

COMPENSACION DINAMICA DE POTENCIA REACTIVA CON FILTRO DE ARMONICOS



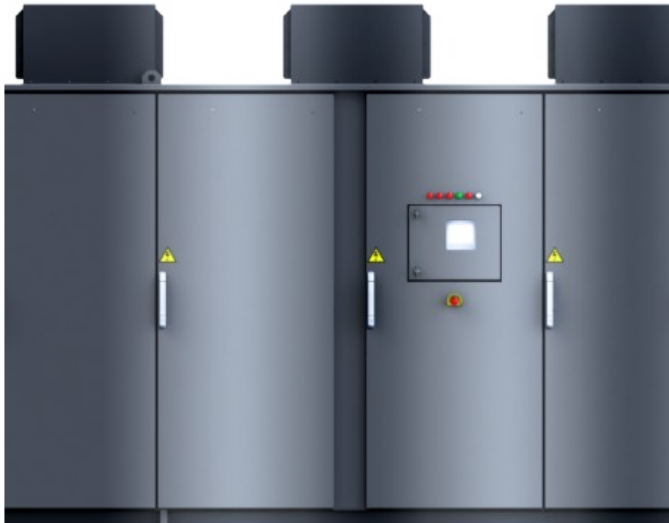
Ing. Rafael Guerrero

Presentado en el Instituto de
Energía de la UASD

30 de Octubre 2025



COMPORTAMIENTO DE LAS CARGAS ELECTRICAS CON EL AVANCE DE LA TECNOLOGIA



- En el pasado, la mayoría de las cargas fueron lineales, cuando ellas fueron conectadas a un voltaje sinusoidal, la corriente resultante también fue sinusoidal sin que esto alterara el desfase entre las ondas de voltajes y corrientes y sin generar distorsiones armónicas. Dentro de estas cargas están: Bombillas Incandescentes, Calentadores, Transformadores, Condensadores, entre otros.
- Mientras tanto, el uso de electrónica de potencia ha aumentado significativamente, con ello han variado el comportamiento de las Cargas Eléctricas y el Comportamiento de la Generación, Transmisión y Distribución de la Energía Eléctrica.
- Estos dispositivos eléctricos son usualmente llamados cargas no-lineales, cuando se conectan a un voltaje sinusoidal estos producen una corriente no-sinusoidal la cual puede crear problemas para otros dispositivos (Ejemplos de cargas no lineales son: Variadores de Frecuencia, UPS, Computadoras, Servidores, Luminarias LED, entre otros).

PROBLEMÁTICA DE LOS SISTEMAS ELECTRICOS CON EL AVANCE DE LA TECNOLOGIA



A medida que pasa el tiempo crecen las industrias y con ello la necesidad de grandes soluciones para eficientizar la producción y la rentabilidad en las empresas y esto a la vez arrastra al consumo y uso de equipos y maquinarias como son:

- Instalación de motores y variadores de frecuencia de grandes capacidades generando al sistema eléctrico muchas distorsiones de armónicos y grandes demandas de potencia reactiva.
- Instalación de Generación Distribuida provocando variaciones de tensiones y al mismo tiempo generando distorsiones armónicas, también aumentando la demanda de Potencia Reactiva a las redes eléctricas porque generalmente configuran los inversores solo para generar potencia activa.
- Hornos eléctricos, Plantas de Laminados, Sistemas de Bombeo de agua, Grandes Centros de Data, Grúas Eléctricas en Muelles y muchas empresas industriales en diferentes ramas con características muy variables en su demanda de energía eléctrica que alteran las operaciones normales de los sistemas eléctricos de Generación, transmisión y Distribución.



EN TODAS LAS EMPRESAS INDUSTRIALES EXISTEN EQUIPOS DE CARGAS INDUCTIVAS Y EQUIPOS CON ELECTRONICA DE POTENCIA, ESTOS EQUIPOS GENERAN GRANDES CONSECUENCIAS A LOS SISTEMAS ELECTRICOS SOBRE TODO A LOS GENERADORES, TRANSFORMADORES Y CONDUCTORES. TAMBIEN, A LOS EQUIPOS DE SERVICIOS AUXILIARES PARA LA PRODUCCION.

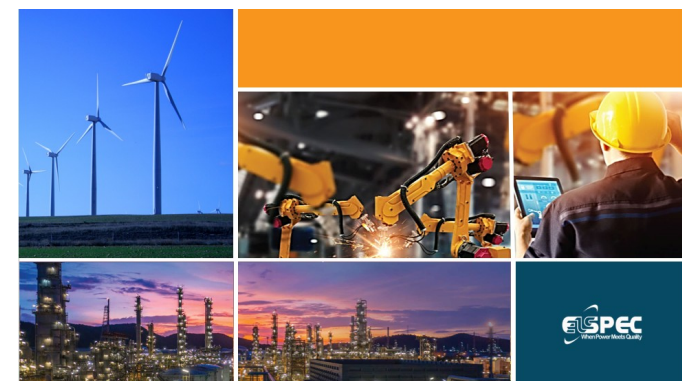
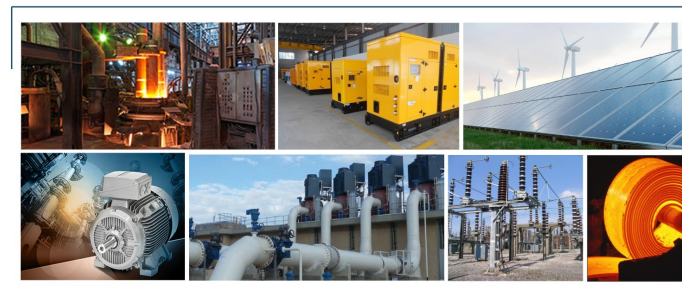
1- Consecuencias de las Cargas Inductivas:

- Bajo Factor de Potencia
- Caídas de Tensión
- Aumentan las perdidas por efecto Joule I^2R
- Fluctuaciones de Voltajes
- Picos de Corrientes
- Sobrecalentamiento
- Reduce el tiempo de vida útil de los Equipos
- Desbalance en el Sistema.
- Eleva los Costos de Energía

2- Consecuencias de las distorsiones Armónicas:

- Calentamientos a los Equipos.
- Ineficiencia en las operaciones de los Equipos.
- Incrementa la Corriente RMS y Distorsiona el Voltaje de la Red
- Paradas Inesperadas de la Producción
- Averías a los Equipos sensibles.
- Aumentan las perdidas de Energía I^2R .

TYPICAL APPLICATIONS



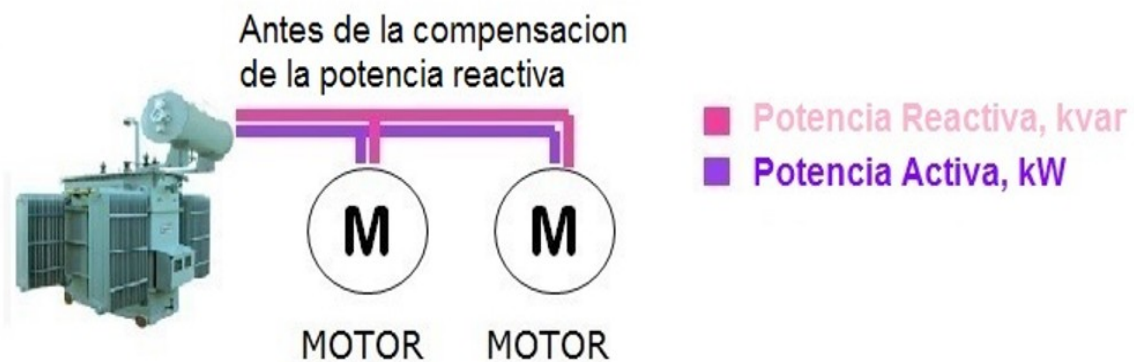
**SOLUCIONES DE
CALIDAD DE ENERGIA**

**ELECTRONICA DE
POTENCIA**

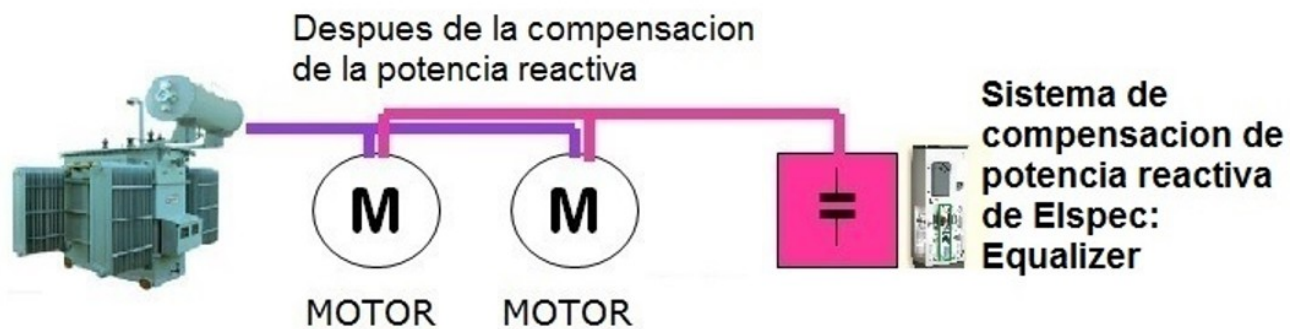
COMPENSACION DINAMICA CON FILTRO DE ARMONICOS

EQUALIZER DE ELSPEC EN MT

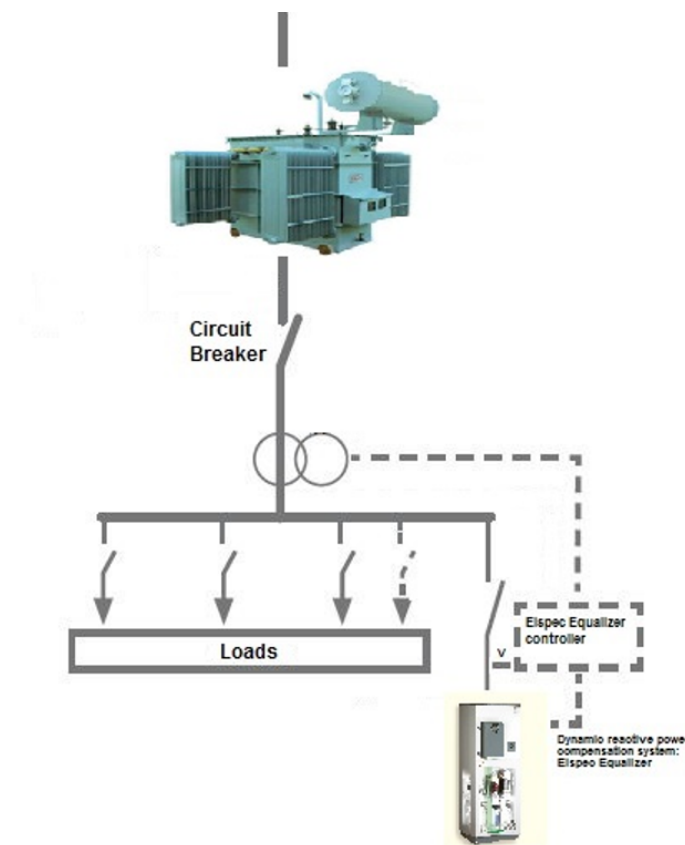
FLUJO DE POTENCIA EN TRANSFORMADORES



Esquema 1



Esquema 2



Esquema 3

FILTRADO DE ARMONICOS, PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL FILTRO ACTIVO

Principio de filtro activo

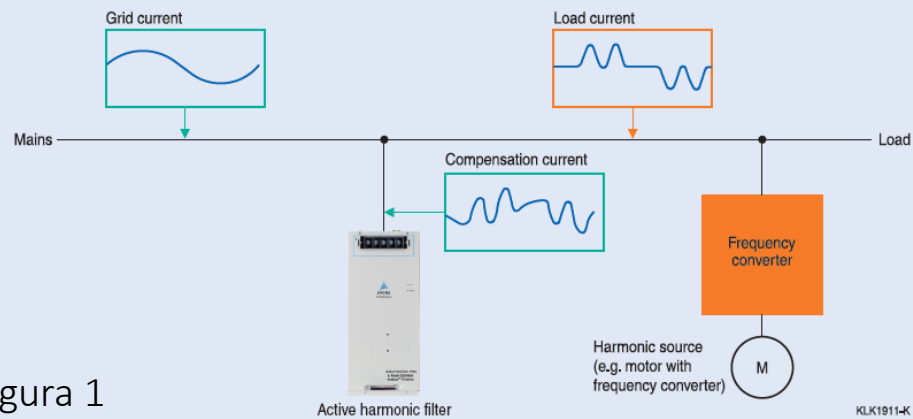


Figura 1

- Los Filtros Activos se instalan en paralelo con las cargas eléctricas no-lineales. El filtro activo analiza la corriente de fase junto con las armónicas asociadas generando una corriente de compensación de corriente la cuál neutraliza las corrientes de armónicas creando una forma de onda prácticamente sinusoidal (ver Figura 1).

- La Fig.2 muestra la distorsión total de corriente (THDi) sin Filtro de Armónicos.

- La Fig. 3 muestra el resultado con el filtro activado.

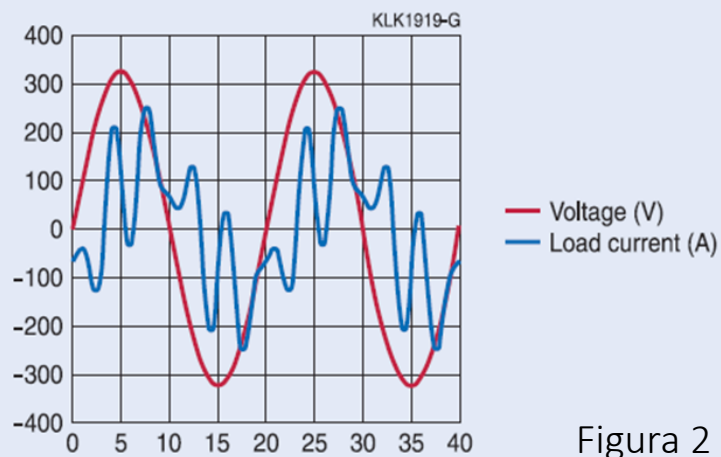


Figura 2

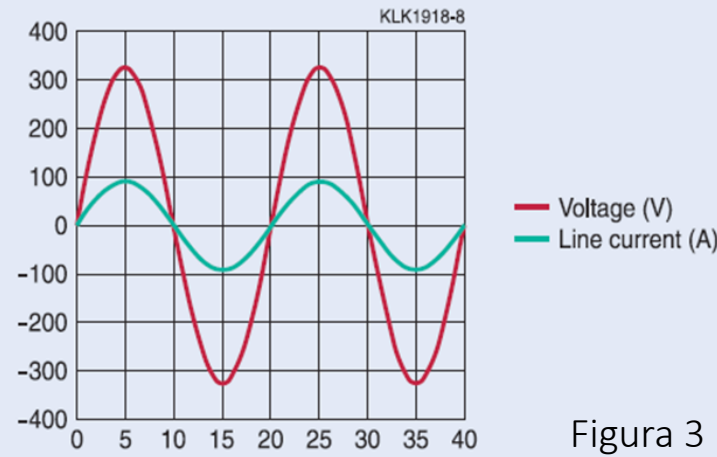
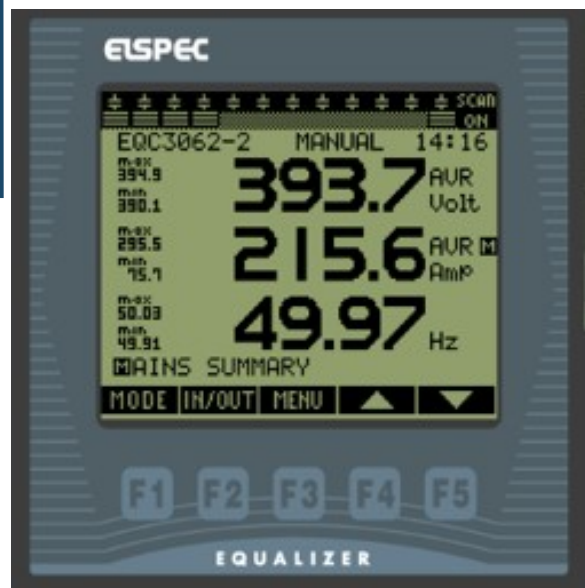


Figura 3

COMPONENTES DEL EQUALIZER



Controlador



Modulo de Switcheo

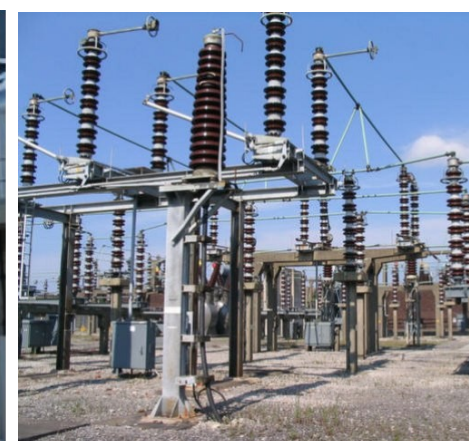
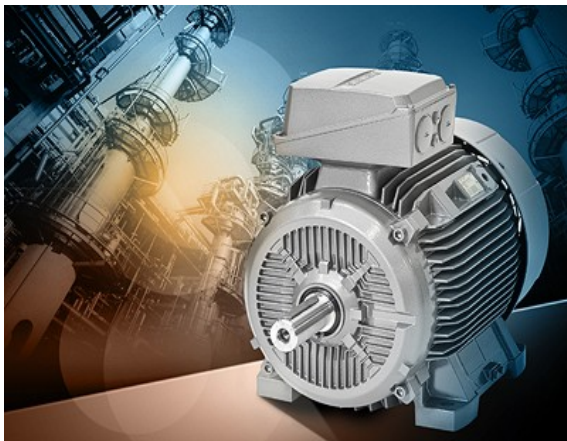


Modulo Inductores y Capacitores

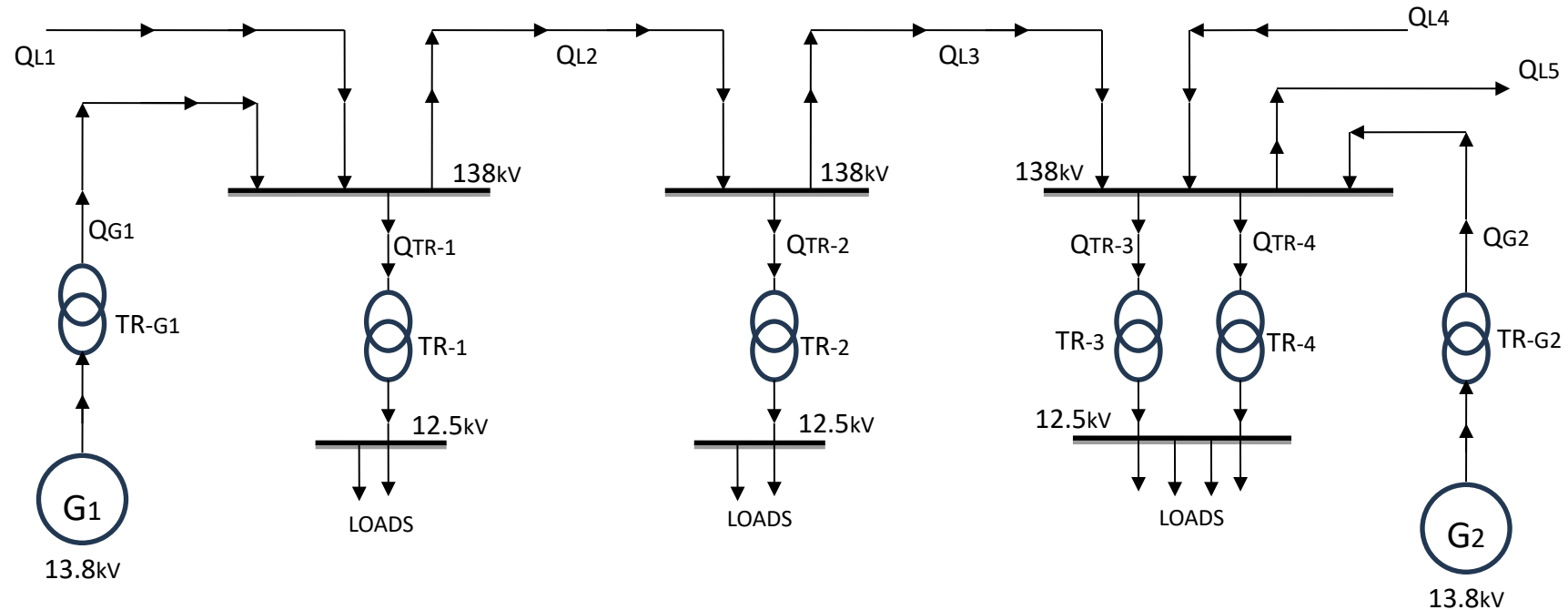


Medidor G5, DFR

APLICACIONES TÍPICAS

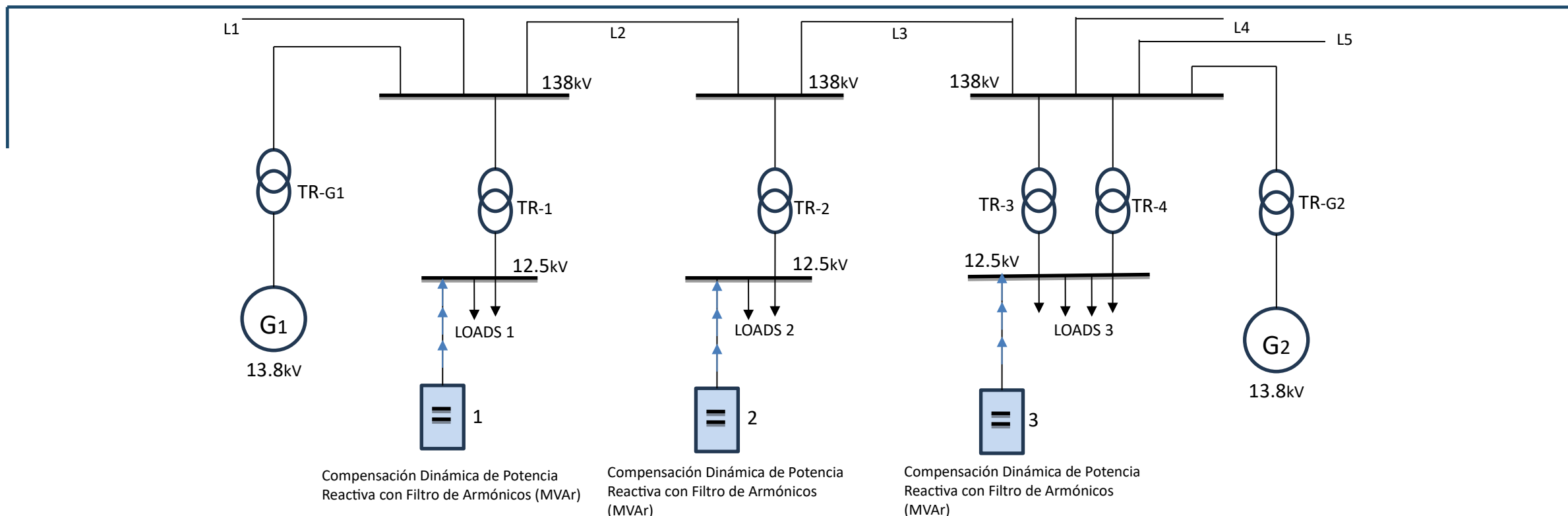


FLUJO DE POTENCIA REACTIVA SIN COMPENSACION EN LA CARGA



- Toda la Potencia Reactiva demandada por las cargas eléctricas es suministrada por los Transformadores de Distribución, esta Potencia es producida por los Generadores y es transportada a través de las Líneas de Transmisión.
- El flujo de Potencia reactiva limita la capacidad a las Líneas de Transmisión y aumenta las pérdidas I^2R .
- La potencia reactiva aumenta la demanda de los MVA a los Generadores y les limita la generación de Potencia Activa MW.
- Incrementan las pérdidas en los transformadores de distribución y disminuye el tiempo de su vida útil.

FLUJO DE POTENCIA REACTIVA CON COMPENSACION DE REACTIVO EN LA CARGA



- 1- Toda la Potencia Reactiva demandada por la carga es aportada por los Sistemas de Compensación Dinámica.
- 2- Los Transformadores de Distribución quedan libre del suministro de la Potencia Reactiva, con esto aumentan su capacidad de entregar Potencia Activa.
- 3- Las líneas de Transmisión quedan libre de transportar el flujo de Potencia Reactiva disminuyendo la corriente y al mismo tiempo disminuyendo la temperatura de los conductores, quedando con mayor capacidad de transportar Potencia Activa.
- 4- Los Generadores no tienen que generar la Potencia Reactiva quedando disponible para ponerlos a generar mayor Potencia Activa.

LA DEMANDA DE POTENCIA REACTIVA VISTA DESDE DOS PUNTOS DE INTERÉS:

1- LA DEMANDA DE POTENCIA REACTIVA PRODUCTO DE LA OPERACIÓN DE LA CARGA:

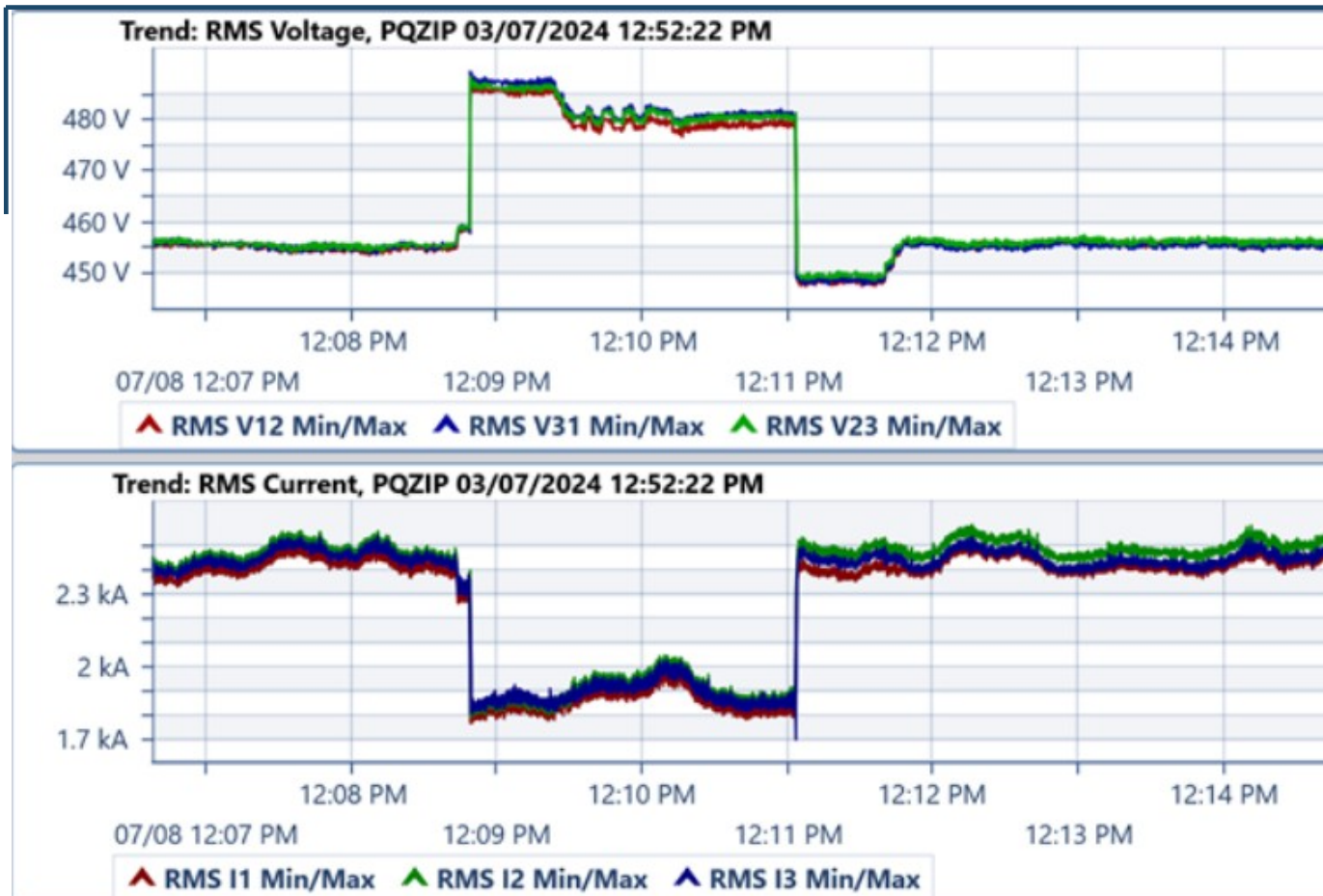
- Estas son demandadas por el diseño propio de los equipos eléctricos los cuales están diseñados para trabajar con un FP determinado.
- Esta demanda es de magnitud contante y variable en el tiempo, es decir, este valor es proporcionar a la carga conectada y cuando disminuye la carga eléctrica conectada, también disminuye el valor de la demanda de potencia reactiva.

2- LA DEMANDA DE POTENCIA REACTIVA PRODUCTO DEL COMPORTAMIENTO OPERACIONAL DE LA CARGA: DINÁMICA, VARIABLE EN EL TIEMPO.

- Estas son demandadas por las condiciones operacionales de los equipos eléctricos generalmente cuando son sometidos a cambios bruscos de cargas y cuando hay Fluctuaciones en la red de suministro..
- Esta demanda es de magnitud variable y dinámica en el tiempo, es decir, este valor esta constantemente variando por eventos que suceden en las redes provocados por entradas de cargas industriales cercanas del suministro, por condiciones de clima, por salidas de Generación Solar, Salidas de Generación Eólica, entre otras.
- Con mayor presencia en las líneas de transmisión de 69 KV y 12.5 KV.

1- LA DEMANDA DE POTENCIA REACTIVA PRODUCTO DE LA OPERACIÓN DE LA CARGA (VARIABLE EN MAGNITUD Y CONSTANTE EN EL TIEMPO).

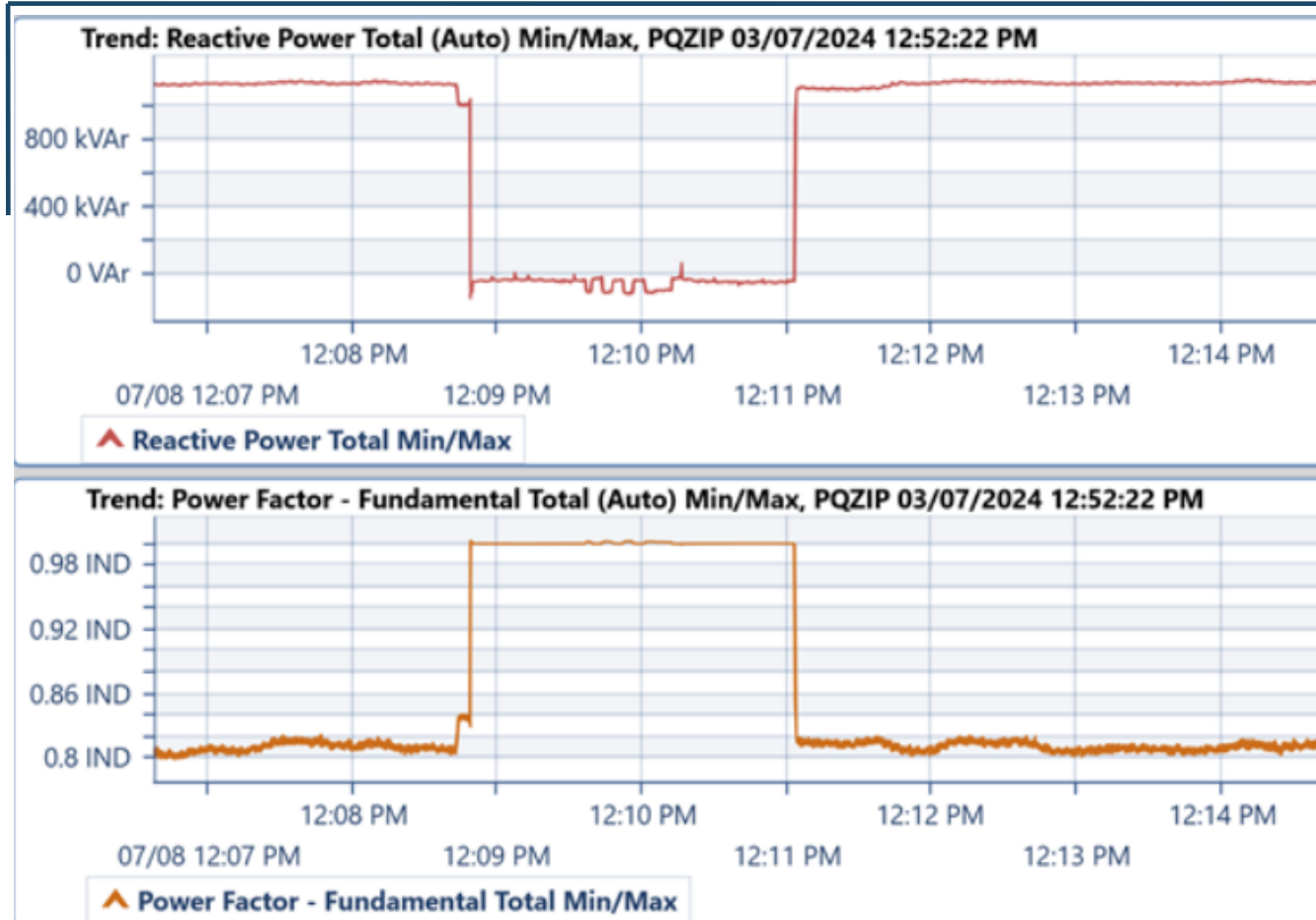
COMPARACIÓN DE VOLTAJES Y CORRIENTES CON COMPENSACION DINAMICA Y SIN COMPENSACION



1- Se observa en la gráfica de voltaje que cuando no hay compensación el voltaje es de 455V. Y cuando se compensa la potencia reactiva el voltaje se estabiliza a 480V.

2- En la Gráfica de corriente se observa la variación de los valores cuando pasa de 2.5 kA al valor de 1.9 kA para una diferencia de 600A equivalente a una reducción de un 24%.

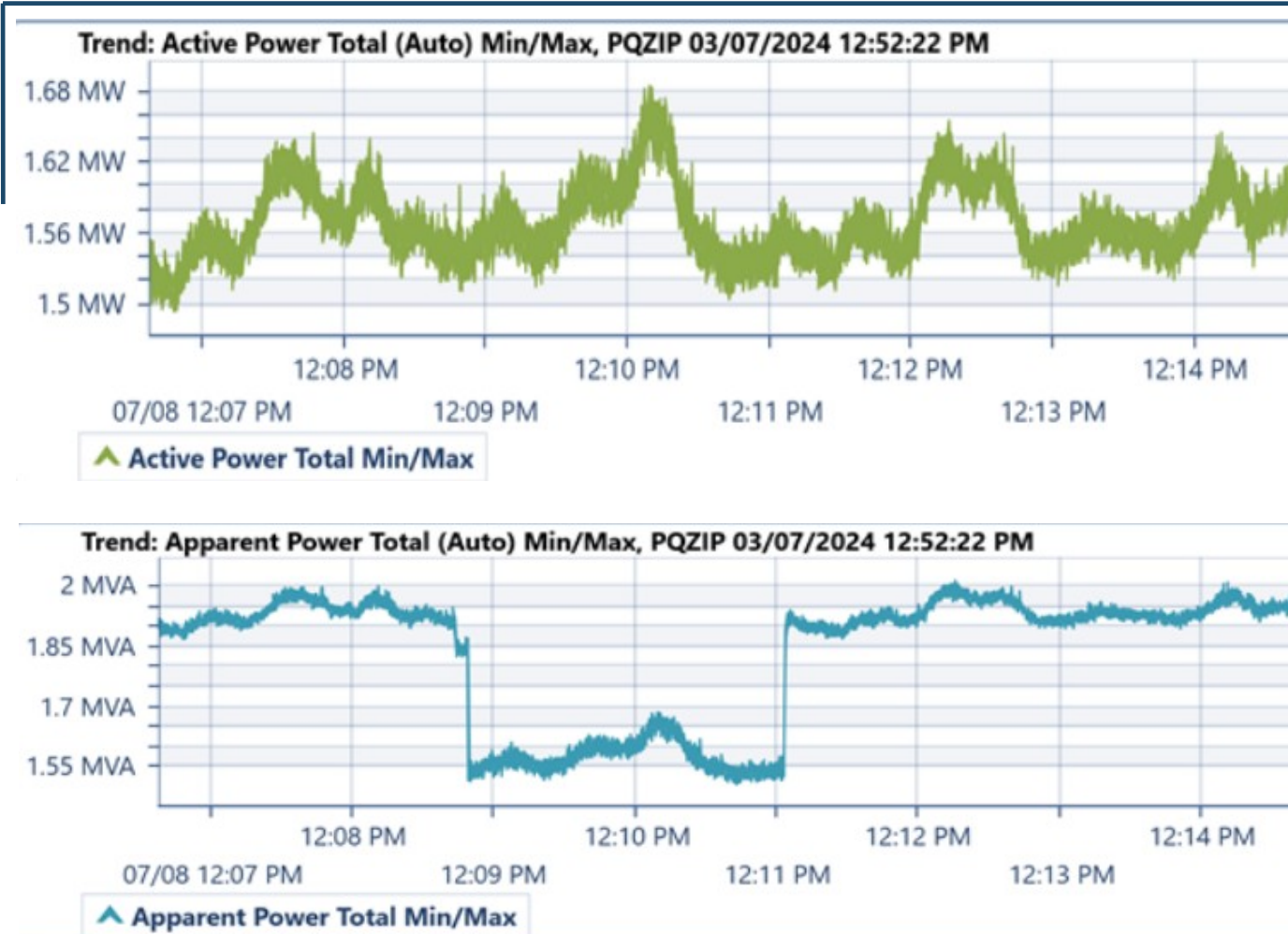
FP Y POTENCIA REACTIVA CON COMPENSACION DINAMICA Y SIN COMPENSACION



En el grafico de potencia reactiva se puede apreciar cuando la compensacion dinamica esta en OFF la demanda de reactiva es 1.1 MVar y cuando la compensacion se pone en ON al instante la demanda se va a cero la misma rapidez se puede observar al momento de hacer la desconexion.

En el grafico de FP se puede apreciar cuando la compensacion dinamica esta en OFF el valor del FP es 0.8 y cuando la compensacion se pone en ON al instante el FP sube a 0.995 y la misma rapidez se puede observar al momento de hacer la desconexion que el valor cae al instante debido al tiempo de respuesta del Equalizer.

POTENCIA ACTIVA Y POTENCIA APARENTE CON COMPENSACION DINAMICA Y SIN COMPENSACION



No varia el comportamiento de la Curva de Potencia Activa (MW) con compensacion y sin compensacion.

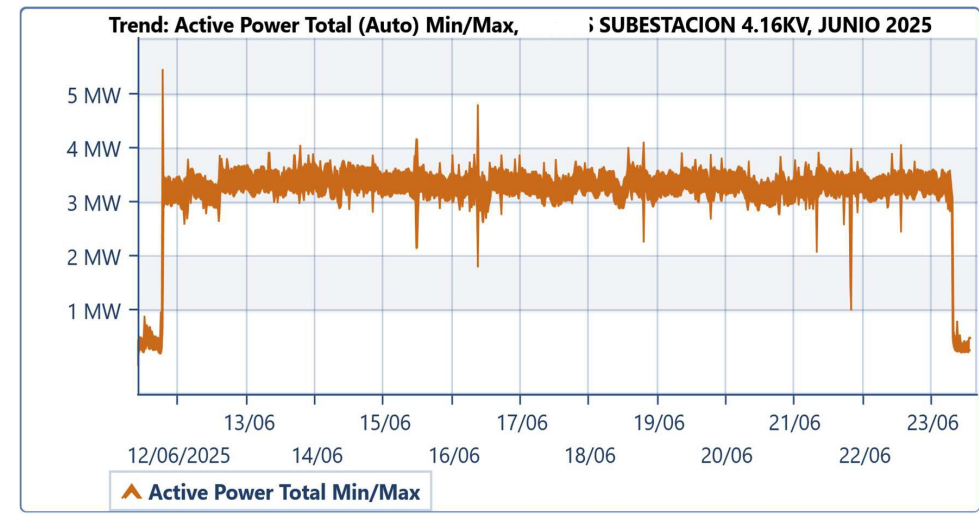
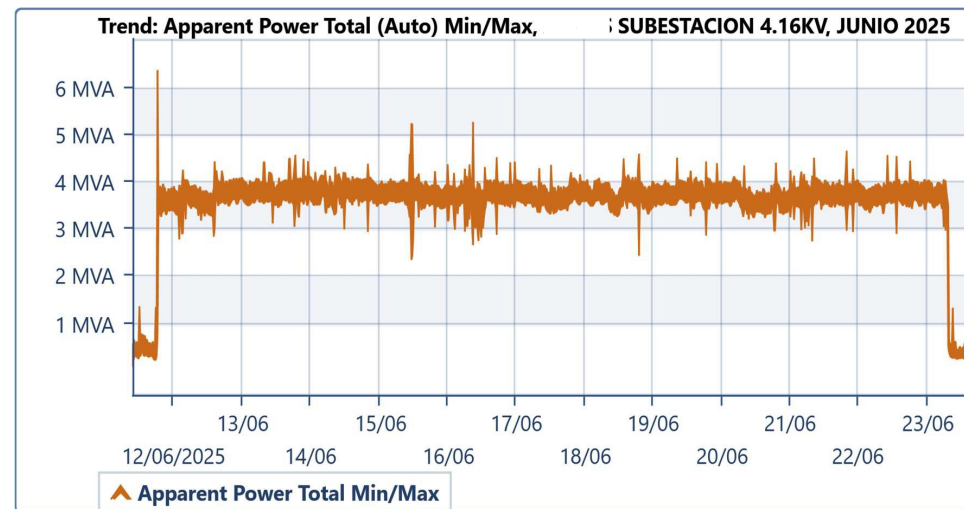
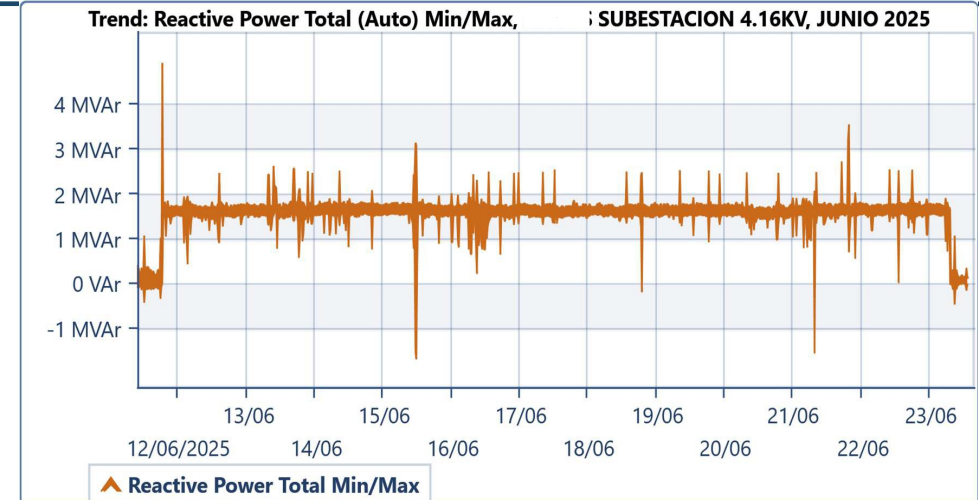
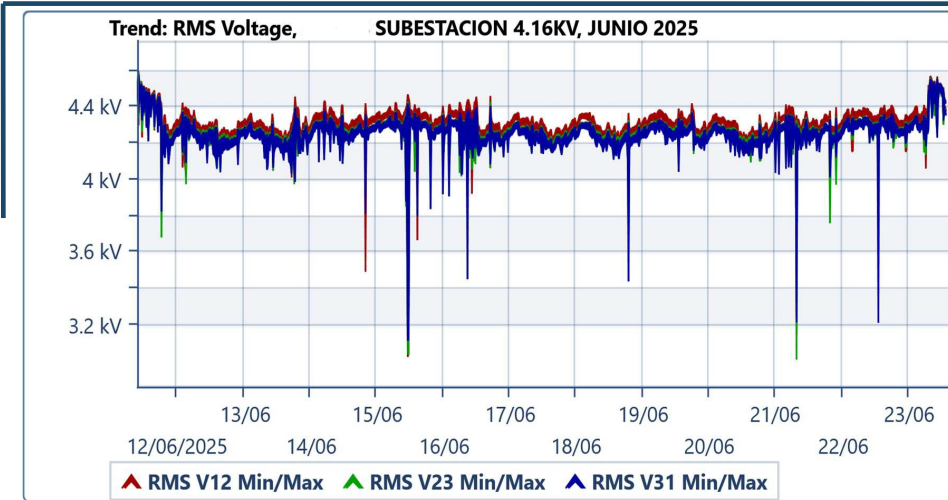
Podemos ver en el grafico que cuando no hay compensación el valor de la potencia aparente es 1.95 MVA y cuando la compensación se pone en ON al instante la potencia aparente cae a un valor de 1.55 MVA, igualado en todo momento con el valor de la potencia activa en MW.

CONSECUENCIAS DE NO COMPENSAR LA POTENCIA REACTIVA PRODUCTO DE LA OPERACIÓN DE LA CARGA

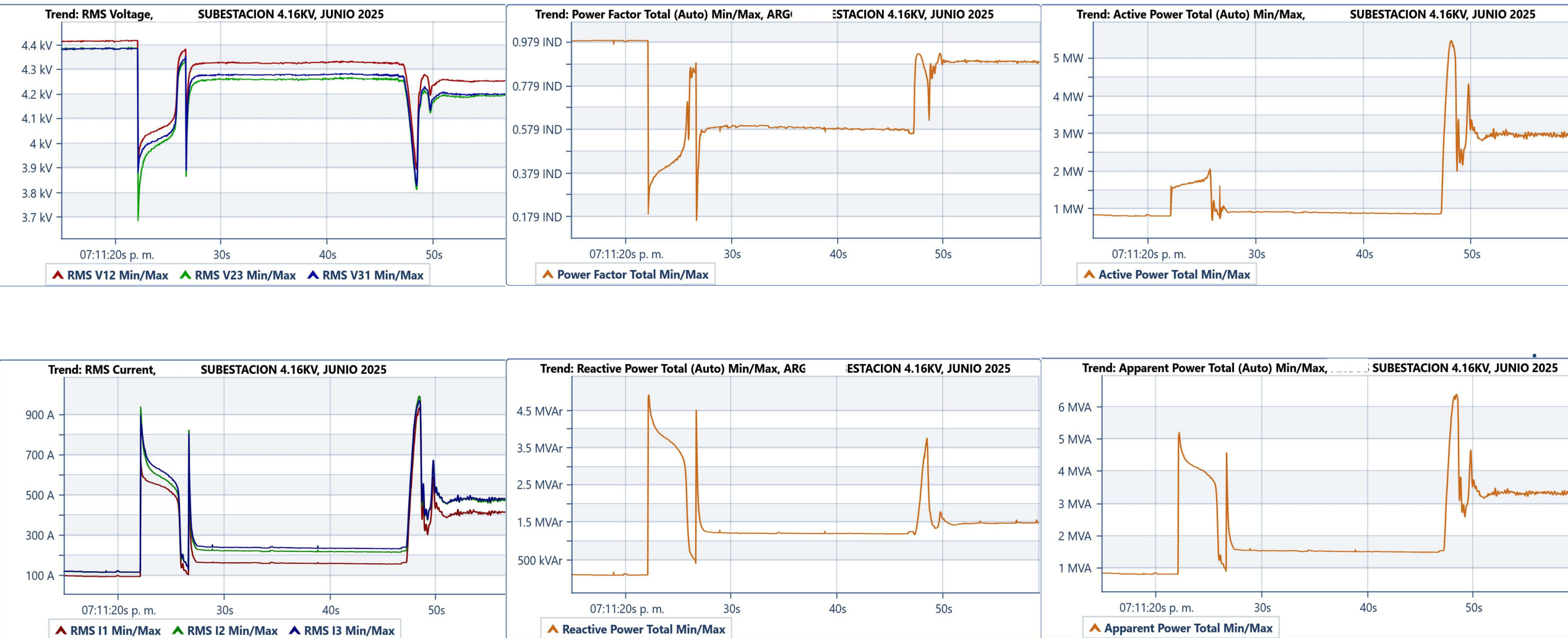
- Sobrecargan los transformadores de Distribución.
- Sobrecargan las redes eléctricas.
- Limitan a los Generadores de producir Potencia Activa en MW.
- Aumentan las pérdidas eléctricas en los Transformadores de Distribución.
- Incrementan las corrientes en las redes eléctricas provocando calentamientos a las líneas y aumentando las fallas.
- Aumentan los costos de Mantenimiento
- Incrementan las pérdidas I^2R .
- Generan caídas de Tensión.
- Generan calentamiento a los equipos eléctricos disminuyendo su tiempo de vida útil.

2- LA DEMANDA DE POTENCIA REACTIVA PRODUCTO DEL COMPORTAMIENTO DE LA CARGA (VARIABLE EN MAGNITUD Y DINÁMICA, VARIABLE EN EL TIEMPO).

MEDICIONES ELECTRICAS EN UNA SUBESTACION 4.16KV



ARRANQUE DE CARGAS EN UNA SUBESTACION 4.16KV

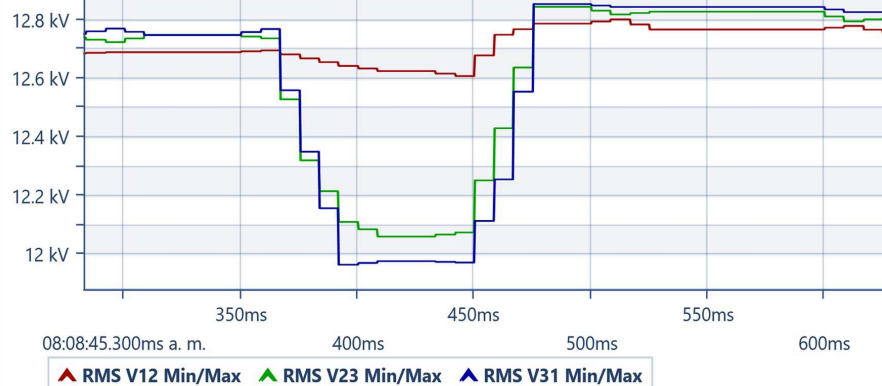


CONSECUENCIAS DE LA POTENCIA REACTIVA PRODUCTO DEL COMPORTAMIENTO DE LA CARGA

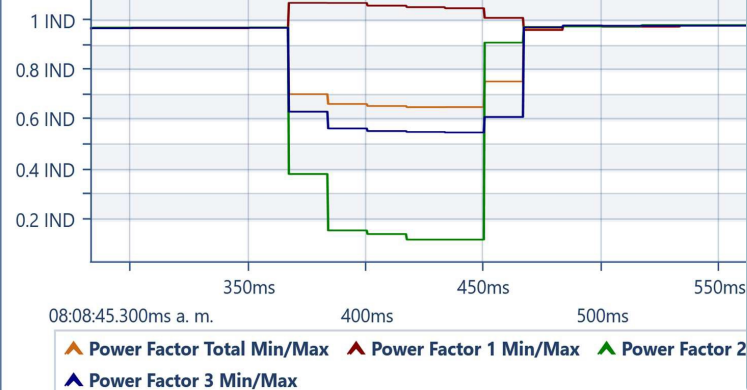
- Generan Fluctuaciones de Voltaje en las redes eléctricas.
- Generan Inestabilidad en las redes de Transmisión y Distribución.
- Provocan disparos de las protecciones de las Líneas de Transmisión y las Líneas de Distribución.
- Generan Perturbaciones en el Sistema Eléctrico Nacional provocando la actuación del Edac.
- Reducen el Tiempo de Vida útil de los equipos.
- Incrementan las Perdidas Eléctricas en las Líneas de Transmisión y líneas de Distribución.
- Provocan daños a las infraestructuras eléctricas disminuyendo el tiempo de vida útil.

MEDICIONES ELECTRICAS EN UNA SUBESTACION 12.5 KV CON UN SVC EN LA LINEA DE 69 KV

Trend: RMS Voltage, PQZIP 28/08/2023 07:51:16 p. m.



Trend: Power Factor, PQZIP 28/08/2023 07:51:16 p. m.



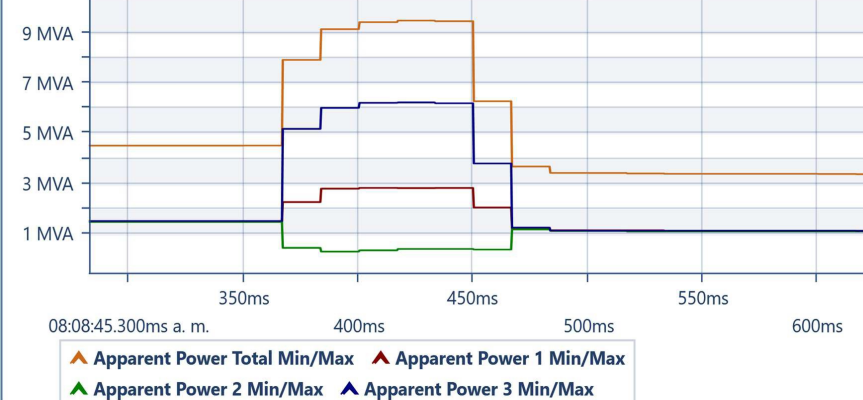
Trend: Active Power, PQZIP 28/08/2023 07:51:16 p. m.



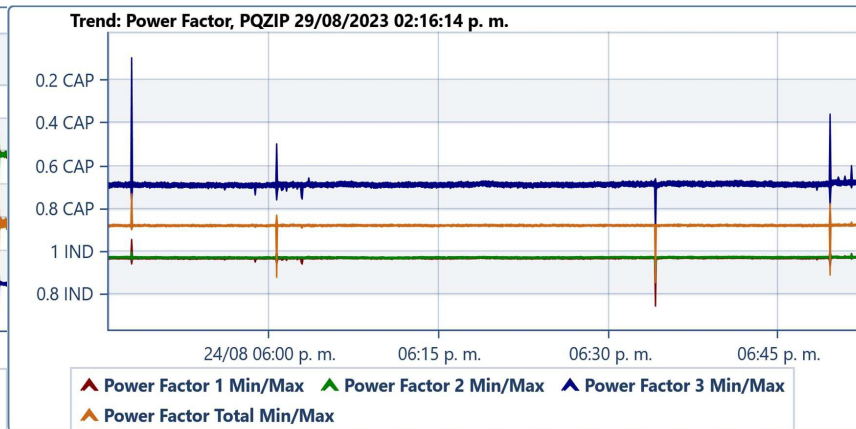
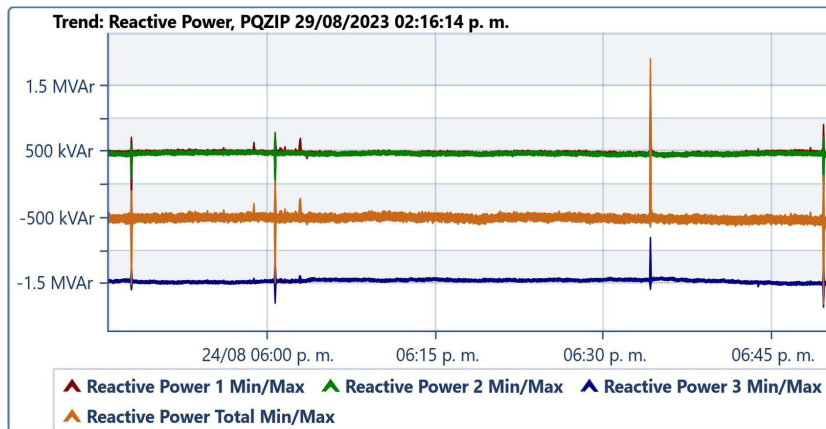
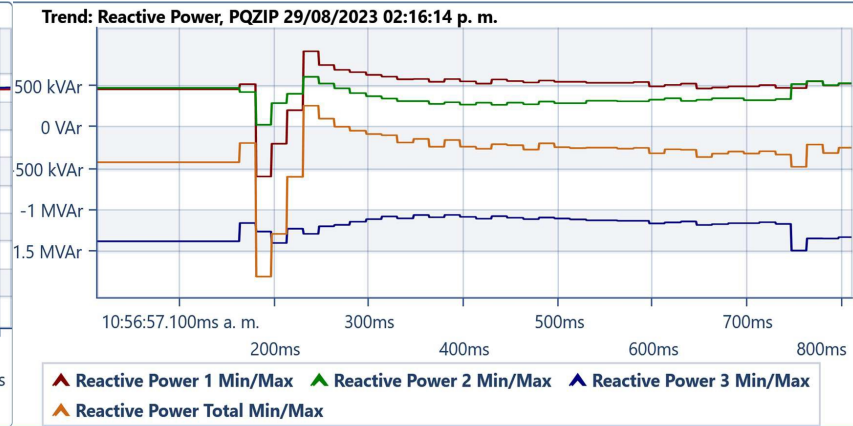
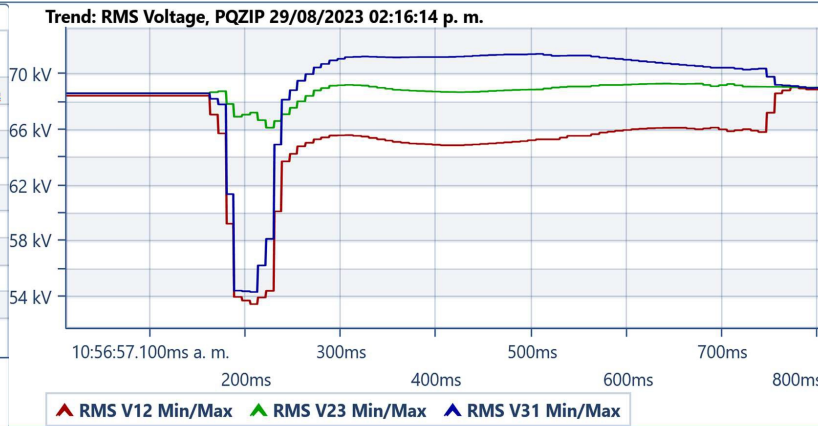
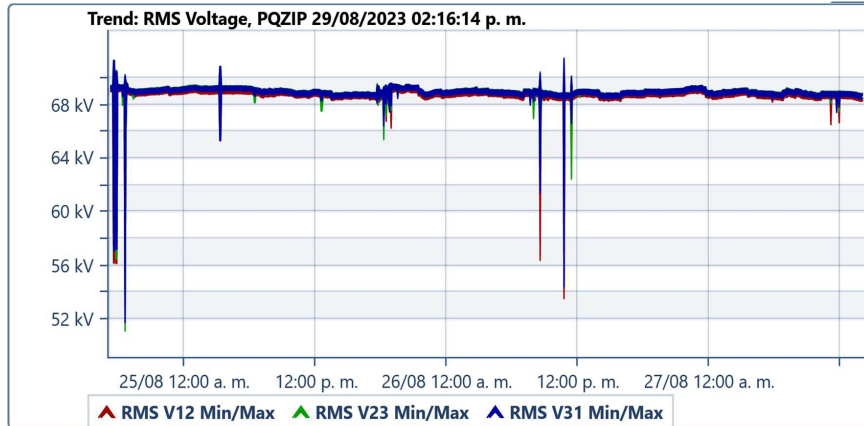
Trend: Reactive Power, PQZIP 28/08/2023 07:51:16 p. m.



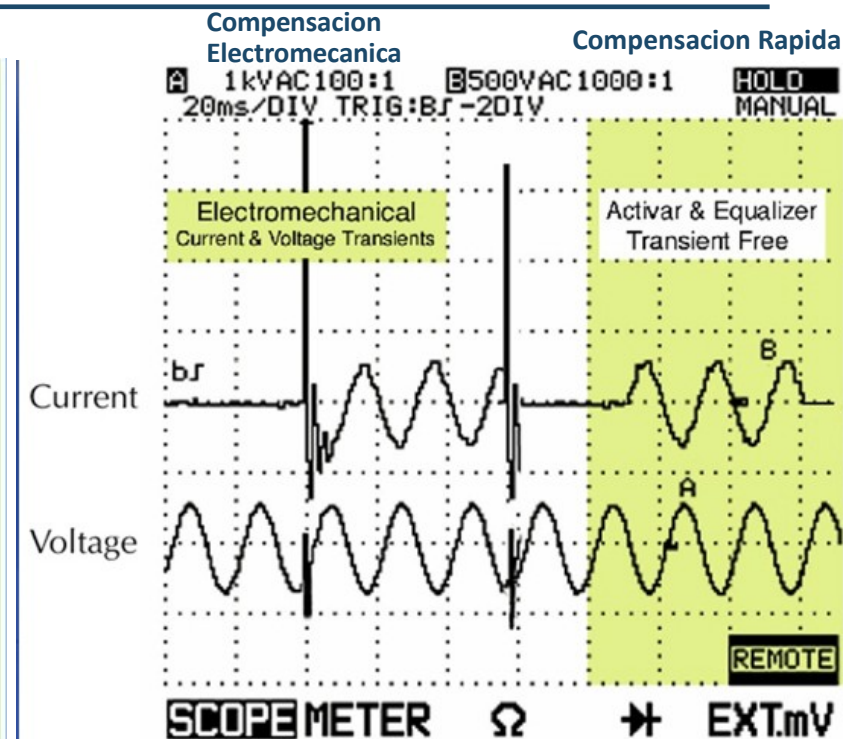
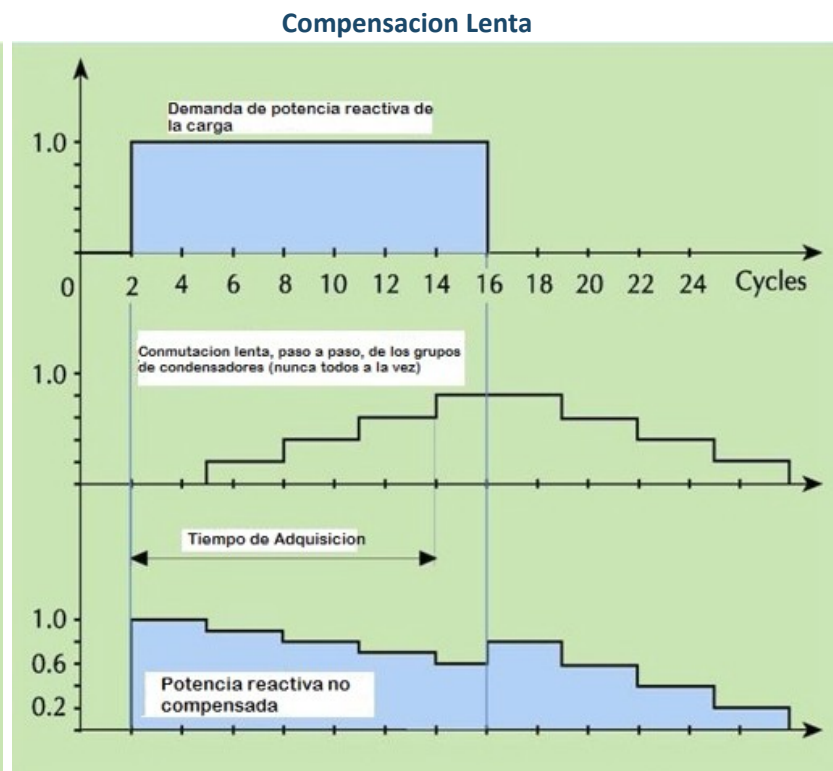
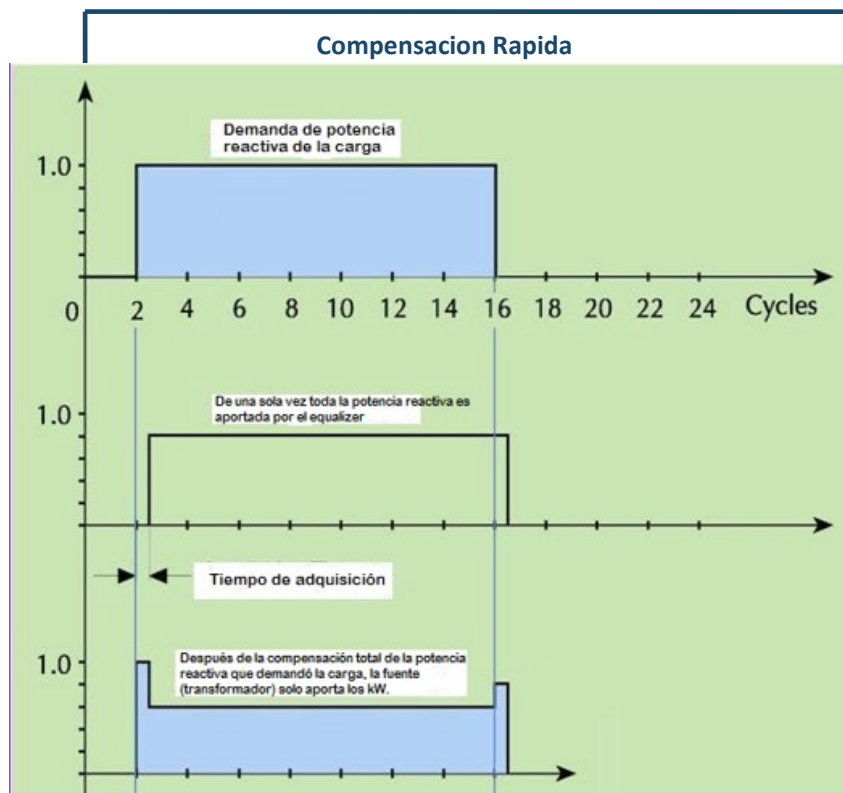
Trend: Apparent Power, PQZIP 28/08/2023 07:51:16 p. m.



MEDICIONES ELECTRICAS EN UNA SUBESTACION 69 KV CON UN SVC EN LA LINEA TRONCAL DE 69 KV



TIEMPO DE ADQUISICIÓN



- Compensacion Total en tiempo Real en menos de 1 Ciclo de Onda.
- Conmutacion de Estado Solido Sin Transitorios.
- Estabilizacion de Fluctuaciones de Voltaje.
- Reduccion de Caidas de Tension y Parpadeos.
- Eficiencia Energetica.

POTENCIA INSTALADA (MVA) Y CANTIDAD DE TRANSFORMADORES DE CADA UNA DE LAS EDES

#	Utility	Estimated Installed load	Estimated	Total Transformers	Quantity of transformers per MVA								
		MVA	Mvar	XXX/XXX Kv	0.5	1.5	3	5	10	14	20	28	40
1	EDE-Norte	1,369.51	416.96	75	1	2	5	14	3	17	8	9	16
2	EDE-Sur	1,638.30	456.00	80		5	8	14	3	16	5	8	21
3	EDE-Este	1,264.00	393.42	68	2	2	10	7	4	10	5	11	17
	Totals:	4,271.81	1,266.38	223	3	9	23	35	10	43	18	28	54

POTENCIA REACTIVA REQUERIDA (MVar) POR TRANSFORMADOR DE CADA UNA DE LAS EDES

TOTAL MVar	Utility	Quantity of ELSPEC per MVar								Totals	
		0.462	1.20	2.00	3.00	4.50	6.00	8.00	10.00		14.00
548.36	EDE-Norte	1	2	5	14	3	17	8	9	16	75
587.50	EDE-Sur		5	8	14	3	16	5	8	21	80
510.32	EDE-Este	2	2	10	7	4	10	5	11	17	68
1,646.19	Totals:	3	9	23	35	10	43	18	28	54	223

NIVEL DE VOLTAJE DE CADA BANCO DE COMPENSACION DE CADA UNA DE LAS EDES

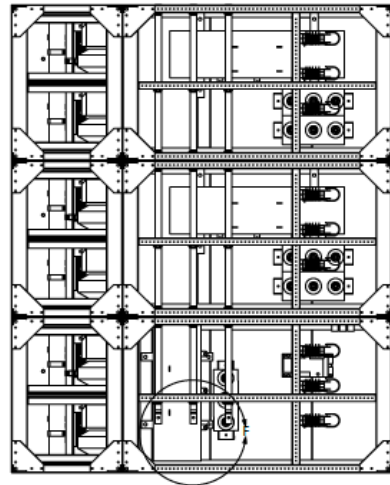
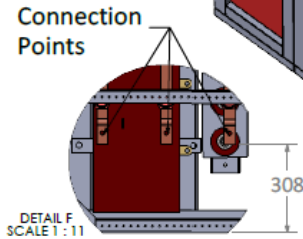
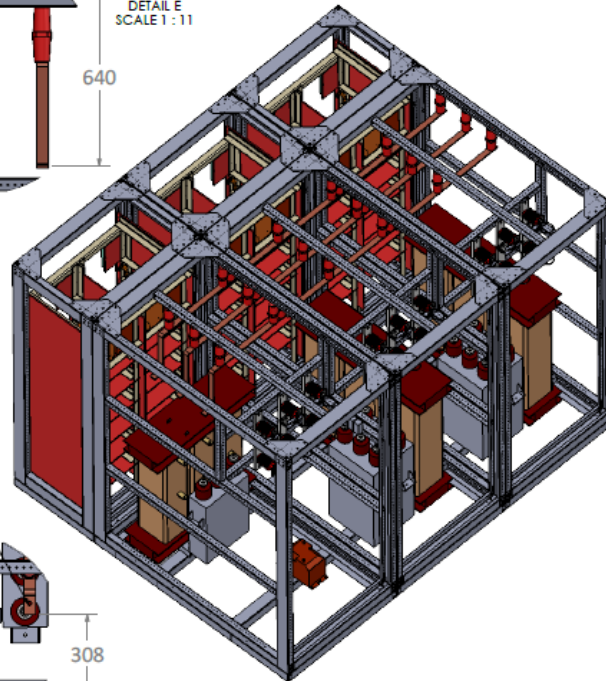
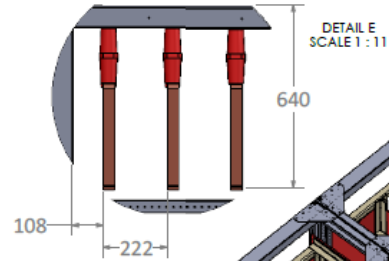
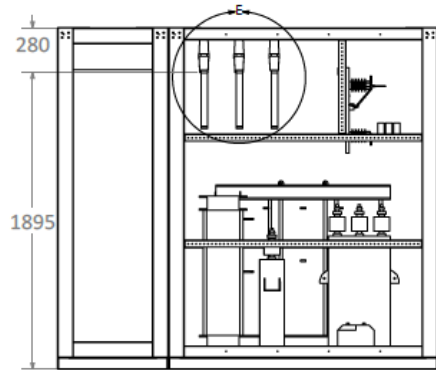
Qty. Mvar	kV									Totals	
	0.48	2.4	4.16	7.2	12.47	13.8	21	34.5	Totals		
0.462	0	0	0	2	1	0	0	0	3	With Step-up Tr	
1.20	1	1	0	0	7	0	0	0	8		
2.00	4	0	3	1	14	1	0	0	19		
3.00	0	0	3	0	30	1	0	1	35		
Totals:		1	6	3	52	2	0	1	65		65
											480V Systems
Total:	5									5	
4.50	0	0	0	1	8	0	0	1	10	Elspec MV	
6.00	0	0	3	0	37	0	0	3	43		
8.00	0	0	1	0	17	0	0	0	18		
10.00	0	0	1	0	24	0	0	3	28		
14.00	0	0	1	0	50	0	2	1	54		
Totals:		0	6	1	136	0	2	8	153	153	
Grand Total:	5	1	12	4	188	2	2	9	223	223	

TAMAÑO DE GRUPO DE 1.2KV - 36KV PARA VÁLVULA DE 250AMP

Detuned 7%, 14%, 50Hz/60Hz						
Operation Voltage (LN)	LL voltage	Connection	Current	Power (total) Half group	Power (total) One group	12 Groups
LN 0.7KV	1.2KV	Y	250A	259kVAr	518kVAr	6.2MVA
LN 1.39KV	2.4KV	Y	250A	519kVAr	1038kVAr	12.5MVA
LN 1.91KV	3.3KV	Y	250A	714kVAr	1428kVAr	17.1MVA
LN 2.4KV	4.16KV	Y	250A	900kVAr	1800kVAr	21.6MVA
LN 3.81KV	6.6KV	Y	250A	1428kVAr	2855kVAr	34.3MVA
LN 5.77KV	10.0KV	Y	250A	2161kVAr	4323kVAr	51.9MVA
LN 7.97KV	13.8KV	Y	250A	2985kVAr	5970kVAr	71.6MVA
LN 12.7KV	22.0KV	Y	250A	4756kVAr	9513kVAr	114.2MVA
LN 19.0KV	33.0KV	Y	250A	7134kVAr	14268kVAr	171.2MVA
LN 20.8KV	36.0KV	Y	250A	8490kVAr	16980kVAr	203.8MVA

*En caso de que se requiera mayor potencia, se puede duplicar la potencia máxima conectando 2 grupos en paralelo.

DISEÑO PARA INDOOR



Cable entry



Front view

DISEÑO PARA OUTDOOR

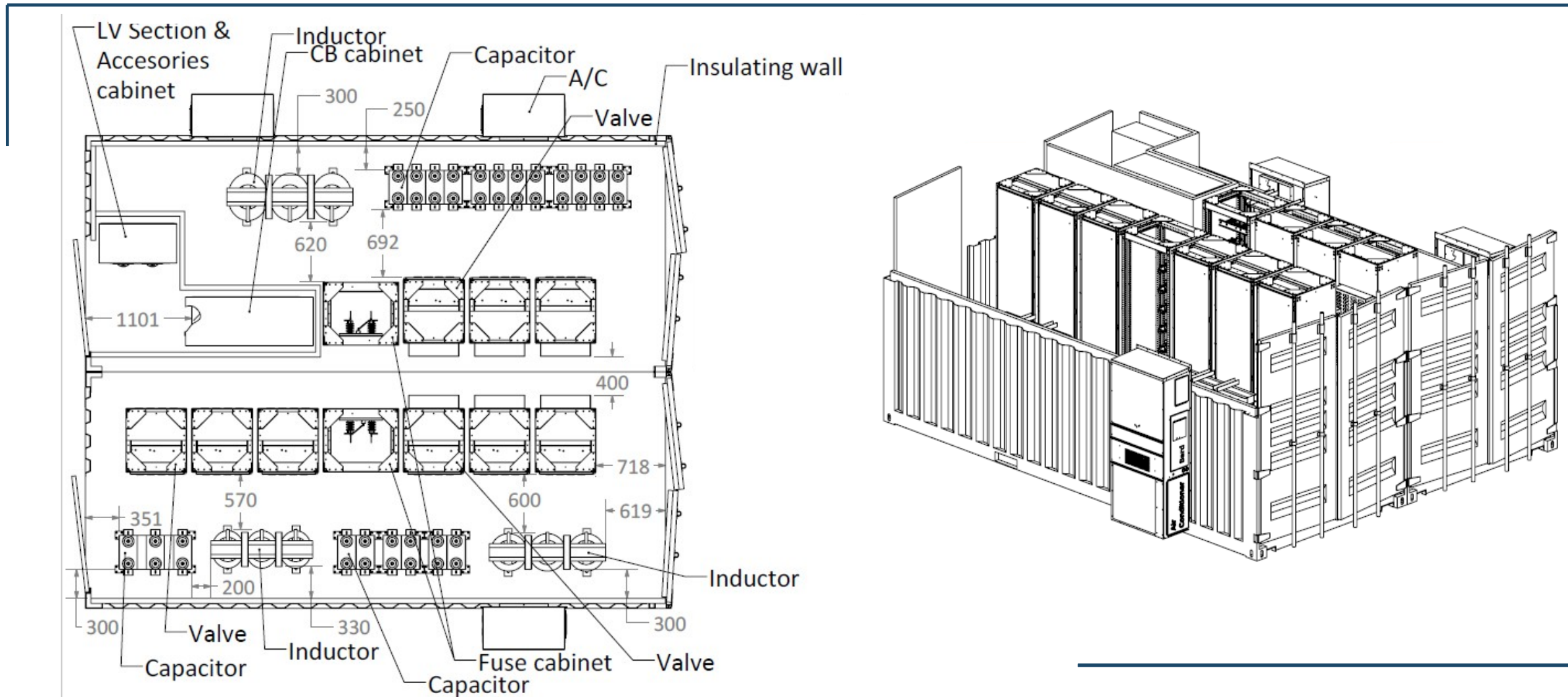
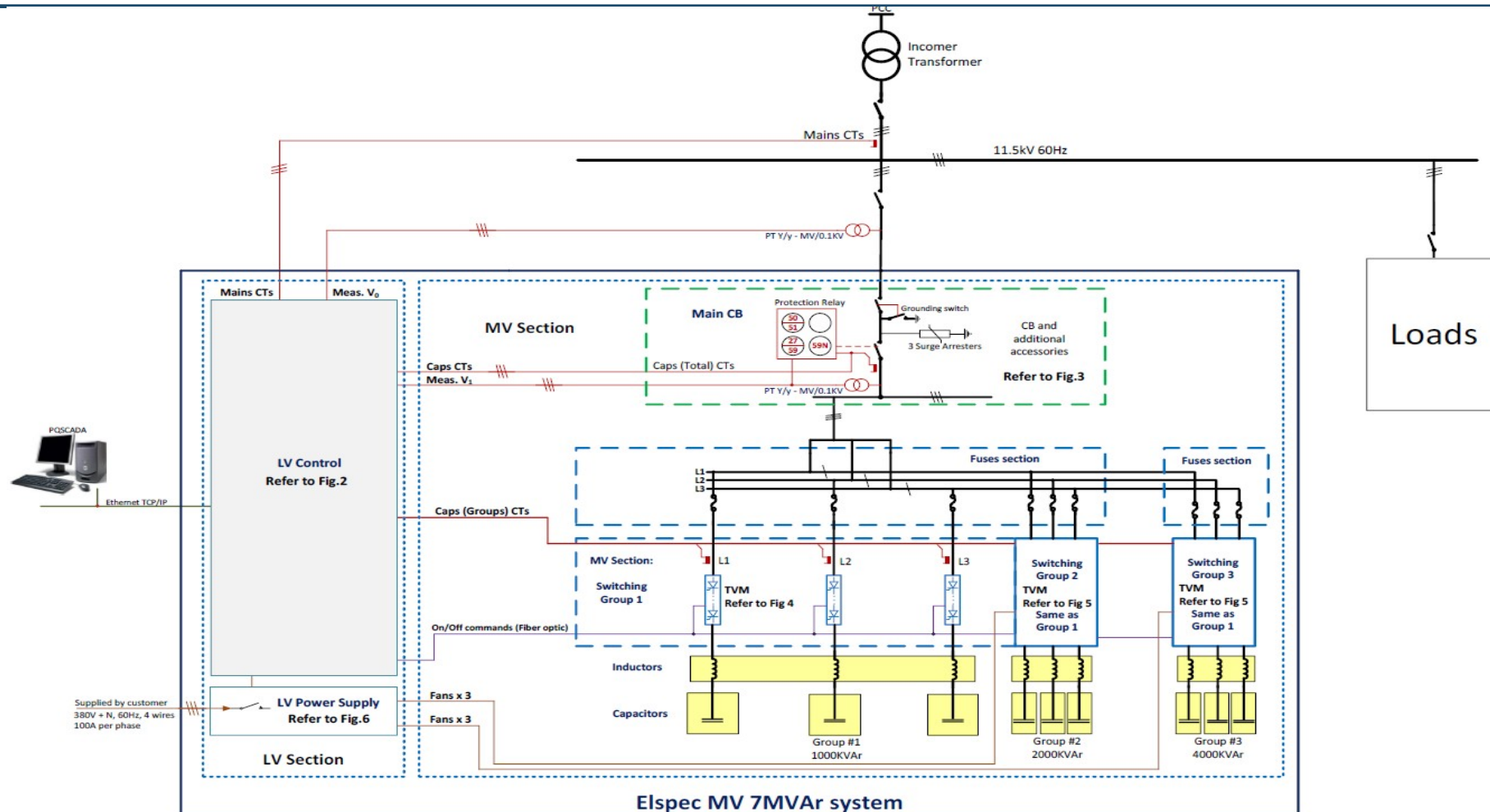


DIAGRAMA DE BLOQUES GENERAL



SECCIÓN DE CONTROL Y PROTECCIÓN DE BT



EQUALIZER Y OTRAS TECNOLOGÍAS

	EQUALIZER	IGBT (STATCOM)	SVC
Compensación Total en Tiempo Real en Menos de 1 Ciclo	✓	Up to 5 Cycles	✓
Pérdidas del Sistema	< 0.4%	3% - 5%	< 3%
Conmutación Sin Transitorios	✓	✓	
Estabilización de las Fluctuaciones de Voltaje	✓	✓	
Compensación de Caídas de Voltaje	✓	✓	
Reducción de Parpadeos del Voltaje	✓	✓	
Filtración de Armónicos	✓	✓	✓
Integrado con Analizador de Calidad de Energía Clase A con Programa de Autoprueba	✓	✓	

Monitoreo Ciclo a Ciclo de un año de Red, Carga y Capacitores.

Se medirán los siguientes canales L1-L3:

- 3 canales de tensión para la red. (DFR 1)
- 3 canales de corriente para la red (DFR 1)
- 3 canales de corriente para el total de condensadores. (DFR 1)

El registro de un año ciclo a ciclo (en todos los canales anteriores) permitirá identificar la fuente de falla en caso de que ocurra en los capacitores (sistema Equalizer MV), carga o red eléctrica.

Un año Ciclo a Ciclo Monitoreo de Grupo de Capacitores y Protección I²t

Protección I²t

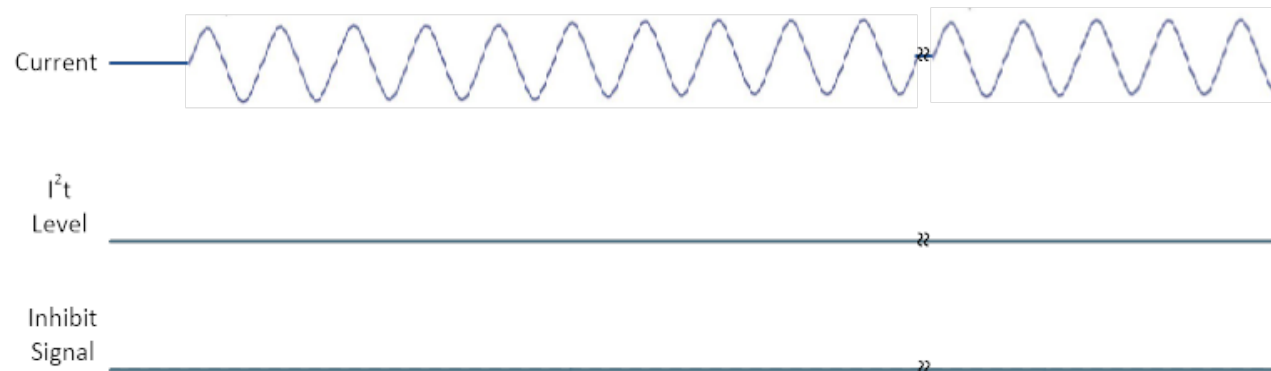
Este programa medirá el nivel de I²t y si supera un valor umbral, el grupo se conectará a un tiempo determinado. Después de este retraso el grupo se volverá a conectar.

En caso de que la falla desaparezca y el nivel I²t vuelva a la normalidad, el grupo funcionará continuamente.

En caso de que el I²t supere nuevamente el umbral, el grupo se desactivará permanentemente y se emitirá un mensaje de error que se enviará al operador.

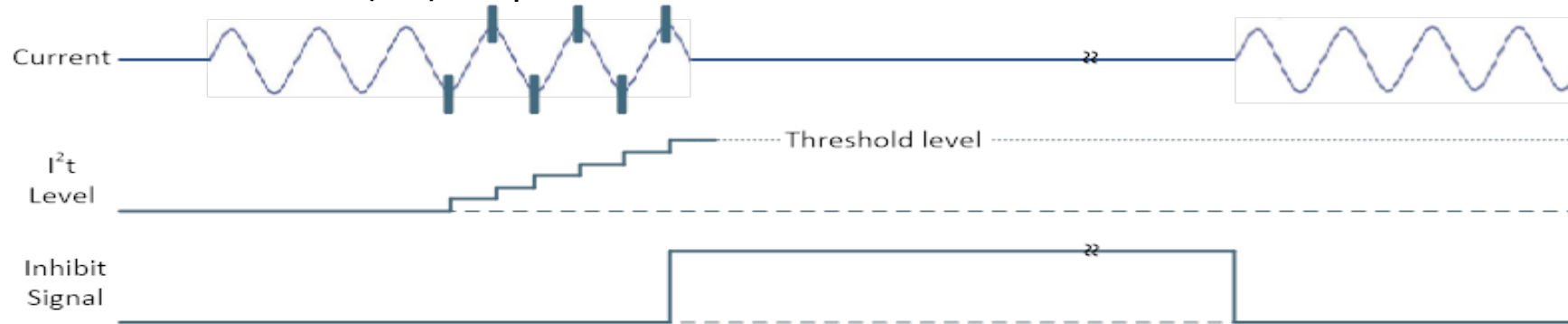
El algoritmo de protección de la función I²t se demuestra a continuación, en 3 modos de operación diferentes:

1. Corriente funcional (OK)

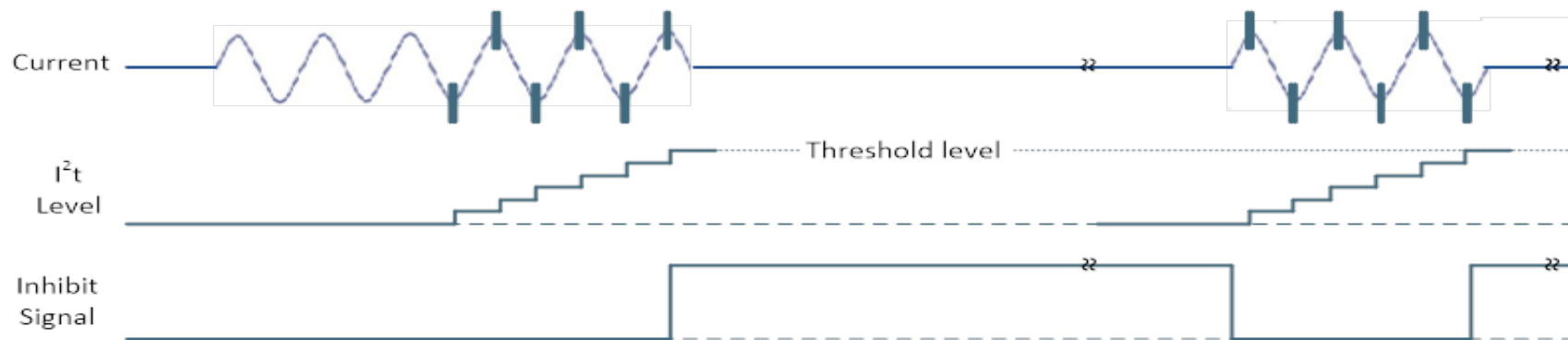


Un año ciclo a ciclo Monitoreo de grupo de capacitores y Protección I²t

2. Corriente funcional (OK) después de recerrar



3. Corriente con falla después de recerrar



COMPENSANDO LA POTENCIA REACTIVA EN LA CARGA DE LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCION SE OBTIENEN LOS SIGUIENTES BENEFICIOS:

1- EN LAS ÁREAS DE DISTRIBUCIÓN (EDEESTE – EDENORTE - EDESUR):

A) Beneficios Técnicos:

- Reducción de las Perdidas técnicas si compensando la potencia reactiva de los transformadores en tiempo real.
- Libera la sobrecarga a los transformadores de distribución.
- Aumenta la capacidad de potencia activa a los Transformadores de Distribución a nivel Nacional, esto va a disponer de mayor capacidad de los transformadores de entregar Potencia Activa sin tener que construir nuevas infraestructuras.
- Estabiliza el Voltaje a nivel nacional corrigiendo las fluctuaciones en todas las redes.
- Reducción de disparos y salida de servicio en los circuitos eléctricos por la eliminación de las sobre corrientes y sobre temperaturas en transformadores y equipos de distribución.
- Prolongación del tiempo de vida útil de las redes, transformadores y equipos en general.
- Aumenta la confiabilidad y continuidad del servicio eléctrico a nivel nacional.

B) Beneficios Económicos:

- La disponibilidad de Potencia Activa (MW) en los transformadores representa montos muy considerables, adicional al ahorro del costo de inversión que se necesitaría en infraestructura de distribución para disponer de esta potencia.
- Ahorros de montos muy considerables en millones de dólares al año por la reducción de perdidas eléctricas.
- Reducción en costos de mantenimiento, reemplazo de equipos y transformadores.
- Ahorros de millones de dólares en costos de construcción de Subestaciones y líneas de distribución para el incremento de potencia activa en los transformadores a nivel nacional, más el tiempo en construcción de infraestructuras eléctricas.
- Las EDES continuaran cobrando millones de dólares en penalizaciones sin tener que pagar a los Generadores, esto se convierte en ingresos para las Edes.

2- EN EL ÁREA DE TRANSMISIÓN (ETED):

A) Beneficios Técnicos:

- Reducción de las Pérdidas técnicas en las líneas de transmisión.
- Reduce el flujo de potencia reactiva por las líneas de transmisión aumentando con ello la capacidad de transmitir flujo de potencia activa.
- Se estabiliza el Voltaje y reduce las caídas de tensiones corrigiendo con ello las fluctuaciones.
- Reducción de disparos y salida de servicio en los circuitos de las líneas de transmisión.
- Prolongación del tiempo de vida útil de las líneas de transmisión y los equipos ya que al reducir las corrientes se reduce la temperatura.
- Aumenta la estabilidad, confiabilidad y continuidad del servicio a nivel nacional.

B) Beneficios Económicos:

- Reducción de las pérdidas técnicas en las líneas de transmisión y esto se traduce a un ahorro anual muy significativo..
- Reducción al año en costos de mantenimiento, reemplazo de equipos y transformadores.

3- EN LAS ÁREAS DE GENERACIÓN:

A) Beneficios:

- Estabiliza el sistema de generación minimizando las perturbaciones provocadas por la inestabilidad de las cargas eléctricas.
- Reducción de disparos y salida de las plantas de generación.
- Prolongación del tiempo de vida útil de los equipos de las generadoras.
- Los Generadores podrán aumentar su capacidad para generar potencia activa MW.

EXPERIENCIA

Instalaciones



Vestas

**32MVAR Equalizer
System at
Substation**



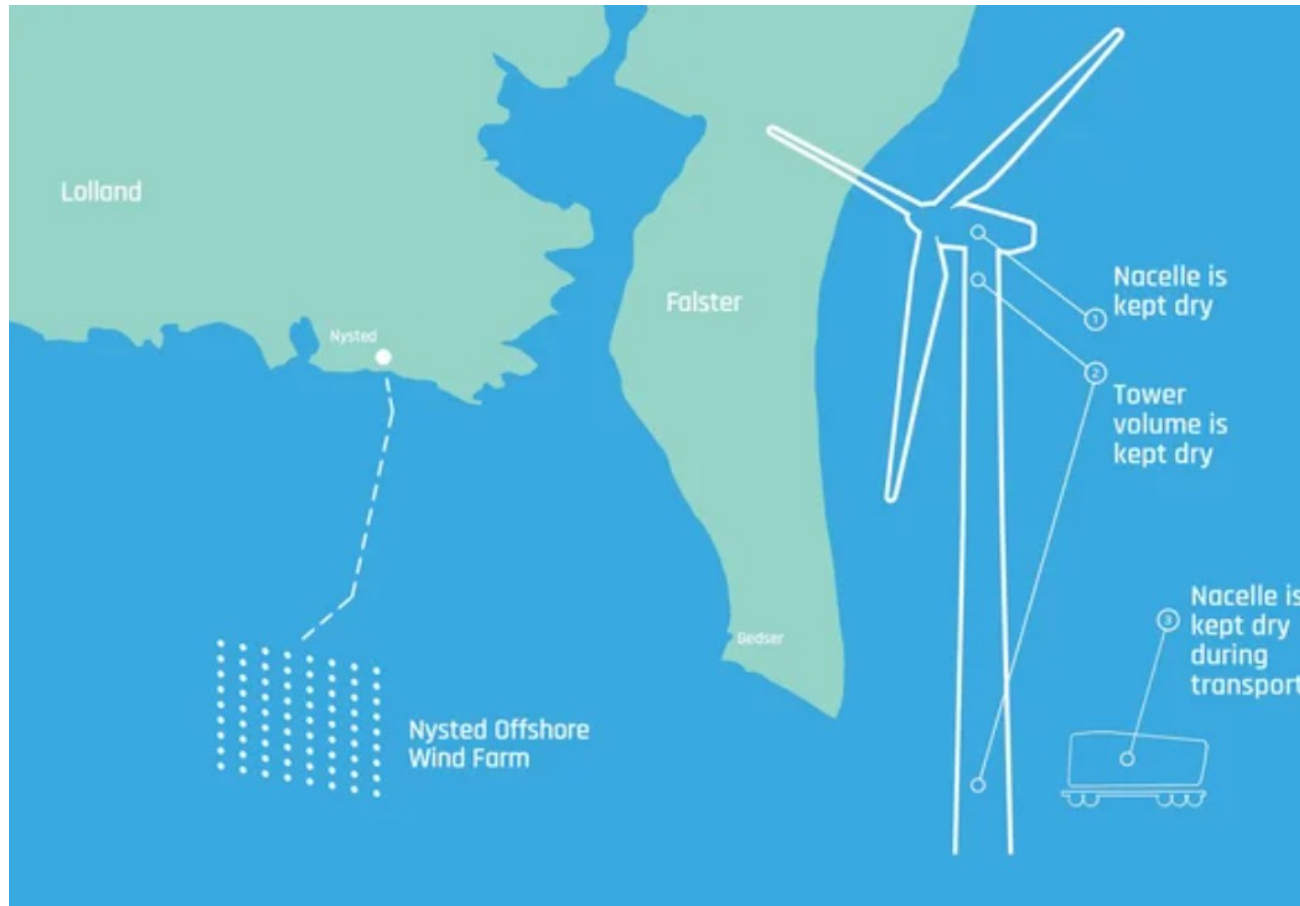


SIEMENS

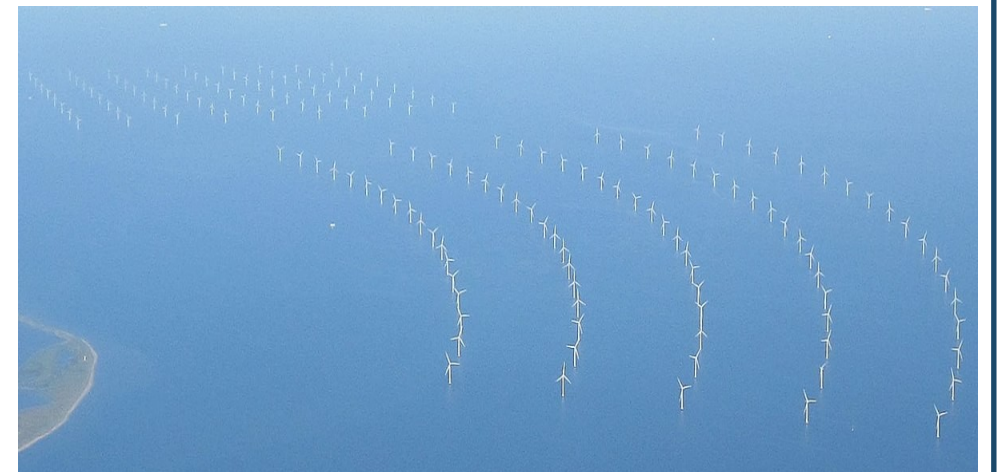
Compensación para Parque
Eolico de 166 MW Elspec
Equalizer,

Total of **100MVar**

Location



SIEMENS



SAMSUNG



SAMSUNG



MEDIUM VOLTAGE EQUALIZER

2 Systems of 7MVA_r in 11.5kV



MEDIUM VOLTAGE EQUALIZER

2 Systems of 7MVA_r in 11.5kV



GRACIAS!



ELSPEC
When Power Meets Quality