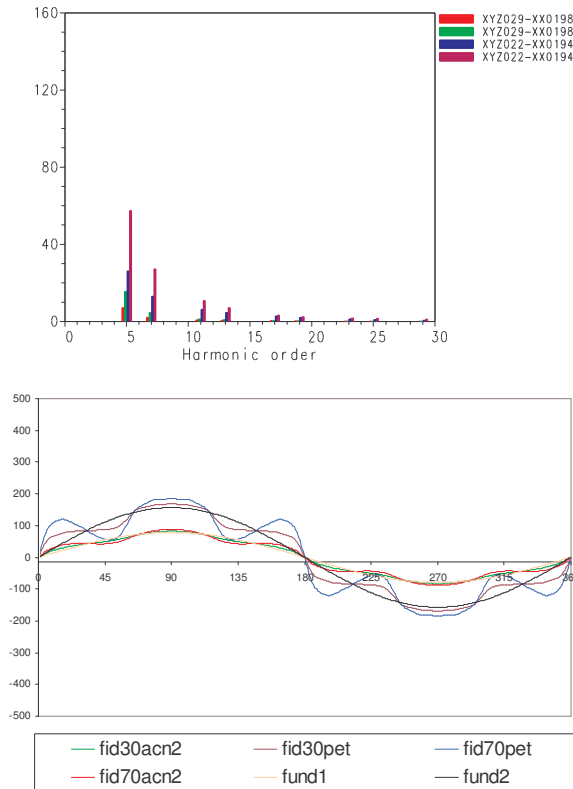


Figura 18.- distorsión en la corriente

El ahorro en sanciones debido a factor de potencia es igual en ambos casos sin penalización al superar 0,95.

En la Tabla se observa el menor costo de inversión anual en el caso de compensación concentrada en 10 kV debido a la utilización de bancos de capacitores y mayor gasto en energía debido a las mayores pérdidas.

El caso de compensación distribuida en 10 KV con filtros establece una mayor inversión en equipamiento aunque un menor gasto en energía debido a las menores pérdidas.

De la evaluación de ambos gastos y costos surge que la compensación distribuida con filtros es la más conveniente.

#### 4.0 CONCLUSIONES

De la aplicación de la metodología descrita en el informe para el caso de estudio analizado surgió que la compensación más adecuada desde el punto de vista del factor de potencia en el punto de suministro, la optimización del funcionamiento de la red interna y los ahorros e inversiones es la compensación distribuida en 10 kV con filtros sintonizados.

Tabla IV.- Resumen de distorsiones

Carga alineal	Caso	Resultados		Límite	Excede
		RMS %		%	
30 %	Acn2	U	100.00	110	no
		I	100.39	180	no
		kVAr	100.39	135	no
	Pet	U	100.06	110	no
		I	101.86	180	no
		kVAr	101.92	135	no
70 %	Acn2	U	100.01	110	no
		I	101.82	180	no
		kVAr	101.83	135	no
	Pet	U	100.16	110	no
		I	108.25	180	no
		kVAr	108.42	135	no

Tabla V.- Evaluación económica

Alternativa	ninguna	concentrada	distribuida
U	-----	10 kV	10 kV
Q	0	8 MVar	8 MVar
Pérdidas	542,5 kW	667 kW	430 kW
Consumo	17,19 MW	17,31MW	17,08 MW
cosQ	0.772	0.958	0.971
Precio Monómico	33,5 \$/MWh	33,5 \$/MWh	33,5 \$/MWh
Consumo de energía	\$3,731	\$ 3,757	\$ 3,707
Ahorro en facturación	-----	-\$ 26,049	\$ 23,878
Sanciones	4,5 \$/MWh	4,5 \$/MWh	4,5 \$/MWh
Penalización	\$ 248,149	0.00	0.00
Ahorro en penalización	-----	\$ 248,149	\$ 248,149
<b>Ahorro anual de energía</b>	-----	<b>\$ 222,099</b>	<b>\$ 272,028</b>
Costos equipo	-----	4 \$/kVAr	9 \$/kVAr
Cantidad	-----	2	6
Total	0	\$ 32,000	\$ 72,000
Amortización en 5 años	-----	\$ 6,400	\$ 14,400
Mantenimiento	-----	\$ 640	\$ 1,440
<b>Total inversión anual</b>	-----	<b>\$ 7,040</b>	<b>\$ 15,840</b>
<b>Beneficio</b>	-----	<b>\$ 215,059</b>	<b>\$ 256,188</b>

#### 5.0 REFERENCIAS

- [1]. NEMA MG1-1998, Motors and Generators.
- [2]. ANSI/IEEE Standard 18.Shunt Power Capacitors.
- [3]. IEC 60871 Shunt capacitors.
- [4]. IEEE Std 141.Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants.
- [5]. Reactive Power Control In Electric Systems. Timothy J.E. Miller (1982)
- [6]. Electrical Power Systems Quality. Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, H. Wayne Beaty.
- [7]. Power System Harmonics. J. Arrillaga, D.A. Bradley (1985).