

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY

CAMPUS MONTERREY

DIVISIÓN DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA



**Análisis de Disturbios Eléctricos en la Industria
Siderúrgica**

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO
ACADEMICO DE:**

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ENERGÉTICA

ELABORADA POR:

ERICK ALAIN SALAZAR LÓPEZ

MONTERREY, N.L.

DICIEMBRE DE 2009

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY

CAMPUS MONTERREY

DIVISIÓN DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la presente Tesis del Ingeniero Erick Alain Salazar López sea aceptada como requisito parcial para obtener el grado académico de:

Maestro en Ciencias en Ingeniería Energética

Especialidad en Eléctrica

Comité de Tesis:

Dr. Osvaldo M. Micheloud Vernackt
Asesor

Dr. Armando Llamas Terrés
Sinodal

Dr. Federico Angel Viramontes Brown
Sinodal

Aprobado:

Dr. Osvaldo M. Micheloud Vernackt
Director Maestría en Ingeniería Energética

Diciembre, 2009

Agradecimientos

- Al Consorcio para el Fomento de la Investigación y el Desarrollo de la Tecnología en México y sus creadores, los cuales me brindaron la oportunidad de pertenecer a la primera generación de estudiantes becados y así desarrollar este tema de Tesis en conjunto con una empresa.
- A la Empresa Ternium que gracias a su preocupación por el desarrollo de la educación y de la sociedad, formó una alianza con el Tecnológico de Monterrey y otras 4 empresas para consolidar el Consorcio para el Fomento de la Investigación y el Desarrollo de la Tecnología en México.
- Al Centro de Estudios de Energía del Tecnológico de Monterrey por proporcionarme los equipos necesarios para las mediciones efectuadas para esta Tesis, su confianza y experiencia en el tema.
- A mi asesor el Dr. Osvaldo Micheloud por su dirección y paciencia.
- A mi co-asesor en la empresa, el Ing. Alfonso Zerecero por el tiempo que le dedicó a este proyecto a pesar de su agitada agenda y el interés que mostró en el tema.
- A mis compañeros del Consorcio quienes fomentaron un ambiente agradable y un intercambio de ideas que facilitó la culminación de la Tesis.
- A mis padres Miguel y Consuelo que siempre me han apoyado y han hecho posible mi desarrollo profesional.
- A todas aquellas personas que directa e indirectamente me apoyaron en el desarrollo de la Tesis y todas sus actividades.
- Y por último a DIOS quien siempre está en primer lugar y hace todo posible.

Contenido

| | |
|--|----|
| Contenido..... | ii |
| Lista de Figuras..... | vi |
| Lista de Tablas | xi |
| Capítulo 1: Introducción y Objetivo | 1 |
| 1.1 Objetivo..... | 3 |
| 1.2 Motivación | 3 |
| 1.3 Justificación | 3 |
| 1.4 Descripción del Problema | 4 |
| 1.5 Hipótesis | 5 |
| 1.5.1 Hipótesis 1 | 5 |
| 1.5.2 Hipótesis 2 | 6 |
| 1.5.3 Hipótesis 3 | 6 |
| 1.6 Conclusión | 7 |
| Capítulo 2: Calidad de Energía | 8 |
| 2.1 Fundamentos de Energía..... | 8 |
| 2.1.1 Definición de Calidad de Energía | 8 |
| 2.1.2 Fenómenos que dan lugar a una mala Calidad de Energía..... | 9 |
| 2.1.2.1 Transitorios | 9 |
| 2.1.2.2 Transitorios Impulsivos..... | 10 |
| 2.1.2.3 Transitorios Oscilatorios | 10 |
| 2.1.2.4 Variaciones de Voltaje de Corta Duración..... | 11 |
| 2.1.2.5 Variaciones de Voltaje de Larga Duración | 14 |
| 2.1.2.6 Desbalance de Voltaje..... | 15 |
| 2.1.2.7 Distorsión de Forma de Onda | 16 |
| 2.1.3 Medidas Cuantificables..... | 17 |
| 2.2 Monitoreo de Calidad de Energía | 18 |
| 2.3 Importancia de mantener una buena Calidad de Energía..... | 19 |
| Capítulo 3: La Energía en la Industria Siderúrgica..... | 21 |
| 3.1 Introducción al Proceso Siderúrgico | 21 |
| 3.1.1 Minería..... | 21 |
| 3.1.2 Fabricación de Pellas (Peletización) | 22 |

| | |
|---|----|
| 3.1.3 Reducción del mineral de hierro | 22 |
| 3.1.4 Aceración y Solidificación..... | 23 |
| 3.1.4.1 Metalurgia Secundaria | 23 |
| 3.1.4.2 Solidificación | 23 |
| 3.1.4.3 Colada Continua..... | 23 |
| 3.1.4.4 Fusión en Horno Eléctrico de Arco..... | 24 |
| 3.1.5 Laminación | 24 |
| 3.2 Subestación | 25 |
| 3.3 Acería vistazo eléctrico..... | 27 |
| 3.4 Laminación vistazo eléctrico | 32 |
| Capítulo 4: Causas de Disturbios Eléctricos dentro de la Industria Siderúrgica..... | 37 |
| 4.1 Causas de <i>Sags</i> y <i>Swells</i> | 37 |
| 4.2 Causas de Armónicas | 41 |
| 4.3 Causas de Flicker | 50 |
| 4.4 Causas de Muecas de Voltaje..... | 51 |
| 4.5 Horno de Arco Eléctrico como causante de múltiples disturbios | 53 |
| Capítulo 5: Efectos de una mala Calidad de Energía en una Empresa Siderúrgica | 56 |
| 5.1 Efectos en Transformadores..... | 56 |
| 5.1.1 Efectos de calentamiento en los transformadores | 56 |
| 5.1.2 Efecto Piel en transformadores | 56 |
| 5.2 Efectos en Convertidores y Dispositivos Electrónicos | 57 |
| 5.3 Efecto en Motores | 58 |
| 5.3.1 Efecto Piel en Motores | 61 |
| 5.3.2 Efectos de calentamiento en motores y generadores..... | 62 |
| 5.4 Efecto en Capacitores | 65 |
| 5.4.1 Efecto piel en Capacitores..... | 66 |
| 5.5 Efecto en Barras de Distribución (<i>SWITCHGEAR</i>) e Interruptores..... | 66 |
| 5.5.1 Efecto piel en <i>Switchgear</i> | 66 |
| 5.6 Efectos en Dispositivos de Protección | 66 |
| 5.6.1 Fusibles | 66 |
| 5.6.2 Relevadores de protección | 66 |
| 5.7 Efectos en Dispositivos de Medición..... | 67 |

| | |
|---|-----|
| 5.8 Efectos Misceláneos..... | 67 |
| Capítulo 6.- Cómo solucionar los problemas ocasionados por una mala calidad de energía en la industria siderúrgica..... | 71 |
| 6.1 Compensador Estático de Reactivos (SVC) y su aplicación siderúrgica..... | 71 |
| 6.2 Convertidor de Voltaje de alimentación (VSC)..... | 75 |
| 6.3 UPFC | 77 |
| 6.4 Compensadores sincrónicos estáticos (STATCOM) | 79 |
| 6.5 Corrector Dinámico de <i>Sags</i> (DySC)..... | 80 |
| 6.6 Restaurador Dinámico de Voltaje (DVR)..... | 83 |
| 6.7 Soluciones Activas..... | 86 |
| 6.7.1 Correctores de Factor de potencia de alta frecuencia con almacenamiento de energía inductiva..... | 87 |
| 6.7.2 Correctores de factor de potencia de alta frecuencia no aislados con almacenamiento de energía capacitiva..... | 87 |
| 6.7.3 Filtros Activos (AF)..... | 87 |
| 6.8 Soluciones Pasivas | 89 |
| 6.8.1 Rectificador con filtro inductivo | 90 |
| 6.8.2 Rectificador con circuitos sintonizados | 90 |
| 6.8.3 Reactores en Serie..... | 90 |
| 6.8.4 Factor K. | 90 |
| 6.8.5 Compensadores en Serie (SC)..... | 90 |
| Capítulo 7.- Análisis del Fenómeno <i>Sag</i> | 93 |
| 7.1 Acometida 230 kV | 94 |
| 7.1.1 Caracterización del SEP en 230 kV | 101 |
| 7.1.2 Diagramas de Densidad de <i>Sags</i> en 230 kV..... | 103 |
| 7.1.3 Contornos Iso- <i>Sags</i> acumulados para 230 kV | 105 |
| 7.1.4 Caracterización de las Cargas | 107 |
| 7.1.5 Superposición de contornos Iso- <i>Sags</i> con Curvas de Inmunidad de cargas críticas | 110 |
| 7.1.6 Recomendaciones para 230 kV..... | 112 |
| 7.2 Bus de Laminación GR1-6 (13.2 kV)..... | 113 |
| 7.2.1 Caracterización del SEP para el nivel de voltaje de 13.2 kV..... | 115 |
| 7.2.2 Diagramas de Densidad de <i>Sags</i> para 13.2 kV | 116 |
| 7.2.3 Contornos Iso- <i>Sags</i> para 13.2kV | 118 |

| | |
|--|-----|
| 7.2.4 Caracterización de las Cargas | 120 |
| 7.2.5 Superposición de contornos Iso-Sags contra Curvas de Inmunidad | 120 |
| 7.2.6 Resultados y Recomendaciones para 13.2kV | 121 |
| 7.3 Alimentación a <i>Drives</i> (825 y 220 V)..... | 122 |
| 7.3.1 Caracterización del SEP para 220V | 123 |
| 7.3.2 Diagramas de Densidad de Sags en 220V..... | 124 |
| 7.3.3 Contornos Iso-Sags en 220 V..... | 126 |
| 7.3.4 Caracterización de Cargas Críticas para 220V..... | 126 |
| 7.3.5 Superposición de contornos Iso-Sags con Curvas de Inmunidad | 126 |
| 7.3.6 Resultados y Recomendaciones para 220 V | 128 |
| Capítulo 8.- Resumen de Resultados, Recomendaciones y Contribuciones | 129 |
| 8.1 Resultados Obtenidos del Análisis de Sags | 129 |
| 8.2 Contribuciones | 130 |
| 8.3 Recomendaciones para Trabajo Futuros | 131 |
| Anexo A.- Gráficas de Voltaje y Corriente efectivos capturados | 132 |
| Referencias..... | 173 |
| Vita..... | 179 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. 1: Mapa Mental del Tema de Tesis | 4 |
| Figura 1. 2: Modelo Simplificado de un SVC | 5 |
| Figura 1. 3: Topología de un Dysc..... | 6 |
| | |
| Figura 2. 1: Forma de Onda del Voltaje de un Transitorio Impulsivo..... | 10 |
| Figura 2. 2: Diagrama unifilar de un sistema de distribución | 11 |
| Figura 2. 3: Formas de Onda del Voltaje al energizar un Capacitor. A) a 12.5 kV; b) a 480 V | 11 |
| Figura 2. 4: <i>Sag</i> instantáneo de Voltaje causado por una falla de una línea a tierra. | 12 |
| Figura 2. 5: <i>Sag</i> de Voltaje temporal causado por arranque de motores..... | 12 |
| Figura 2. 6: Interrupción momentánea debido a una falla y la liberación posterior [2]. | 14 |
| Figura 2. 7: Captura de Desbalance de Voltaje en un alimentador residencial..... | 16 |
| Figura 2. 8: Forma de Onda y Espectro Armónico de la corriente demandada por un Variador de Frecuencia..... | 17 |
| | |
| Figura 3. 1: Diagrama Unifilar de Subestación..... | 26 |
| Figura 3. 2: Demanda del HAE en coladas normales | 27 |
| Figura 3. 3: Diagrama Eléctrico del HAE..... | 28 |
| Figura 3. 4: Esquema eléctrico del Arco..... | 29 |
| Figura 3. 5: Resistencia entre electrodos y nodo común..... | 29 |
| Figura 3. 6: Esquemático de Laminación..... | 33 |
| Figura 3. 7: Molinos laminadores. | 33 |
| Figura 3. 8: Esquema de control de un motor. | 34 |
| Figura 3. 9: Diagrama eléctrico unifilar Planta Puebla..... | 35 |
| Figura 3. 10: Conexión de motores en laminación | 36 |
| | |
| Figura 4. 1: Duración típica de tiempos de Re-cierre | 39 |
| Figura 4. 2: <i>Sag</i> del Voltaje en el punto del usuario ante un re-cierre. | 40 |
| Figura 4. 3: Corrientes Armónicas típicas de dispositivos comunes [17]..... | 42 |
| Figura 4. 4: Topologías típicas de <i>Drives</i> de motores que utilizan rectificadores controlados por fase de 6 pulsos: a) Drive de motor de CD; b) Drive de CA de inducción con inversor de fuente de corriente; c) Drive de inducción de CA con inversor alimentado por voltaje; d) Drive de inducción de CA con un inversor disparado por PWM [19]. | 42 |
| Figura 4. 5: Corrientes Armónicas calculadas para distintas formas de onda [20]. | 44 |
| Figura 4. 6: Análisis de Espectros de la corriente de un capacitor de 13.8 kV ($f_n=5.24$)..... | 45 |
| Figura 4. 7: Diagrama unifilar del sistema de distribución de la Acometida Athens | 46 |
| Figura 4. 8: Curva de sensibilidad de Flicker muestra límites para fluctuaciones de voltaje como función de su frecuencia de ocurrencia..... | 51 |
| Figura 4. 9: Espectro y forma de onda del Voltaje en un sistema de 25 kV durante la operación de un drive. | 52 |
| Figura 4. 10: Voltaje vs. Frecuencia en un drive de 4.16 kV..... | 52 |

| | |
|--|----|
| Figura 4. 11: Voltaje medido en 34.5 kV despues de la instalación de un transformador con desfase de fases [24]. | 53 |
| Figura 4. 12: Diagrama de operación del Horno de Arco Eléctrico [25]. | 54 |
| Figura 4. 13: Diagrama de operación de un HAE de CD [26], [28]. | 55 |
| Figura 5. 1: Armónicas Triplen [33]. | 57 |
| Figura 5. 2: Líneas de Muecas cruzando el eje x [33]. | 58 |
| Figura 5. 3: Contenido Armónico de una onda de voltaje en particular [34]. | 59 |
| Figura 5. 4: Curva de Deslizamiento del Torque de un motor de inducción [34]. | 59 |
| Figura 5. 5: Resistencia e Inductancia del Rotor contra orden armónico | 60 |
| Figura 5. 6: Resistencia e Inductancia del Rotor contra orden armónico | 60 |
| Figura 5. 7: Resistencia e Inductancia del Rotor contra orden armónico | 61 |
| Figura 5. 8: Corrientes en el rotor (arriba) y voltaje de CD (abajo) ante a) un <i>Sag</i> de voltaje simétrico y b) un <i>Sag</i> de Voltaje asimétrico [37]. | 65 |
| Figura 5. 9: Esquemático de un Rectificador Trifásico. | 69 |
| Figura 6. 1: Sistema trifásico con un SVC conectados al nodo de carga [55]. | 71 |
| Figura 6. 2: Respuestas dinámicas de la simulación con una carga constante desbalanceada. | 72 |
| Figura 6. 3: Respuesta dinámica del ángulo de disparo. | 72 |
| Figura 6. 4: Corrientes en la línea de distribución, a) sin SVC, b) con SVC. | 73 |
| Figura 6. 5: Diagrama unifilar de un sistema de dos nodos con SVC | 74 |
| Figura 6. 6: Respuesta instantánea de la corriente de fase de un HAE sin SVC [57]. | 74 |
| Figura 6. 7: Respuesta instantánea de la corriente de fase de un HAE con SVC para balance de carga [57]. | 75 |
| Figura 6. 8: Respuesta instantánea del voltaje de fase de un HAE sin SVC [57]. | 75 |
| Figura 6. 9: Respuesta instantánea del voltaje de fase de un HAE con SVC [57]. | 75 |
| Figura 6. 10: Diagrama unifilar de un sistema con un VSC en paralelo. | 76 |
| Figura 6. 11: Simulación del Voltaje en PCC durante un <i>Sag</i> del 71%. VSC inactivo [59]. | 76 |
| Figura 6. 12: Simulación del Voltaje trifásico compensado en PCC. Utilizando inyección de potencia reactiva [59]. | 77 |
| Figura 6. 13: Diagrama de un UPFC para HAE [62]. | 78 |
| Figura 6. 14: Compensación armónica en sistema de HAE utilizando UPFC como filtro activo en paralelo [62]. | 79 |
| Figura 6. 15: Mitigación de Flicker utilizando compensación en serie con UPFC [62]. | 79 |
| Figura 6. 16: Diagrama esquemático del STATCOM [65]. | 80 |
| Figura 6. 17: Topología de un DySC monofásico [66]. | 81 |
| Figura 6. 18: Principio de Operación de un DySC [67]. | 82 |
| Figura 6. 19: Gráfica de Eventos donde se muestra el área de protección de un DySC [67]. | 82 |
| Figura 6. 20: Diagrama DVR. | 83 |
| Figura 6. 21: Resultados de simulación para un <i>Sag</i> trifásico balanceado | 83 |
| Figura 6. 22: Resultados de simulación para un <i>Sag</i> monofásico [68] | 84 |
| Figura 6. 23: Sistema de Distribución [69] | 85 |

| | |
|--|-----|
| Figura 6. 24: Efecto de agregar capacitores en las corrientes armónicas en PCC [69]..... | 85 |
| Figura 6. 25: Configuración básica para un banco de capacitores sintonizado para corrección de FP y control de armónicas [69] | 86 |
| Figura 6. 26: a) Componente de séptima armónica de la corriente de carga de la planta como función de ASD con un banco de capacitores sintonizado a 4.7; b) Igual que a) pero con la onceava componente armónica | 86 |
| Figura 6. 27: Corrector tipo <i>boost</i> | 87 |
| Figura 6. 28: Rectificador con filtro inductivo | 90 |
| Figura 6. 29: Modelo de un sistema de potencia; a) Diagrama Esquemático; b) Diagrama unifilar | 91 |
| Figura 6. 30: Mediciones del voltaje en terminales de una carga sensible; a) sin SC; b) con SC..... | 91 |
| Figura 6. 31: Mediciones de voltaje en terminales de EES; a) Sin cambio de fase; b) Con cambio de fase; c) Siguiendo un cambio en la carga de -20% [81]..... | 92 |
| | |
| Figura 7. 1: Metodología propuesta para analizar <i>Sags</i> [82] | 93 |
| Figura 7. 2: Distribución del SEP en la industria siderúrgica evaluada..... | 94 |
| Figura 7. 3: Acercamiento de la variación del V_{rms} de acometida..... | 95 |
| Figura 7. 4: Horario Punta | 95 |
| Figura 7. 5: Evento capturado por Dranetz el 13/10/09 a las 14:39..... | 97 |
| Figura 7. 6: Evento capturado por Dranetz el 14/10/09 a las 09:08..... | 98 |
| Figura 7. 7: Evento capturado por Dranetz el 14/10/09 a las 09:29..... | 99 |
| Figura 7. 8: Evento capturado por Dranetz el 14/10/09 a las 14:30..... | 100 |
| Figura 7. 9: Evento capturado por Dranetz el 15/10/09 a las 02:55..... | 100 |
| Figura 7. 10: Evento capturado por Dranetz el 15/10/09 a las 03:01..... | 101 |
| Figura 7. 11: Densidad de <i>Sags</i> instantáneos en 230 kV | 104 |
| Figura 7. 12: Densidad de <i>Sags</i> Momentáneos en 230 kV | 104 |
| Figura 7. 13: Densidad de <i>Sags</i> Temporales en 230 kV | 105 |
| Figura 7. 14: Ejemplo de Contornos Iso- <i>Sags</i> | 106 |
| Figura 7. 15: Diagrama de Contornos Iso- <i>Sags</i> para 230 kV | 107 |
| Figura 7. 16: Curvas de Tolerancia de <i>Sags</i> de Voltaje para PLC's..... | 108 |
| Figura 7. 17: Curvas de Inmunidad de <i>Sags</i> de Voltaje para tarjetas de entradas digitales de PLC (DI PLC Card)..... | 108 |
| Figura 7. 18: Curvas de Inmunidad de <i>Sags</i> de Voltaje para <i>Drives</i> variadores de velocidad (ASD)..... | 108 |
| Figura 7. 19: Curvas de Inmunidad de <i>Sags</i> de Voltaje para Relevadores de CA..... | 109 |
| Figura 7. 20: Curvas de Inmunidad de <i>Sags</i> de Voltaje para bobinas de arrancadores de motores..... | 109 |
| Figura 7. 21: Curvas de Inmunidad de <i>Sags</i> de Voltaje para Computadoras Personales..... | 109 |
| Figura 7. 22: Curva SEMI F47 de <i>Sags</i> [84]..... | 110 |
| Figura 7. 23: Superposición de contornos Iso- <i>Sags</i> en 230 kV con curva SEMI F47 | 111 |
| Figura 7. 24: Superposición entre diagramas de contornos Iso- <i>Sags</i> en 230 kV contra curvas de inmunidad de cargas críticas | 112 |
| Figura 7. 25: Ocurrencia de <i>Sags</i> Instantáneos..... | 116 |
| Figura 7. 26: Ocurrencia de <i>Sags</i> Momentáneos..... | 117 |
| Figura 7. 27: Ocurrencia de <i>Sags</i> Temporales..... | 117 |

| | |
|--|-----|
| Figura 7. 28: Caracterización del SEP considerando <i>Sags</i> desde 95% de magnitud. | 118 |
| Figura 7. 29: Caracterización del SEP considerando <i>Sags</i> desde el 90% de magnitud. | 119 |
| Figura 7. 30: Diagrama de Contornos Iso- <i>Sags</i> del SEP de esta industria Siderúrgica en particular. | 119 |
| Figura 7. 31: Comparación de la caracterización de la SEP contra la curva SEMI F47..... | 120 |
| Figura 7. 32: Comparación de curvas de cargas críticas contra contornos Iso- <i>Sags</i> | 121 |
| Figura 7. 33: Densidad de <i>Sags</i> instantáneos en 220V | 125 |
| Figura 7. 34: Densidad de <i>Sags</i> momentáneos en 220V | 125 |
| Figura 7. 35: Contornos Iso- <i>Sags</i> para 220V | 126 |
| Figura 7. 36: Superposición de diagrama de contornos en 220V contra la curva SEMI F47 | 127 |
| Figura 7. 37: Superposición de diagrama de contornos en 220V contra curvas de inmunidad de cargas críticas..... | 127 |
| | |
| Anexo A. 1: Historial de Voltaje obtenido por ION | 132 |
| Anexo A. 2: Historial de Voltaje obtenido por ION | 132 |
| Anexo A. 3: Historial de Voltaje obtenido por ION | 133 |
| Anexo A. 4: Gráfica Estadística de Eventos obtenidos por ION | 133 |
| Anexo A. 5: Historial de Vab obtenido por Fluke 06/Abril..... | 134 |
| Anexo A. 6: Historial de Vbc obtenido por Fluke 06/Abril..... | 134 |
| Anexo A. 7: Historial de Vca obtenido por Fluke 06/Abril..... | 135 |
| Anexo A. 8: Gráfica estadística de eventos obtenidos por Fluke 06/Abril | 135 |
| Anexo A. 9: Historial de Vab obtenida por Fluke 06/Abril..... | 136 |
| Anexo A. 10: Historial de Vbc obtenido por Fluke 06/Abril..... | 136 |
| Anexo A. 11: Historial de Vca obtenido por Fluke 06/Abril..... | 137 |
| Anexo A. 12: Gráfica estadística de eventos obtenidos por Fluke 06/Abril | 137 |
| Anexo A. 13: Historial de Vab obtenido por Fluke 06-11/Abril | 138 |
| Anexo A. 14: Historial de Vbc obtenido por Fluke 06-11/Abril | 138 |
| Anexo A. 15: Historial de Vca obtenido por Fluke 06-11/Abril..... | 139 |
| Anexo A. 16: Gráfica Estadística de eventos obtenidos por Fluke 06-11/Abril..... | 139 |
| Anexo A. 17: Historial de Vab obtenido por Fluke 11-21/Abril | 140 |
| Anexo A. 18: Historial de Vbc obtenido por Fluke 11-21/Abril | 140 |
| Anexo A. 19: Historial de Vca obtenido por Fluke 11-21/Abril..... | 141 |
| Anexo A. 20: Gráfica estadística de eventos obtenidos por Fluke 11-23/Abril..... | 141 |
| Anexo A. 21: Historial de Vab obtenido por Fluke 23/Abril..... | 142 |
| Anexo A. 22: Historial de Vbc obtenido por Fluke 23/Abril..... | 142 |
| Anexo A. 23: Historial de Vca obtenido por Fluke 23/Abril..... | 143 |
| Anexo A. 24: Historial de Vab obtenido por ION 05-07/Mayo | 144 |
| Anexo A. 25: Historial de Vbc obtenido por ION 05-07/Mayo | 144 |
| Anexo A. 26: Historial de Vca obtenido por ION 05-07/Mayo..... | 144 |
| Anexo A. 27: Historial de Vab obtenido por ION 05-18/Mayo | 145 |
| Anexo A. 28: Historial de Vbc obtenido por ION 05-18/Mayo | 146 |
| Anexo A. 29: Historial de Vca obtenido por ION 05-18/Mayo..... | 147 |
| Anexo A. 30: Historial de Vab obtenido por ION 15-31/Mayo | 148 |

| | |
|--|-----|
| Anexo A. 31: Historial de Vbc obtenido por ION 15-31/Mayo | 149 |
| Anexo A. 32: Historial de Vca obtenido por ION 15-31/Mayo..... | 150 |
| Anexo A. 33: Historial de Vab obtenido por ION 01-30/Junio | 151 |
| Anexo A. 34: Historial de Vbc obtenido por ION 01-30/Junio | 152 |
| Anexo A. 35: Historial de Vca obtenido por ION 01-30/Junio | 153 |
| Anexo A. 36: Historial de Vab obtenido por ION 01-03/Julio | 154 |
| Anexo A. 37: Historial de Vbc obtenido por ION 01-03/Julio | 155 |
| Anexo A. 38: Historial de Vca obtenido por ION 01-03/Julio | 156 |
| Anexo A. 39: Historial de Vab obtenido por ION 03-21/Julio..... | 157 |
| Anexo A. 40: Historial de Vca obtenido por ION 03-21/Julio | 158 |
| Anexo A. 41: Historial de VLL obtenido por ION 11-29/Sept..... | 159 |
| Anexo A. 42: Historial de Vab obtenido por Fluke 06-11/Abril | 160 |
| Anexo A. 43: Historial de Vbc obtenido por Fluke 06-11/Abril | 160 |
| Anexo A. 44: Historial de Vca obtenido por Fluke 06-11/Abril..... | 161 |
| Anexo A. 45: Historial de Vab obtenido por Fluke 11-23/Abril | 161 |
| Anexo A. 46: Historial de Vbc obtenido por Fluke 11-23/Abril | 162 |
| Anexo A. 47: Historial de Vca obtenido por Fluke 11-23/Abril..... | 162 |
| Anexo A. 48: Gráfica estadística de eventos obtenidos por Fluke 11-23/Abril..... | 163 |
| Anexo A. 49: Historial de Vab obtenido por ION 11-31/Agosto | 164 |
| Anexo A. 50: Historial de Vbc obtenido por ION 11-31/Agosto | 165 |
| Anexo A. 51: Historial de Vca obtenido por ION 11-31/Agosto | 166 |
| Anexo A. 52: Historial de Vab obtenido por ION 01-11/Sept..... | 167 |
| Anexo A. 53: Historial de Vbc obtenido por ION 01-11/Sept..... | 168 |
| Anexo A. 54: Historial de Vca obtenido por ION 01-11/Sept..... | 169 |
| Anexo A. 55: Historial de Vab obtenido por ION 11-30/Sept..... | 170 |
| Anexo A. 56: Historial de Vbc obtenido por ION 11-30/Sept..... | 171 |
| Anexo A. 57: Historial de Vca obtenido por ION 11-30/Sep..... | 172 |

Lista de Tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. 1: Principales Fenómenos causantes de Disturbios Electromagnéticos | 9 |
| Tabla 2. 1: Analizadores de Calidad de Energía disponibles en el mercado [7], [8], [9]..... | 20 |
| Tabla 4. 1: Magnitudes de Voltaje durante los distintos tipos de Falla, en el punto de origen de la falla y en puntos en propagación a través de transformadores [10]. | 37 |
| Tabla 4. 2: Causas de Sags en Sistemas de Distribución | 38 |
| Tabla 4. 3: Voltajes Secundarios del Transformador (pu) ante fallas tipo SLTG [11] | 40 |
| Tabla 4. 4: Capacitores controlados en la Acometida Athens | 46 |
| Tabla 4. 5: Capacitores en la Subestación..... | 47 |
| Tabla 4. 6: Configuraciones de los capacitores que resultaron en la mayor THD en el sistema. | 47 |
| Tabla 4. 7: Niveles de distorsión armónica en el Sistema de Distribución North Athens para el caso 1a..... | 47 |
| Tabla 4. 8: Niveles de distorsión armónica en el Sistema de Distribución North Athens para el caso 1b | 48 |
| Tabla 4. 9: Niveles de distorsión armónica en el Sistema de Distribución North Athens para el caso 1c..... | 48 |
| Tabla 4. 10: Resumen de niveles transitorios de voltaje para distintas configuraciones de conexiones de capacitores en la subestación North Athens | 49 |
| Tabla 4. 11: Límites de Distorsión de Voltaje según IEEE-519 [19], [22]..... | 50 |
| Tabla 4. 12: IEEE-519 Límites Máximos de Distorsión Armónica de Corriente (% componentes impares) para sistemas de distribución en general [19] | 50 |
| Tabla 4. 13: IEEE-519 Límites Máximos de Distorsión Armónica de Corriente (% componentes impares) para sistemas de subtransmisión en general [19] | 50 |
| Tabla 4. 14: IEEE-519 Límites Máximos de distorsión Armónica de Corriente (% componentes impares) para sistemas de alto voltaje y co-generación y generación dispersa [19]..... | 50 |
| Tabla 4. 15: Resumen de Resultados de Flicker en 230 kV [23]..... | 51 |
| Tabla 4. 16: Voltajes Armónicos típicos durante fundición y refinación en un HAE [26]..... | 54 |
| Tabla 5. 1: Rotación y Deslizamiento contra Armónicas | 60 |
| Tabla 5.2: Valores de Corriente en el Estator y Pérdidas por Armónicas calculados y aproximados. | 61 |
| Tabla 5. 3: Dirección de la Rotación de la componente armónica [36]. | 63 |
| Tabla 5. 4: Análisis armónico de Corrientes [36]. | 63 |
| Tabla 5. 5: Corrientes armónicas de distintas formas de onda..... | 64 |
| Tabla 5. 6: Desempeño a Carga Completa..... | 64 |
| Tabla 6. 1: Resultados de las pruebas con y sin SVC | 73 |
| Tabla 6. 2: Capacidad de protección para varios equipos para corrección de potencia [66]. | 81 |
| Tabla 6. 3: Capacidad de Protección para varios equipos de protección | 82 |
| Tabla 6. 4: Selección de FA para aplicaciones específicas. Configuración preferible con mayor cantidad de asteriscos..... | 88 |

Tabla 6. 5: Corrientes Armónicas, THD de corriente y Factor de Armónica para varios tipos de *Drives* Variadores de Frecuencia [77]. 89

Tabla 7. 1: Lista de eventos anormales en acometida (*Eventos que hace falta correlacionar con acontecimientos anormales en la planta) 96

Tabla 7. 2: Presentación de Eventos según la metodología de la IEEE 102

Tabla 7. 3: Lista de eventos anormales en bus GR1-6 (*Eventos que hace falta correlacionar con acontecimientos anormales en la planta) 114

Tabla 7. 4: Lista de *Sags* capturados..... 115

Tabla 7. 5: Listado de Eventos anormales en bus de alimentación al Drive 122

Tabla 7. 6: Eventos capturados en 220V presentados de acuerdo a la metodología de la IEEE..... 124

Capítulo 1: Introducción y Objetivo

Actualmente el mundo esta exigiendo una alta eficiencia en toda actividad que afecte de manera directa o indirecta al medio ambiente, siendo este un tema de mucha importancia, y no tanto en tema de contaminación sino en uso de recursos. Pues nos hemos percatado, tal vez no demasiado tarde, que la población mundial es cada día mayor y ha llegado a ser demasiada, y que los recursos de los cuales disponemos en este planeta no son infinitos.

Los sistemas eléctricos requieren de una demanda de energía limpia, para que así ésta sea utilizada eficientemente; además una energía limpia no producirá daños en equipos ni problemas derivados. Ligado a este tema, que se podría nombrar como “Economía de los recursos naturales”, ha surgido el famoso concepto “Calidad de Energía”, el cual será analizado a fondo en este documento para que así el lector entienda todas sus implicaciones.

Hoy en día la energía eléctrica utilizada en procesos de manufactura, procesos industriales e inclusive en el hogar es inmensa, día con día surgen nuevos usuarios en la red a los cuales se les debe de entregar la energía necesaria para realizar sus actividades. Las redes eléctricas que se encargan de distribuir esta energía deben crecer también eventualmente para dar abasto a la creciente demanda. Generar la energía eléctrica no es cosa sencilla, se necesita de toda una tecnología bien desarrollada para transformar la energía presente en la naturaleza (en forma geotérmica, hidráulica, eólica, solar, nuclear u otra), finalmente en energía eléctrica que pueda ser transportada y utilizada.

Es importante comprender que no toda la energía adquirida de la naturaleza se transforma en energía eléctrica, existen pérdidas de diversos tipos los cuales disminuyen la eficiencia de la transformación. Una planta hidroeléctrica por ejemplo, transforma la energía potencial y cinética del agua en energía eléctrica, pero para esto necesita del cauce del río mas una turbina hidráulica y un generador; y es aquí donde las eficiencias de estas máquinas influyen en la eficiencia total de transformación de la central. Es importante visualizar también que los recursos naturales presentes en nuestro planeta son finitos y es importante su inteligente utilización; los ríos se contaminan, los cauces de éstos pierden su fuerza, y habría que averiguar que le sucederá a las corrientes de aire al ser aprovechadas para mover aerogeneradores. Si la energía no se crea ni se destruye, entonces esta energía cinética presente en la velocidad del aire tendría que disminuir al ser transformada en energía que da el movimiento a las aspas de aerogeneradores.

Otro aspecto a considerar es la importancia y presencia que tiene, y seguirá teniendo, la energía eléctrica en el mundo. A pesar que se han descubierto otras tecnologías para extraer energía del planeta (las energías alternas), la mayoría terminan transformando esa energía en energía eléctrica. Dado que no importa de dónde se extraiga la energía primaria, o qué forma tenga ésta de inicio, al final del proceso la mayor parte de esta energía se convertirá en energía eléctrica, que es la energía que alimenta y mueve a nuestra sociedad.

A efectos de controlar la cantidad de energía que se suministra y el uso que se le da a ésta, se ha generado el concepto “Calidad de Energía”, el cual es un término utilizado para referirse al estándar de calidad que debe tener el suministro de corriente alterna en las instalaciones eléctricas. Sus definiciones son varias y se describirán mas adelante.

La energía Eléctrica ha estado presente en nuestra sociedad desde que James Joule definió que la electricidad es una forma de energía, y años después George Westinghouse logró instalar la primera planta de generación eléctrica comercial, con lo cual comenzó la era de dependencia de la energía eléctrica la cual continua hasta la actualidad.

Con la creciente tecnología han aparecido también dispositivos que, al mismo tiempo que ayudan a un control más eficiente de procesos y máquinas, su mismo principio de funcionamiento afecta a la energía que le alimenta; estos dispositivos llevan el nombre de cargas no lineales. Ejemplos de estos son controladores de motores, compensadores de reactivos (SVC), rectificadores, reactores, hornos de arco eléctrico (HAE), entre otros [1]. Las cargas no lineales tienen como característica principal el hecho de distorsionar, de alguna forma, la llamada “calidad de energía eléctrica”, y de ahí se deriva su nombre.

El propósito de la presente tesis es estudiar distintos fenómenos que alteran la calidad de energía, principalmente *Sags*, *Swells* y distorsión armónica, de qué manera afectan estos disturbios a procesos tales como la industria siderúrgica y qué soluciones son las más adecuadas para evitar problemas causados por la presencia de éstos.

En el capítulo primero se presenta el objetivo de la realización de la presente tesis y la importancia que se espera tendrá para la industria.

En el capítulo segundo se presenta toda aquella información relevante que rodea el término calidad de energía, definiciones de los fenómenos, algunos parámetros necesarios para medir y cuantificar, y como monitorear estos fenómenos.

El capítulo tercero introduce la industria siderúrgica al presente documento, pero sin profundizar en detalle dentro del abismo que es este tema. Se muestra la industria siderúrgica solamente en los procesos importantes para este estudio.

El capítulo cuarto muestra a detalles las causas que pueden llegar a producir disturbios eléctricos que den como resultado una mala calidad de energía. Este capítulo es importante porque trata de concientizar al usuario de que es sumamente sencillo deteriorar la calidad de la red eléctrica sin darnos cuenta, y muchas veces buscando mejoras para nuestros procesos.

En el quinto capítulo se presentan los efectos debidos a los disturbios eléctricos que se tratan en el capítulo cuarto. Es importante el conocimiento de éstos, pues son debidos a ellos que industrias como la Siderúrgica tiene disminución de productividad, como se demostrará más adelante en este documento.

En el capítulo sexto se muestra una lista de soluciones que contrarrestan los problemas de calidad de energía más importantes. Se explica sencillamente el funcionamiento de algunos de estos dispositivos y se enlistan también sus ventajas y desventajas.

Por ultimo en el capítulo séptimo se presenta un resumen de los resultados experimentales y un análisis de los *Sags*, donde se demuestra el porqué es importante estar protegidos contra los disturbios eléctricos de esta índole, y finalmente se listan propuestas para estudios futuros.

1.1 Objetivo

Investigar el estado del arte del tema transitorios eléctricos en la industria siderúrgica, tecnologías para combatir los efectos negativos, y llevar adelante una campaña de medición para determinar las amenazas de la planta Puebla y otras plantas de la empresa en el futuro. Las siguientes son actividades específicas que deben realizarse para llevar a cabo el objetivo descrito:

- Identificar puntos clave para capturar *Sags* de voltaje dentro de la planta.
- Obtener un periodo de captura mensual de eventos de *Sags*.
- Caracterizar el sistema eléctrico de potencia (SEP) de la planta de acuerdo a la metodología presentada en el estándar 1346 de la IEEE.
- Realizar la caracterización para distintos niveles de voltaje claves.
- Identificar las cargas críticas en la planta
- Hacer una comparación de cada caracterización de los tres niveles de voltaje contra las cargas críticas para conocer su afectación ante el fenómeno.
- Proponer recomendaciones para estudios futuros.

1.2 Motivación

El mundo actual es bastante competitivo, en el cual se exigen altos estándares de calidad y producción para mantenerse presente en el mercado. La industria siderúrgica no es la excepción; agregado a esto, Ternium tiene como visión llegar a ser la empresa siderúrgica con mayor presencia en América, y para lo cual necesitará de proyectos de mejora que la coloquen en un lugar mas destacado en comparación con el resto de las siderurgias del mundo, al mismo tiempo que necesita una buena conservación y mantenimiento de sus plantas actuales para que trabajen bajo altas normas de calidad. Ésta es una visión a largo plazo y la cual involucra infinidad de acciones y toma de decisiones correctas. De inicio Ternium ha apostado a la alianza entre empresa y universidad para que así se pueda acelerar el desarrollo tecnológico en la empresa y brindarle la competitividad que necesita, al mismo tiempo que se desarrolla la sociedad misma. Debido a ésto se van sumando distintos proyectos de investigación con el fin de implementar mejoras en los procesos en las distintas plantas de Ternium; una de ellas es la de Largos Puebla donde predominan problemas en los trenes de laminación que se atribuyen a una mala calidad de energía.

1.3 Justificación

Como se mencionó anteriormente, Ternium es una empresa que busca crecimiento y presencia, debido a esto se ha aliado con el Tecnológico de Monterrey para promover la investigación en áreas de interés mutuo. Se espera que tales desarrollos impulsen las tecnologías y los procesos utilizados en la

empresa y que mejoren la calidad de sus productos y sus eficiencias. Estas metas buscadas por la empresa coinciden con el propósito de la presente tesis, y es de esta manera que se justifica lo que aquí se presenta.

1.4 Descripción del Problema

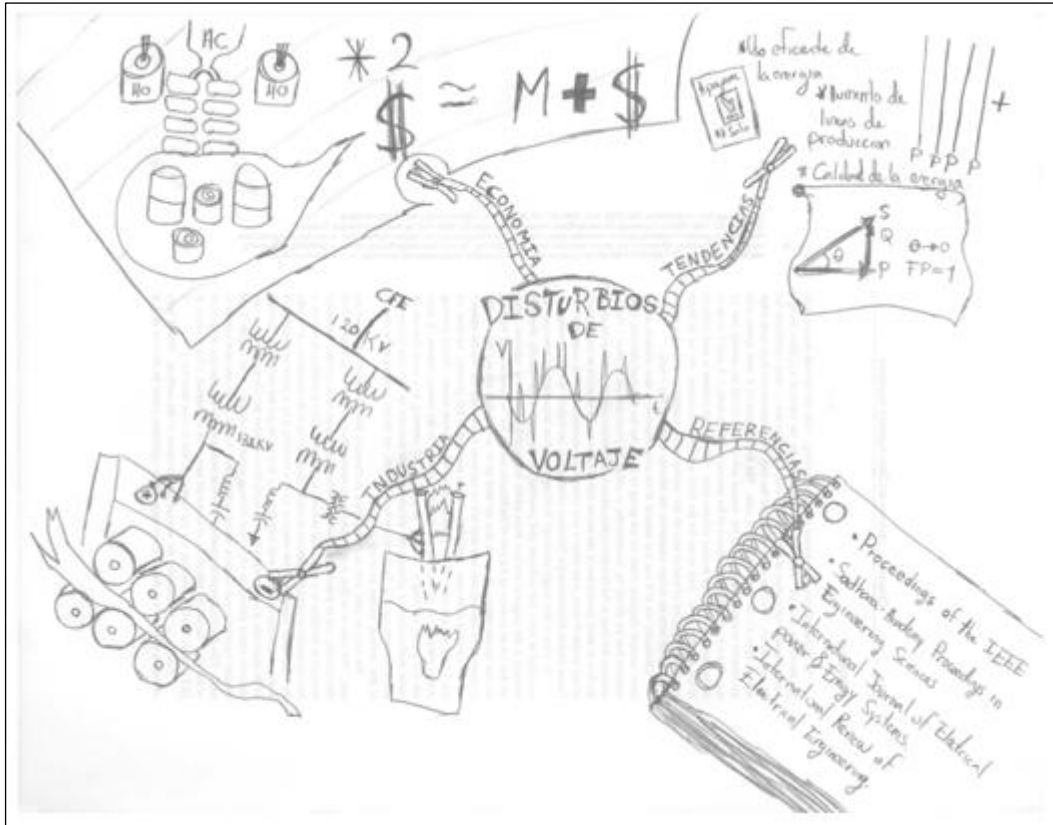


Figura 1. 1: Mapa Mental del Tema de Tesis

La Figura 1. 1 es un mapa mental que muestra en términos generales los subtemas y el alcance que este proyecto de Tesis abarca. En el centro de éste se encuentra el Tema principal de la Tesis, y a su vez la variable de control a disminuir. Los subtemas más importantes que abarca la Tesis son el sector económico, las tendencias actuales y la industria.

En el sector industrial es donde está el problema raíz y sus implicaciones más directas, pues la calidad de la energía eléctrica se ve afectada debido al equipo que se necesita tener operando dentro de la planta para su producción, la potencia que demanda el proceso, el horno eléctrico y los molinos de laminación. La contaminación de la energía genera fallas en los equipos más sensibles los cuales producen defectos en el producto terminado. Dentro de la industria siderúrgica, los equipos más sensibles son los controladores de los motores, mejor conocidos como *drives*; convirtiendo de esta manera el área de laminación en la más delicada en toda la planta.

Entonces la presencia de mala calidad de energía ocasionada por la misma planta, u obtenida del exterior, repercutirá en el área de laminación. Esto por supuesto ocasiona fallas de calidad en el producto además de paros no programados por roturas o atorones en los procesos de laminación. Todo esto da como resultado disminución en la producción anual lo que se traduce en costos.

El no poder demandar suficiente potencia de sus equipos hace que la producción no sea la óptima, esto sucede con el Horno Eléctrico de Arco por ejemplo, lo que ocasiona una menor producción y como consecuencia menores ganancias y pérdidas de mercado. Agregado a esto, se teme que un crecimiento en la planta sin haber solucionado los problemas actuales pueda aumentar la eventualidad de estos, lo que ocasionaría más pérdidas económicas que las ganancias esperadas por la misma ampliación. Pues una segunda línea de laminación, por ejemplo, demandará más potencia y también distorsionará más la red eléctrica, lo que puede ocasionar trabas en la producción si no se atiende el problema con cuidado. Por lo tanto es importante entender la causa raíz para así poder reducir sus efectos negativos.

Por las cuestiones mencionadas previamente se puede observar la importancia de este tema energético, sin mencionar las tendencias actuales de la energía. Agregado a esto, cada vez son más las normas que obligan a las empresas a cumplir con un factor de potencia cercano al unitario y utilizar eficientemente su energía; pues la situación energética mundial ya es un tema de cuidado, y las empresas latinoamericanas no pueden esperarse hasta que se les audite, como a las europeas, para tomar cartas en el asunto.

1.5 Hipótesis

Al principio de este estudio se realizó un recorrido por la planta, observándola y entrevistando al personal con el fin de poder generar algunas ideas, las cuáles pudieran ser la causa de los problemas bajo estudio, esto es atorones de los molinos o fallas en la calidad del producto. El resultado de tal experimentación se resume en los siguientes tres enunciados.

1.5.1 Hipótesis 1

“La distorsión armónica generada por el funcionamiento del Horno de Arco Eléctrico es la causa del cambio de velocidad no programado en los *drives* de laminación”.

Debido al fenómeno caótico que es el arco eléctrico en el interior de un Horno de Arco Eléctrico (HAE), se ha demostrado que durante las etapas de perforación y fundición se genera un contenido armónico que se propaga hacia el resto de la red eléctrica, se cree que al haber altas demandas de potencia en el horno (100 MVA aproximadamente) estas corrientes armónicas generadas repercutirán en las cargas mas débiles de la planta, siendo ésta el área de laminación.

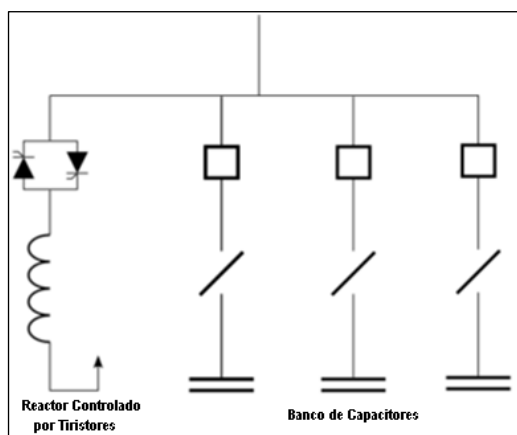


Figura 1. 2: Modelo Simplificado de un SVC

Se prevé que el problema pueda ser solucionado agregando un *Static Var Compensator* (SVC) en paralelo con el Horno de Arco Eléctrico y asegurándose que los filtros de armónicas ya presentes se encuentren trabajando correctamente, limpiando de esta manera la energía en la red.

Un SVC se puede describir como un banco de capacitores en conjunto con un controlador a tiristores. Dependiendo del ángulo de desfase entre el voltaje y la corriente en un sistema de potencia, éste se encarga de regular el desfase de tal forma que se tienda a llevarlos a trabajar en fase. Los tiristores se controlan electrónicamente, y por lo tanto es necesario un pequeño controlador que le mande la señal de disparo para activar y desactivar el SVC siempre que sea necesario.

1.5.2 Hipótesis 2

“La presencia eventual de distorsiones en el voltaje tales como *Sags*, *Swells* o interrupciones es la causa de la variación de la velocidad de los *drives* y por ende de los atrones”.

Será preciso identificar el origen de estos disturbios, puesto que pueden ser internos o externos. De ser internos se planea buscar una solución a estos, lo que implicará identificar el o los dispositivos causantes de estos *Sags* y modificarlos o cambiarlos para eliminar la producción de *Sags*. De ser externos será necesario proteger a los *Drives* para que la aparición de éstos no sea un problema. Es posible que la implementación de DySC's (*Dynamic Sag Corrector*) sea la solución.

El DySC es un dispositivo electrónico que se encarga de aportar el voltaje que hace falta a la red cuando se presenta un *Sag*. Debido a su configuración no necesita de la ayuda de baterías, lo que lo reduce en tamaño, a su vez esta diseñado para proteger solo a *Sags* hasta cierto valor en pu's, ignorando al resto, lo que reduce los costos. Se dice que es una solución estadísticamente eficiente, más adelante se profundizará un poco más en los dispositivos que contrarrestan disturbios eléctricos. En la Figura 1. 3 se muestra la topología del circuito de un DySC.

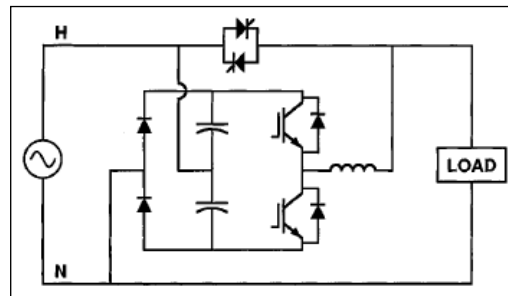


Figura 1. 3: Topología de un DySC

1.5.3 Hipótesis 3

“La causa de las variaciones en la velocidad de los motores se debe a que a algún *drive* le llegó una señal de velocidad equivocada”

Se cree que en la comunicación de sincronismo entre los distintos *drives* existe interferencia electromagnética que modifica la señal, lo que provoca que el motor o motores modifiquen su velocidad por la presencia de disturbios o interferencias. Si esta es la causa del problema será necesario modificar el cableado de comunicación, el cual seguramente no cumple con los estándares actuales o ya esta muy deteriorado.

1.6 Conclusión

La operación del Horno de Arco es casi permanente pero los disturbios que causan atorones son esporádicos por lo que, a primera vista, no parecería ser ésta la causa. Sin embargo es necesario medir para estar seguro que esta hipótesis puede descartarse.

Para que fenómenos electromagnéticos tengan efectos negativos de manera eventual sobre otros conductores se necesita la presencia de fenómenos transitorios que induzcan en los cables de señal/control tensiones que luego se traduzcan en los *drives* en ajustes de velocidad no deseados.

Los *Sags*, *Swells* e Interrupciones se caracterizan precisamente por ser eventuales, la causa de estos es muy variada y puede ser de origen interno o externo a la planta. Debido a esto es muy posible que cada vez que se presente un fenómeno de estos en la red, el área de laminación salga perjudicada. Elegir la hipótesis 2 como comienzo de estudio es lo más conveniente.

El tema “Calidad de Energía” es común para las tres hipótesis, y direccionar la tesis hacia el estudio general de este tema ayudará a comprender exactamente de qué manera está involucrada la calidad de energía con la ocurrencia de problemas similares.

Capítulo 2: Calidad de Energía

Como se comentó en el capítulo anterior, el tema en común de las tres hipótesis que se manejan en el presente estudio es la “calidad de energía”. En este capítulo se definirá este tema y se mencionaran los aspectos más importantes del mismo.

2.1 Fundamentos de Energía

Debido a la creciente presencia de equipos que cuentan con electrónica de potencia y cargas no lineales en la red eléctrica, se ha convertido en un tema de importancia el mantener una energía eléctrica limpia, pero sin perder las ventajas que la electrónica de potencia brinda. Organizaciones tales como la IEEE y la IEC han definido nuevos términos para cuantificar, cualificar y clasificar la contaminación de la red. Es de suma importancia para el lector estar familiarizado con la estandarización de estos términos, pues serán muy utilizados en el presente trabajo.

2.1.1 Definición de Calidad de Energía

Calidad de energía eléctrica es un término de mucha importancia para la industria de generación de energía, y por lo tanto requiere de continua atención por parte de la generación misma y de los grandes usuarios. En años recientes esta cuestión se ha hecho más crítica, debido al incremento en el número de cargas sensibles a disturbios de potencia. Tomando en cuenta que es la presencia de estas mismas cargas la causa de la degradación de la calidad de la energía, no es posible hablar de una limpieza de la red eléctrica solo dejando de utilizar estos equipos. A esta clase de equipos que hoy en día utilizan electrónica de potencia, conmutación por medio de semiconductores y rectificación, se les denomina como cargas no lineales; es difícil imaginarse un usuario que no cuente con al menos uno de estos dispositivos. Debido al alta presencia de estos equipos la red eléctrica esta muy contaminada, y es necesaria una limpieza para que usuarios y generación puedan seguir disfrutando de los beneficios de la electricidad sin problemas graves para ambos. Dado esto, la meta para las compañías de suministro de energía es proporcionar energía de buena calidad, mientras que para los usuarios es mantenerla, dentro de lo posible, en buena calidad.

Un problema de calidad de energía es cualquier acontecimiento eléctrico manifestado en voltaje, corriente o desviación de frecuencia que resulte en fallas o mal funcionamientos de equipos del lado de los consumidores.

Según el estándar 1159 de la IEEE, se define la calidad de energía como la Normalización del Suministro Eléctrico mediante reglas que fijan los niveles, parámetros básicos, forma de onda, armónicos, niveles de distorsión armónica, interrupciones, etc [2].

Es importante visualizar la importancia de este tema, pues el tener una mala calidad de energía afecta a los dispositivos que se encuentren en la red. Tal es el caso de muchos dispositivos electrónicos, como las computadoras, controladores de proceso y equipo de comunicación, que son sensibles a disturbios en sistemas de potencia.

2.1.2 Fenómenos que dan lugar a una mala Calidad de Energía

Un disturbio eléctrico es cualquier fenómeno que altere la forma del voltaje o corriente, o el desfaseamiento en el ángulo de estas señales. Los disturbios se pueden presentar en distintas formas, sin embargo los más comunes en un sistema de potencia son los siguientes:

- Sags de Voltaje
- Swells de Voltaje
- Interrupciones momentáneas
- Transitorios
- Desbalance de Voltaje
- Armónicos
- Fluctuaciones de Voltaje

En la Tabla 1. 1 se muestra la clasificación según la IEC de estos disturbios, esta tabla la presenta el estándar 1159 de la IEEE. En ella se encuentran enlistados todos los disturbios eléctricos que se pueden presentar, aunque la presencia de tan solo uno de ellos ya contamina la red y se puede decir que la calidad de energía eléctrica no es buena.

Tabla 1. 1: Principales Fenómenos causantes de Disturbios Electromagnéticos

| | |
|--|---|
| Fenómenos de Conducción de baja frecuencia | Armónicas, Interarmónicas |
| | Fluctuaciones de Voltaje |
| | Disminuciones de Voltaje e Interrupciones |
| | Desbalance de Voltaje |
| | Variaciones de Frecuencia |
| | Voltajes inducidos de baja frecuencia |
| | CD en redes de CA |
| Fenómenos de Radiación de baja frecuencia | Campos Magnéticos |
| | Campos Eléctricos |
| Fenómenos de Conducción de alta frecuencia | Formas de Onda de Voltaje o Corriente Inducidas |
| | Transitorios unidireccionales |
| | Transitorios oscilatorios |
| Fenómenos de Radiación de alta frecuencia | Campos Magnéticos |
| | Campos Eléctricos |
| | Campos Electromagnéticos |
| | Ondas continuas |
| | Transitorios |

A continuación se explicará de manera breve las definiciones y características principales de los disturbios que tiene más importancia para la industria siderúrgica.

2.1.2.1 Transitorios

El término Transitorio se origina de la teoría de circuitos eléctricos, donde denota las componentes de voltaje y corriente que ocurren durante la transición de un estado estable a otro estado estable

(típicamente senoidal). Los circuitos eléctricos son descritos por ecuaciones diferenciales, cuyas soluciones son la suma de la solución homogénea de la ecuación y una solución particular. La solución particular corresponde con el estado estable, la solución homogénea corresponde con el estado transitorio. En la teoría de circuitos eléctricos, un transitorio es siempre asociado con un cambio en el estado estable debido a una acción perturbadora.

En sistemas de potencia el término transitorio es utilizado un poco diferente: denota aquellos fenómenos de voltaje y corriente de corta duración. No existe un límite claro, pero los fenómenos con duraciones menores a un ciclo (de la frecuencia nominal del sistema, 50 o 60Hz) son generalmente referidos como transitorios. Los transitorios son vistos actualmente como un problema de calidad de energía [3]. Los transitorios en sistemas de potencia pueden ser clasificados debido a su forma de onda en transitorios oscilatorios o transitorios impulsivos.

2.1.2.2 Transitorios Impulsivos

Un transitorio impulsivo es un cambio repentino en el estado estable del voltaje, corriente o ambas, es además de polaridad unidireccional. Los transitorios impulsivos son caracterizados normalmente por sus tiempos de crecimiento y decrecimiento. Esta clase de transitorios son amortiguados rápidamente debido a elementos resistivos en los circuitos y no se propagan más allá del lugar donde se generan.

El ejemplo más común de un transitorio impulsivo es un rayo. En la Figura 2. 1 se muestra cómo el voltaje se ve afectado ante la presencia de un rayo.

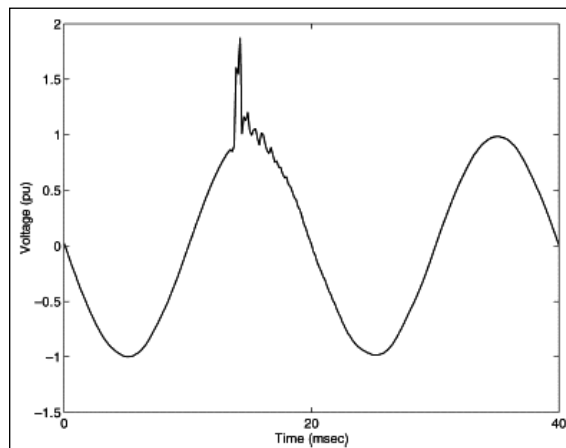


Figura 2. 1: Forma de Onda del Voltaje de un Transitorio Impulsivo

2.1.2.3 Transitorios Oscilatorios

Los transitorios oscilatorios muestran un amortiguamiento con una frecuencia variante desde cientos de Hertz hasta MegaHertz. Matemáticamente, los transitorios oscilatorios son la representación gráfica de la solución homogénea de las ecuaciones diferenciales lineales. Como un sistema eléctrico de potencia puede ser descrito de manera aproximada por un conjunto de ecuaciones lineales, los transitorios oscilatorios son los transitorios o modos de oscilación naturales de un sistema eléctrico de potencia.

Un ejemplo claro de este tipo de transitorios es la carga de un capacitor. La Figura 2. 3 muestra como la onda del voltaje se ve afectada ante la desconexión de los capacitores presentados en la Figura 2. 2.

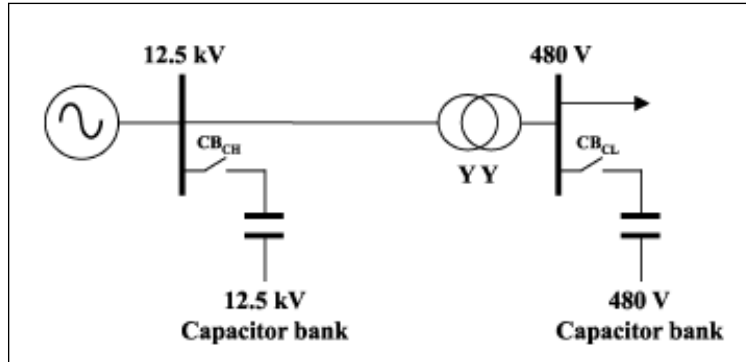


Figura 2. 2: Diagrama unifilar de un sistema de distribución

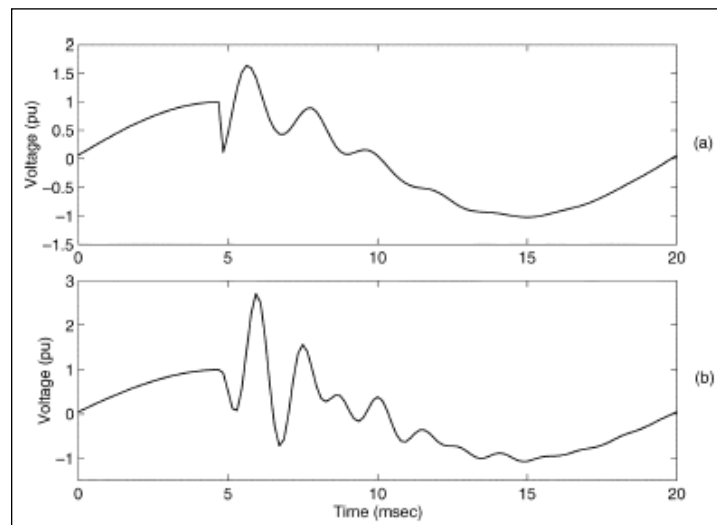


Figura 2. 3: Formas de Onda del Voltaje al energizar un Capacitor. A) a 12.5 kV; b) a 480 V

2.1.2.4 Variaciones de Voltaje de Corta Duración

Cada tipo de variación puede distinguirse por instantánea, momentánea o temporal, dependiendo de su duración.

Las variaciones de voltaje de corta duración son ocasionadas en su mayoría por condiciones de falla, energización de cargas muy pesadas que requieren altas corrientes de arranque. Dependiendo de la ubicación de la falla y las condiciones del sistema, la falla puede causar ya sea elevaciones de voltaje o disminuciones de este, o inclusive una completa interrupción de voltaje. La condición de la falla puede estar cercana o lejana a la zona de interés. En cualquiera de los casos el impacto en el voltaje durante la falla es una corta variación en corriente y voltaje. Dentro de esta clasificación caen los ya mencionados *Sags*, *Swells* e Interrupciones.

Sags de Voltaje (dip).- Se define como un decremento en el valor rms del voltaje, a la frecuencia nominal por periodos que oscilan en un rango de medio ciclo a un minuto. Son causados por bajones de voltaje debido a fallas en corriente o arranques de grandes motores. Es complicado definir un *Sag* de voltaje. La

definición recomendada es un *Sag* al 20%, lo que significa que la línea de voltaje esta reducida por debajo del 20% del valor normal o 0.02 pu.

Los *Sags* de voltaje son usualmente asociados con fallas de corto circuito en los sistemas, pero también pueden ser causados por la conexión de cargas muy pesadas por ejemplo grandes motores. Cuando los *Sags* son causados por fallas de corto circuito, éstos durarán hasta que la falla se libere por alguna protección. En la Figura 2. 4 se muestra la forma típica de un *Sag*.

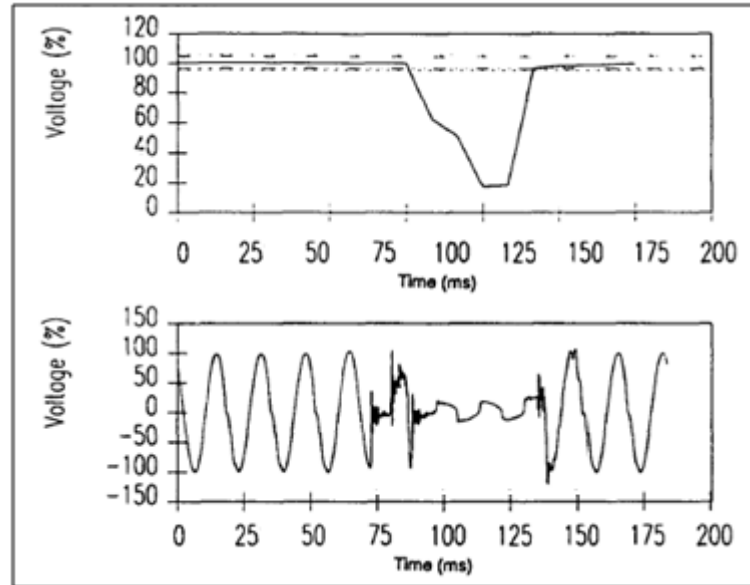


Figura 2. 4: *Sag* instantáneo de Voltaje causado por una falla de una línea a tierra.

Los *Sags* de voltaje también pueden ser causados por grandes cambios en cargas o arranque de motores. Un motor de inducción demandará de 6 a 8 veces su corriente de plena carga durante el arranque. Este retardo en la corriente causa una caída de voltaje a través de la impedancia del sistema. Si la magnitud de la corriente es relativamente grande con respecto a la corriente de falla, el *Sag* que se produce como resultado puede ser importante. La Figura 2. 5 ilustra el efecto del arranque de un motor muy grande.

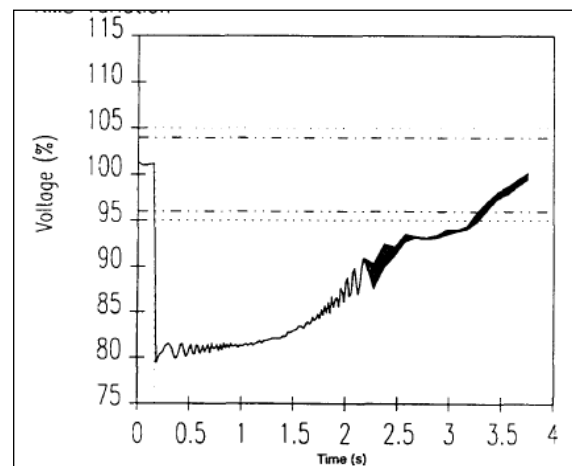


Figura 2. 5: *Sag* de Voltaje temporal causado por arranque de motores.

Swells de Voltaje.- Se define como un incremento de voltaje a un nivel entre 1.1 y 1.8 pu en rms, a la frecuencia nominal por periodos oscilando entre medio ciclo y un minuto. Así como los *Sags*, un *Swell* es asociado usualmente con condiciones de fallas del sistema de potencia, pero estos son mucho menos comunes que los *Sags* de voltaje. Un *Swell* puede ocurrir debido a una falla de una línea a tierra en el sistema dando como resultado un incremento temporal del nivel de voltaje de las fases sin falla. *Swells* también pueden ser causados por desconexión de cargas muy pesadas o conexión de bancos de capacitores. Los *Swells* se caracterizan por su magnitud y duración, la severidad de un *Swell* de voltaje durante una condición de falla es función de la ubicación de la falla, la impedancia del sistema y la tierra. En un sistema no aterrizado, los voltajes de línea a tierra en las fases no aterrizadas serán de 1.73pu durante una falla de línea a tierra. Cerca de la subestación en un sistema aterrizado, no habrá incremento de voltaje en las fases sin falla debido a que el transformador de la subestación esta conectado usualmente en delta- estrella, proveyendo un camino de baja impedancia en secuencia cero para la corriente de falla. En algunas publicaciones, el término sobrevoltaje momentáneo es usado como sinónimo del término *Swell*.

Según el Std C62.41-1991 de la IEEE la definición de *Swell* es la siguiente: “Un incremento momentáneo en el voltaje a la frecuencia del sistema de potencia, fuera de las tolerancias normales, con una duración de más de un ciclo y menos de unos pocos segundos”.

Interrupción.- Ocurre cuando la alimentación de voltaje decrece a menos de 0.1 pu por un periodo de tiempo menor a 1 minuto. Las interrupciones pueden ser causadas por fallas de cortocircuito, mal funcionamiento en el control, o fallas en los equipos. Las interrupciones son cuantificadas de acuerdo a su tiempo de duración dado que su magnitud es siempre menor que el 10% del voltaje nominal. La duración de una interrupción debido a una falla en el sistema de la acometida es determinada por dispositivos de protección de la acometida misma y por el evento particular que esta causando la falla. La duración de una interrupción debido a algún mal funcionamiento del equipo o conexiones sueltas es irregular.

Algunas interrupciones son precedidas por decrementos de voltaje, cuando estas interrupciones son ocasionadas por fallas en el sistema de alimentación. El decremento del voltaje ocurre entre el tiempo que tarda en iniciarse la falla y el tiempo en que opera el dispositivo de protección.

En el alimentador en falla, las cargas experimentarán un decremento en el voltaje seguido inmediatamente por una interrupción. La duración de esta interrupción dependerá de la capacidad de interrupción del dispositivo de protección. Una interrupción instantánea generalmente limitará la duración causada por una falla no permanente a menos de 30 ciclos. Por otro lado interrupciones retrasadas causarán una interrupción temporal. La Figura 2. 6 muestra una interrupción temporal en donde el voltaje decae por 2.3s aproximadamente.

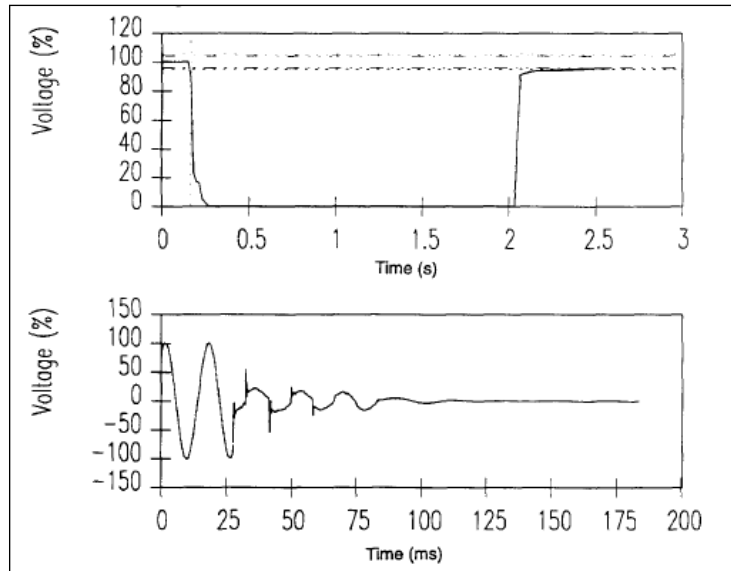


Figura 2. 6: Interrupción momentánea debido a una falla y la liberación posterior [2].

Los disturbios mencionados anteriormente pueden ser clasificados en tres tipos, dependiendo de su duración:

- Instantáneos: 0.5 – 30 ciclos
- Momentáneos: 30 ciclos – 3 seg
- Temporales: 3 seg – 1 min

2.1.2.5 Variaciones de Voltaje de Larga Duración

Las variaciones de voltaje de larga duración acompañan desviaciones en RMS a la frecuencia de potencia por más de 1 minuto. Las tolerancias de voltaje de estado estable esperadas en un sistema de potencia están especificadas en ANSI C84.1-1989 (American National Standard for Electric Power Systems and Equipment Voltage Ratings). Las variaciones de larga duración son consideradas presentes cuando los límites del ANSI son excedidos por más de 1 minuto. Las variaciones de larga duración pueden ser sobre voltajes o falta de voltajes, dependiendo de la causa de la variación. Generalmente estos sobrevoltajes o bajo voltajes no son el resultado de fallas en los sistemas, son causados por variaciones en la carga en el sistema y operaciones de conexión y desconexión. Estas variaciones son presentadas por graficas de RMS contra tiempo. Dentro de esta clasificación pertenecen los: Bajo Voltajes (*Undervoltage*), Sobrevoltajes e Interrupciones.

Bajo Voltajes (*Undervoltage*).- Decremento en el valor RMS del voltaje de AC a menos del 90% a la frecuencia nominal por una duración mayor a 1 minuto. Esto puede ser causado por la conexión de una carga pesada o la conexión de un banco de capacitores muy grande [4], [5].

Los bajo voltajes son el resultado de eventos que son lo contrario de los eventos que causan los sobrevoltajes. Una carga conectándose, o un banco de capacitores desconectándose puede causar un bajo voltaje hasta que el equipo de regulación de voltaje en el sistema vuelva a restaurar el nivel de voltaje a sus tolerancias. Circuitos sobrecargados pueden dar como resultado un bajo voltaje también.

El término apagón es, a veces, utilizado para describir períodos de bajo voltaje iniciado como una estrategia de despacho energética, para disminuir el envío de energía. El tipo de disturbio descrito por un apagón es básicamente el mismo que el de una falta de voltaje. Debido a que no existe una definición formal ni única de Apagón y se considera lo mismo que una falta de voltaje se recomienda mejor dejar de utilizar este término en futuros escritos de calidad de energía.

Sobrevoltajes.- Es un incremento en el valor efectivo del voltaje de CA, a un nivel mayor al 110%, a la frecuencia nominal por una duración mayor a 1 min. Estos son causados por desconexiones de cargas muy pesadas o la energización de grandes capacitores [5]. Pueden ser el resultado de conexión de cargas, o variaciones en compensación reactiva del sistema, por ejemplo conexión de un banco de capacitores. Una pobre capacidad de regulación de voltaje o un mal control da como resultado un sobrevoltaje. Referencias incorrectas de tap en los transformadores pueden ser causa de sobre voltajes o bajo voltajes. Debido a que estas fallas pueden durar varios minutos, pueden causar stress en computadoras, motores y equipo de control.

Interrupciones.- Ocurren cuando el voltaje de alimentación decrece a menos de 0.1 pu por un período de tiempo excedente a 1 min. Pueden ser causadas por fallas, mal funcionamientos de control, o fallas en los equipos. Las interrupciones con duración mayor a 1 min son consideradas permanentes y requieren intervención manual para que se restauren.

2.1.2.6 Desbalance de Voltaje

Es definido como la relación de una componente negativa o de secuencia cero y una componente de secuencia positiva. El desbalance de voltaje en un sistema de potencia es debido a cargas monofásicas. En particular, cargas de tracción monofásicas conectadas a través de distintas fases producen voltajes de secuencia negativa, que en muchos casos tienen que ser reducidos a menos del 2% con la ayuda de SVC's. Desbalances de voltaje severos pueden llevar a un calentamiento excesivo de motores de inducción. Desbalances también pueden ocurrir por un fusible quemado en una fase de un banco trifásico. Hay ocasiones cuando un desbalance de voltaje severo mayor al 5% puede ocurrir por fallas monofásicas. Desbalance de corriente o voltaje es estimado algunas veces según la siguiente definición: “Es la máxima desviación del promedio de los 3 voltajes o corrientes dividido por el promedio del voltaje de las 3 fases” [5].

$$\text{Desbalance de Voltaje} = 100 * \frac{(\text{máx. desviación del voltaje promedio})}{\text{voltaje promedio}}$$

En la Figura 2. 7 se muestra un ejemplo de una captura de 1 semana de desbalance medido en un punto de una alimentación residencial.

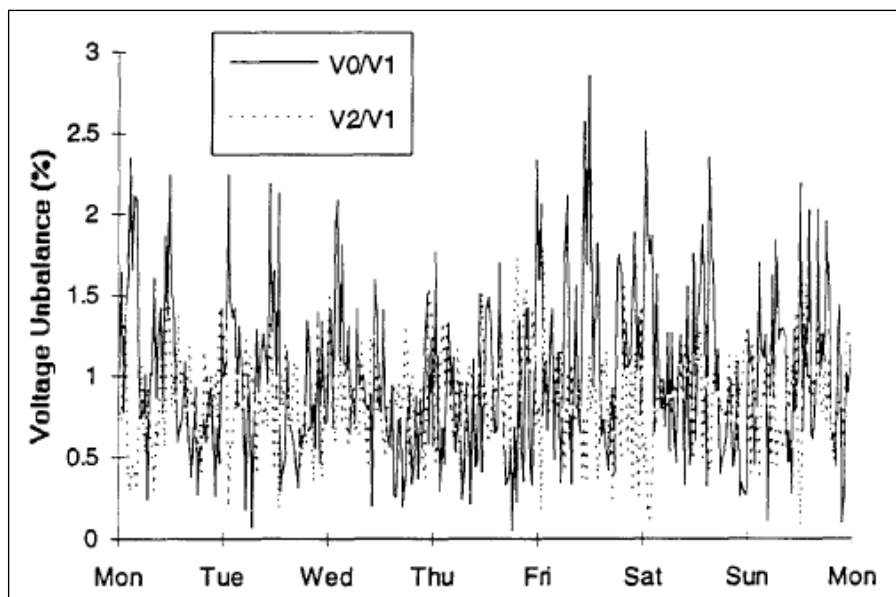


Figura 2. 7: Captura de Desbalance de Voltaje en un alimentador residencial.

La causa principal de desbalances de voltaje a menos de un 2% son las cargas monofásicas desbalanceadas en un circuito trifásico. El desbalance de voltaje también puede ser el resultado de anomalías en bancos de capacitores.

2.1.2.7 Distorsión de Forma de Onda

La distorsión de forma de onda es una desviación en estado estable de una senoidal ideal a una frecuencia caracterizada por el contenido espectral de la desviación. Existen cinco principales tipos de distorsión de forma de onda: Desfasamiento de CD, Armónicas, Interarmónicas, *Notching* y Ruido.

Desfasamiento de CD.- La presencia de un voltaje de directa o corriente de directa en una señal de alterna se le conoce como desfasamiento de directa o DC Offset. Este fenómeno puede ocurrir como resultado de un disturbio geomagnético o más comúnmente por el uso de rectificación de media onda.

Armónicos.- Los Armónicos son voltajes senoidales o corrientes senoidales que tienen frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia a la cual el sistema de alimentación está diseñado para operar, usualmente 50 o 60 Hz. Las armónicas se combinan con el voltaje o corriente fundamental produciendo distorsión de forma de onda. La distorsión armónica existe debido a las características no lineales de dispositivos y cargas en el sistema de potencia. Estos dispositivos pueden ser modelados como fuentes de corrientes que inyectan corrientes armónicas al sistema de potencia. La distorsión de Voltaje resulta debido a que estas corrientes causan bajones de voltaje no lineales a través de la impedancia del sistema. La distorsión armónica está tomando importancia para muchos consumidores y para todo el sistema de potencia debido a la creciente aplicación de equipos de electrónica de potencia.

Los niveles de distorsión armónica se pueden caracterizar por un espectro armónico completo con magnitudes y ángulos de fase de cada componente armónica individual. Es también común utilizar una

sola cantidad, la distorsión armónica total (THD), como una medida de la magnitud de la distorsión armónica.

Las corrientes armónicas resultan de la operación normal de dispositivos no lineales en el sistema de potencia. La Figura 2. 8 ilustra la forma de onda y el espectro armónico de la corriente de entrada de un drive variador de frecuencia típico. Los niveles de distorsión de la corriente se pueden caracterizar por una distorsión armónica total, como se describió anteriormente, pero esto puede estar mal interpretado. Por ejemplo, muchos *drives* de control de velocidad exhibirán una alta distorsión armónica total para la corriente de entrada cuando están operando con cargas muy altas. Esto no es de mucha importancia porque la magnitud de la corriente armónica es muy baja, a pesar de que la distorsión armónica sea alta.

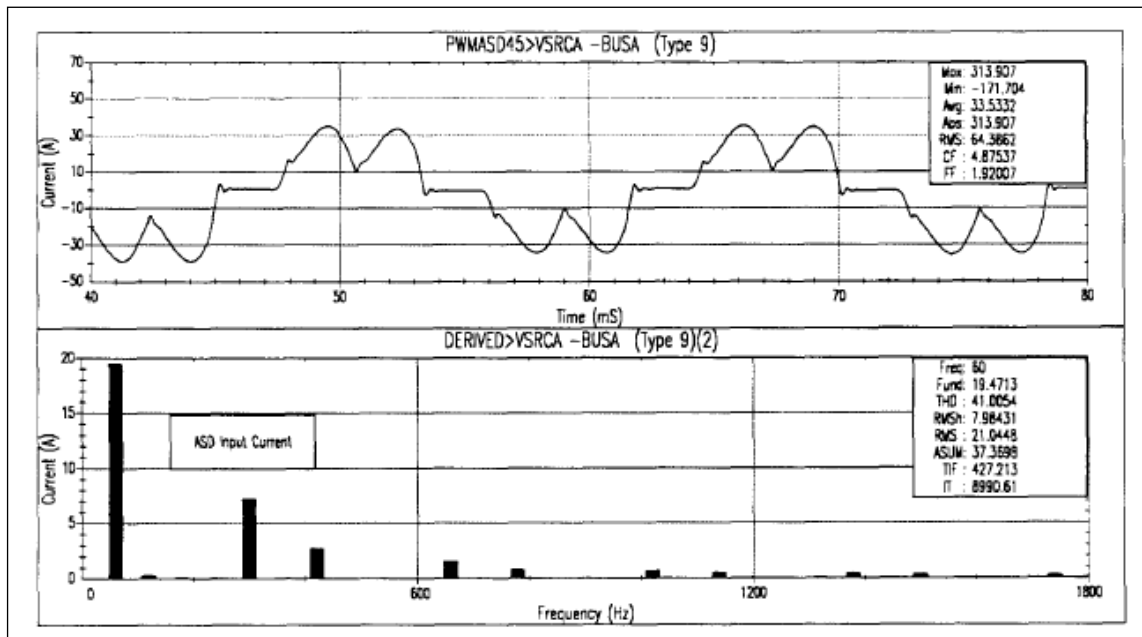


Figura 2. 8: Forma de Onda y Espectro Armónico de la corriente demandada por un Variador de Frecuencia.

Para manejar esta preocupación de caracterizar las corrientes armónicas de una manera constante, el Estándar 519-1992 de la IEEE define otro término, la distorsión demandada total. Este término es el mismo que el de la distorsión armónica total con la diferencia de que la distorsión es expresada como un porcentaje de una corriente de carga medida, y no como un porcentaje de la corriente fundamental.

En el lado de corriente directa en un convertidor, toda carga que tenga una pequeña inductancia, como un motor de directa, no demandará corriente sin rizado. Las armónicas en la onda de voltaje producen un rizado significativo en la forma de onda de las corrientes de directa. Las armónicas están relacionadas con el número de pulsos del circuito convertidor: 6 pulsos, sexta armónica, 12 pulsos, 12ava armónica.

2.1.3 Medidas Cuantificables

Factor de potencia.- El factor de potencia se define como la relación entre potencia real y potencia aparente.

$$fp = \frac{P}{S}$$

Donde la potencia aparente (S) es el producto de la magnitud efectiva del voltaje por la magnitud efectiva de la corriente. Para el caso en que las ondas de voltaje y corriente no están distorsionadas en su forma, aplica la reducción a la siguiente fórmula:

$$fp = \cos \theta$$

Lo ideal es que el factor de potencia sea unitario. Cualquier valor inferior requerirá una mayor corriente para una potencia demandada específica. Debido a esto, es importante mantener un factor de potencia mayor al 90% para la optimización del equipo de alimentación.

THD.- Por sus siglas en ingles de Distorsión Armónica Total. Es la relación del valor RMS de la distorsión al valor RMS de la fundamental. Como el valor efectivo de la distorsión es la sumatoria de cuadrados de todos los valores efectivos de cada componente armónica excepto la fundamental, lo anterior se puede escribir de la siguiente manera:

$$THD = \frac{RMS \text{ distorsión}}{RMS \text{ Fundamental}} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_{hmax}^2}}{I_1} = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2}}{I_1}$$

Factor K.- El factor K indica la capacidad de un transformador para alimentar cargas no senoidales sin sobrecalentarse [6] y se calcula de la siguiente manera:

$$K = \left(\frac{I_1}{I}\right)^2 \sum_{h=1}^{h=hmax} I_h^2 h^2$$

Para las formulas anteriores:

I_1 es el valor efectivo de la corriente fundamental en Arms

I es el valor efectivo de la corriente en Arms

I_h es el valor efectivo de la corriente armónica h, en pu tomando como base la corriente fundamental.

2.2 Monitoreo de Calidad de Energía

Con la creciente contaminación de la energía eléctrica, las industrias de generación le han prestado mucha atención a la calidad de la energía y a la confiabilidad de ésta. A pesar de los esfuerzos incontables que las industrias de generación de energía imponen en sus instalaciones y en su transmisión, la mayoría de los disturbios no se generan del lado de la generación sino de la carga, o ya sea por interferencia de la naturaleza misma en la distribución o transmisión, y por lo tanto estos disturbios están más allá del control de la generación. Debido a que generadores y usuarios de energía están interesados en los problemas que ocurren por mala calidad de energía, es muy importante el constante monitoreo de este fenómeno y la confiabilidad en los dispositivos que monitorean. El monitoreo constante asegura un desempeño óptimo del sistema eléctrico y una administración efectiva de energía.

La clave para un óptimo monitoreo de la energía es tener flexibilidad, poderoso procesamiento de datos, y un fácil acceso a la información. Es importante dejar en claro los alcances del monitoreo, para así poder cotizar los dispositivos que más se adecuen a estos alcances.

Actualmente en el mercado se pueden encontrar analizadores de armónicos, analizadores de espectros, analizadores de disturbios, medidores de flicker, en fin, dispositivos especializados en la captura de tan solo un fenómeno eléctrico a la vez, ignorando al resto. Lo más recomendable son los analizadores de calidad de energía, que precisamente son aquellos equipos que integran todas las tecnologías anteriores.

La Tabla 2. 1 muestra distintos analizadores de Calidad de Energía, sus costos estimados y sus características.

Cabe mencionar que en el presente estudio de calidad de energía se hizo con Fluke 435, el ION y el Dranetz. A lo largo de los meses de captura de datos se utilizaron 3 distintos analizadores de calidad de energía. En primera instancia se utilizó el Fluke 435 gracias a la disponibilidad de éste en el Centro de Estudios de Energía del Tecnológico de Monterrey. Casi en paralelo se instaló en principio un ION permanentemente en la planta de Ternium Puebla. Y casi finalizando el año se instalaron otros dos dispositivos un poco más poderosos. Otro ION y un dispositivo de la marca Dranetz. Todas las instalaciones para captura de datos fueron momentáneas, pues ninguna pertenece estrictamente a la empresa Ternium y por lo tanto no podía quedarse permanentemente la instalación.

Debido al interés que este tema ha despertado en el personal encargado de subestación de las plantas de Ternium, se planea la compra e instalación, ahora si permanente, de equipos de esta índole.

De las tres marcas utilizadas para este estudio (Fluke, ION y Dranetz), solamente se obtuvo la experiencia de la instalación, la descarga y la configuración del equipo Fluke.














2.3 Importancia de mantener una buena Calidad de Energía

Actualmente se han comenzado a imponer impuestos o sobrecargos para que los usuarios traten de conservar una energía limpia. Siempre que éstos alteren la forma o fase debido a sus procesos, se les pretende obligar a que instalen equipos que contrarresten estas alteraciones. La forma en que se puede medir si se está cumpliendo con esta norma es monitoreando el factor de potencia y la cantidad de distorsión armónica en la alimentación a cada usuario. Si se considera que la distorsión es alta y el factor de potencia es bajo entonces tal usuario deberá pagar un excedente porcentual a la factura de electricidad. Si tomamos en cuenta que la factura de una empresa como lo es Ternium es uno de los gastos más representativos, entonces hablar de un excedente porcentual de esta factura es hablar de grandes pérdidas de dinero.

De la misma manera, si se cuenta con un factor de potencia cercano a la unidad, se recibirá una bonificación porcentual a la factura eléctrica. Otra vez, para Ternium cuidar este detalle no solo es desaparecer un gran gasto sino darle una gran contribución económica.

Estas normas se han impuesto en los países desarrollados desde hace unos años, sin embargo países como México ya utiliza estos recargos o bonificaciones al menos en cuanto a factor de potencia se refiere, aún no para cantidad de distorsión. En nuestro país, Comisión Federal de Electricidad (CFE) es el encargado de imponer esta norma.

Tabla 2. 1: Analizadores de Calidad de Energía disponibles en el mercado [7], [8], [9].

| Logo | Marca | Series | Características Principales | Modos de Captura | Precios | Imágenes |
|---|-------------|------------|--|--|-----------|---|
|  | FLUKE | 434/003 | Trifásico Entradas para cuatro voltajes y cuatro corrientes Captura datos en todas las fases simultáneamente Incluye una batería NIMH con duración de hasta 7 hrs midiendo Utiliza el FlukeView Software para transferir los datos a la PC Portátil Captura eventos automáticamente con una rapidez de hasta 5µs Capacidad para guardar hasta 10 Datasets Cada Dataset con capacidad para guardar 32 parámetros y 50 pantallas 8MB de memoria | RMS verdadero Picos de Voltaje y Corriente Frecuencia Sags & Swells Transitorios Interrupciones Potencia y Consumo Demandas pico de Armónicas Inter-armónicas Flicker Desbalance | 5400 USD |  |
| | | 435/003 | Trifásico Entradas para cuatro voltajes y cuatro corrientes Captura formas de onda de hasta 200kHz en todas las fases simultáneamente Incluye una batería NIMH con duración de hasta 7 hrs midiendo Utiliza el FlukeView Software para transferir los datos a la PC Portátil Capacidad para guardar hasta 100 parámetros en las 4 fases Memoria suficiente para guardar 400 parámetros por 1 mes con una resolución de 1 min Capacidad para capturar pequeñas variaciones con resolución de hasta 0.5 seg Capacidad para guardar hasta 10 Datasets 16MB de memoria | RMS verdadero Picos de Voltaje y Corriente Frecuencia Sags & Swells Transitorios Interrupciones Potencia y Consumo Demandas pico de Armónicas Armónica hasta la 50va Inter-armónicas Flicker Desbalance | 7500 USD |  |
|  | AEMC | 8335 | Trifásico Frecuencia de muestreo de 256 muestras por ciclo Memoria de 2GB SD Card Soporta 1000V / 1200 A Se alimenta con 110/230VAC (50/60 Hz) Capacidad de batería para 8hrs con pantalla activa o 35 con inactiva | RMS verdadero Picos de Voltaje y Corriente Frecuencia Potencia Real, Reactiva y Aparente FP Desbalance Armónicas hasta la 50va THD Factor K Flicker | 5200 USD |  |
|  | HIOKI | 3196 | Trifásico Portátil Entradas para cuatro voltajes y cuatro corrientes Memoria interna 13MB | FP Sags & Swells Flicker Transitorios Armónicas Transitorios de alta frecuencia Detección de forma de onda | 6200 USD |  |
|  | REED | 1000A | Trifásico Portátil Adaptable a sistemas de cinco hilos | Voltaje Corriente Frecuencia Potencia Real, Reactiva y Aparente Energía FP Sags & Swells Desbalance Flicker Transitorios Armónicas | 9000 USD |  |
|  | DRANETZ BMI | Power 1000 | Trifásico Portátil Entradas para cuatro voltajes y cuatro corrientes Frecuencia de muestreo de 100kHz Capacidad para almacenar datos en memorias externas por puerto USB Puerto Ethernet para control remoto 4 entradas digitales de estatus 4 entradas digitales de control Alimentación mundialmente adaptable (85 a 220 AC/DC) | RMS verdadero Frecuencia Transitorios Armónicas hasta la 50va incluyendo subarmónicas Flicker Desbalance | 12500 USD |  |
|  | ION | 7550/7650 | Trifásico No es Portátil Comunicación compatible con internet por puerto Ethernet y RS-232 Soporte para protocolos Modbus RTU/TCP Almacenamiento de Datos en Memoria Interna 8 entradas digitales para control | Voltaje de 3 fases, instantáneos Corrientes de 3 fases Frecuencia FP Energía Consumos Demandas Armónica hasta la 63va Transitorios de 17µs a 60Hz Sags & Swells | N/D |  |

Capítulo 3: La Energía en la Industria Siderúrgica

Actualmente dentro de la industria Siderúrgica como en el resto de las industrias se pretende incrementar la producción sin disminuir la calidad de los productos, pero sí los costos. Así como también disminuir la cantidad de energía desperdiciada y eliminar los contaminantes y residuos tóxicos para el medio ambiente, tales como emisiones de CO₂ por ejemplo.

Tomando en cuenta estos puntos, varios proyectos de investigación se han puesto en marcha en el cual se atacan las áreas más importantes de la producción que aún no cumplen con alguno de estos estándares.

Todo esto como prevención para el futuro, pues hasta ahora no hay ley en Latinoamérica que force a las empresas de giro Siderúrgico a cumplir con estos estándares; mientras que en Europa y Asia empresas Siderúrgicas han dejado de producir por estas cuestiones. Es por esto que la Siderurgia Latinoamericana ve con buenos ojos cualquier proyecto que le asegure que le ayudará a mantenerse por debajo de todas estas limitantes.

3.1 Introducción al Proceso Siderúrgico

En este apartado se describirá brevemente las etapas que componen al proceso de fabricación de acero, con el fin de que el lector se familiarice con este proceso para que así pueda aplicar los conocimientos eléctricos necesarios para su mejora.

El proceso Siderúrgico, se le conoce al proceso de fabricación de acero, y consta de cinco etapas principales: Preparación, Reducción, Aceración, Solidificación y Laminación; de estas etapas principales se desprenden 5 procesos: el proceso de Minería, Peletización, Reducción del mineral de hierro, Aceración y Solidificación, y Laminación de productos largos o planos. A continuación se describirá brevemente cada etapa y sus procesos involucrados.

3.1.1 Minería

La minería es un proceso que forma parte de la etapa de Preparación de la materia prima en la fabricación de acero. Toda producción de acero inicia con la extracción del mineral de hierro de las minas, de éstas se puede extraer minerales metálicos y no metálicos. Ternium en México cuenta con 4 minas distribuidas por la república de las cuales extrae los minerales necesarios para satisfacer la demanda de su producción, tan solo una de estas minas tiene una capacidad de producción de 8621 MTon/año de mineral pre concentrado.

Una vez obtenido el mineral de hierro de las minas, dependiendo de su grado de impurezas (presencia de otros elementos como fósforo y azufre) y de su tamaño, es acondicionado para las etapas posteriores de reducción a través de los procesos de sinterización y/o peletización.

La sinterización consiste en aportar calor a los finos de mineral de hierro, generando una fusión parcial del material, formando así un producto poroso llamado sinter, el cual es utilizado en la reducción por altos hornos.

La peletización consiste en la mezcla del mineral finamente molido con aditivos aglomerantes, para darles forma esférica, los cuales son endurecidos por cocción en hornos rotatorios.

3.1.2 Fabricación de Pellas (Peletización)

Es el segundo proceso dentro de la primera etapa de la fabricación de acero. Es necesario debido a que la calidad del mineral de hierro encontrado en las minas es de bajo contenido de hierro como para ser procesado en la reducción, es necesario beneficiarlo con el proceso de fabricación de Pellas.

La fabricación de Pellas o proceso de peletización es el proceso mediante el cual a partir de un mineral concentrado de hierro, aditivos y aglomerante orgánico, se produce un aglomerado en forma esférica con características físicas, químicas y metalúrgicas apropiadas para la etapa posterior en el proceso de reducción. Las esferas que se obtienen en el proceso de peletización se conocen como Pellas (Pellet), que son partículas producidas por aglomerados finos de mineral de hierro concentrado. Ternium en México cuenta con 2 plantas peletizadoras, una de ellas con capacidad de 4100 MTon de Pellas al año.

Antes de iniciar el proceso de peletizado el mineral recibe un tratamiento de beneficiado para lograr las características químicas y físicas requeridas, denominado molienda y concentración, posteriormente se procede a la elaboración de pellas, subproceso conocido como peletización. Las Pellas fabricadas en Ternium México tienen aproximadamente las siguientes características:

- Contenido de Fierro Total (Fe)= 66.6%
- Contenido de Sílice (Si)= 2.50%
- Contenido de Azufre (S)= 0.006%

3.1.3 Reducción del mineral de hierro

La reducción de mineral de hierro, es un proceso que forma parte de la etapa de reducción en la fabricación del acero. El proceso de reducción es el proceso en el cual se extraen los óxidos del mineral. En la industria Siderúrgica existen dos métodos de reducción del mineral de hierro con los que se obtiene acero, estos son: Reducción Indirecta y Reducción Directa.

En el método de Reducción Indirecta se utiliza un alto horno mientras que la Reducción Directa utiliza un reactor y un horno eléctrico de arco. Ambos métodos parten del mineral de hierro, pero la diferencia básica entre ellos, es cómo llevan a cabo la reducción del mineral de hierro.

Reducción directa es el proceso que permite obtener el hierro metálico o hierro de reducción directa con las características físico- químicas requeridas, granulometría y composición química para la fabricación del acero a través de la extracción o eliminación de oxígeno de las pellas en el horno de reducción o reactor. En la ruta reducción directa, la reducción se lleva a cabo con un gas reductor generado a partir de la reformación de gas natural, el proceso se ejecuta sin fusión desde la hematina hasta el hierro metálico. El calor se proporciona calentando el gas reductor en un intercambiador de calor. El producto después de procesado conserva su forma original de pellet pero con notable mayor porosidad, a este producto se le conoce como hierro de reducción directa (HRD) o fierro esponja. En Ternium México se utiliza la reducción directa y hornos de arco eléctrico, el total de producción de las plantas de reducción directa es de 2284 MTon/año, tan solo en Monterrey es de 1525 MTon/año.

3.1.4 Aceración y Solidificación

Aceración y solidificación son los procesos destinados a convertir productos de reducción del mineral y otros materiales en acero líquido con una composición química específica definida en función del tipo de acero a fabricar, a este proceso se le denomina aceración. Posteriormente en el proceso de solidificación, el acero líquido es transformado en placas solidas llamadas planchones, palanquillas o lingotes.

El hierro de reducción directa (HRD), fabricado en las plantas de reducción directa se obtiene en forma sólida, para elaborar productos laminados debe ser previamente transformado en acero, fundiéndolo y ajustando su composición química mediante un proceso de aceración en horno eléctrico de arco. Ternium en México cuenta con tres acerías con una producción total de 2284 Mton/año.

3.1.4.1 Metalurgia Secundaria

La metalurgia secundaria en horno cuchara también conocido como horno olla, tiene como objetivos el ajuste final de la composición química del acero a los valores especificados, profundizar la desulfuración del acero, asegurar el tratamiento adecuado para cumplir con las condiciones de calidad exigidas y despachar el acero a la temperatura adecuada para su posterior colado. Una vez teniendo el acero líquido con las propiedades físicas, químicas y metalúrgicas deseadas, el horno cuchara se transporta a la zona de colada continua, donde se procesa el acero para comenzar la solidificación del mismo.

3.1.4.2 Solidificación

La solidificación es un fenómeno de nucleación y crecimiento a una temperatura adecuada, que al alcanzar dicha temperatura, un conjunto de átomos contiguos toma una posición fija denominada núcleo. El fenómeno de nucleación y crecimiento se da en distintos puntos de la masa líquida. De cada núcleo, surgen cristales que forman una red cristalina que aumenta de tamaño. Estas porciones de cristal crecen hasta ser circundadas por otras del mismo origen. Estas partes de la masa de acero se denominan granos de material. Las propiedades mecánicas del acero dependerán de la forma de los granos y de su estructura cristalográfica.

3.1.4.3 Colada Continua

El proceso de colada continua consiste en solidificar el acero líquido de manera continua, desde la superficie al centro, obteniendo un planchón en el caso de productos planos o una palanquilla en el caso de productos largos. En México se cuenta con una capacidad de 2481 Mton/año de productos planos y 1338 Mton/año de productos largos.

La capacidad instalada de la acería de la planta Guerrero es de 1900 Mton al año, para lo cual cuenta con dos hornos eléctricos para fundir la carga metálica, uno de 200 Ton y otro de 170 Ton de capacidad, dos hornos olla de 135 Ton para el afino del acero y dos máquinas de colada continua de planchón delgado de 54 mm de espesor.

La capacidad instalada de la acería en planta norte es de 550 mil toneladas al año de acero líquido, para lo cual cuenta con un horno eléctrico de arco con 93 Ton de capacidad, mas 10 Ton de remanente donde se

funde la carga metálica, un horno olla de 93 Ton de capacidad y un transformador de 15 MVA, y una máquina de colada continua con 5 líneas para billet 127 x 127 mm.

La capacidad instalada de la acería en Puebla es de 750 mil toneladas al año. Para ello cuenta con un horno eléctrico con 200 Ton de capacidad en donde se funde la carga metálica, un horno olla con 135 Ton para el afino final del acero y una máquina de colada continua con 5 líneas para billet 140 x 140mm y un largo de 8 mts.

3.1.4.4 Fusión en Horno Eléctrico de Arco

Ternium en Planta Guerrero utiliza hornos Eléctricos de arco del tipo de corriente directa. En los mismos, la corriente eléctrica pasa desde los electrodos a través de un arco a la carga metálica, la corriente eléctrica regresa al circuito eléctrico a través de ánodos conductores en el fondo del horno. Las etapas del proceso de fusión en hornos eléctricos de arco son: Fusión, Refinación y Vaciado.

En la etapa de fusión, la chatarra y el HRD pasan del estado sólido al líquido. Se realizan cargas de chatarra mediante cestas dentro de los hornos eléctricos; el horno contiene un remanente de acero líquido de la colada previa que ayuda a fundir la carga actual. Una vez que la chatarra ha sido cargada, se colocan los electrodos y la bóveda sobre el horno, se conecta la energía eléctrica, generándose un arco eléctrico entre los electrodos y la carga metálica, lo cual produce suficiente energía calorífica para fundir la chatarra. Al iniciar la aparición del arco eléctrico los electrodos comienzan a penetrar dentro de la chatarra, hasta lograr que el arco eléctrico se estabilice quedando cubierto por la chatarra, en ese momento se incrementa la potencia del horno y se inicia la alimentación de HRD y cal que se mantiene de forma continua hasta completar la carga, a esta etapa se le conoce como profundización. Finalmente el arco eléctrico funde la carga metálica de abajo hacia arriba formando un charco de metal fundido.

La fusión ocurre debido al calor generado por la radiación del arco, la resistencia al flujo de corriente ofrecida por la carga y la energía química aportada por la reacción de oxidación de las lanzas de oxígeno. Durante la fusión se inyecta oxígeno y carbón para incrementar la energía química del baño mediante lanzas coherentes.

En la etapa de refinación se ajusta la temperatura y composición química del baño de acero a los valores de especificación requeridos por el proceso. La temperatura que tiene el acero en el horno eléctrico es de aproximadamente 1600 °C. Los principales propósitos del proceso del horno olla es lograr que el acero tenga características químicas acordes con las especificaciones, alcanzar la temperatura del tratamiento final para su envío a la colada continua y limpiar el acero de inclusiones.

3.1.5 Laminación

Este es el quinto y último proceso en el flujo de fabricación de acero. La laminación plana consiste en hacer pasar un material metálico entre dos cilindros que giran a la misma velocidad y en sentido contrario, para reducir su espesor mediante la presión ejercida por los mismos. El metal es comprimido, reducido en su sección y cambiado de forma. La deformación por laminación es plástica, es decir que las dimensiones del material obtenido se mantienen luego de cesar la fuerza de los cilindros.

Existen dos procesos básicos de laminación, laminación en caliente y en frío. La laminación en caliente se realiza a altas temperaturas (mayores a los 850 °C) y está orientado a bandas de espesores de 1.2 mm o más; mientras que la laminación en frío se realiza a temperaturas cercanas a las del ambiente y están

orientados a obtener productos de espesor menor a 2.5 mm, mayor calidad superficial y tolerancias dimensionales más estrechas.

Las plantas de ternium México tienen una capacidad total de producción de 5000 M de bobinas de laminación en caliente (LAC) al año. Las instalaciones en México producen 2200 M de bobinas de laminación en frío (LAF) al año.

3.2 Subestación

Actualmente la planta de Ternium Puebla en particular es alimentada enteramente por CFE la cual lleva sus líneas de alta tensión hasta la subestación dentro de la planta, donde se encargan de distribuir esta energía.

CFE alimenta con 230 kV y una potencia de 3800 MVA a 5 transformadores que se encargan de distribuir la energía en distintos niveles de potencial al resto de las cargas en la planta. Al punto donde llega la alimentación de CFE se le conoce eléctricamente como acometida. Los transformadores alimentados directamente por la acometida son conocidos como T1, T2, T3, T4 y T5 respectivamente.

T1 y T2 son transformadores de 50 MVA de capacidad y transforman el voltaje de 230 a 13.2 kV, ambos alimentan a un bus alimentador principal nombrado “Bus GR1”. Estos Transformadores rara vez están conectados al mismo tiempo, son utilizados usualmente como respaldo.

Del Bus GR-1 se alimentan la mayoría de las cargas dentro de la planta, sin embargo ninguna representativa. El área de Laminación y Vaciado Continuo, así como también diversos capacitores, torres de enfriamiento y compresores son las cargas alimentadas por este bus. A este grupo de cargas se le conoce como “Laminación y Servicios”.

En otra rama de la acometida se encuentra el transformador T3 de 70 MVA de capacidad el cual también reduce el voltaje de 230 a 13.2 kV. Este transformador alimenta directamente a un bus nombrado “GR-2”, sin embargo tiene la capacidad de alimentar también al bus GR-1 si es necesario. La única carga que se alimenta de T3 es el Horno Olla u Horno de Refinación.

Por ultimo los transformadores T4 y T5 de 90 MVA de capacidad cada uno disminuyen el voltaje de 230 a 34.5 kV para alimentar a la carga mas representativa de toda la planta, que es el Horno de Arco Eléctrico (HAE). Ambos transformadores alimentan al bus GR-3 de donde también se alimentan los filtros de armónicas para el cuidado de la energía y otros componentes del horno que facilitan el proceso de descarga de acero fundido a las ollas.

La Figura 3. 1 es un diagrama unifilar de la subestación de la planta, y en ella se pueden observar todos los componentes y conexiones que se describieron previamente.

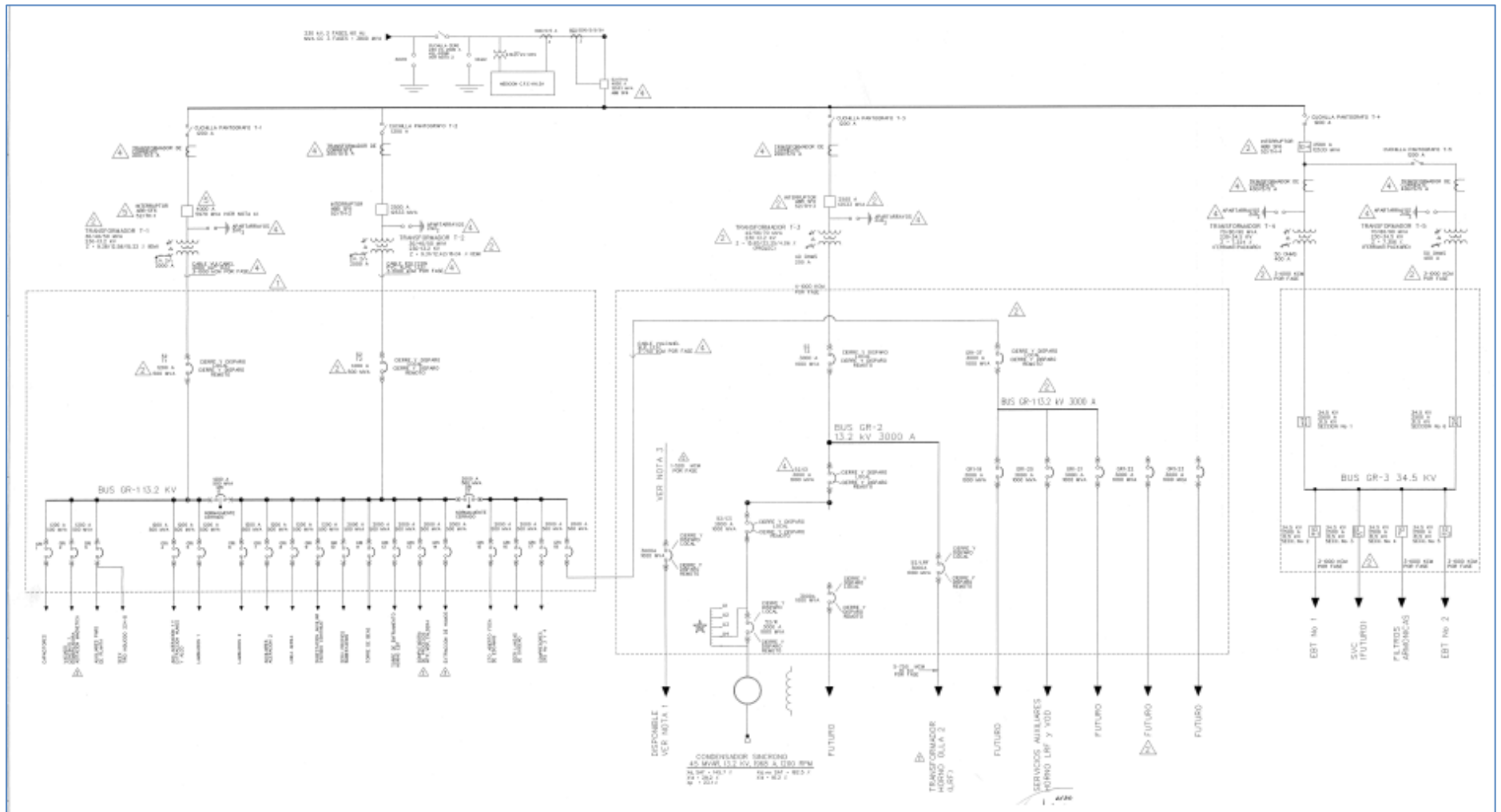


Figura 3. 1: Diagrama Unifilar de Subestación

3.3 Acería vistazo eléctrico

La acería esta constituida principalmente por el Horno de Arco Eléctrico y los Hornos de Refinación. Como se describió en el capítulo anterior, los Hornos de refinación u Horno Olla son alimentados por un Transformador de 70 MVA, mientras que el HAE se alimenta por 2 transformadores de 90 MVA de capacidad. De esta manera se puede observar como el HAE es la carga más demandante de energía por mucho y por lo tanto la carga más representativa.

Actualmente se logran hacer en promedio 10 coladas al día, cada colada dura alrededor de 80 min, y durante estos 80 min efectivos se demandan alrededor de 120MW a la red eléctrica, como se muestra en la Figura 3. 2.

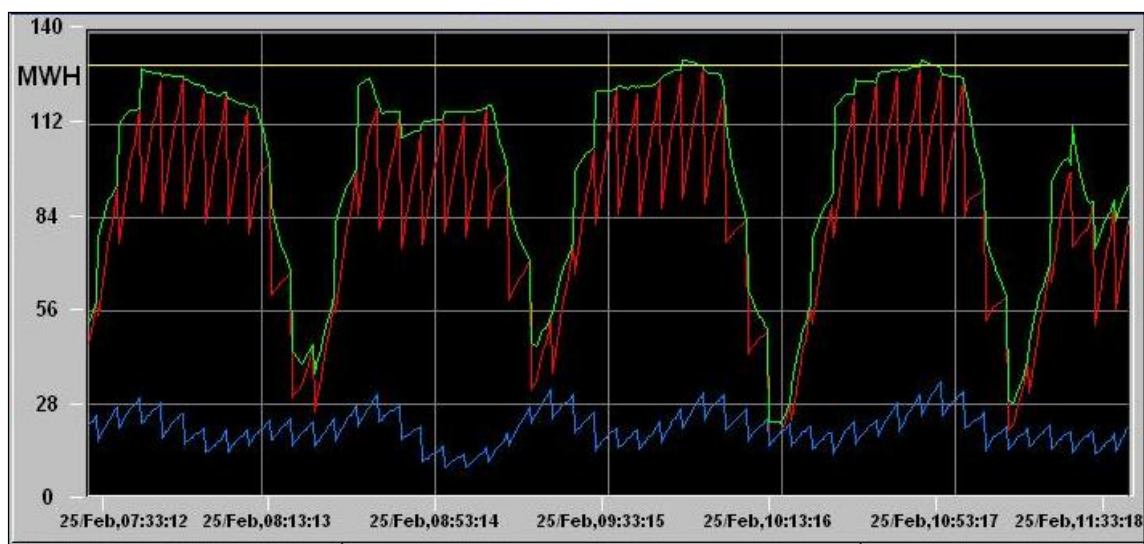


Figura 3. 2: Demanda del HAE en coladas normales

En la Figura 3. 2 se puede observar también la comparación entre potencias demandadas dentro de la planta, donde la línea roja es la potencia demandada solamente por el HAE y la línea azul es la potencia demandada por el resto de las cargas en la planta. Otra vez se puede observar como el HAE es la carga más representativa de toda la planta, y donde vale la pena estudiar la forma de eficientar el uso de la energía.

El Horno de Arco Eléctrico desde el punto de vista puramente eléctrico se compone de 3 electrodos los cuales son alimentados cada uno de ellos por una fase de un transformador trifásico, en serie con un reactor para controlar la energía reactiva en la línea. La Figura 3. 3 muestra un diagrama del vistazo eléctrico del horno.

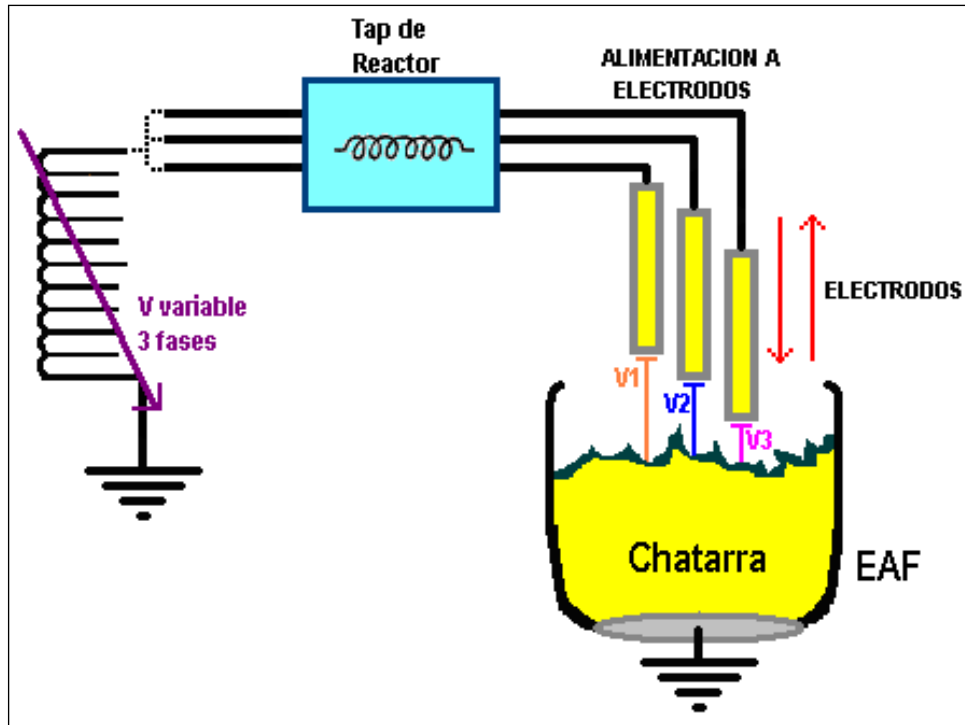


Figura 3. 3: Diagrama Eléctrico del HAE

Cada electrodo en el HAE es alimentado por medio de una fase de la línea de transformador que tiene capacidad de cambiar de Taps. De esta manera el voltaje que alimenta a los electrodos es un voltaje variable.

Para el caso de un horno de corriente alterna como el que se tiene en Ternium Puebla, la corriente que circula por cada electrodo busca una trayectoria de menor impedancia entre la punta de un electrodo y otro, formando de esta manera una diferencia de potencial entre electrodos. La chatarra en estado sólido es un elemento conductor de electricidad, que al estar en contacto con los electrodos reducen la impedancia que la corriente tiene que vencer para lograr tal trayectoria. La resistencia eléctrica es inversamente proporcional al flujo de corriente, por lo tanto la resistencia se opone al flujo de la corriente, esto significa que a mayor resistencia se tendrá menor flujo de corriente.

Dentro de un HAE, la principal fuente generadora de calor, la cual funde chatarra en acero líquido es el Arco Eléctrico. Para que se genere este arco se necesita que haya flujo de corriente entre un electrodo y otro. Toda la chatarra es conductora y se puede tomar como un solo nodo de baja impedancia, por lo que para que la generación del Arco sea satisfactoria se necesita vencer la impedancia entre electrodo y chatarra. La impedancia entre electrodo y chatarra puede disminuir disminuyendo la distancia de separación entre la punta del electrodo y la chatarra misma o el baño de acero líquido.

El circuito eléctrico en su estado natural (electrodos en posición de reposo y horno sin carga de chatarra) se encuentra abierto, esto significa que existe una impedancia sumamente grande (infinita) que impide el flujo de corriente. Entre mas cerca estén los electrodos de la base del nodo común o chatarra, la impedancia entre estos 2 puntos disminuirá, logrando así un flujo de corriente. La barrera entre la existencia y no existencia de flujo de corriente es cuando los electrodos se encuentran muy cercanos a la

chatarra (casi tocándolos), es cuando la impedancia entre estos 2 puntos es mínima, cercana a cero y entonces se produce el flujo de corriente. En circuitos eléctricos, al presentarse impedancia mínima cercana a cero, se dice que existe un cortocircuito. Esto es lo que ocurre en el interior de Horno de Fusión, se genera a propósito un corto circuito, detonando una energía impresionante, que con su calor es capaz de fundir metales. De esta manera se produce el famoso arco. A continuación la Figura 3. 4 representa lo escrito.

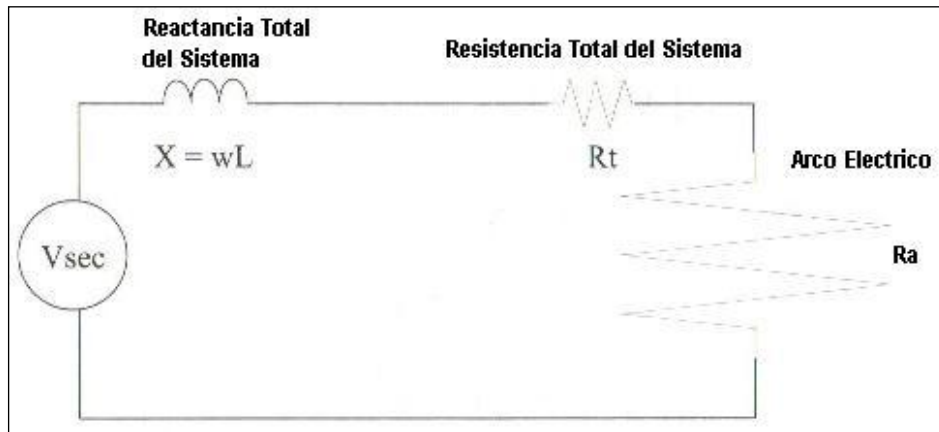


Figura 3. 4: Esquema eléctrico del Arco

Es de esta manera en que se logra vencer el límite de impedancia infinita y se genera el Arco Eléctrico. Es posible representar la distancia de separación de los electrodos al nodo común “chatarra” por una resistencia que se opone a que exista un flujo de corriente, como se muestra en la Figura 3. 5. Un Arco Eléctrico es una descarga de electrones o corriente y se categoriza dentro de los plasmas. El arco eléctrico se encuentra en su centro a una temperatura entre los 10000 y los 20000 °C. Es finalmente este calor y su energía radiante lo que funde la chatarra.

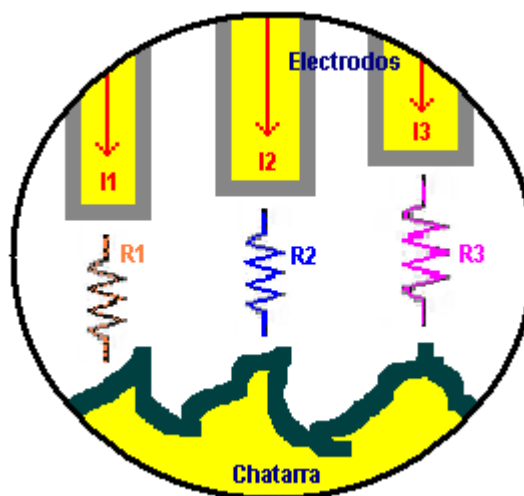


Figura 3. 5: Resistencia entre electrodos y nodo común.

Si existe una corriente y una resistencia, entonces implícitamente existe una diferencia de potencial (voltaje) entre la punta de cada electrodo y el nodo común (la chatarra o lecho de acero fundido). Es posible obtener la energía contenida en el arco que se produce de los electrodos una vez conocidos el voltaje, la corriente y la resistencia que ahí se presentan. Con la formula:

$$E = P(t) = V(t) * I(t) = \frac{V(t)^2}{R} = I(t)^2 * R = \left[\frac{Watts}{seg}; Joules \right]$$

Es importante comprender que el valor de energía calculado con la formula anterior NO es utilizado en su totalidad para la fundición. Parte de esta energía se presenta en calor y se transmite por convección o por radiación, otra se presenta en pérdidas, y otra vuelve a la red eléctrica en forma de energía eléctrica. Solamente aquella parte de la energía que se presentó en forma de calor es la que se transforma en el fenómeno de la fundición del acero; y ni siquiera el 100% de esta porción de energía, haciendo un complicado balance de energía se podría saber con exactitud cuanta energía efectiva es utilizada para fundir una cantidad específica de metal.

El reactor en la línea juega un papel importante. Éste tiene un variador de taps, el cual le permite variar su valor de reactancia aportada al circuito en la línea. Al variar la reactancia del reactor es posible variar la impedancia total de la línea. Siempre que exista una reactancia existe una impedancia, siempre que exista una impedancia existe una potencia reactiva (VAr), siempre que exista una potencia reactiva existe un factor de potencia (FP).

De acuerdo a este principio siempre que se tenga reactancia se tendrá un desfase entre Voltaje y Corriente. Al coseno de este ángulo de desfase se le conoce como Factor de Potencia, como se definió en el capítulo 2.

La potencia real (Watts) es consumida solamente por la carga resistiva en la línea. Mientras que la potencia aparente (VAr) es consumida solamente por la carga reactiva de la línea. Con el reactor se busca tener una reactancia lo mas pequeña posible para así mantener un factor de potencia cercano a 0.7 pu y así obtener la máxima capacidad del transformador.

Una vez conocido lo anterior queda más clara la forma en que opera el HAE, y la enorme cantidad de energía que se utiliza. Existen distintos métodos de control que buscan lograr la máxima eficiencia del horno con el mínimo gasto energético. Lo que estos sistemas de control buscan es tener una longitud de arco óptima, donde se produzca la fusión de manera mas eficiente, esto es en menor tiempo y consumiendo así menos energía. Lo más conveniente es tener un arco largo que permita reducir el tiempo de colada. La mayor transferencia de potencia de una fuente de energía (transformador mas reactor) se da cuando la impedancia de la fuente es igual a la impedancia de la carga (arco).

Al variar la Reactancia o la Resistencia se varía la impedancia, de esta manera se puede variar la potencia real o aparente utilizada en la línea. Y a su vez se varía de esta manera el Factor de Potencia. Comisión Federal de Electricidad (CFE) bonifica con un porcentaje de la factura mensual de electricidad a aquellas empresas que están cercanas al factor de potencia unitario. Por otro lado CFE multa con un recargo porcentual de la factura a aquellas empresas con FP por debajo de 0.9. Esta multa o bonificación

porcentual en Ternium, una empresa que gasta millones de pesos en energía eléctrica al año, puede ser un tremendo gasto o ganancia según sea el caso; de ambas formas muy importante de tomar en cuenta. El control del sistema de potencia se encarga también de mantener un FP estable. El cambio en el valor de todas estas variables en su momento preciso, de acuerdo con la etapa de la colada, dan como resultado un consumo de energía eficiente.

La energía eléctrica utilizada en la fundición se contabiliza en Millones de Watts (MW), y se le conoce como potencia eléctrica. La literatura dice que $MW=I^2 \cdot R$, donde I es la corriente que pasa por una fase del circuito eléctrico, y R es la impedancia o resistencia del Arco eléctrico. A mayor MW mayor energía utilizada, por lo tanto mayor temperatura y con esto menor tiempo utilizado en la fusión, pero mayores costos. Esta energía puede variar ya sea variando la corriente o variando la impedancia. La forma de variar la impedancia es como se describió anteriormente, variando la distancia de separación entre los electrodos y la chatarra o lecho líquido o los taps del reactor en serie.

Otra manera de variar la energía consumida es variando la corriente I de fase que pasa por los electrodos. La literatura dice que la corriente se determina con la siguiente fórmula: $I=V/R$, donde otra vez R es la impedancia en el arco eléctrico y V es el voltaje monofásico que alimenta a cada electrodo. Este Voltaje se puede variar, cambiando el tap del transformador, a mayor tap en el transformador mayor voltaje en el electrodo, y considerando que la impedancia se ha mantenido constante, entonces mayor corriente por la fase y así mayor energía (MW). Esta variación es fundamental en el control de la energía, puesto que la longitud del arco es un parámetro que puede afectar el interior del Horno, y entonces a veces es más conveniente cambiar el tap del transformador para obtener la longitud de arco adecuada para la condición de estabilidad de horno.

Para lograr la economización del proceso de Fusión ha sido necesario el dividir el tiempo de colada en tres etapas:

1.- *Bore-in* o etapa de perforación: Es la etapa inicial de la colada, comienza una vez que se vacía la primera carga al horno. Se define como el tiempo que tarda el electrodo en cavar un agujero en la chatarra.

En esta etapa se busca una penetración rápida en la chatarra, para esto se necesita mucha energía, por lo que se recomienda un arco largo, pero el horno es inestable en esta etapa por carecer de cobertura de escoria.

2.- *Melting* o etapa de fundición: Lapso de la colada en el cual la mayoría de la chatarra es transformada de su estado sólido a su estado líquido. Durante esta etapa se busca no dañar los paneles de enfriamiento ni las paredes del refractario, así como tampoco tocar el fondo del horno con algún electrodo, por lo que es la etapa más crítica durante toda la colada.

3.- *Refine* o etapa de refinación: Lapso de la colada en el cual el metal líquido es calentado desde su temperatura de fusión a su temperatura de término.

Durante esta etapa se busca elevar la temperatura del metal fundido de la manera más rápida posible. Otra vez cuidando de dañar las paredes del refractario y los paneles de refrigeración

3.4 Laminación vistazo eléctrico

El área de laminación como ya se mencionó en otras ocasiones es el área más delicada dentro de la planta. Ésta se encuentra eléctricamente alimentada a través del transformador 1 y 2 junto con el resto de las cargas insignificantes. Sin embargo el objetivo de la presente Tesis es encontrar la causa que provoca los problemas en esta área.

En Ternium Monterrey se cuenta con el proceso de laminación de planos y de largos, sin embargo, el presente estudio se realizó principalmente en la planta de Ternium Puebla donde el único proceso que tienen es el de laminación de largos.

La laminación de productos largos consiste en reducir la sección transversal de la palanquilla proveniente del proceso de Colada Continua, para transformarla en Alambrón o Varilla. Esto se realiza a través de una deformación mecánica, a alta temperatura, mediante un tren laminador, que irá reduciendo el tamaño de la sección transversal hasta lograr las dimensiones requeridas del producto final. En México se cuentan con dos plantas en donde se fabrica el proceso de laminación de productos largos, éstas son la planta de Apodaca en Monterrey y la de Xoxtla en Puebla. Con estas dos plantas se cuenta con una capacidad instalada de 607 mil Ton/año de varilla y 344 mil Ton/año de alambrón.

El proceso de Laminación esta conformado por 6 partes fundamentales: La zona de precalentamiento, el molino de desbaste, la zona intermedia, el molino pre-acabador, el molino acabador y el RSM¹.

La zona de precalentamiento donde se cuenta con un horno para precalentar la palanquilla y elevar su temperatura hasta 1200°C para así facilitar su transformación. Las palanquillas ingresadas al horno pueden provenir directamente de la colada continua o del almacén; a las primeras se les denomina carga caliente y las segundas carga fría.

El Horno tiene capacidad en su interior de 130 palanquillas, dentro de el se realiza la combustión con la mezcla de aire y gas natural. Cuando el Horno se alimenta con carga caliente tiene una capacidad de 90 Ton/hr y cuando se alimenta con carga fría la capacidad es de 75 Ton/hr.

Se le denomina zona de desbaste a los primeros rodillos en la línea de laminación. Esta conformada por 10 estantes. Cada estante se compone de 2 rodillos paralelos que giran a la velocidad del motor anexo a ellos. Su función es reducir el área transversal de la palanquilla y alargar su longitud.

La zona intermedia esta conformada por molinos más pequeños que al igual que los de desbaste buscan disminuir aun más el espesor de la palanquilla y alargar su longitud.

Las zonas del molino pre-acabador, acabador y RSM son las últimas en la línea de laminación, ellas se encargan de darle el espesor y longitud final, apariencia final y presentación final. En este grupo se encuentran los últimos molinos de la línea, tijeras de corte y formadores de lazos por ejemplo.

Todos los molinos, tijeras y formadores de lazos son operados por motores de distintas capacidades, algunos de ellos de 4000 y 5600 KVA. A su vez cada motor es controlado por *drives* variadores de frecuencia. En esta planta se cuentan con *Drives* BBC de los años 60's para la zona de Desbaste y parte de la intermedia, y *Drives* ABB y SAMI de los años 80's para las zonas finales de la línea. La Figura 3. 6 muestra un esquemático de lo aquí descrito.

¹ RSM: (*Reducing Sizing Mill*) Molino Reductor de Tamaño

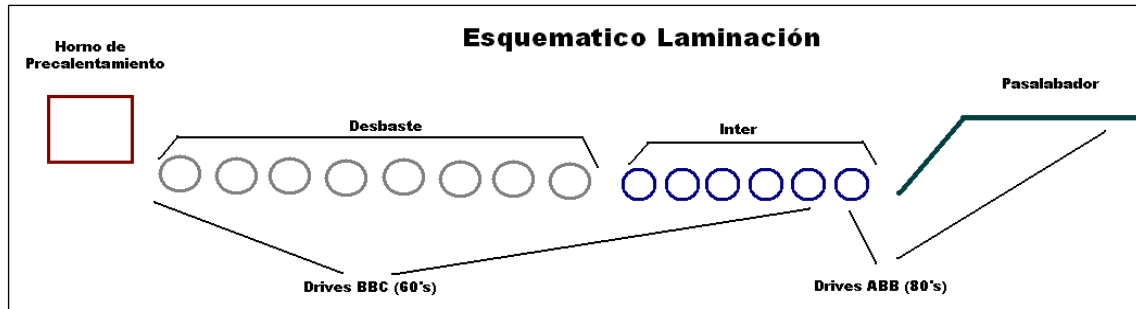


Figura 3. 6: Esquemático de Laminación

La velocidad a la cual gira cada molino es distinta, donde el molino más cercano al horno de precalentamiento gira más lento, mientras que el más alejado gira más rápido. El control en la velocidad de cada molino es fundamental para que toda la línea este en sincronía, si alguno de ellos llegara a girar, tan solo por un momento, a una velocidad fuera de la sincronía, la línea de laminación completa sufriría un problema que detendría la producción por tiempos tan prolongados como la magnitud del problema lo requiera.

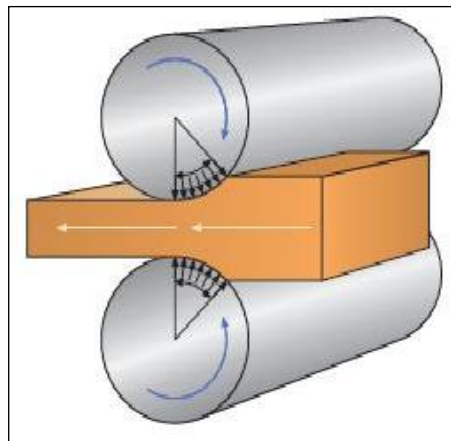


Figura 3. 7: Molinos laminadores.

Para que algún molino salga de sincronía basta con que el motor controlándolo gire a una velocidad distinta a la de sincronía. Y para esto basta con que el sistema electrónico que controla el sincronismo mande a un drive una referencia errónea de velocidad.

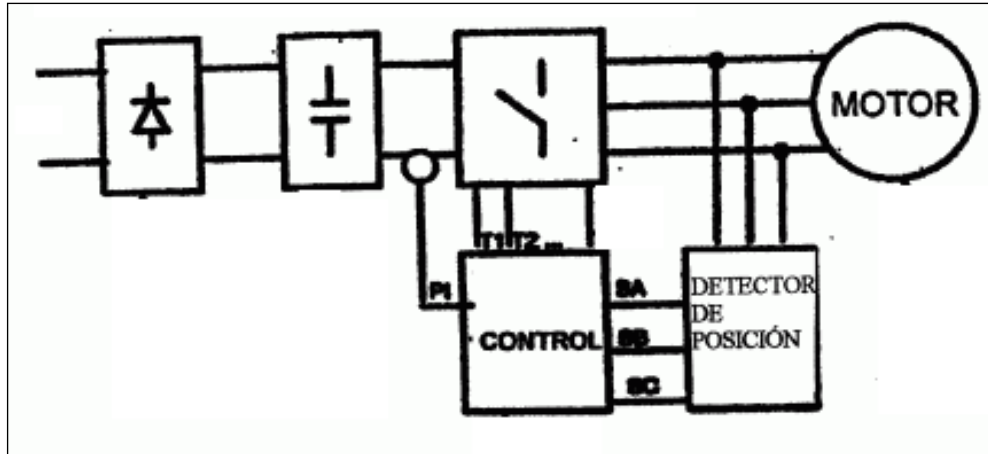


Figura 3. 8: Esquema de control de un motor.

Debido a esta situación, la zona del molino acabador y RSM son las más delicadas, puesto que los motores en estas zonas son más pequeños y giran a mayor velocidad. Entonces al ocurrir algún disturbio eléctrico en la alimentación de los *Drives* y del sistema electrónico de control de sincronismos, estos mandan una señal referenciada errónea que repercute en el movimiento de algunos motores, afectando a toda la línea. Muchas veces los motores grandes no se ven afectados por una señal de referencia errónea de corta duración porque la misma inercia del motor le impide un cambio de velocidad brusco. No es lo mismo para los motores en la zona RSM.

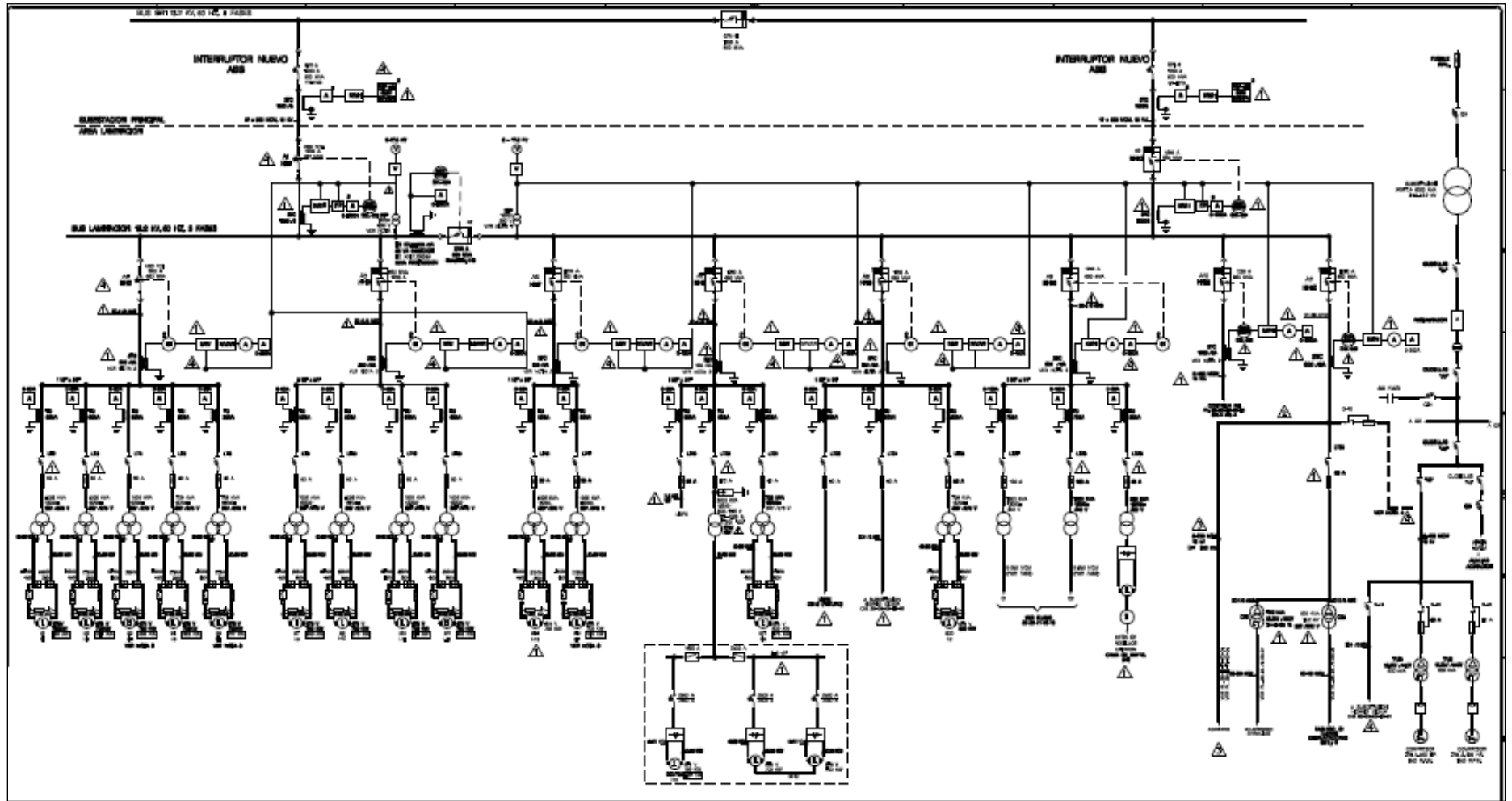


Figura 3. 9: Diagrama eléctrico unifilar Planta Puebla

La Figura 3. 9 muestra el diagrama eléctrico unifilar del área de laminación de la planta Puebla. En este diagrama se pueden observar como el área de laminación tiene dos puntos de alimentación en 13.2 kV, una proveniente de cada transformador, el T1 y T2 respectivamente. Del diagrama se puede observar también la distribución de las distintas cargas dentro del área, las cuales son principalmente motores de corriente directa de 675V nominales.

En la Figura 3. 10 se muestra la conexión más común para motores con la que se cuenta en el área de laminación. Donde a partir de un transformador de tres devanados se reduce el voltaje de 13.2 kV a 367 y 275 V en cada pierna. De esta manera se alimentan a dos rectificadores independientes, donde uno de ellos consta de rectificación disparada por tiristores, y por lo tanto se obtiene un voltaje de directa variable, y del otro lado se tiene un simple rectificador de diodos. De ambos rectificadores se obtienen 450 y 350 V de directa que al ser conectados en serie alimentan al motor de 675 V con un voltaje variable. Con este tipo de conexión se busca tener un Voltaje de directa con poco rizado.

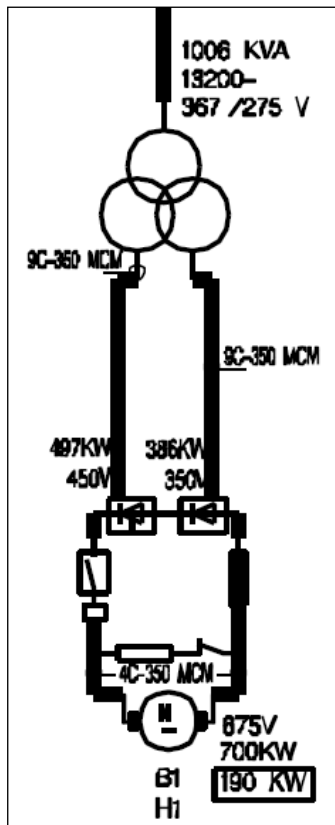


Figura 3. 10: Conexión de motores en laminación

Capítulo 4: Causas de Disturbios Eléctricos dentro de la Industria Siderúrgica

En el capítulo dos ya se definieron los distintos disturbios eléctricos que dan lugar a una mala calidad de energía. Este capítulo se centra en listar los fenómenos que puedan dar lugar a los distintos disturbios. Se encontrará que muchos de los fenómenos aquí descritos son frecuentemente encontrados en casi cualquier empresa, Ternium no es la excepción. Es propósito de este capítulo difundir este conocimiento y así concientizar a ingenieros para que se tomen medidas para evitar estos fenómenos.

4.1 Causas de *Sags* y *Swells*

Los *Sags* y *Swells* son disturbios que suceden eventualmente en la red eléctrica y sus causas pueden llegar a ser muy variadas. Sin embargo es simple su clasificación respecto a su origen, entonces el *Sag* o *Swell* puede ser de origen externo o interno.

Una de las causas más comunes que provoca *Sags* son las fallas de corto circuito en la red eléctrica, distintos tipos de fallas producen distintos tipos de *Sags*, los cuales pueden tener distintas combinaciones de voltajes trifásicos, inclusive para el mismo tipo de *Sag*. Durante la propagación a través del sistema de potencia, los *Sags* son expuestos a cambios adicionales. Los tipos de *Sags* y fases de voltaje cambian durante la propagación. En la Tabla 4. 1 se muestra los disturbios que dan como resultado en el lugar de la falla y en la propagación, para distintos orígenes de la falla, en este caso fallas de línea a tierra, línea a línea, dos líneas a tierra y trifásica.

Tabla 4. 1: Magnitudes de Voltaje durante los distintos tipos de Falla, en el punto de origen de la falla y en puntos en propagación a través de transformadores [10].

| <i>Tipo de Falla</i> | <i>Disturbio Resultante</i> |
|---|---|
| <i>Falla de una línea a Tierra (L-G)</i> | <i>En el punto de falla:</i> <i>Sag</i> de una fase o interrupción de una fase; las dos fases sin falla tienen la misma magnitud. <i>En propagación:</i> <i>Sag</i> de una fase, <i>Sag</i> de dos fases simétrico, o <i>Sag</i> trifásico asimétrico con magnitud igual en dos fases. |
| <i>Falla de línea a línea (L-L)</i> | <i>En el punto de falla:</i> <i>Sag</i> simétrico de dos fases; las dos fases en falla tienen la misma magnitud. <i>En propagación:</i> <i>Sag</i> de una fase, <i>Sag</i> de dos fases simétrico, o <i>Sag</i> trifásico asimétrico con magnitudes iguales en dos fases. |
| <i>Falla de dos líneas a Tierra (L-L-G)</i> | <i>En el punto de falla:</i> <i>Sag</i> o interrupción de dos fases simétrico; las dos fases de falla tienen la misma magnitud. <i>En propagación:</i> <i>Sag</i> de dos fases simétrico, o <i>Sag</i> trifásico asimétrico con magnitudes iguales en dos fases. |

| | |
|------------------------------------|--|
| <i>Falla Trifásica (L-L-L)</i> | <i>En el punto de falla:</i> <i>Sag</i> o interrupción trifásico simétrico; las tres fases tienen magnitudes iguales. <i>En propagación:</i> <i>Sag</i> trifásico simétrico con magnitudes iguales en las tres fases. |
|------------------------------------|--|

Se puede observar cómo a pesar de que el origen de la falla sea conocido, no es garantía qué tipo de *Sag* se va a originar. Claramente se observa como de una falla de línea a línea pueden originarse *Sags* de una sola fase, simétricos en dos fases o asimétricos en tres fases; así como también un *Sag* de una sola fase puede ser originado por una falla de línea a tierra o de una falla de línea a línea, por mencionar un ejemplo. Por lo que no se puede saber con completa certeza qué *Sag* se obtendrá de acuerdo a una falla conocida.

Existen tres áreas de ocurrencias de *Sags*: el sistema de transmisión típicamente mayor a 65 kV, los sistemas de distribución de 65 a 12 kV, y los puntos de utilización de 480 a 120 V.

Es importante comprender las diferencias y las distintas causas que influyen en los tres puntos de ocurrencia. En la Tabla 4. 2 se muestra las distintas causas que producen *Sags* en el sistema de distribución y con qué frecuencia ocurren [11].

Tabla 4. 2: Causas de *Sags* en Sistemas de Distribución

| Causas | # de Ocurrencias | Porcentaje |
|--------------------------------------|-------------------------|-------------------|
| Viento y Relámpagos | 37 | 46% |
| Falla en equipo en la acometida | 8 | 10% |
| Accidentes de construcción o tráfico | 8 | 10% |
| Animales | 5 | 6% |
| Ramas de árboles | 1 | 1% |
| Desconocidas u otras | 21 | 26% |
| TOTAL | 80 | |

En específico, en el sistema de transmisión las causas más comunes de *Sags* se deben al clima, con esto me refiero a tormentas eléctricas y rayos que caen en estas líneas, también accidentes de construcción, accidentes de medios de transporte como helicópteros o avionetas, animales o una falla en alguna otra parte del sistema causando *Sags* viajeros. Inclusive se han encontrado nidos de grandes aves en la torres de transmisión que resultan en fallas de línea a tierra debido a que los aisladores se ponen en corto con la estructura. Se atribuye que los relámpagos son la causa más común de *Sags* en el sistema de transmisión, como puede observarse en la tabla anterior. Una falla puede ocurrir cuando un rayo golpea directo una fase del sistema o un objeto aterrizado, como la torre o un cable blindado, esto provocará un *Sag* que durará hasta que se libere la falla.

En los sistemas de distribución es otra la situación, puesto que el voltaje es menor. El clima (relámpagos), al igual que en la transmisión, es una de las causas de *Sags*, aunque también el contacto de los animales, contaminación de aisladores, accidentes de construcción, accidentes de automóviles o vehículos motorizados y contacto de cables con ramas de árboles. Cualquiera de las anteriores puede dar como resultado fallas trifásicas, de línea a tierra o de línea a línea; las fallas trifásicas son las más severas pero

es muy poco común que sucedan, mientras que las fallas de una línea a tierra son la causa más común de *Sags* de voltaje en las industrias [12].

Por último en el punto de utilización también ocurren *Sags*, según un estudio del NPL², el 50% de los eventos de elevación o disminución del RMS que se obtuvieron en el estudio fueron causados por el equipo instalado en la misma planta. Los *Sags* de voltaje pueden ser causados por condiciones de falla dentro de las instalaciones, o el arranque de grandes cargas inductivas, como motores, que demandan una condición de corriente momentánea.

Puede haber también presencia de *Sags* de larga duración, los cuales ocurren generalmente debido a fallas en el sistema de protección de la transmisión o la distribución. En tales casos la influencia de motores de inducción debe ser tomada en cuenta ya que pueden alterar significativamente las características de los *Sags* [13]. Estudios han demostrado que es importante tomar en cuenta que la forma de los *Sags* deja de ser rectangular si existe un número apreciable de motores de inducción y la falla es de larga duración. En tales casos la forma del *Sag* cambia debido a la respuesta dinámica del motor de inducción. Cuando aparece un *Sag* de voltaje en las terminales de un motor de inducción, el torque y la velocidad del motor disminuyen a niveles por debajo de los nominales. Una vez que el *Sag* es removido, el motor de inducción trata de re acelerar, y comienza a demandar una cantidad excesiva de corriente del sistema. El flujo de esa corriente a través de la impedancia de las líneas previene una recuperación rápida del nivel de voltaje y causa un *Sag* de mayor duración y cambio en la forma del *Sag*. Este nuevo *Sag* puede causar que equipo sensible sea afectado aunque haya sido capaz de sobrellevar el *Sag* original [14].

El interruptor de recierre o recloser es un interruptor para media tensión previsto para despejar fallas temporales o interrumpirlas en caso de ser fallas permanentes. Con interruptores de recierre en la subestación, los usuarios de circuitos paralelos pueden experimentar hasta cuatro *Sags* sucesivos, durando desde un par de ciclos hasta más de 10 ciclos. Las características del voltaje en el punto de los usuarios de un alimentador paralelo se ven de la siguiente manera:

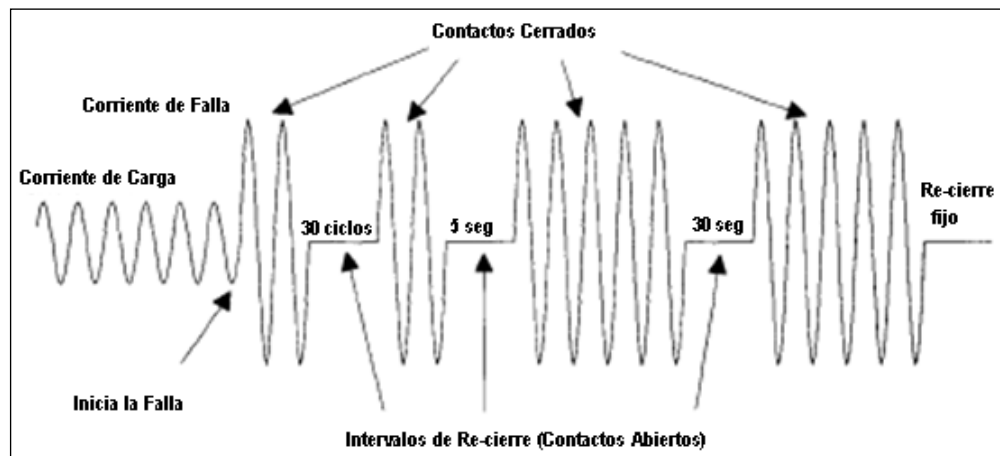


Figura 4. 1: Duración típica de tiempos de Re-cierre

² National Power Laboratory.- Empresa en Estados Unidos que ha realizado numerosos estudios de *Sags*.

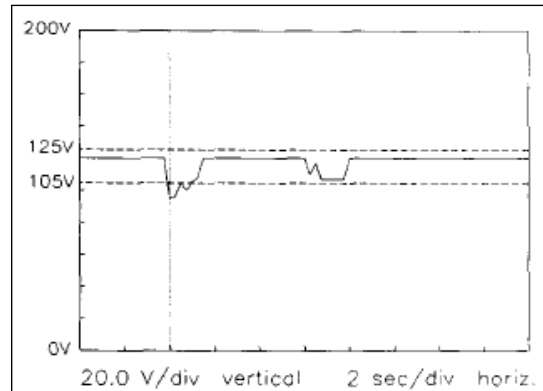


Figura 4. 2: Sag del Voltaje en el punto del usuario ante un re-cierre.

Por otro lado se encuentran los *Swells* que, contrarios a los *Sags*, estos son elevaciones de voltaje. Es muy poca la frecuencia con la que ocurren los *Swells* y por eso se dice que son poco comunes, pero también se asocian a condiciones de falla del sistema. Por ejemplo un *Swell* puede ocurrir debido a una falla de una línea a tierra en el sistema, la cual puede resultar en una elevación de voltaje temporal en las otras fases que no tuvieron la falla. Esto ocurre en sistemas tipo delta que no estén conectados a tierra o que estén con tierras flotadas. En la Tabla 4. 3 se muestra como se ve afectado el voltaje secundario de distintas conexiones del transformador ante la presencia de una falla de corto circuito de una línea a tierra (SLTG).

Tabla 4. 3: Voltajes Secundarios del Transformador (pu) ante fallas tipo SLTG [11]

| Conexión del Transformador | Fase a Fase | | | Fase a Neutro | | |
|---|-------------|------|------|---------------|------|------|
| | Va | Vb | Vc | Van | Vbn | Vcn |
| Estrella aterrizada- Estrella aterrizada | 0.58 | 1.00 | 0.58 | 0.0 | 1.0 | 1.0 |
| Estrella aterrizada – Estrella no aterrizada | 0.58 | 1.00 | 0.58 | 0.0 | 1.0 | 1.0 |
| Estrella no aterrizada – Estrella no aterrizada | 0.58 | 1.00 | 0.58 | 0.33 | 0.88 | 0.88 |
| Estrella no aterrizada – Estrella aterrizada | 0.58 | 1.00 | 0.58 | 0.33 | 0.88 | 0.88 |
| Delta – Delta | 0.58 | 1.00 | 0.58 | --- | --- | --- |
| Estrella no aterrizada – Delta | 0.33 | 0.88 | 0.88 | --- | --- | --- |
| Estrella aterrizada – Delta | 0.33 | 0.88 | 0.88 | --- | --- | --- |
| Delta – Estrella aterrizada | 0.88 | 0.88 | 0.33 | 0.58 | 1.00 | 0.58 |
| Delta – Estrella no aterrizada | 0.88 | 0.88 | 0.33 | 0.58 | 1.00 | 0.58 |

En resumen, los *Sags* son causados por condiciones de falla y estos son inevitables en la práctica. Sin embargo el arranque de motores también puede generar estos bajones de voltajes, pero estos son típicamente más largos en duración que 30 ciclos y su magnitud no es tan baja. Las variaciones de voltaje debido a arranque de motores son usualmente referidas como flicker, especialmente si el motor arranca con mucha frecuencia. Las fallas de cortocircuito que resultan en *Sags* de voltaje pueden ocurrir ya sea dentro o fuera de la industria. La condición de *Sag* de voltaje dura hasta que la falla de cortocircuito es corregida por un dispositivo protector. En una planta este dispositivo es generalmente un fusible o un interruptor termomagnético. Del lado de la generación o acometida la falla puede ser liberada por un

fusible de rama o un interruptor de subestación. Si existen maniobras en alta tensión la condición de *Sag* puede ocurrir muchas veces.

Las fallas de corto circuito de la acometida pueden ocurrir en los sistemas de distribución o en los sistemas de transmisión. Una falla en cualquier alimentador causará una interrupción que afectará a todos los usuarios alimentados de ese circuito.

Las fallas de corto circuito en el sistema de transmisión pueden afectar incluso a más usuarios. En transmisión, usuarios a cientos de millas del origen de la falla pueden experimentar un *Sag* de voltaje que cause mal funcionamiento en el equipo. La gran mayoría de las fallas presentes en el sistema de acometida son fallas de una línea a tierra (SLGF). Las fallas trifásicas son mucho más severas, pero mucho menos comunes. SLFG's usualmente se originan por las condiciones del clima, como relámpagos, viento y nieve. La contaminación de aisladores, contacto de animales, y accidentes de construcción o transportación también ocasionan estas fallas. Los relámpagos son la causa más común de *Sags* en los sistemas de distribución y transmisión. Relámpagos pueden ocasionar una falla simplemente golpeando un objeto aterrizado [15].

4.2 Causas de Armónicas

Hay veces que una carga no lineal o una carga que varía periódicamente con el tiempo tiene que ser considerada como fuente de frecuencias armónicas. Esto debido a su circuito interno usualmente constituido por elementos pasivos y fuentes de armónicas. Debido a un incremento rápido en electrónica de potencia, más y más energía es transmitida a la red eléctrica en forma de voltajes y corrientes no senoidales [16].

Debido a que la distorsión armónica es causada por elementos no lineales conectados al sistema de potencia, todo elemento que tenga características no lineales causará distorsión armónica. Se pueden encontrar muchos tipos de cargas que producen armónicas conectadas en la red, algunos ejemplos de fuentes comunes de armónicas al sistema de potencia son:

- Saturación de Transformadores
- Irrupción de Transformadores
- Conexiones al neutro del Transformador
- Distribución MMF en máquinas rotatorias de CA
- Hornos de Arco Eléctrico
- Luz Fluorescente
- Fuentes de poder para computadoras operadas por conmutación
- Cargadores de Baterías
- Fuentes de CA imperfectas
- Compensadores estáticos de reactivos (SVC)
- Variadores de frecuencia para motores (VFD)
- Convertidores CD
- Inversores
- Fuentes de alimentación para televisiones

De las anteriores nombradas, una de las que más armónicas y de mayores amplitudes arroja a la red eléctrica son las cargas tipo VFD.

| Armónica | Porcentaje de la Fundamental | | |
|----------|------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|
| | Hornos de Arco | Transformadores de Distribución | Inversores monofásicos de conmutación |
| 3 | 29.0 | 50.0 ^b | 16.0 |
| 5 | 7.6 | 20.0 | 5.0 |
| 7 | 3.1 | 5.0 | 2.8 |
| 9 | 2.0 | 2.6 | 1.9 |

Figura 4. 3: Corrientes Armónicas típicas de dispositivos comunes [17]

En la Figura 4. 3 se muestran las armónicas típicas en presencia de los dispositivos ahí nombrados. Las corrientes armónicas individuales generadas por un convertidor, para cualquier orden armónico, pueden ser vistas como fasores variables, con amplitud y fase variable. La corriente armónica total inyectada a un bus es la suma geométrica de todos estos fasores [18].

Es muy común encontrar en industrias motores de corriente directa, motores de inducción de corriente alterna y motores sincrónicos, todos ellos motores de potencia y todos ellos controlados por *drives* específicos para cada tipo de motor. Aunque todos estos *drives* guardan una cosa en común, y esta es que utilizan control de fase de 6 o 12 pulsos y rectificación de puente completo lo cual produce distorsión de voltaje y corriente en la red de CA. Los *drives* que controlan estos motores utilizan la electrónica de potencia para convertir tres fases de CA en un voltaje variable de CD con rectificadores controlados de seis/doce pulsos. En la siguiente figura se muestran las topologías más comunes de los *drives* de motores.

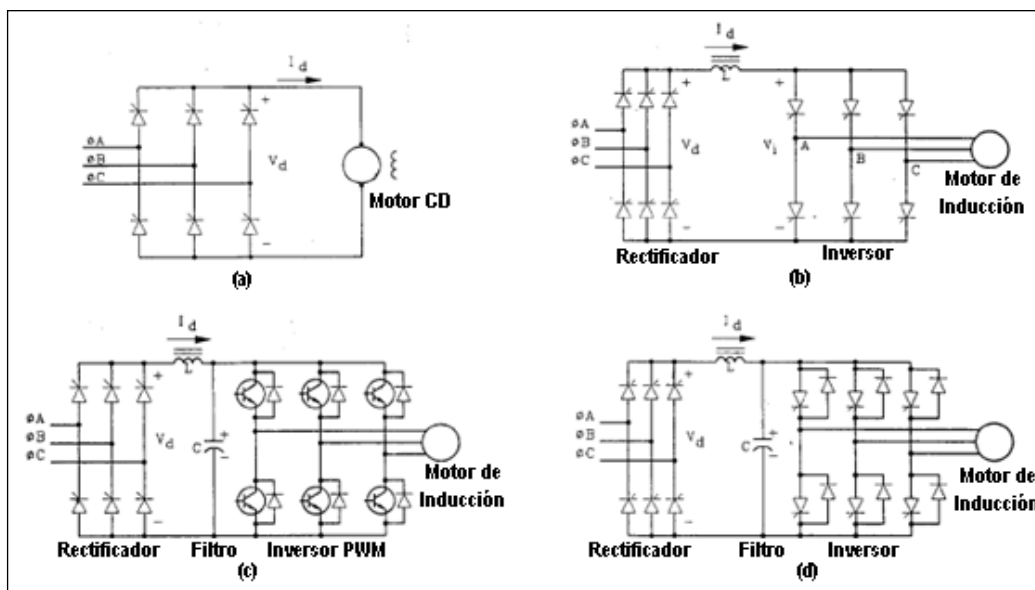


Figura 4. 4: Topologías típicas de *Drives* de motores que utilizan rectificadores controlados por fase de 6 pulsos: a) Drive de motor de CD; b) Drive de CA de inducción con inversor de fuente de corriente; c) Drive de inducción de CA con inversor alimentado por voltaje; d) Drive de inducción de CA con un inversor disparado por PWM [19].

Los convertidores de 6 pulsos son otros dispositivos comunes en las plantas, ya bastante estudiados que arrojan ordenes armónicos ya conocidos. Cuando se tiene un transformador delta-estrella conectado entre las terminales del convertidor y el punto en el cual se observa la corriente, se obtiene una onda cuadrada con distintos niveles, lo que produce gran contenido armónico. En la Figura 4. 5 se muestra el contenido armónico de distintas formas de onda que resultan de los convertidores.

Aunque se utilizaron distintos métodos para el cálculo de las armónicas, se pueden observar algunas diferencias significativas para algún orden armónico específico, sin embargo la mayoría del contenido armónico es muy parecido.

Actualmente las plantas de generación están encontrando que el número total de rectificadores o convertidores grandes y pequeños que están conectados a sus sistemas es un número significativo.

Se han encontrado casos en los que los bancos de capacitores instalados en subestaciones son el factor dominante causante de transitorios y armónicos al sistema de distribución [17].

La armónica de resonancia ocurre en un sistema de potencia cuando la frecuencia natural del sistema de potencia corresponde a la frecuencia de la fuente de una corriente armónica. La resonancia es un efecto peligroso que puede ocurrir por falta de análisis al momento de instalar nuevos componentes capacitivos en la red. La corrección del Factor de Potencia sin consideración de una posible resonancia puede ocasionar este problema.

El comportamiento dinámico de la corriente asociado con la energización de transformadores incluye armónicas pares e impares que decaen con el tiempo hasta que la corriente de magnetización del transformador alcanza el estado estable. Las armónicas mas comunes durante este evento son la segunda, tercera, cuarta y quinta, decreciendo en magnitud conforme aumentan en orden. Estas armónicas solo causan problemas cuando existe resonancia con alguna de ellas.

A manera de ilustración de lo antes indicado se presenta un caso de estudio. En junio de 1986, en una planta papelera en Kitimat, Canadá, se presentó una problema terrible que terminó en incendio y destrucción, debido a una falla en el interruptor de la acometida de la planta a 13.8kV. Posteriores estudios del problema descubrieron que la causa de la falla del interruptor fue debido a presencia de quinta armónica que provocaba resonancia. Problema que se originó como efecto de una corrección de factor de potencia por un banco de capacitores de 13.8kV. El molino de la papelera tenia aproximadamente 8MW de *drives* de directa a base de tiristores que generaban armónicas de quinta, séptima, onceava, treceava, decimo séptima, decimo novena, etc.

Se realizaron mediciones de corrientes armónicas en la alimentación al interruptor del banco de capacitores de 13.8kV, en el interruptor principal de 13.8kV y en las cuatro alimentaciones de 13.8kV a los transformadores de 13.8-0.4kV. También se tomaron mediciones en el bus del molino de 13.8kV y en los buses de 0.4kV de las máquinas papeleras. Se encontraron los siguientes resultados en el bus de 13.8kV [21].

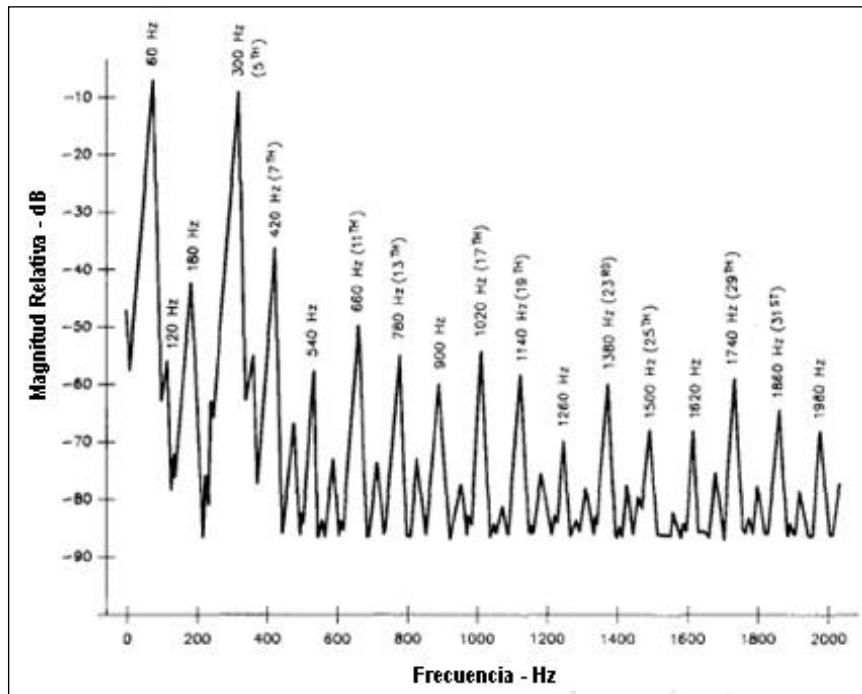


Figura 4. 6: Análisis de Espectros de la corriente de un capacitor de 13.8 kV (fn=5.24)

Los 61 A de quinta armónica generados por los tiristores de las máquinas de *drives* es aproximadamente 3% de la corriente total del sistema a 60 Hz. Fuentes armónicas del orden de 1% pueden generar grandes sobrecorrientes y sobrevoltajes durante la armónica de resonancia. El diagrama de espectros del banco de capacitores principal muestra la existencia de armónicas de alto orden y quinta armónica [21].

La AACE realizó un estudio de armónicos en tres subestaciones y doce circuitos de distribución. Se cuentan con tres subestaciones: North Athens, South Athens y Englewood, y doce alimentadores de distribución automatizados como se muestra en la figura.

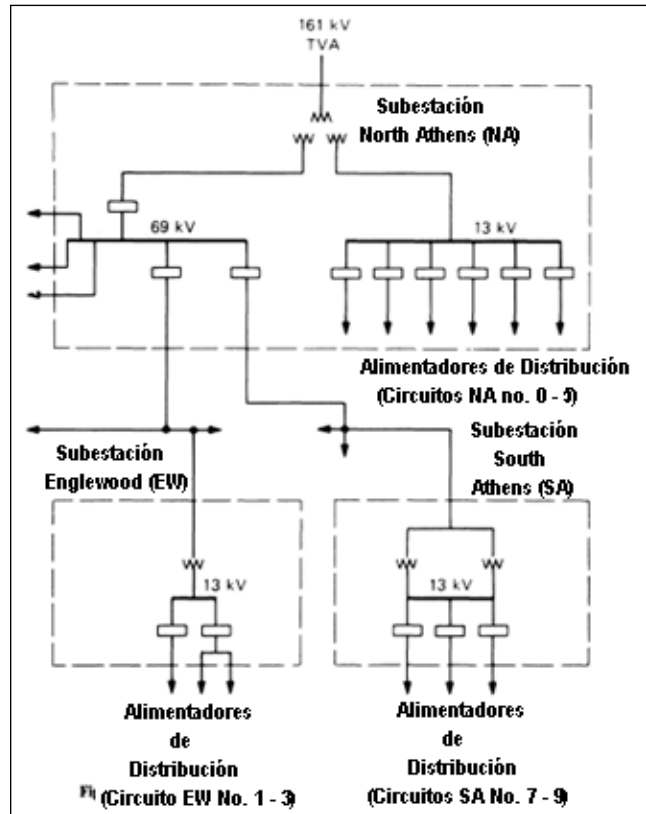


Figura 4. 7: Diagrama unifilar del sistema de distribución de la Acometida Athens

Cada circuito cuenta con 3 fases en el primario. Puede observarse de la Figura 4. 7 que en la subestación North Athens (NA) se cuentan con 6 circuitos de distribución numerados del 0 al 5 conectados en un bus de 13.2 kV, y que esta subestación alimenta con 69 kV a las otras dos subestaciones. En la subestación de South Athens (SA) se cuenta con 3 circuitos de distribución también alimentados a 13.2 kV, numerados 7, 8 y 9, mientras que en la Englewood (EW) se cuenta con tres circuitos a 13.2 kV numerados del 1 al 3. Se cuenta con un sistema automático para conectar y desconectar los bancos capacitivos en la red, con el objetivo de reducir pérdidas en la línea, estabilizar el voltaje en los alimentadores, y suministrar potencia reactiva al sistema de transmisión. Los bancos de capacitores controlables en las tres subestaciones se muestran en la Tabla 4. 4, los bancos de capacitores en las subestaciones son mostradas en la Tabla 4. 5.

Tabla 4. 4: Capacitores controlados en la Acometida Athens

| Nombre Subestación | Circuito no. | Numero y tamaño de los capacitores (kVAr) |
|--------------------|--------------|---|
| North Athens | 0 | 1-600 |
| North Athens | 1 | 2-600, 2-1200 |
| North Athens | 2 | 3-600 ^a , 2-1200 |
| North Athens | 3 | 1-900, 3-1200 |
| North Athens | 4 | No capacitores |
| North Athens | 5 | 2-600, 2-1200 |
| South Athens | 7 | 1-600, 1-900, 1-1200 |
| South Athens | 8 | 3-600 |
| South Athens | 9 | 3-600 ^a , 2-1200 |
| Englewood | 1 | 1-600 |
| Englewood | 2 | No capacitores |
| Englewood | 3 | 1-150 ^a , 1-300 |

Tabla 4. 5: Capacitores en la Subestación

| Subestación | Numero y tamaño de los capacitores (kVAr) |
|--------------------|--|
| North Athens | 1-5400, 2-4800 |
| South Athens | 2-3600 |
| Englewood | ninguno |

El objetivo de este análisis de armónicas es determinar si alguna configuración de capacitores resultante de la conmutación pueda dar como resultado un nivel armónico excesivo en el sistema de distribución. Se evaluaron varias configuraciones de capacitores dándole prioridad a aquellas que generaban resonancia en paralelo en la tercera y quinta armónica. Del análisis descrito se encontraron los siguientes casos como los más críticos:

Tabla 4. 6: Configuraciones de los capacitores que resultaron en la mayor THD en el sistema.

| Caso | Descripción del Caso |
|-------------|---|
| 1 | <p>Sistema de Distribución North Athens</p> <p>(a) Todos los bancos de capacitores conectados (en subestación y alimentadores) (Caso con menor frecuencia de resonancia)</p> <p>(b) Banco de Capacitores de 4.8 MVAR en subestación conectado, capacitores en nodos 115, 191, 213, 292, 391, 393 y 303 desconectados (Caso de resonancia a la quinta armónica)</p> <p>(c) El mismo caso que 1b pero con carga al 20%</p> |
| 2 | <p>Sistema de Distribución South Athens</p> <p>(a) Banco de capacitores de subestación conectado; capacitores en nodos 720 y 917 desconectados (caso de resonancia a la quinta armónica)</p> |
| 3 | <p>Sistema de Distribución Englewood</p> <p>(a) Todos los capacitores conectados (en subestación y alimentadores) (Caso con menor frecuencia de resonancia)</p> |

y estos son los resultados obtenidos para algunos de estos casos.

Tabla 4. 7: Niveles de distorsión armónica en el Sistema de Distribución North Athens para el caso 1a

| Capacitor bus | % 3rd | % 5th | % 7th | % 9th | % THD |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Substation | 6.7634 | 0.2160 | 0.0337 | 0.9600 | 6.8347 |
| 246 | 7.0490 | 0.1828 | 0.0210 | 1.0067 | 7.1229 |
| 115 | 7.1253 | 0.2891 | 0.0983 | 1.0191 | 7.2043 |
| 191 | 7.1047 | 0.2870 | 0.0953 | 1.0157 | 7.1833 |
| 128 | 7.0652 | 0.2753 | 0.0847 | 1.0092 | 7.1427 |
| 106 | 7.0070 | 0.2568 | 0.0689 | 0.9998 | 7.0830 |
| 213 | 6.9255 | 0.2640 | 0.0532 | 0.9863 | 7.0006 |
| 203 | 6.9246 | 0.2629 | 0.0528 | 0.9861 | 6.9996 |
| 221 | 6.8971 | 0.2438 | 0.0450 | 0.9817 | 6.9710 |
| 293 | 6.9402 | 0.2508 | 0.0469 | 0.9889 | 7.0149 |
| 291 | 6.9111 | 0.2428 | 0.0438 | 0.9841 | 6.9852 |
| 391 | 7.8697 | 0.0514 | 0.0655 | 1.1408 | 7.9524 |
| 393 | 6.8993 | 0.2611 | 0.0511 | 0.9821 | 6.9739 |
| 139 | 6.8895 | 0.2587 | 0.0501 | 0.9805 | 6.9639 |
| 303 | 6.8645 | 0.2477 | 0.0457 | 0.9764 | 6.9382 |
| 561 | 1.0708 | 0.1857 | 0.1625 | 0.0333 | 1.0994 |
| 590 | 2.3425 | 0.1898 | 0.1513 | 0.2352 | 2.3668 |
| 591 | 3.8915 | 0.1995 | 0.1232 | 0.4897 | 3.9292 |
| 566 | 4.4899 | 0.2057 | 0.1065 | 0.5877 | 4.5341 |

Tabla 4. 8: Niveles de distorsión armónica en el Sistema de Distribución North Athens para el caso 1b

| Capacitor bus | % 3rd | % 5th | % 7th | % 9th | % THD |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Substation | 7.6507 | 3.7388 | 0.0402 | 1.5094 | 8.6482 |
| 246 | 7.9832 | 3.9906 | 0.0298 | 1.5440 | 9.0577 |
| 115 | 8.0719 | 4.1871 | 0.0288 | 1.5534 | 9.2250 |
| 191 | 8.0477 | 4.1843 | 0.0298 | 1.5508 | 9.2022 |
| 128 | 8.0018 | 4.1871 | 0.0318 | 1.5460 | 9.1625 |
| 106 | 7.9341 | 4.1050 | 0.0333 | 1.5389 | 9.0648 |
| 213 | 7.8391 | 4.1688 | 0.0426 | 1.5290 | 9.0094 |
| 203 | 7.8380 | 4.1687 | 0.0426 | 1.5289 | 9.0084 |
| 221 | 7.8060 | 4.0645 | 0.0415 | 1.5256 | 8.9321 |
| 293 | 7.8567 | 3.9913 | 0.0359 | 1.5309 | 8.9444 |
| 291 | 7.8229 | 3.9870 | 0.0374 | 1.5273 | 8.9122 |
| 391 | 8.9387 | 3.9001 | 0.0319 | 1.6456 | 9.8904 |
| 393 | 7.8087 | 4.0772 | 0.0410 | 1.5259 | 8.9403 |
| 139 | 7.7973 | 4.0759 | 0.0415 | 1.5247 | 8.9296 |
| 303 | 7.7682 | 3.9766 | 0.0405 | 1.5216 | 8.8586 |
| 561 | 1.0258 | 7.2260 | 0.2081 | 0.9399 | 7.3617 |
| 590 | 2.4948 | 7.0339 | 0.1991 | 1.0406 | 7.5381 |
| 591 | 4.3035 | 6.5090 | 0.1735 | 1.1862 | 7.8946 |
| 566 | 5.0010 | 6.1831 | 0.1580 | 1.2488 | 8.0514 |

Tabla 4. 9: Niveles de distorsión armónica en el Sistema de Distribución North Athens para el caso 1c

| Capacitor bus | % 3rd | % 5th | % 7th | % 9th | % THD |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Substation | 0.4585 | 1.1955 | 0.0678 | 0.2313 | 1.3029 |
| 246 | 0.7272 | 1.2788 | 0.0616 | 0.2160 | 1.4882 |
| 115 | 0.8002 | 1.3422 | 0.0632 | 0.2118 | 1.5782 |
| 191 | 0.7806 | 1.3411 | 0.0642 | 0.2129 | 1.5676 |
| 128 | 0.7435 | 1.3417 | 0.0664 | 0.2149 | 1.5503 |
| 106 | 0.6885 | 1.3149 | 0.0667 | 0.2180 | 1.5017 |
| 213 | 0.6126 | 1.3344 | 0.0761 | 0.2218 | 1.4869 |
| 203 | 0.6118 | 1.3344 | 0.0761 | 0.2218 | 1.4866 |
| 221 | 0.5857 | 1.3009 | 0.0736 | 0.2234 | 1.4459 |
| 293 | 0.6267 | 1.2780 | 0.0672 | 0.2208 | 1.4420 |
| 291 | 0.5989 | 1.2763 | 0.0686 | 0.2225 | 1.4289 |
| 391 | 1.4450 | 1.2622 | 0.0315 | 0.2000 | 1.9293 |
| 393 | 0.5866 | 1.3049 | 0.0734 | 0.2235 | 1.4499 |
| 139 | 0.5773 | 1.3045 | 0.0739 | 0.2241 | 1.4459 |
| 303 | 0.5535 | 1.2725 | 0.0715 | 0.2256 | 1.4077 |
| 561 | 1.3009 | 2.2764 | 0.2095 | 0.1966 | 2.6376 |
| 590 | 1.2421 | 2.2183 | 0.2023 | 0.1984 | 2.5581 |
| 591 | 1.1005 | 2.0562 | 0.1814 | 0.2034 | 2.3480 |
| 566 | 1.0105 | 1.9555 | 0.1687 | 0.2068 | 2.2173 |

Resumiendo se encontró que los valores máximos de THD ocurrieron cuando los capacitores son configurados para producir una resonancia de quinta armónica dominante en NA [17].

Al mismo tiempo se realizó un estudio de transitorios con el fin de determinar si la conmutación de los capacitores en NA y SA produce una variación de voltaje significativa en la red. Los resultados de este análisis se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 4. 10: Resumen de niveles transitorios de voltaje para distintas configuraciones de conexiones de capacitores en la subestación North Athens

| Capacitor de Subestación | Capacitores de estación conectados de inicio | Capacitores de alimentadores conectados de inicio | Voltaje transitorio de subestación máximo | Voltaje transitorio de alimentadores máximo |
|--------------------------|--|---|---|---|
| 5.4 MVar | Ninguno | 16500 KVar todos conectados | 1.70 pu | 2.75 pu nodo 246, circuito no. 0 |
| 5.4 MVar | Ninguno | 600 KVar compuesto al nodo 203, circuito no. 2 | 1.92 pu | 2.67 pu nodo 203, circuito no. 2 |
| 5.4 MVar | Ninguno | 7800 KVar totales 1-600 KVAR compuestos (203) y 6-1200 KVar al final de cada alimentador (nodos 566, 191, 115, 393, 213, 293) | 1.81 pu | 2.72 pu nodo 213, circuito no. 2 |
| 5.4 MVar | Ninguno | 9600 KVar totales | 1.73 pu | 2.47 pu nodo 246, circuito no. 0 |
| 5.4 MVar | 4.8 MVar | Todos los 16500 KVar | 1.52 pu | 2.11 pu nodo 246, circuito no. 0 |
| 5.4 MVar | 4.8 MVar | 7800 KVar totales | 1.48 pu | 1.99 pu nodo 115, circuito no. 1 |
| 5.4 MVar | 9.6 MVar | Todos los 16500 KVar | 1.35 pu | 1.72 pu nodo 246, circuito no. 0 |
| 5.4 MVar | 9.6 MVar | 7800 KVar totales | 1.31 pu | 1.77 pu nodo 115, circuito no. 1 |
| 4.8 MVar | Ninguno | Todos los 16500 KVar | 1.71 pu | 2.77 pu nodo 246, circuito no. 0 |
| 4.8 MVar | Ninguno | 7800 KVar totales | 1.74 pu | 2.60 pu nodo 213, circuito no. 2 |
| 4.8 MVar | 4.8 MVar | 7800 KVar totales | 1.47 pu | 1.97 pu nodo 115, circuito no. 1 |

Como resultado de estos análisis se puede concluir que los bancos de capacitores en las subestaciones son la componente dominante de transitorios y armónicos en el sistema de distribución. Cuando el banco de capacitores de la subestación es energizado pueden ocurrir grandes magnitudes de transitorios dependiendo del estatus de los bancos de capacitores en el alimentador.

Actualmente existen distintos estándares aceptados a nivel mundial donde se limita el contenido armónico que puede estar presente en buses de voltaje que son puntos de conexión común (PCC), sistemas de distribución, sistemas de subtransmisión y sistemas de alto voltaje. Las siguientes tablas muestran esta información.

Tabla 4. 11: Límites de Distorsión de Voltaje según IEEE-519 [19], [22]

| Voltaje del nodo en PCC | HDv (%) | THDv (%) |
|-------------------------|---------|----------|
| 69 KV y menor | 3.0 | 5.0 |
| 69.001 KV a 161 KV | 1.5 | 2.5 |
| 161 KV y mayor | 1.0 | 1.5 |

HDv= Distorsión Armónica Individual de voltaje

Tabla 4. 12: IEEE-519 Límites Máximos de Distorsión Armónica de Corriente (% componentes impares) para sistemas de distribución en general [19]

| I_{sn}/I_L | $n < 11$ | $11 \leq n < 17$ | $17 \leq n < 23$ | $23 \leq n < 35$ | $35 \leq n$ | TDD |
|--------------|----------|------------------|------------------|------------------|-------------|------|
| < 20* | 4.0 | 2.0 | 1.5 | 0.6 | 0.3 | 5.0 |
| 20 < 50 | 7.0 | 3.5 | 2.5 | 1.0 | 0.5 | 8.0 |
| 50 < 100 | 10.0 | 4.5 | 4.0 | 1.5 | 0.7 | 12.0 |
| 100 < 1000 | 12.0 | 5.5 | 5.0 | 2.0 | 1.0 | 15.0 |
| > 1000 | 15.0 | 7.0 | 6.0 | 2.5 | 1.4 | 20.0 |

Tabla 4. 13: IEEE-519 Límites Máximos de Distorsión Armónica de Corriente (% componentes impares) para sistemas de subtransmisión en general [19]

| I_{sn}/I_L | $n < 11$ | $11 \leq n < 17$ | $17 \leq n < 23$ | $23 \leq n < 35$ | $35 \leq n$ | TDD |
|--------------|----------|------------------|------------------|------------------|-------------|------|
| < 20* | 2.0 | 1.0 | 0.75 | 0.3 | 0.15 | 2.5 |
| 20 < 50 | 3.5 | 1.75 | 1.25 | 0.5 | 0.25 | 4.0 |
| 50 < 100 | 5.0 | 2.25 | 2.0 | 0.75 | 0.35 | 6.0 |
| 100 < 1000 | 6.0 | 2.75 | 2.5 | 1.0 | 0.5 | 7.5 |
| > 1000 | 7.5 | 3.5 | 3.0 | 1.25 | 0.7 | 10.0 |

Tabla 4. 14: IEEE-519 Límites Máximos de distorsión Armónica de Corriente (% componentes impares) para sistemas de alto voltaje y co-generación y generación dispersa [19]

| I_{sn}/I_L | $n < 11$ | $11 \leq n < 17$ | $17 \leq n < 23$ | $23 \leq n < 35$ | $35 \leq n$ | TDD |
|--------------|----------|------------------|------------------|------------------|-------------|------|
| < 50 | 2.0 | 1.0 | 0.75 | 0.3 | 0.15 | 2.5 |
| ≥ 50 | 3.0 | 1.5 | 1.15 | 0.45 | 0.22 | 3.75 |

4.3 Causas de Flicker

Siempre que se tenga Horno de Arco Eléctrico se tendrá inevitablemente flicker. Se realizó un estudio en la empresa Bayou Steel que tiene una planta acerera suministrada por 230 kV en un patio industrial que es alimentado a través de una línea de transmisión de 230 kV de 2.5 millas [23]. En esta planta se cuenta en principio con un horno eléctrico de CA que opera a 57 MW y un molino laminador, y se planea agregar un segundo horno de 57 MW también. Este estudio pretende demostrar que el flicker aumenta conforme haya mayor existencia de cargas tipo HAE.

Se realizaron mediciones de flicker en el sistema con un solo horno, y se encontraron niveles RMS de flicker en el rango de 0.2 a 0.3%. Generalmente se considera un problema de flicker las fluctuaciones de 0.5% o mayor, dependiendo de la frecuencia de las fluctuaciones y la probabilidad de ocurrencia. En la

siguiente figura se muestra la tabla de los niveles de flicker que son aceptables, en porcentaje de cambio de voltaje contra frecuencia de aparición, además se especifica en que rango de operación trabaja el horno eléctrico.

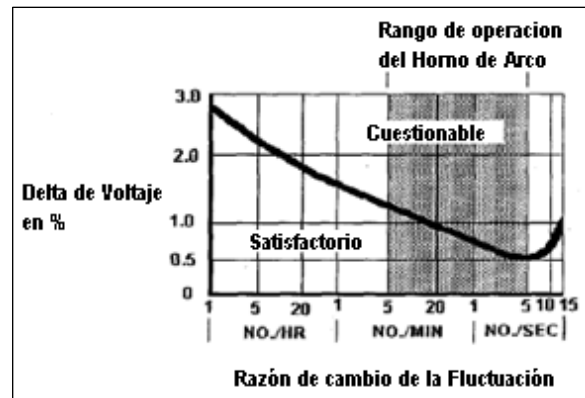


Figura 4. 8: Curva de sensibilidad de Flicker muestra límites para fluctuaciones de voltaje como función de su frecuencia de ocurrencia

El resultado del análisis antes descrito en la planta, con mediciones con un solo horno y dos hornos se muestra en la siguiente tabla, donde se puede observar como todos los valores de flicker aumentan con la adición del nuevo horno.

Tabla 4. 15: Resumen de Resultados de Flicker en 230 kV [23]

| MVA Disponible | Un Horno | | Dos Hornos | |
|----------------|--------------------|---------------|--------------------|---------------|
| | $\Delta V(\%)$ (%) | % RMS Flicker | $\Delta V(\%)$ (%) | % RMS Flicker |
| 21576 | 0.28 | 0.28 | 0.36 | 0.43 |
| 18015 | 0.26 | 0.29 | 0.41 | 0.49 |
| 15664 | 0.30 | 0.33 | 0.47 | 0.57 |
| 13568 | 0.35 | 0.39 | 0.60 | 0.75 |
| 12203 | 0.38 | 0.43 | 0.68 | 0.75 |
| 10196 | 0.45 | 0.52 | 0.76 | 0.92 |

Las mediciones con dos hornos bajo las condiciones presentadas, muestran que el flicker puede ser considerado un problema en ciertas ocasiones. Puesto que un nivel RMS de flicker mayor a 0.5% ya no es un nivel aceptable.

4.4 Causas de Muecas de Voltaje

Notching o muescas de voltaje es otro disturbio asociado a la presencia de grandes variadores de velocidad. Ajustadores de velocidad de CD o CA son utilizados para controlar grandes motores desde los 1000 a los 20000 hp's. Estos *drives* usan típicamente rectificación por control de fase y un gran inductor de CD para alimentar de una corriente relativamente constante de CD al inversor. El rectificador

controlado utilizado en estos *drives* es una causa de la presencia de muescas en el voltaje. Siempre que la corriente conmuta de una fase a otra, se genera un corto circuito momentáneo entre fases a través de los dispositivos de conmutación del rectificador, comúnmente SCR's. Para un rectificador de 6 pulsos este fenómeno ocurre 6 veces por ciclo. Por ejemplo un motor de 6000 hp con su respectivo drive provoca oscilaciones en el sistema de 25 kV, los cuales se muestran en las siguientes figuras.

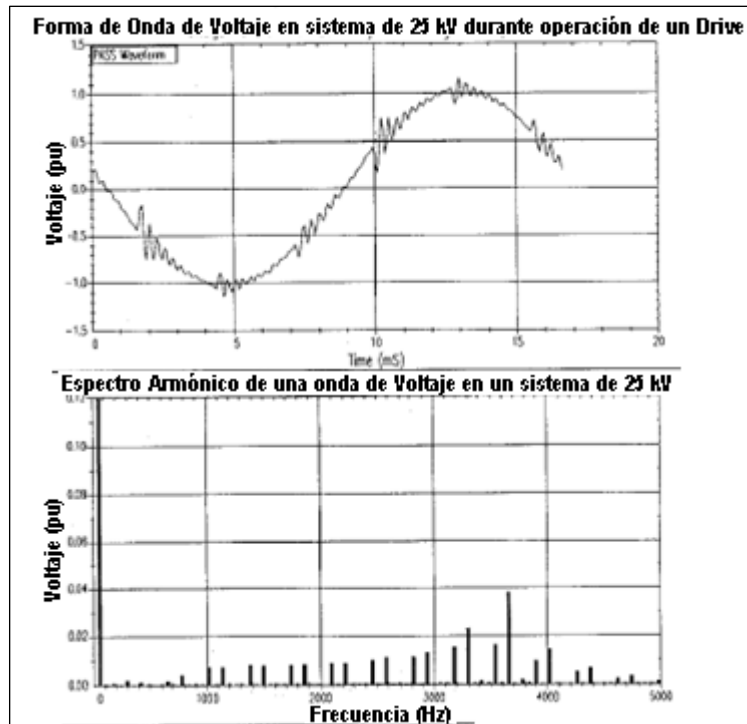


Figura 4. 9: Espectro y forma de onda del Voltaje en un sistema de 25 kV durante la operación de un drive.

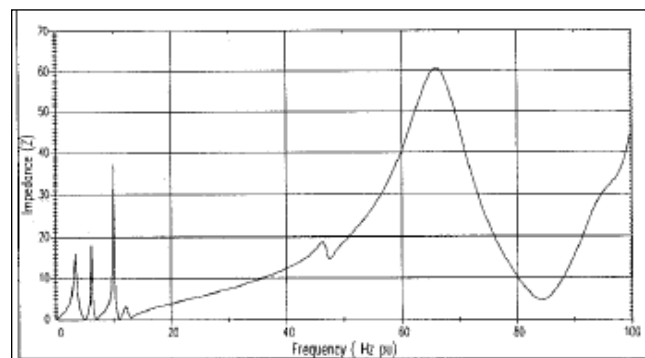


Figura 4. 10: Voltaje vs. Frecuencia en un drive de 4.16 kV

En las mediciones se encontró que el motor y el controlador de velocidad ajustable producían las muescas capturadas. El peor problema de muescas ocurre cuando se trabaja a un ángulo de disparo del 70% [24].

En el caso contrario, cuando se tienen *drives* de CD, se han encontrado niveles de distorsión inaceptablemente altos en el sistema de 34.5 kV debido a la operación de estos *drives*. La siguiente tabla muestra algunos resultados.

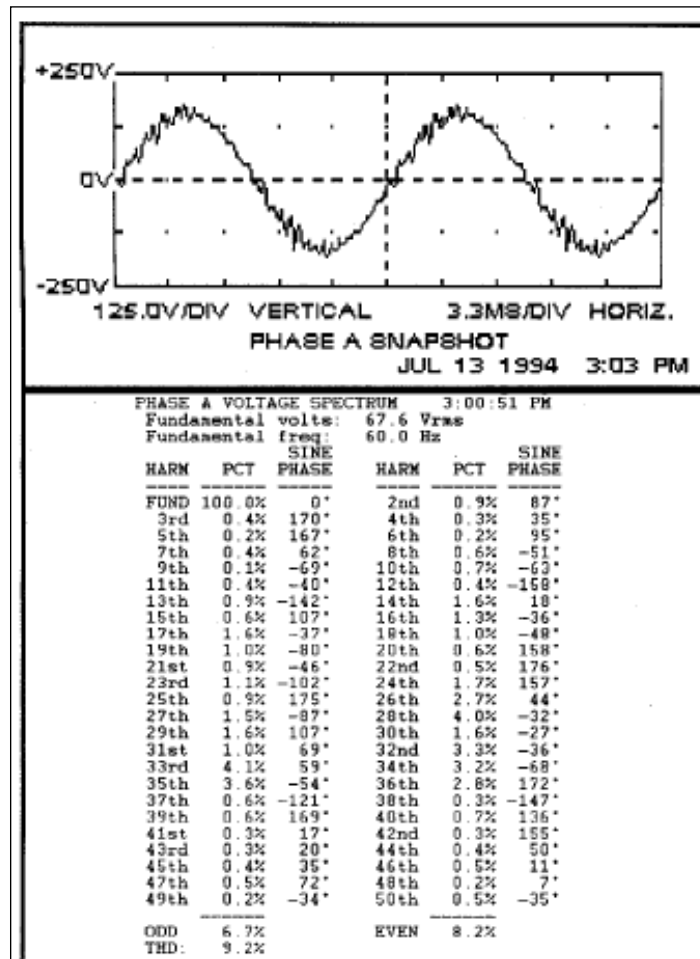


Figura 4. 11: Voltaje medido en 34.5 kV despues de la instalación de un transformador con desfasamiento de fases [24].

4.5 Horno de Arco Eléctrico como causante de múltiples disturbios

Debido al comportamiento dinámico del arco en un Horno de Arco Eléctrico (HAE) durante el proceso de fundición, el HAE es la mayor fuente de perturbaciones en una red de alto voltaje. Ya sea que se utilice CA o CD para alimentar el horno, las perturbaciones son de naturaleza aleatoria, existen desbalances de voltaje, armónicas, inter armónicas o flicker de voltaje en un rango de frecuencia de 0-30 Hz.

El rango de operación de un HAE de CA se puede observar en un plano X-R como el de la Figura 4. 12.

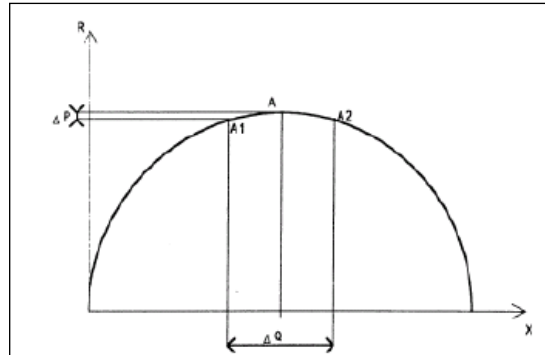


Figura 4. 12: Diagrama de operación del Horno de Arco Eléctrico [25].

Si el punto de operación cambia de A1 a A2, la variación de la potencia reactiva puede ser hasta diez veces mayor que la variación de la potencia activa. La variación en la potencia reactiva tiene un impacto directo en el perfil de voltaje del sistema de transmisión. Esto explica porqué la variación del consumo de la potencia reactiva de un HAE produce el fenómeno de flicker. La caracterización del flicker producido por un HAE es una operación extremadamente difícil. El flicker es variable de un ciclo a otro y durante la etapa de fundición se producen picos muy altos. Depende de los parámetros [26]:

- Calidad y cantidad de la chatarra
- Puntos de operación
- Cantidad de oxígeno inyectado
- Consecuencias impredecibles debido a saltos y reacomodamiento de la chatarra durante la fundición.

Añadido a esto la no linealidad del arco debido a la variación de la longitud del mismo produce armónicas que fluctúan de una manera aleatoria durante la etapa de “bore-in”.

En la Tabla 4. 16 se muestra el contenido armónico presente cuando hay HAE durante las etapas de fundición y refinación.

Tabla 4. 16: Voltajes Armónicos típicos durante fundición y refinación en un HAE [26]

| Armónica | Fundición | Refinación |
|----------|-----------|------------|
| 2nd | 5.0% | 2.0% |
| 3rd | 20.0% | 10.0% |
| 4th | 3.0% | 2.0% |
| 5th | 10.0% | 10.0% |
| 6th | 1.5% | 1.5% |
| 7th | 6.0% | 6.0% |
| 8th | 1.0% | 1.0% |
| 9th | 3.0% | 3.0% |
| 11th | 2.0% | 2.0% |
| 13th | 1.0% | 1.0% |

Es importante observar como las armónicas de bajo orden aumentan durante la etapa de fundición, mientras que las de alto orden permanecen constantes entre ambos procesos del horno. Esto es debido a la alta potencia demandada en forma de corriente durante la fundición.

Las corrientes armónicas se producen cuando las armónicas de voltaje del arco son impresas a través del electrodo y de las impedancias del transformador. Estas corrientes armónicas son inyectadas de vuelta al sistema eléctrico, pero usualmente no causan problemas a menos que el sistema cause resonancia a alguna de estas frecuencias. Si este es el caso, la corriente armónica puede excitar el circuito de resonancia produciendo un RMS muy alto y picos de voltaje, los cuales pueden degradar o dañar el equipo eléctrico y eventualmente causar fallos en el equipo.

Otra fuente de armónicas es la transferencia de energía inicial en la chatarra y en el transformador [27].

Por otro lado un HAE de CD produce un arco más estable que un HAE de CA. En principio, utilizar un HAE de CD disminuye el flicker. En la siguiente figura se muestra el diagrama de operación de un horno de directa.

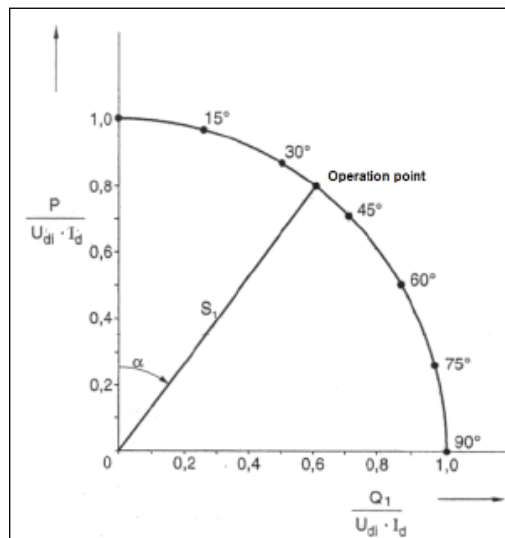


Figura 4. 13: Diagrama de operación de un HAE de CD [26], [28].

Los factores que afectan la operación del horno son los materiales de fundición o refinación, la etapa de fundición, la posición de los electrodos, el control del brazo de electrodos y el voltaje de alimentación e impedancia del Horno.

Capítulo 5: Efectos de una mala Calidad de Energía en una Empresa Siderúrgica

Ya se han mencionado los disturbios existentes inmersos en el tema Calidad de Energía, también se mencionaron las causas que los producen. En este capítulo se enuncian las desventajas de tener una calidad de energía deteriorada, se listan los distintos efectos que acontecen ante la gran cantidad de disturbios que pueden tenerse y se especifica de qué manera se ven afectados dispositivos como transformadores o motores, ante un deterioro en la red eléctrica. Mismos disturbios eléctricos pueden tener distintos efectos en distintos equipos, en los siguientes apartados se listan los efectos en cada dispositivo.

5.1 Efectos en Transformadores

Las pérdidas en los transformadores son divididas generalmente en pérdidas en el núcleo y pérdidas en el cobre. Las pérdidas del núcleo suelen ser comparables a las pérdidas en el cobre bajo condiciones normales de operación. Las pérdidas del embobinado, formadas por pérdidas parásitas y pérdidas por I^2R , son generadas por corrientes pasando a través del transformador. Las pérdidas del embobinado son importantes debido a los altos niveles de distorsión de la corriente en la carga.

Las pérdidas I^2R se deben a corrientes que pasan por la resistencia equivalente de las bobinas. Las pérdidas de Eddy o de corrientes parásitas son un ejemplo de pérdidas I^2R que se dan en el núcleo magnético y que causan pérdidas que se presentan como disipación en calor. Las componentes de las pérdidas parásitas se deben a componentes de flujo electromagnético parásito en las bobinas y en otros elementos conductores del transformador.

Muchas de las armónicas generadas en los sistemas de potencia son resultado de envejecimiento y fallas en componentes de *drives*, estos componentes elevan los niveles de distorsión de voltaje y corriente. Niveles más altos de distorsión armónica en el sistema de potencia causan mayores pérdidas en los transformadores, que resultan en sobrecalentamiento. Calentamiento excesivo causan un deterioro rápido del aislamiento, que lleva a fallas prematuras.

5.1.1 Efectos de calentamiento en los transformadores

El efecto de armónicas en transformadores es doble. Las corrientes armónicas causan un incremento en las pérdidas del núcleo y pérdidas parásitas de flujo, tensiones en el aislamiento y posibles resonancias entre las bobinas del transformador y la capacitancia de la línea. El efecto total o completo de estas pérdidas da como resultado un incremento en el calentamiento del transformador. Debe notarse que las pérdidas en el transformador causadas por voltajes y corrientes armónicas dependen del a frecuencia [29], [30]. Las pérdidas aumentan con el incremento de la frecuencia, y por lo tanto, las frecuencias armónicas de alta frecuencia son más importantes que las componentes armónicas de baja frecuencia al momento de causar calentamiento al transformador.

5.1.2 Efecto Piel en transformadores

El efecto piel y el efecto proximidad también pueden causar que los transformadores se sobrecalienten de la misma manera que se describió para los conductores. Adicionalmente, la distorsión de onda incrementará las pérdidas del núcleo de un transformador. El diseño del transformador y conexiones de bobinas afectarán estas pérdidas. Algunos transformadores conectados en estrella son también sensibles a desbalance de voltajes [31].

5.2 Efectos en Convertidores y Dispositivos Electrónicos

La distorsión externa puede afectar el desempeño del convertidor o de la carga. La severidad de estos efectos es complicada por el hecho de que el convertidor generalmente es una fuente de distorsión también. La ruptura (*disruption*) de este tipo de cargas puede ser dividida en 2 categorías:

- Ruptura de la operación del convertidor
- Ruptura de la carga del convertidor

La ruptura del convertidor puede resultar por cambios en el ángulo de disparo debido a errores en el sistema de control debido a la presencia de armónicas, y a SCR o falla en transistores debido a altos di/dt, dv/dt o efectos de sobrecalentamiento.

La ruptura en la carga puede resultar por la transmisión de las armónicas a través del filtro en el lado de la carga.

La lógica de control de ciertos rectificadores controlados lleva a errores de operación con voltajes distorsionados [30], [32]. En particular, los convertidores que detectan cruce por cero en cada fase para implementar el retraso en sus disparos, son vulnerables a la distorsión.

La presencia de fuertes armónicas triplen indica usualmente un problema en los *drives*, como partes mal funcionando, pérdidas de conexión, etc. En la Figura 5. 1 se muestra la forma de onda de corriente y un análisis del drive con un contenido de armónicas triplen de 34.6%.

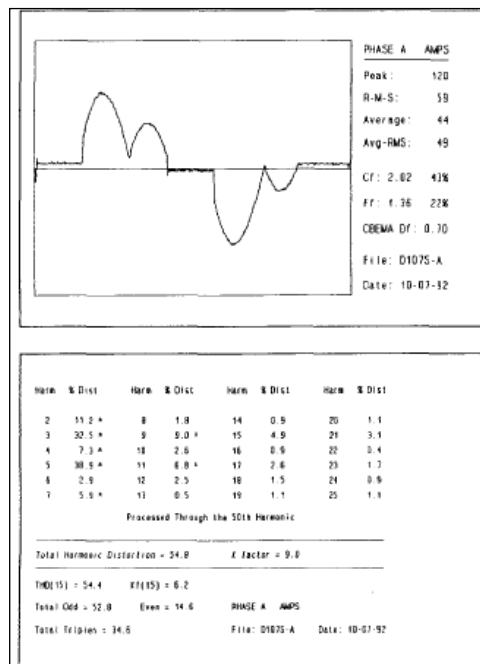


Figura 5. 1: Armónicas Triplen [33].

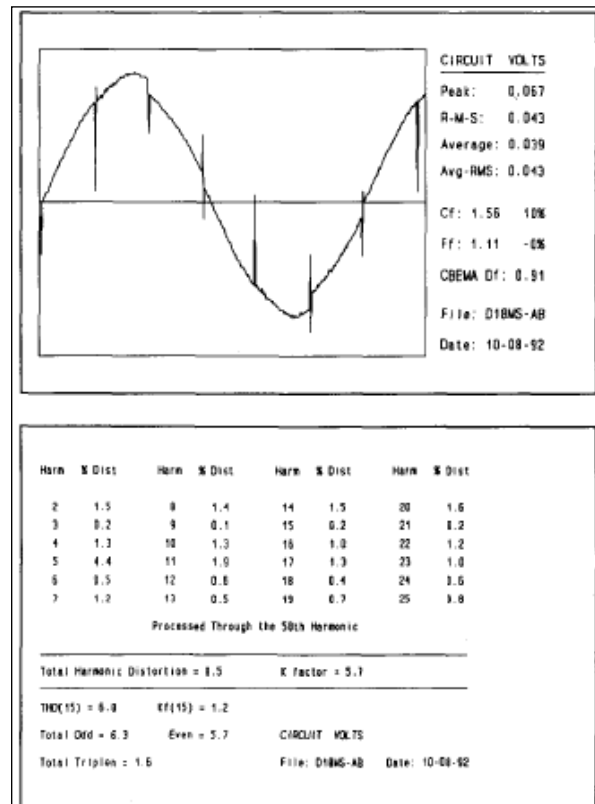


Figura 5. 2: Líneas de Muecas cruzando el eje x [33].

La Figura 5. 2 muestra una forma de onda de voltaje en la que las líneas de notch en la forma de onda pasa a través del cruce por cero. Muchos dispositivos utilizan la frecuencia de 60 HZ para proveer el disparo para la operación de aquellos dispositivos y son sensibles a este tipo de desviaciones causando imprecisión en el control, pérdidas de memoria, o pérdidas en tiempos críticos.

5.3 Efecto en Motores

Dependiendo del orden, una componente armónica de voltaje puede contribuir de manera positiva o negativa al torque. Las corrientes del estator y las pérdidas del cobre derivan de una onda de voltaje compuesto de armónicas de varias magnitudes y ordenes. La corriente del estator es afectada si el neutro de un motor está conectado al neutro de la fuente.

Un análisis de Fourier de la forma de onda del voltaje de un tipo de fuente muestra que la fundamental y la cuarta, séptima, decima, treceava armónicas ($3n+1$ ordenes de armónicas) en la forma de onda del voltaje, contribuyen a una fuerza magnetomotriz rotatoria en la misma dirección de giro del rotor, y por lo tanto resulta en un toque positivo. Sin embargo la segunda, quinta, octava, onceava armónica (ordenes de armónicas $3n+2$) resultan en una fuerza magnetomotriz en una dirección opuesta a la dirección a la cual el rotor gira, y por lo tanto contribuye a un torque negativo. Por ultimo la tercera, sexta, novena, doceava armónica (armónica de orden $3n+3$) producen una fuerza magnetomotriz que no gira, y por lo tanto no produce torque.

Voltajes de ordenes armónicos iguales a $v=3n+1$ causan flujo de corrientes en el estator en las tres fases con la misma secuencia que los voltajes, y la fase de la secuencia es positiva. Las corrientes del estator resultan en una fuerza magnetomotriz (fmm) rotatoria en la misma dirección que el rotor se mueve. Voltajes en un orden armónico igual a $v=3n+2$ causan un flujo en las corrientes del estator en las tres fases con la misma secuencia de los voltajes, pero con secuencia negativa. Resultando en una fmm rotatoria en una dirección opuesta a la que gira el rotor. Voltajes en un orden armónico igual a $v=3n+3$ causa un flujo de corriente en el estator en las tres fases, las cuales están en fase y por lo tanto no contribuyen a ninguna fmm giratoria.

La Figura 5. 4 muestra las características de torque contra deslizamiento de un motor con el contenido armónico de la Figura 5. 3.

| | |
|----------------|-------------------|
| $V_1 = 0.59$ | $V_8 = 0.0754$ |
| $V_2 = 0.124$ | $V_9 = 0.0325$ |
| $V_3 = 0.050$ | $V_{10} = 0.0555$ |
| $V_4 = 0.0643$ | $V_{11} = 0.003$ |
| $V_5 = 0.2645$ | $V_{12} = 0.033$ |
| $V_6 = 0.074$ | $V_{13} = 0.167$ |
| $V_7 = 0.374$ | |

Figura 5. 3: Contenido Armónico de una onda de voltaje en particular [34].

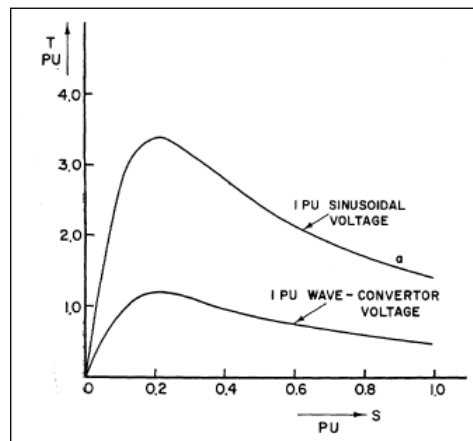


Figura 5. 4: Curva de Deslizamiento del Torque de un motor de inducción [34].

Se puede notar que el torque disminuye con el cuadrado de la componente fundamental de la onda de entrada en pu. De este análisis se puede concluir que con una forma de onda del voltaje rico en armónicas, la máquina de inducción opera como si el voltaje aplicado en sus terminales hubiera sido disminuido. El efecto de ordenes armónicos $3n+1$ y $3n+2$ son prácticamente insignificantes. El efecto de armónicas de orden $3n+3$ es notable en las corrientes del estator siempre que la reactancia (X_2) sea pequeña, voltaje en terminales (V_{v0}) sea grande, y el neutro del motor este conectado al neutro de la fuente. Para una mejor

utilización del motor, es deseable, que la componente de la fundamental en la forma de onda del voltaje que va al motor sea alta.

A mayores frecuencias las corrientes de la barra del rotor tratan de circular por la periferia de la misma, disminuyendo el área efectiva de la barra, lo que incrementa la resistencia de ésta. Este efecto conocido como efecto piel o pelicular es utilizado para mejorar, o modificar, el comportamiento de arranque de motores de inducción porque al estar inmóviles el deslizamiento es unitario y la frecuencia del rotor es de 60 Hz. La siguiente tabla muestra la rotación contra el orden armónico y el deslizamiento en motores de inducción.

Tabla 5. 1: Rotación y Deslizamiento contra Armónicas

| n | Rotation |
|-----|----------|
| 5 | - |
| 7 | + |
| 11 | - |
| 13 | + |
| 17 | - |
| 19 | + |

En la Figura 5. 5, Figura 5. 6 y Figura 5. 7, se muestra la resistencia del rotor y la inductancia contra el orden armónico para 3 motores de inducción distintos.

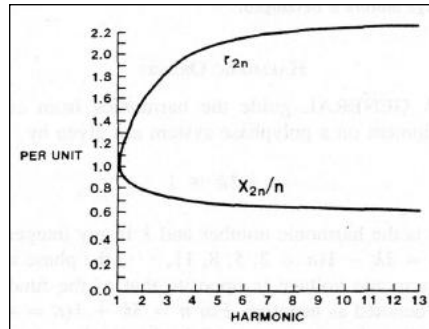


Figura 5. 5: Resistencia e Inductancia del Rotor contra orden armónico

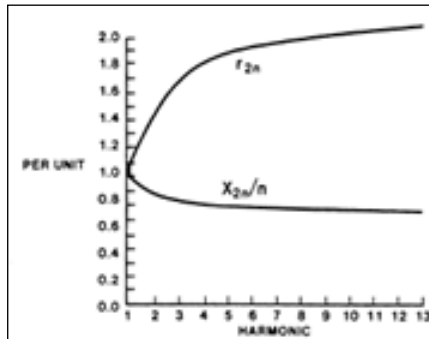


Figura 5. 6: Resistencia e Inductancia del Rotor contra orden armónico

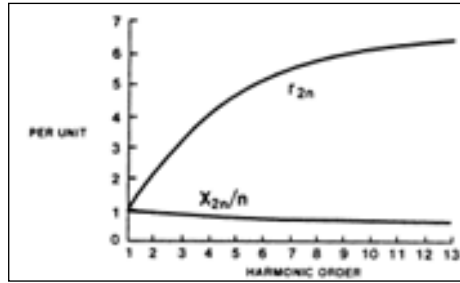


Figura 5. 7: Resistencia e Inductancia del Rotor contra orden armónico

En la Tabla 5.2 se muestra el resultado obtenido de mediciones de distintos motores de distinta capacidad, para las pérdidas por armónicas y la corriente en el estator [35].

Tabla 5.2: Valores de Corriente en el Estator y Pérdidas por Armónicas calculados y aproximados.

| HP | Poles | Enclosure | ΔW_r | | I_r | |
|------|-------|---------------------|--------------|---------|-------|---------|
| | | | Calc. | Approx. | Calc. | Approx. |
| 15 | 6 | TEFC ^b | 0.0265 | 0.0702 | 1.005 | 1.0145 |
| 25 | 4 | TEFC ^{b,c} | 0.0359 | 0.0702 | 1.005 | 1.0145 |
| 30 | 2 | TEFC ^b | 0.0866 | 0.0702 | 1.014 | 1.0145 |
| 50 | 2 | TEFC | 0.0400 | 0.0702 | 1.008 | 1.0145 |
| 50 | 4 | TEFC ^c | 0.0397 | 0.0702 | 1.006 | 1.0145 |
| 60 | 4 | DP | 0.0220 | 0.0702 | 1.005 | 1.0145 |
| 100 | 4 | TEFC | 0.0306 | 0.0702 | 1.005 | 1.0145 |
| 100 | 4 | TEFC ^c | 0.0413 | 0.0702 | 1.007 | 1.0145 |
| 125 | 2 | TEFC | 0.0664 | 0.0702 | 1.009 | 1.0145 |
| 250 | 2 | DP | 0.0524 | 0.0702 | 1.006 | 1.0145 |
| 250 | 4 | TEFC | 0.0728 | 0.0702 | 1.007 | 1.0145 |
| 300 | 4 | DP | 0.0449 | 0.0702 | 1.008 | 1.0145 |
| 500 | 2 | DP | 0.1287 | 0.0702 | 1.013 | 1.0145 |
| 500 | 6 | DP | 0.0444 | 0.0702 | 1.007 | 1.0145 |
| 500 | 10 | DP | 0.0593 | 0.0702 | 1.009 | 1.0145 |
| 600 | 4 | DP | 0.0467 | 0.0702 | 1.008 | 1.0145 |
| 600 | 4 | DP ^c | 0.0576 | 0.0702 | 1.009 | 1.0145 |
| 1000 | 2 | DP | 0.0430 | 0.0702 | 1.007 | 1.0145 |
| 1000 | 4 | DP | 0.0430 | 0.0702 | 1.007 | 1.0145 |
| 1000 | 6 | DP | 0.0450 | 0.0702 | 1.006 | 1.0145 |
| 1500 | 2 | DP | 0.0332 | 0.0702 | 1.006 | 1.0145 |
| 2500 | 4 | DP | 0.0794 | 0.0702 | 1.011 | 1.0145 |
| 5000 | 2 | DP | 0.0410 | 0.0702 | 1.006 | 1.0145 |

^a Based on Wave 1 from Table IV.
^b High efficiency designs.
^c High starting torque (NEMA Design C designation ≤ 200 hp).

5.3.1 Efecto Piel en Motores

Los conductores asociados con materiales magnéticos como en los motores e inclusive conductores de acero tendrán efecto piel mas pronunciados. Durante plena carga normal con un deslizamiento del 3%, la frecuencia del deslizamiento es de 1.8 Hz en las barras del rotor. El rotor tendrá una resistencia de CA a esta baja frecuencia de mas o menos el mismo valor que la resistencia de CD. Pero durante condiciones de arranque el rotor tendrá corriente a 60 Hz, y debido al efecto piel la resistencia efectiva será superior a este valor. Cuando se necesitan altos torque de arranque y alta eficiencia, se utilizan barras de rotor de una forma especial, las cuales aumentan el efecto piel aún más.

Cuando un motor de inducción es alimentado con voltaje trifásico desbalanceado o no simétrico, una corriente rotacional negativa es inducida en el rotor. La resistencia del rotor a esta frecuencia más alta debida al efecto piel será mayor que a rotor fijo. Entonces, pequeños desbalances causan incrementos en las pérdidas del motor. A las frecuencias armónicas de quinta, séptima, etc, la resistencia del rotor será aún más grande. Nótese que el desbalance de voltaje también causa un cambio en la distribución de las pérdidas en un motor. El efecto neto de esto, más otras impedancias de la máquina, es hacer la sensibilidad de pérdidas de una máquina a voltajes armónicos muy cercana al desbalance de voltajes. Las

máquinas sincrónicas pueden ser más sensibles a desbalances de voltajes y distorsión de onda que las máquinas de inducción [1].

5.3.2 Efectos de calentamiento en motores y generadores

En motores, las pérdidas del núcleo debido a distorsión de voltaje son insignificamente pequeñas, y las componentes armónicas pueden ser clasificadas como pérdidas en el embobinado del estator, pérdidas en el embobinado del rotor, y pérdidas en el núcleo. Todas estas son pérdidas del tipo I^2R , con la resistencia efectiva influenciada por la frecuencia. Debido al diseño de las barras del rotor, esta aproximación de altas frecuencias se hace válida en el rango de las frecuencias de armónicas. Se puede esperar que la resistencia del estator presente los mismos efectos, con la posibilidad que la aproximación de altas frecuencias será válida a más altas frecuencias. Los análisis sugieren que los motores con mayores barras profundas o efecto de doble jaula tendrán el mayor sobrecalentamiento por armónicas. Motores sincrónicos de alta velocidad con equipos de arranque suave tendrán comportamientos ante armónicas similares a los de motores de inducción.

Las corrientes armónicas tienen un efecto en las combinaciones turbina- generador. Oscilaciones mecánicas pueden ser producidas por torques oscilantes debidos a una interacción entre las corrientes armónicas y el campo magnético fundamental. La corriente de quinta y séptima armónica, por ejemplo, resulta en un estímulo continuo torsional en el rotor del generador a la frecuencia de la sexta armónica (360 Hz). Este torque oscilatorio tiene el potencial de estimular el generador- turbina en modos de vibración complejos que involucran oscilaciones torsionales de los elementos del rotor y flexiones de la cubeta de la turbina. Si la frecuencia natural a la cual vibra este par de máquinas es cercana a la frecuencia de estímulo eléctrico, se pueden originar respuestas mecánicas de alta resonancia las cuales pueden resultar en fatiga de altos ciclos en la flecha de la turbina.

Algunas mediciones de varias máquinas sugieren que los efectos por calentamiento en máquina de una sola fase son de una magnitud similar que los efectos en máquinas trifásicas.

Cuando hay presencia de armónicas los picos de la densidad de flujo que rota varía, pero su valor promedio en el tiempo es el mismo que si no hubiera armónicas. Si el voltaje es tal que la operación esté cerca del punto de saturación, la corriente sin carga incrementará por el pico de densidad de flujo, de todos modos, este efecto explica solo una pequeña parte de los incrementos observados en corriente. La mayor contribución en la reducción de las inductancias es el incremento en pérdidas de flujo por las corrientes armónicas que resultan en altas saturaciones del circuito magnético.

Si el motor trabaja bajo condiciones normales de carga, se puede asumir que el deslizamiento para la frecuencia fundamental es cero. La interacción de cada corriente armónica en el rotor con el flujo en el entrehierro resultará en torques pulsantes. La magnitud de estos torques son generalmente pequeños y su valor promedio es cero. Ver Tabla 5. 3.

Tabla 5. 3: Dirección de la Rotación de la componente armónica [36].

| Harmonic | 3-Phase | 2-Phase |
|----------|---------|---------|
| 3 | O | B |
| 5 | B | F |
| 7 | F | B |
| 9 | O | F |
| 11 | B | B |
| 13 | F | F |
| 15 | O | B |
| 17 | B | F |
| 19 | F | B |

Note: O means nonexistent, F means forward, B means backward.

Motores de inducción polifásicos operados por voltajes no senoidales tienen las mismas pérdidas que otros motores, y algunas pérdidas adicionales debido a armónicas tales como:

- Pérdidas de embobinado del estator.- Pueden incrementar considerablemente como resultado de voltajes no senoidales.
- Pérdidas de embobinado del rotor- Éstas pérdidas incrementan de manera pequeña con excitación no senoidal.
- Pérdidas de núcleo.- Son mayores con excitación no senoidal debido a altos picos de densidad de flujo originados por las corrientes de magnetización.
- Pérdidas por fricción.- Éstas pérdidas no son influenciadas por la forma de onda del voltaje.
- Pérdidas de armónicas en el rotor debido a corrientes armónicas.- Aumentna apreciablemente por el efecto de barra profunda.
- Pérdidas referidas usualmente como pérdidas parásitas.- Dentro de estas se encuentran las pérdidas en el final del estator, pérdidas en el final del rotor, y otras pérdidas parásitas.

En la Tabla 5. 4 se muestra cómo las corrientes armónicas se ven más afectadas cuando hay carga en los motores. Cuando hay presencia de armónicas altas, las corrientes a plena carga son mayores que sin carga.

Tabla 5. 4: Análisis armónico de Corrientes [36].

| Harmonic | Current in rms Amperes | | |
|----------|------------------------|-----------|------------|
| | No-Load | Full Load | Calculated |
| 1 | 34 | 44.5 | 30.8* |
| 5 | 15.4 | 15.4 | 15.3 |
| 7 | 7.7 | 7.7 | 8.3 |
| 11 | 4.9 | 4.9 | 4.31 |
| 13 | 3.7 | 3.7 | 3.59 |
| 17 | 4.1 | 3.9 | 3.38 |
| 19 | 3.9 | 4.6 | 3.86 |
| 23 | 13.9 | 17.0 | 14.29 |
| 25 | 12.3 | 14.5 | 12.74 |
| 29 | 2.5 | 2.5 | 2.21 |
| 31 | 2.5 | 2.5 | 1.59 |
| 35 | 1.5 | 1.5 | 0.99 |
| 37 | 1.5 | 1.5 | 0.90 |
| 41 | 2.5 | 2.2 | 0.91 |
| 43 | 2.5 | 2.2 | 1.05 |
| 47 | 4.6 | 5.2 | 3.92 |
| 49 | 4.6 | 5.2 | 3.47 |

* This is the calculated no-load value. The calculated full load value is 49.7 amperes.

Las pérdidas obtenidas en la Tabla 5. 6 son para un motor operando sin carga y a plena carga con una forma de onda con las características de la forma de onda presentadas en la Tabla 5. 5.

Tabla 5. 5: Corrientes armónicas de distintas formas de onda

| Waveform Harmonic | Voltage in Percent of Fundamental | | | |
|-------------------|-----------------------------------|------|------|------|
| | A | B | C | D |
| 5 | 20.0 | 20.0 | 21.3 | 26.0 |
| 7 | 14.3 | 14.8 | 16.2 | 25.3 |
| 11 | 9.1 | 10.0 | 12.7 | 86.8 |
| 13 | 7.7 | 8.6 | 12.5 | 81.8 |
| 17 | 5.9 | 7.0 | 15.1 | 18.8 |
| 19 | 5.3 | 6.6 | 19.2 | 17.0 |
| 23 | 4.4 | 6.3 | 85.3 | 49.6 |
| 25 | 4.0 | 6.4 | 82.7 | 42.3 |
| 29 | 3.4 | 6.5 | 16.5 | 7.5 |
| 31 | 3.2 | 6.6 | 12.2 | 5.6 |
| 35 | 2.9 | 7.8 | 8.9 | 8.2 |
| 37 | 2.7 | 9.1 | 8.5 | 2.4 |
| 41 | 2.4 | 13.2 | 9.5 | 2.0 |
| 43 | 2.3 | 17.6 | 11.6 | 3.1 |
| 47 | 2.1 | 84.5 | 46.8 | 17.6 |
| 49 | 2.0 | 83.4 | 43.2 | 19.6 |
| 53 | 1.9 | 16.3 | 7.7 | 5.8 |
| 55 | 1.8 | 11.7 | 5.3 | 5.8 |

Tabla 5. 6: Desempeño a Carga Completa

| Motor | Waveform | Fund. Freq. (Hz) | Speed (r/min) | HP | Harmonic Current | Stator Current | | Total Loss in Watts | |
|-------|----------|------------------|---------------|------|------------------|----------------|-------|---------------------|--------|
| | | | | | | Meas. | Calc. | Meas. | Calc. |
| 1 | Sine | 15 | 422 | 5.1 | 0 | 46.1 | 43.5 | 902 | 712 |
| | A | 15 | 424.5 | 4.97 | 16.7 | 48.0 | 49.8 | 1070 | 1015 |
| | B | 15 | 430.7 | 5.08 | 20.0 | 51.2 | 52.6 | 1440 | 1272.6 |
| | C | 15 | 426.7 | 4.78 | 27.7 | 54.5 | 56.9 | 1680 | 1680.9 |
| | D | 15 | 413 | 4.70 | 45.7 | 66.0 | 69.1 | 2900 | 2791 |
| | Sine | 60 | 1765 | 20.1 | 0 | 48.6 | 47.4 | 1303 | 1122 |
| 2 | A | 60 | 1765 | 20.6 | 13.7 | 52.6 | 49.2 | 1600 | 1437.7 |
| | Sine | 15 | 430 | 5.0 | 0 | 44.1 | 42.0 | 912 | 741 |
| | B | 15 | 428 | 5.0 | 19.5 | 47.2 | 49 | 1400 | 1229.5 |
| | C | 15 | 421 | 4.92 | 27.0 | 53.5 | 53.3 | 1950 | 1613 |
| | D | 15 | 413 | 4.70 | 44.6 | 65.5 | 65.4 | 2935 | 2664 |

La consecuencia más notable de la presencia de armónicas es el incremento en pérdidas en los motores.

La figura siguiente muestra que bajo un *Sag* de voltaje no simétrico, las corrientes máximas del rotor son más pequeñas, pero tiene armónicas de segundo orden, y causa rizado en el voltaje de corriente directa.

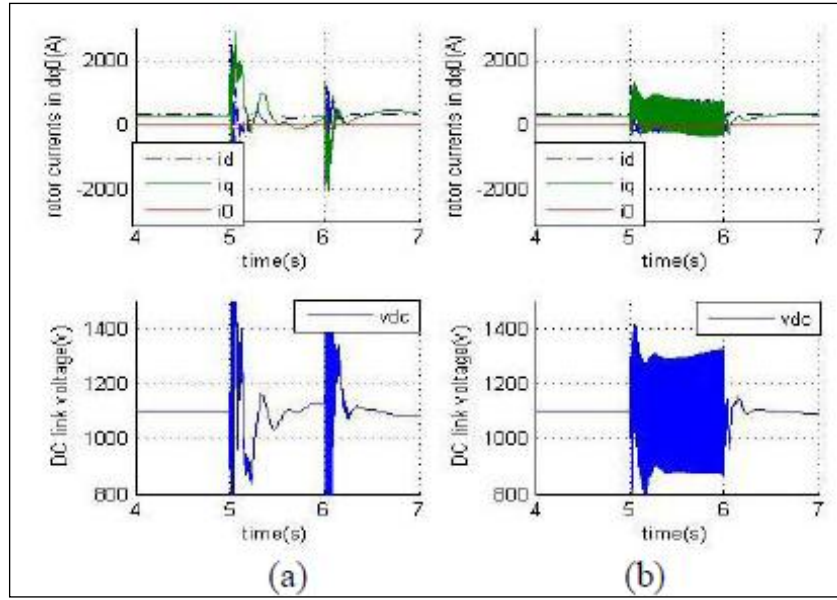


Figura 5. 8: Corrientes en el rotor (arriba) y voltaje de CD (abajo) ante a) un *Sag* de voltaje simétrico y b) un *Sag* de Voltaje asimétrico [37].

5.4 Efecto en Capacitores

El efecto de las componentes armónicas en los bancos de capacitores es causar pérdidas adicionales por calentamiento. Los efectos capacitivos en el sistema de frecuencias armónicas pueden ser divididos en tres modos distintos [30]:

Modo 1: Abarca capacitores localizados cerca del equipo que cause una distorsión significativa. Un resumen de este modo se puede obtener de [30], [38], [22] para sistemas de distribución y de [30], [39] para sistemas de transmisión. En este sistema, se requiere un análisis avanzado para determinar las frecuencias de resonancia. La utilización de ractores para sintonizar disminuye la resonancia.

Modo 2: Abarca capacitores en posiciones remotas con respecto a una fuente de armónicas, o influenciadas por varias fuentes. Las técnicas de análisis para este modo se pueden observar en [30], [40], [41], [42]. Los efectos armónicos en este modo se deben considerar a un nivel del sistema, con representación detallada de un gran número de componentes.

Modo 3: Ocurre cuando una carga relativamente pequeña sin disturbio con corrección de factor de potencia es alimentada desde un alimentador de distribución. En este caso el bus de carga puede sufrir mayor distorsión que la presente en el tap del alimentador. Cualquier límite en el nivel de distorsión del primario debe incluir un subsidio para una distorsión alta en las terminales de la carga. También en este caso, puede ser derivado un límite superior de la corriente para el capacitor, una vez dado un nivel primario de distorsión.

La presencia de corrientes armónicas en el sistema de potencia de la planta causa un calentamiento excesivo en los capacitores de corrección de factor de potencia. La vida útil de estos capacitores se reducirá sustancialmente debido a estas altas temperaturas. Las pérdidas dieléctricas por unidad de

corriente en los capacitores es proporcional a la frecuencia, entonces las pérdidas para la quinta armónica serán aproximadamente 5 veces las pérdidas a los 60 Hz para una corriente específica [43].

5.4.1 Efecto piel en Capacitores

Las pérdidas en los capacitores por este fenómeno son pequeñas. Las pérdidas en las resistencias de descargas es dependiente de las frecuencias y es menor que medio watt por kVAr. Las pérdidas dieléctricas del orden de 1 Watt por kVAr a 60 Hz incrementarán en proporción al incremento de la frecuencia para un voltaje en terminales dado. El incremento total en pérdidas en el capacitor debido a distorsión de forma de onda es pequeño en términos de los kVA del sistema. Pero en vista de los pequeños tamaños de los capacitores por kVAr, estas pérdidas pueden resultar en un incremento substancial en la temperatura del capacitor y una reducción de la vida de éste [1].

5.5 Efecto en Barras de Distribución (*SWITCHGEAR*) e Interruptores

Las componentes armónicas en la forma de onda de la corriente pueden afectar la capacidad de interrupción del switchgear. El problema es que las componentes armónicas pueden resultar en un elevado di/dt en los ceros de corriente, haciendo la interrupción mas difícil. Las fallas en los interruptores se atribuyen a la inhabilidad de las bobinas de blowout de operar adecuadamente ante la presencia de armónicas severas [30], [44]. Mientras la bobina de “blowout” o accionamiento asiste en el movimiento del arco dentro del “arc-chute” o apaga chispa, donde la interrupción se genera, su operación poco eficiente prolonga el arqueo y eventualmente resulta en fallas de interrupción.

5.5.1 Efecto piel en *Switchgear*

Las pérdidas en *Switchgear* debido a distorsión de forma de onda se comparan a las pérdidas en conductores. Adicionalmente, cualquier componente que tenga una impedancia inductiva significativa tendrá pérdidas adicionales debido al efecto proximidad. Transformadores de corriente tendrán pérdidas adicionales debido a que cualquier arqueo inductivo resultará en un arqueo mucho mayor a distintas frecuencias armónicas con un incremento en pérdidas del núcleo.

Interruptores de corto circuito que tienen bobinas autocontenidas de CA tendrán otros problemas además del efecto piel y efecto proximidad los cuales causan sobrecalentamiento de los componentes que llevan la corriente fundamental [30].

5.6 Efectos en Dispositivos de Protección

5.6.1 Fusibles

Un nivel significativo de corrientes armónicas en un fusible causa calentamiento excesivo, el cual puede causar cambios en las características del tiempo de la corriente del dispositivo.

5.6.2 Relevadores de protección

Armónicas afectan a los relevadores en varios sentidos, llevando a posibles efectaciones de su funcionamiento normal. Los relés que dependen de crestas de voltaje o corriente o ceros de voltaje para su operación son obviamente afectados por distorsión armónica en la onda [1], [30]. La presencia de

corriente de tercera armónica de secuencia cero en valor excesivo puede causar que relevadores conectados a tierra se abran en falso.

De un análisis Canadiense para ver la afectación de armónicas en interruptores, se obtuvieron los siguientes resultados [45], [30]:

- Los relevadores mostraron una tendencia de operación más lenta con mayores valores de pickup y no lo contrario.
- Relevadores estáticos de baja frecuencia fueron susceptibles a cambios sustanciales en sus características de operación.
- En la mayoría de los casos, los cambios en las características de operación fueron relativamente pequeños bajo el rango de moderación de distorsión esperado durante la operación normal.
- Dependiendo del fabricante, los relevadores de sobrevoltajes y sobrecorrientes mostraron varios cambios en sus características de operación.
- Dependiendo del contenido armónico, el torque de operación de los relevadores puede ser revertido.
- Los tiempos de operación pueden variar enormemente como una función de la mezcla de frecuencias en las cantidades medidas.

En general, los niveles armónicos requeridos para causar mal operación de relevadores son mayores que los niveles máximos aceptables para otros equipos.

5.7 Efectos en Dispositivos de Medición

Instrumentación y Mediciones también son afectadas por corrientes armónicas particularmente si ocurre condición de resonancia la cual causa voltajes armónicos altos en los circuitos. Dispositivos de inducción de disco como medidores de Watt horas o relevadores de sobrecorriente son diseñados para monitorear solamente corrientes fundamentales, pero corrientes armónicas de cargas no lineales y desbalances de fase causado por distorsión armónica pueden causar operación errónea de estos dispositivos. Un estudio realizado por Canadienses indica que un contenido de quinta armónica del 20% puede producir un error del 10 al 15% en un transductor electrónico trifásico de dos elementos [30], [45]. Otros estudios han demostrado que el error debido a armónicas puede ser positivo, negativo o pequeño con terceras armónicas [46], [47], [48], [49], [50]. En general, la distorsión puede ser mayor al 20% antes de que errores significantes sean detectados.

5.8 Efectos Misceláneos

En los sistemas de potencia, en sistemas trifásicos balanceados, bajo condiciones de operación balanceadas, las armónicas en cada fase tienen relaciones de fase específicas. Por ejemplo, en el caso de la tercera armónica, las corrientes de la fase “b” estarán atrasadas con respecto a las de fase “a” por $3 \times 120^\circ$ o 360° , y aquellas en fase “c” adelantarán a la fase “a” por la misma cantidad. Por lo tanto las terceras armónicas están en fase y aparecen como componentes de secuencia cero. Por lo tanto, en un sistema estrella aterrizada, estas armónicas fluyen en las líneas y circuitos del neutro, mientras que en un sistema en delta o sistema no aterrizado no pueden existir estas corrientes. De la misma manera en que se

analizó la tercera armónica, se puede encontrar que la quinta armónica es de secuencia negativa y la séptima de secuencia positiva [51].

Los sistemas “carrier” o de onda portadora, que controlan dispositivos remotos, pueden operar de manera errónea si existen armónicas cercanas a la frecuencia del sistema “carrier”.

Las armónicas pueden resultar en saturación del núcleo en algunos transformadores de potencial, esto provocando errores. En el caso de transformadores de corriente, parece haber poca influencia en el radio de transformación. El ángulo, la potencia y la energía pueden resultar afectados. El ruido altamente audible y arcos ocasionales en los capacitores de los transductores de voltajes se ven afectados por componentes armónicas. El ruido ocasionado por armónicas puede llevar a operaciones erróneas del sistema de control [1], [30].

Todas las distorsiones de forma de onda y desbalances de voltaje causan incrementos en los costos operativos de los motores y aumento de pérdidas en todos los componentes del sistema.

La tendencia de la corrección del factor de potencia utilizando capacitores puede resultar en una distorsión adicional, no bien apreciada del todo. Distorsión de onda y desbalance de voltaje puede resultar en incrementos en costos por uno o más de los siguientes efectos:

- Reducción de la eficiencia de motores de CA
- Incremento en pérdidas de standby en motores
- Incremento en pérdidas en transformadores, capacitores, conductores y switchgear
- Incremento en demandas de reactancia
- Incremento en demanda de inversión del sistema
- Reducción de la calidad de producción
- Incremento en los costos de mantenimiento
- Incremento en facturas de energía eléctrica

El efecto piel es un término descriptivo que contabiliza el incremento en la resistencia de CA de un conductor conforme la frecuencia aumenta. El centro de un conductor es atravesado por más líneas de flujo magnético que su superficie, por lo tanto la inductancia o reactancia del centro es mayor que la de la superficie, y menor corriente de CA fluirá por el centro. Para conductores largos la resistencia de CA incrementa más rápidamente con la frecuencia. Cuando se utilizan formas especiales para estos conductores es difícil correlacionar el efecto piel con cualquier parámetro útil.

El efecto de proximidad es de la misma naturaleza que el efecto piel. Este está basado en el hecho de que la corriente en dos conductores relacionados fluirá entre las caras transversales de los conductores inversamente con la reactancia de esa parte del área transversal.

Estos efectos causan complejidades al determinar la corriente efectiva en un conductor largo. Lecturas pico o medidores de tipo promedio no son recomendados para medir ondas distorsionadas. Estos son

conocidos por resultar en errores que dependen de las relaciones de fase de las armónicas. Inclusive un medidor de RMS podría no dar una lectura correcta.

Las pérdidas parásitas se pueden dividir en seis componentes como siguen:

- Las pérdidas por corrientes de Eddy en el cobre del estator debido a flujos de fuga.
- Pérdidas en el motor y estructura debido a flujos de fuga.
- El rotor de alta frecuencia y pérdidas de superficie de estator debido a zigzag flujos de fuga.
- Las pulsaciones de alta frecuencia y pérdidas I^2R del rotor, también debido a zigzag flujos de fuga.
- Las pérdidas I^2R a seis veces la frecuencia debido a corrientes circulantes inducidas por el flujo de fuga del cinturón del estator.
- Las pérdidas de cobre extras en motores con “skewed” slots debido a “skew leakage flux”, ver [52].

A lo largo de los años se ha monitoreado distintas plantas y claramente se demuestra que, casi sin excepción, estas plantas experimentan de 8 a 24 disturbios de calidad de energía cada año que son suficientemente significantes para impactar en la operación de las plantas [53].

Son pocas las fallas que son naturalmente simétricas. Cada falla asimétrica se muestra como un *Sag* en una sola fase de la línea y causa una sobrecorriente substancial que fluye al terminar un *Sag*. En la figura siguiente, para un *Sag* de entrada trifásico, el máximo valor de cualquier voltaje de línea a línea determinará a cuánto decaerá el voltaje del capacitor, y gobernará la amplitud del pico de corriente al final del *Sag*. Para *Sags* asimétricos, el rectificador se comportará como un rectificador de excitación de una sola fase con altos picos de corriente mayores que para el caso balanceado.

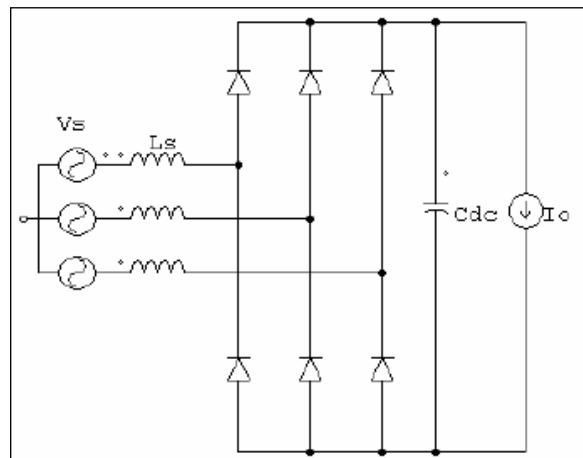


Figura 5. 9: Esquemático de un Rectificador Trifásico

Ya está claro que niveles significativos de corrientes de secuencia positiva y negativa se generarán, dando como resultado en torque transitorios positivos o negativos al principio y fin de un *Sag*. Para un *Sag* con suficiente voltaje residual para proveer magnetización, el motor continúa demandando altas corrientes y tiende a soportar el voltaje de línea. Al final del *Sag* otra gran corriente y torque transitorio ocurren. Un torque transitorio como éste puede dañar flechas y ciertos tipos de cargas. Si el *Sag* dura suficiente

tiempo, el contactor del motor se abrirá, interrumpiendo el proceso. Los *Sags* de voltaje pueden estresar severamente el equipo electromecánico, tal como motores y actuadores, a pesar de que se sienta que el problema debe ser contenido en términos de impacto general en una planta industrial [53]. Sobrevoltajes pueden causar efecto corona, degradación del aislamiento y rupturas.

Un área de preocupación es el efecto de distorsión de voltaje en dispositivos de protección, incluyendo el “sparover” y recuperación de dispositivos “gapped” y calentamiento de dispositivos de estado sólido [30].

Además, las armónicas han causado fallas de los componentes en filtros de línea usados en sistemas de potencia. Estudios en Inglaterra indican fallas en cables de 33 kV debido a armónicas [54], [30].

Capítulo 6.- Cómo solucionar los problemas ocasionados por una mala calidad de energía en la industria siderúrgica.

Como se mencionó en los capítulos anteriores, son muchos los disturbios que pueden originar una mala calidad de energía, así como también son muchos los efectos de cada disturbio. Debido a esto también hay distintos dispositivos que se encargan de contrarrestar todos estos efectos. En este capítulo se listan algunos de los dispositivos que protegen o corrigen disturbios importantes.

6.1 Compensador Estático de Reactivos (SVC) y su aplicación siderúrgica

Un SVC ajusta la susceptancia en cada fase controlando los ángulos de conducción de los tiristores del reactor (TCR). Un SVC necesita de un algoritmo de control para operar, y con el algoritmo adecuado puede reducir las corrientes de secuencia negativa en gran medida y mejorar el factor de potencia. En la Figura 6. 1 se muestra el diagrama de un SVC donde una subestación alimenta con potencia eléctrica a una carga desbalanceada a través de un sistema trifásico de distribución. Se asume que los voltajes en el bus de subestación y las impedancias de líneas están balanceados y que la carga es lineal. El propósito de este SVC es disminuir las corrientes de secuencia negativa y las partes imaginarias de las corrientes de secuencia positiva [31].

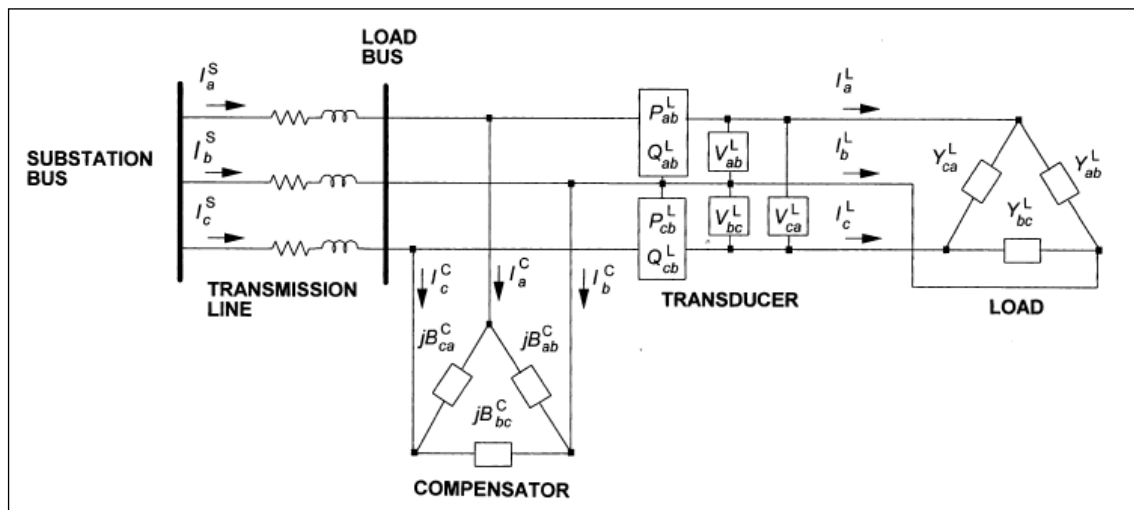


Figura 6. 1: Sistema trifásico con un SVC conectados al nodo de carga [55].

Para mostrar la manera en que trabaja el SVC se realizó una simulación en el artículo S1, en donde los resultados son los siguientes:

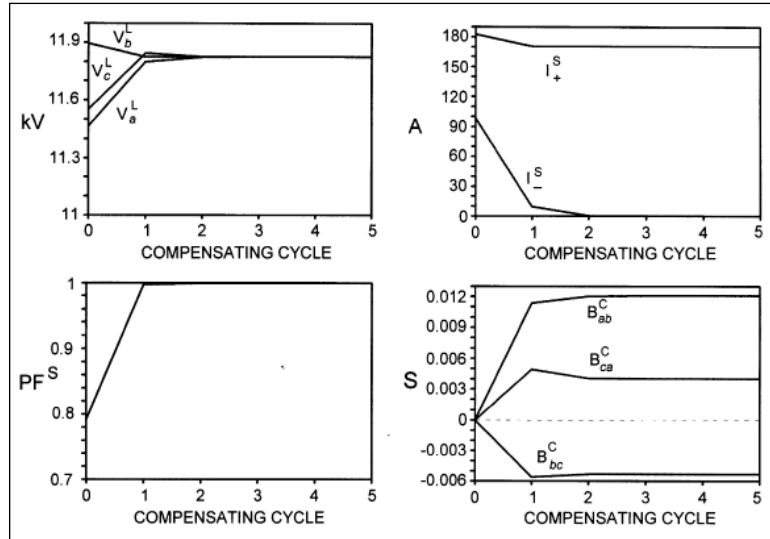


Figura 6. 2: Respuestas dinámicas de la simulación con una carga constante desbalanceada.

En la Figura 6. 2 el ciclo de compensación 0 significa el instante antes de que el SVC empiece a trabajar. A pesar de la suposición del voltaje balanceado en el bus de carga no es práctico, la condición de desbalance y el factor de potencia son mejorados enormemente después del primer ciclo de compensación. Después del segundo ciclo de compensación, el resultado de la compensación se aproxima el estado estable balanceado. Esto es debido a que el voltaje de secuencia negativa es más pequeño que el voltaje de secuencia positiva, y el voltaje de secuencia negativa depende de la corriente de secuencia negativa. Cuando la carga monofásica es conectada, el ángulo de disparo se comporta como en la Figura 6. 3. La distribución de estado estable de las formas de onda de las corrientes con y sin SVC se muestra en la Figura 6. 4. Resultados de pruebas con y sin SVC se muestran en la Tabla 6. 1 para comparaciones. Se puede observar que el SVC aliviana el ángulo de desbalances y corrige el factor de potencia de 0.819 a casi la unidad. Debido al incremento en el voltaje de la carga, la capacidad de carga también incrementa. Se puede observar de la Figura 6. 4 que el SVC genera corrientes armónicas. La presencia de armónicas puede llegar a ser devastador si existe resonancia en paralelo debido al capacitor y la impedancia del sistema de alimentación. Esto porque las corrientes armónicas inducidas por el SVC fluirán al sistema de distribución de potencia y dañaran la calidad de la energía. Por lo que técnicas de mitigación de armónicas tales como filtros de armónicas o configuraciones más complicadas deben ser empleadas en el diseño de los SVC's [56].

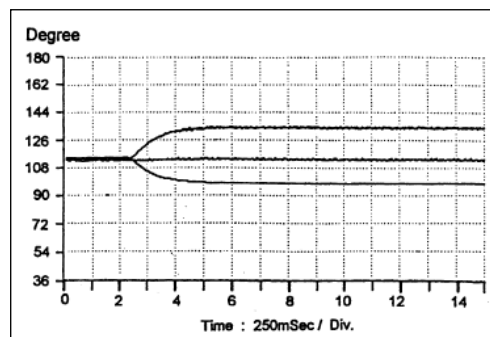


Figura 6. 3: Respuesta dinámica del ángulo de disparo.

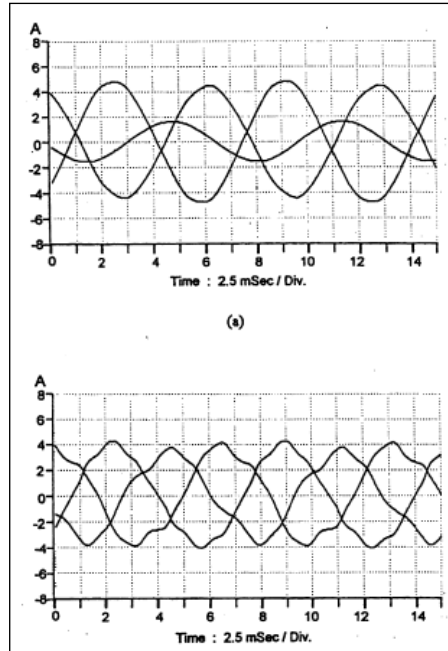


Figura 6. 4: Corrientes en la línea de distribución, a) sin SVC, b) con SVC

Tabla 6. 1: Resultados de las pruebas con y sin SVC

| | Without SVC | With SVC |
|----------------|--------------------|--------------------|
| V_{ab}^S (V) | 404 | 404 |
| V_{bc}^S (V) | 402 | 402 |
| V_{ca}^S (V) | 405 | 405 |
| I_a^S (A) | 3.03 | 2.77 |
| I_b^S (A) | 3.38 | 2.81 |
| I_c^S (A) | 1.08 | 2.38 |
| I_+^S (A) | 2.368 | 2.63 |
| I_-^S (A) | 1.316 | 0.26 |
| I_{UR1} (%) | 55.57 ^a | 9.89 ^a |
| I_{UR2} (%) | 92.12 ^a | 16.21 ^a |
| V_{ab}^L (V) | 346.2 | 361.9 |
| V_{bc}^L (V) | 367.7 | 363.4 |
| V_{ca}^L (V) | 384.5 | 371.7 |
| V_+^L (V) | 365.4 | 365.2 |
| V_-^L (V) | 22.07 | 5.99 |
| V_{UR1} (%) | 6.04 ^a | 1.64 ^a |
| V_{UR2} (%) | 10.46 ^a | 2.68 ^a |
| P^L (W) | 1400 | 1664 |
| S^L (VA) | 1710 ^a | 1685 ^a |
| PF^L | 0.819 ^a | 0.988 ^a |

^a Calculated values based on the definitions of Eqs. (18)–(20).

Con el SVC las corrientes de secuencia negativa son reducidas enormemente y el factor de potencia se eleva cerca de la unidad.

Es posible utilizar un SVC para desbalances de voltaje y flicker de voltaje debido a Hornos de Arco Eléctrico. Estos SVC no solo reducen flicker sino que también incrementan la producción de la planta.

Además, el SVC puede ser utilizado para balancear cargas y mejorar el factor de potencia cerca de la unidad.

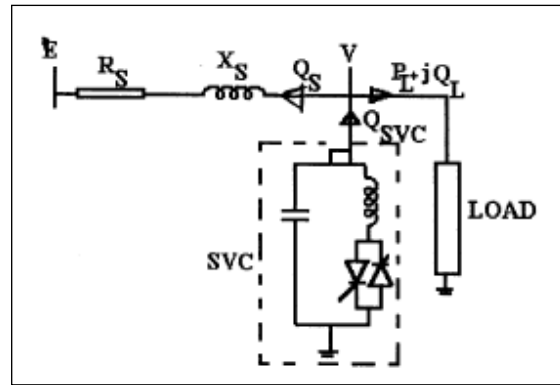


Figura 6. 5: Diagrama unifilar de un sistema de dos nodos con SVC

El SVC utilizado para balance de cargas debe inyectar potencia reactiva con una variación de potencia activa del horno y corriente del arco. El ángulo de disparo del reactor controlado por tiristores debe incrementar para así disminuir el valor efectivo de la potencia reactiva absorbida por el reactor del SVC, el cual parece susceptancias capacitivas trifásicas balanceadas conectadas en paralelo con susceptancias del SVC trifásicas utilizadas para balance de carga. El comportamiento de las impedancias del circuito de arco, la corriente de fase, y los voltajes del horno con y sin SVC son mostrados en la Figura 6. 6, Figura 6. 7, Figura 6. 8 y Figura 6. 9 respectivamente. Se puede observar que el factor de potencia de entrada trifásico es unitario cuando se utiliza el SVC.

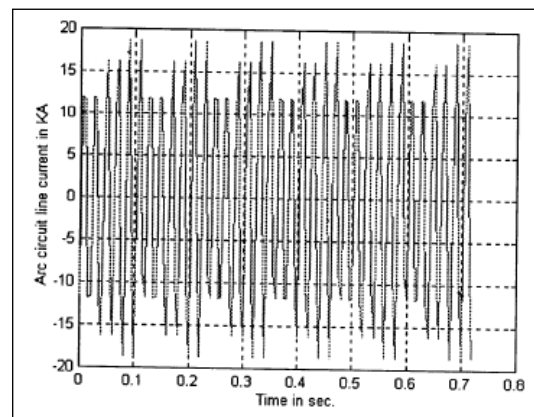


Figura 6. 6: Respuesta instantánea de la corriente de fase de un HAE sin SVC [57].

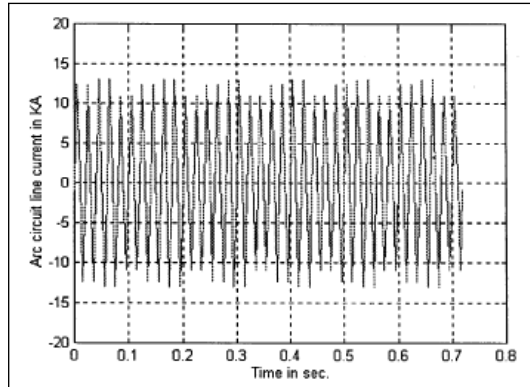


Figura 6. 7: Respuesta instantánea de la corriente de fase de un HAE con SVC para balance de carga [57].

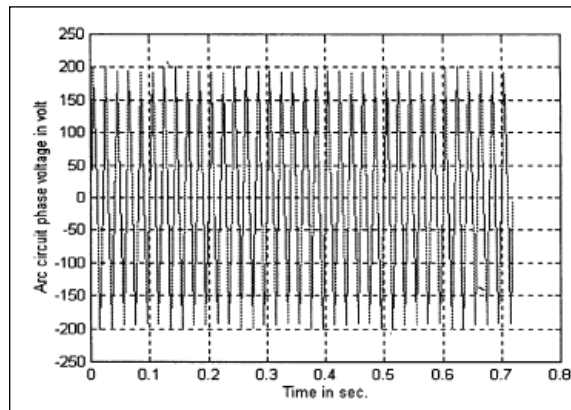


Figura 6. 8: Respuesta instantánea del voltaje de fase de un HAE sin SVC [57].

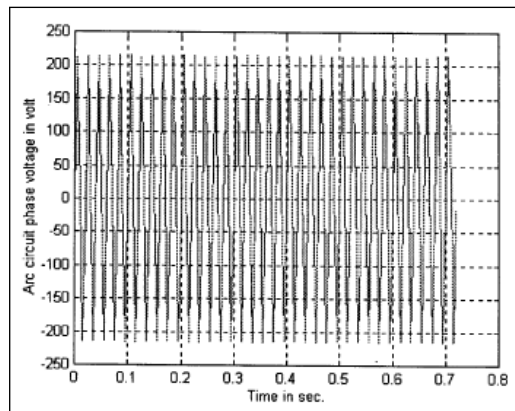


Figura 6. 9: Respuesta instantánea del voltaje de fase de un HAE con SVC [57].

6.2 Convertidor de Voltaje de alimentación (VSC)

Un VSC conectado en paralelo con la red puede ser utilizado para mitigar *Sags* de voltaje. El VSC mantiene constante la magnitud del voltaje de la red en el punto de conexión al inyectar potencia reactiva para compensar el *Sag*. Para mitigar los efectos de los *Sags* de voltaje, una solución es el uso de un VSC conectado en serie con el alimentador de distribución de la carga. Este dispositivo es ampliamente

utilizado a nivel mundial [58], [59], sin embargo tiene la desventaja de ser muy costoso y de poseer un sistema muy complejo de protección [60], [59].

Un VSC conectado en paralelo es utilizado en sistemas de distribución para aplicaciones tales como filtrados de corrientes armónicas, compensación de potencia reactiva y para cancelar fluctuaciones de voltaje que puedan llevar a flicker causados por variaciones en la corriente de cargas como un horno de arco eléctrico conectado a una red débil. La compensación se obtiene inyectando corriente reactiva a la red, que resulta en un cambio de voltaje en el punto de conexión común (PCC) debido a la impedancia de la red. El mismo principio es aplicado para la mitigación de *Sags* de voltaje.

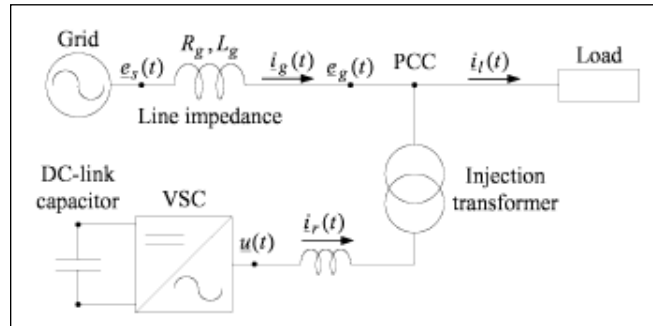


Figura 6. 10: Diagrama unifilar de un sistema con un VSC en paralelo.

Para mostrar cómo funciona esta configuración, en la figura siguiente se muestra el voltaje en el nodo PCC cuando el compensador está en estado “idle”. Como se muestra, el voltaje PCC es afectado por un *Sag* de voltaje de 71%.

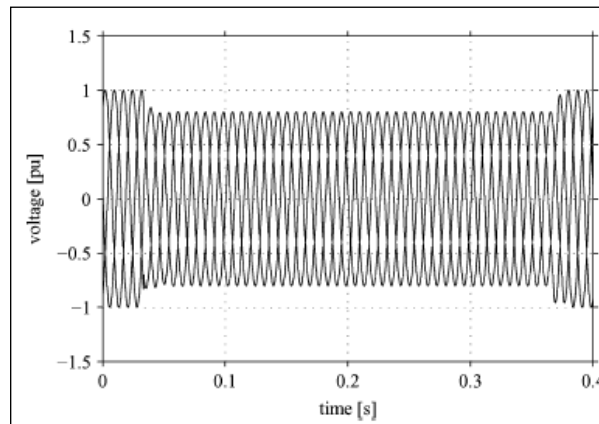


Figura 6. 11: Simulación del Voltaje en PCC durante un *Sag* del 71%. VSC inactivo [59].

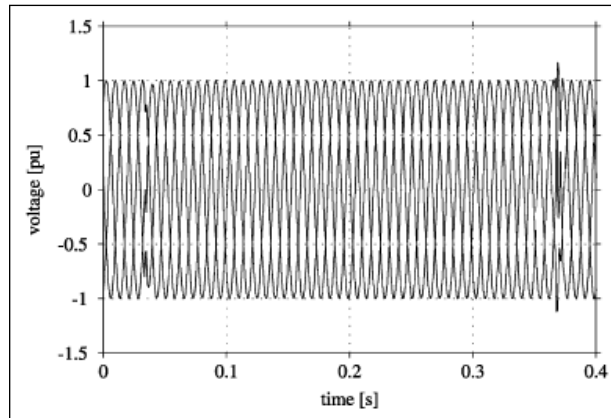


Figura 6. 12: Simulación del Voltaje trifásico compensado en PCC. Utilizando inyección de potencia reactiva [59].

Cuando el compensador está en línea, el controlador reacciona a la reducción de voltaje inyectando potencia reactiva, lo que mantiene el voltaje en el nodo PCC constante a 1 pu como en la Figura 6. 12. Obsérvese que el voltaje compensado es afectado por un transitorio al inicio y final del *Sag*, porque el sistema de control está diseñado para mantener la magnitud del voltaje del PCC en el valor de pre falla, pero no su fase. Una desventaja es que el controlador debe ser sintonizado para un valor específico de la impedancia de la red. Para poder incrementar la robustez del sistema de lazo cerrado contra la variación de los parámetros del sistema es necesario bajar la velocidad del controlador, dejándolo demasiado lento para compensar fenómenos tan rápidos como son los *Sags*. Se mostró que el VSC puede mantener una magnitud del voltaje en la red al inyectar potencia reactiva para compensar *Sags* de voltaje. Sin embargo, este tipo de sistema de control es demasiado sensible a las variaciones de los parámetros del sistema. Para obtener mejor desempeño y un controlador más robusto, una configuración de VSC conectado en paralelo con filtros LCL sería necesario [59].

6.3 UPFC

Un horno de arco eléctrico induce distintos tipos de disturbios causados por armónicas y transitorios durante el proceso de fundición. Se necesita de compensación dinámica para poder mitigar los disturbios en la red. Los UPFC's con capacidad de compensación en serie activa se oponen a variaciones de la resistencia del arco y flicker del voltaje en la fuente. El UPFC con capacidad de compensación activa se comporta como una resistencia positiva o negativa oponiéndose a las variaciones de la resistencia del arco y flicker en la fuente. La fluctuación de potencia que causa la caída de voltaje se puede separar en dos partes:

Potencia reactiva promedio absorbida por el horno, la cual puede ser compensada por capacitores en paralelo, y la variación instantánea de potencia reactiva alrededor del valor promedio que solo puede ser compensado con un dispositivo dinámico. La variación instantánea de la potencia reactiva puede cancelarse por varias soluciones. Se pueden distinguir dos tipos de compensación:

Compensación en paralelo.- La potencia reactiva consumida por el horno de arco se debe mantener constante. Este tipo de compensación no protege el horno de arco, consecuentemente, en caso de corto circuito las instalaciones del horno sufrirán altas corrientes.

La compensación en serie.- Puede ser compensación activa o reactiva.

El UPFC es el equipo, tipo FACTS, más versátil y es capaz de insertar un voltaje en serie con la línea. Este voltaje puede tener cualquier fase y magnitud referida al voltaje de línea. El UPFC consiste de una rama en paralelo y otra en serie, cada una consiste de un transformador trifásico y un convertidor PWM. Ambos convertidores son operados por un link de CD en común con un capacitor de CD. La potencia real puede fluir libremente en cualquier dirección entre las dos ramas de CA. Cada convertidor puede generar independientemente o absorber potencia reactiva en las terminales de CA de salida [61], [62].

Las armónicas generadas por el inversor son atenuadas por un filtro de segundo orden, proveyendo un THD de voltaje bajo al transformador. La Figura 6. 13 muestra una aplicación de un UPFC para compensación de horno de arco eléctrico conectado a través de un transformador.

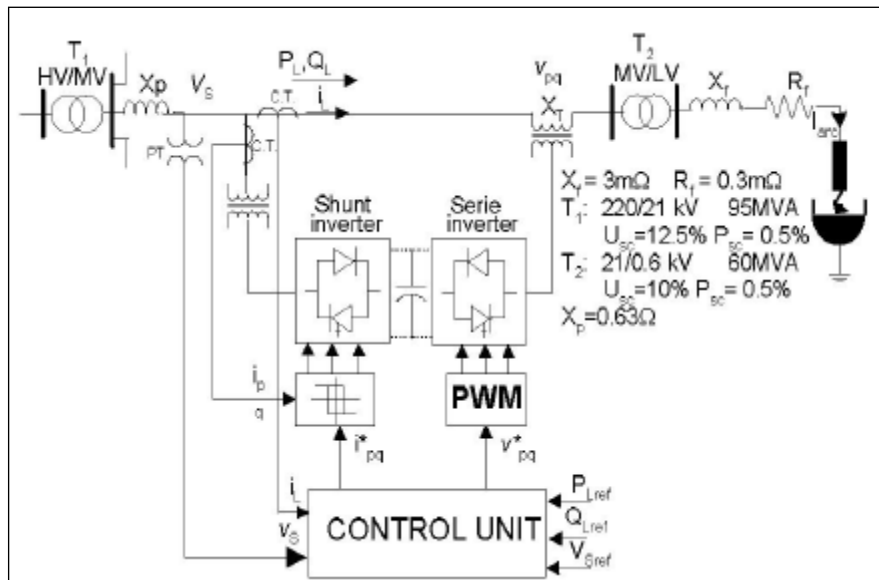


Figura 6. 13: Diagrama de un UPFC para HAE [62]

Utilizar el UPFC como un filtro activo en paralelo es una manera efectiva de minimizar la distorsión de voltaje causada por un horno de arco eléctrico. La Figura 6. 14 muestra la compensación de las corrientes armónicas utilizando el convertidor en paralelo del UPFC sin ningún retraso de tiempo; y en la Figura 6. 15 se muestra un caso donde la resistencia del arco fluctúa y causa el fenómeno de flicker.

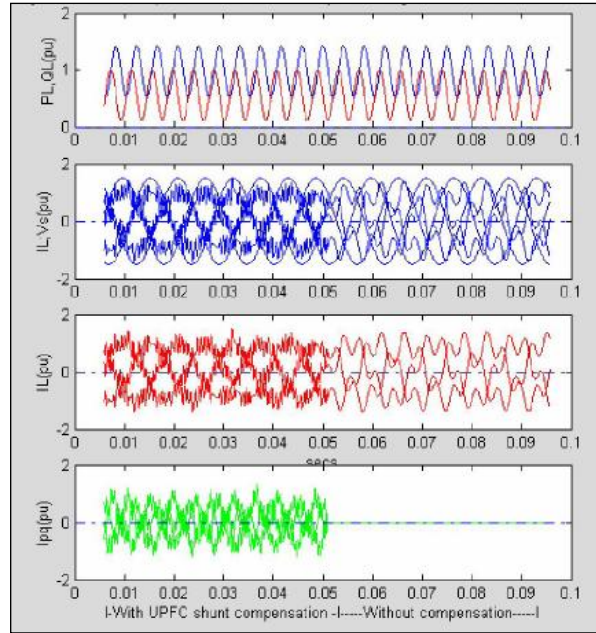


Figura 6. 14: Compensación armónica en sistema de HAE utilizando UPFC como filtro activo en paralelo [62].

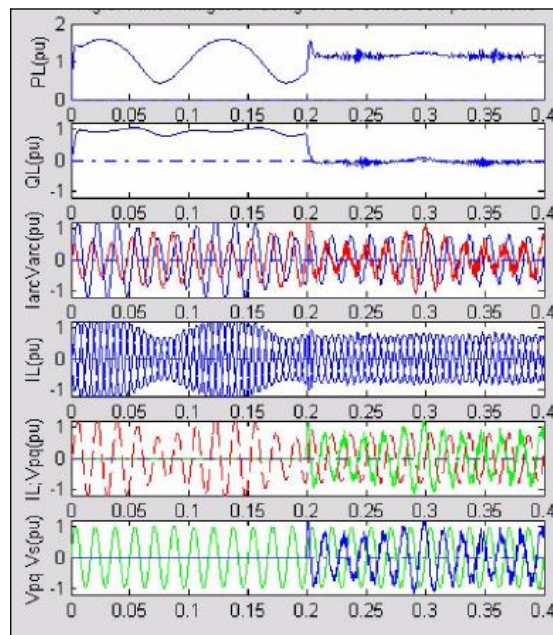


Figura 6. 15: Mitigación de Flicker utilizando compensación en serie con UPFC [62].

La compensación por UPFC permite que el Horno de Arco opere a altas potencias y las limitantes de las corrientes se reducen.

6.4 Compensadores sincrónicos estáticos (STATCOM)

Los STATCOM con convertidores auto conmutados son uno de los dispositivos con sistemas flexibles de transmisión de CA (FACTS) más efectivos para control de voltaje, corrección de factor de potencia, y estabilidad del sistema de potencia. Sin embargo, para lograr tal funcionalidad, se necesita

diseñar un sistema de control propio y suficiente. El STATCOM es un dispositivo compensador de potencia reactiva en paralelo con la línea de transmisión. El propósito primordial del STATCOM es respaldar el voltaje del bus proveyendo potencia reactiva capacitiva o inductiva al sistema. También es capaz de mejorar la estabilidad de estado estable y de estado transitorio de un sistema de potencia. Este controlador puede generar y/o absorber potencia reactiva de tal manera que su salida puede variar para controlar parámetros específicos del sistema eléctrico de potencia. Regulando las potencias activas y reactivas intercambiándolas entre este dispositivo y la red eléctrica se obtiene el control sobre los flujos de potencia en la red y el voltaje de CD del STATCOM [63], [64], [65]. En pocas palabras lo que este dispositivo puede lograr hacer depende enteramente de su sistema de control.

El diagrama esquemático del STATCOM se muestra en la Figura 6. 16. El STATCOM genera un voltaje trifásico balanceado cuya magnitud y fase se pueden ajustar rápidamente utilizando switches semiconductores. El STATCOM se compone de un convertidor alimentado por voltaje con un capacitor de CD, transformador “coupling” y un circuito de de control y generación de señales.

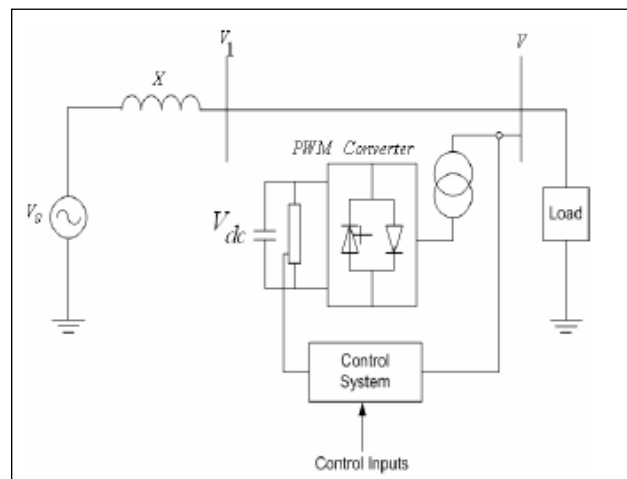


Figura 6. 16: Diagrama esquemático del STATCOM [65].

La función principal del STATCOM es regular la magnitud del voltaje al absorber o generar dinámicamente potencia reactiva a la red de CA. Esta transferencia de potencia reactiva se realiza a través de la reactancia de “leakage” del transformador “coupling” utilizando un segundo voltaje en fase con el voltaje primario. Este voltaje es otorgado por un convertidor PWM alimentado por voltaje y está siempre en cuadratura con la corriente del STATCOM. La diferencia de voltaje de CA a través de la reactancia del transformador produce un cambio de potencia reactiva entre el STATCOM y el sistema de potencia en el punto de interface.

6.5 Corrector Dinámico de *Sags* (DySC)

El DySC conectado en serie o paralelo provee estadísticamente protección contra *Sags* significativa a un costo bastante reducido. Las soluciones convencionales tales como “surge supresors” y reguladores de voltaje no resuelven el problema predominante y, mientras que los sistemas UPS sí resuelven el problema, sus altos costos de adquisición y operacionales disminuye la utilización de estos para procesos industriales poco críticos y comerciales. DySC en varias presentaciones recientemente han sido

desarrollados por varias compañías, apuntando a la mitigación de *Sags* del lado de la acometida en los medidores, principalmente para aplicaciones de potencias mayores clasificadas en 2-10 MW a niveles medios de voltaje.

El DySC apunta a combatir *Sags* de voltaje, transitorios, y pérdidas de potencia momentáneas. El DySC está dimensionado desde los 1.5 KVA monofásicos a los 500 kVA trifásicos en implementaciones sin transformador, y hasta 2000 kVA con conexión de transformador. El DySC es 1/20 el tamaño de las soluciones actuales y también menor en precio, esto debido a que no contiene transformador, contiene conversión de potencia de un estado, une el tiempo de protección a las características del sistema y minimiza la energía acumulada [66].

El Mini DySC o DySC de una sola fase se deriva de un circuito elevador de voltaje como se muestra en la Figura 6. 17. El inversor monofásico se configura para operar en modo de elevación de voltaje o de bypass, y es capaz de proveer una elevación del 100% a la línea de voltaje de CA. Esto permite la corrección de *Sags* hasta del 50%. Además el bus de CD del inversor permite manipular *Sags* de voltaje más severos hasta de 0V.

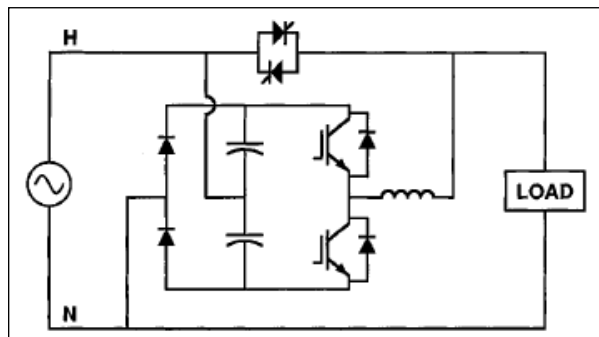


Figura 6. 17: Topología de un DySC monofásico [66].

Los MegaDySC o DySC de alta potencia pueden operar bajo un *Sag* muy bajo o con una apertura del interruptor del alimentador. En la siguiente tabla se muestra una comparación de las distintas soluciones contra disminuciones de voltaje.

Tabla 6. 2: Capacidad de protección para varios equipos para corrección de potencia [66].

| Type of Event | % of Total PQ Events | Spike Suppressor | Voltage Regulator | Transformerless DySC | UPS Systems |
|-------------------------------|----------------------|------------------|-------------------|----------------------|--------------|
| Spikes & surges | 5% | Solves | Solves | Solves | Solves |
| Sag to 80% | 35% | No | Solves | Solves | Solves |
| Sag from 50-80% | 45% | No | No | Solves | Solves |
| Interruption 0-0.15 sec | 7% | No | No | Solves | Solves |
| Interruption 0.15-500 sec | 4% | No | No | No | Solves |
| >500 sec Outage | 4% | No | No | No | No |
| Total PQ Events Solved | 100% | 5% | 40% | 92% | 96% |
| kVA Range | | 1-1000 kVA | 1-200 kVA | 1-2000 kVA | 0.2-1000 kVA |
| kVA / lb. | | 1-10 | 0.02-0.03 | 0.2-1.0 | 0.01-0.02 |
| kVA / ft ³ | | 500 | 1-2 | 10-50 | 0.3-1 |

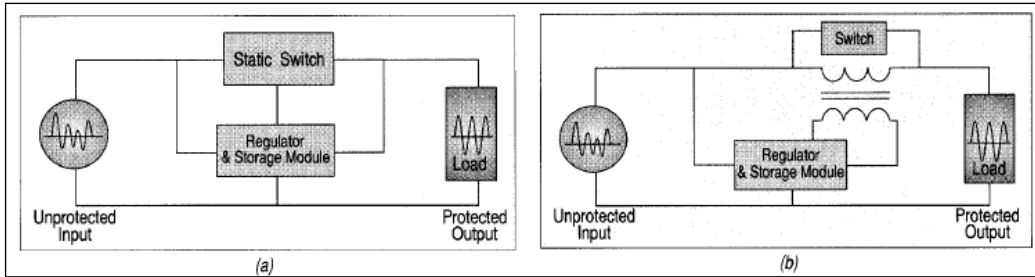


Figura 6. 18: Principio de Operación de un DySC [67]

Tabla 6. 3: Capacidad de Protección para varios equipos de protección

| Type of Event (% of Total PQ Events) | Spike Suppressor | CVT Voltage Regulator | DySC-D Product | UPS Systems |
|---|---------------------|--------------------------|-------------------|----------------|
| Spikes & surges (5%) | Solves | Solves | Solves | Solves |
| Sag to 80% (35%) | No | Solves | Solves | Solves |
| Sag from 50-80% (45%) | No | Product Dependent | Solves | Solves |
| Outage 0-0.15 sec (7%) | No | No | Solves | Solves |
| Outage 0.15-500 sec (4%) | No | No | No | Solves |
| >500 sec Outage (4%) | No | No | No | No |
| % Events Covered (100%) | 5% | 40% | 92% | 96% |
| KVA Range | 1-1000 kVA | 1-300 kVA | 1-500 kVA | 0.2-1000 kVA |
| KVA /lb. | 1-10 | 0.02-0.03 | 0.5-1.0 | 0.01-0.02 |
| KVA/cu.ft. | 500 | 1-2 | 10-50 | 0.3-1 |
| \$/kVA | 20 | 250-400 | 100-175 | 500-1000 |

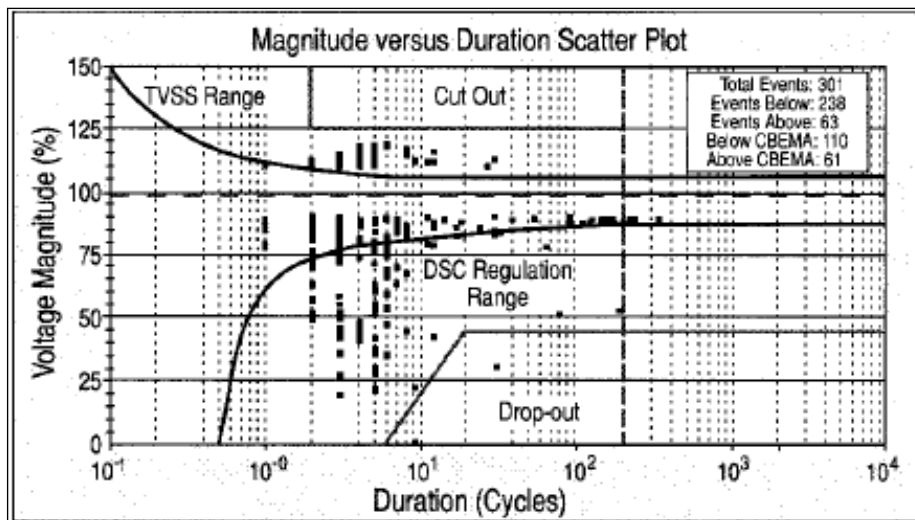


Figura 6. 19: Gráfica de Eventos donde se muestra el área de protección de un DySC [67]

6.6 Restaurador Dinámico de Voltaje (DVR)

Es el dispositivo basado en electrónica de potencia más popular para mitigar los *Sags* de voltaje. En general los sistemas DVR está compuesto por un VSI, una batería para almacenar energía, un controlador que provee señales de disparo para el control de VSI, tres transformadores monofásicos, capacitores que filtran armónicas del inversor y filtros LC que filtran armónicas inyectadas a los voltajes. En la Figura 6. 20 se muestra un diagrama de lo descrito.

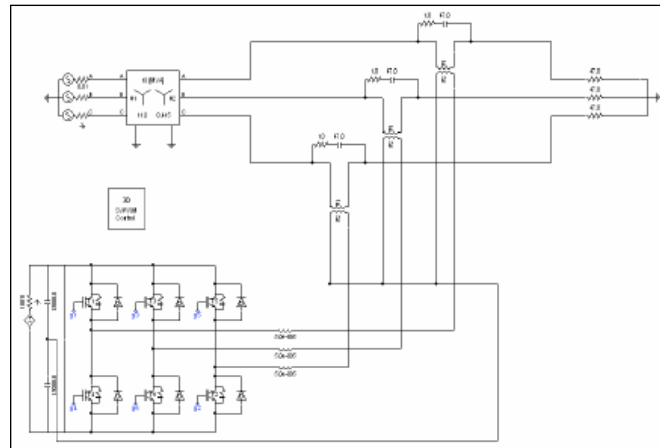


Figura 6. 20: Diagrama DVR

Enseguida se muestra el comportamiento ante una falla de tres líneas a tierra del 30% como se muestra en la Figura 6. 21. En la Figura 6. 21b se muestra que los voltajes en terminales de la carga son restaurados a sus valores nominales durante la compensación del DVR que se muestra en la Figura 6. 21c.

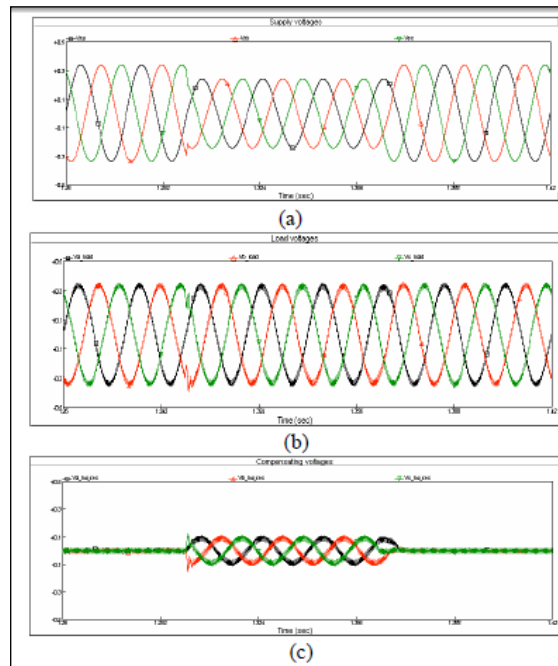


Figura 6. 21: Resultados de simulación para un *Sag* trifásico balanceado

Así mismo se muestra el resultado para una falla de una sola línea a tierra, en la Figura 6. 22:

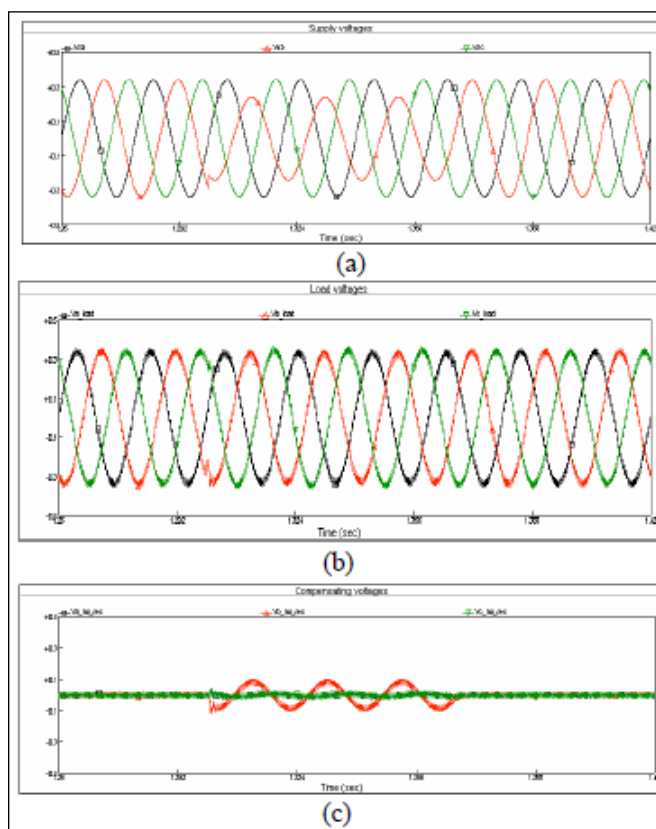


Figura 6. 22: Resultados de simulación para un Sag monofásico [68]

El Estándar 519 de la IEEE “Recommended Practice for Harmonic Control in Electric Power Systems” provee límites recomendados en dos categorías [22], [69]:

- 1.- Los límites de corrientes armónicas son especificados por usuarios individuales. Estos son evaluados en el punto de conexión común (PCC) entre el usuario y el sistema de potencia.
- 2.- Los límites de voltajes armónicos son especificados para el sistema de potencia total e indican la calidad de energía que un usuario puede esperar.

Para poder evaluar una empresa con respecto a los límites de corrientes armónicas se necesitan conocer los siguientes términos:

- 1.- Punto de conexión común (PCC): Es el punto donde se evalúan las corrientes armónicas. Se determina por la acometida. Los puntos más comunes son los puntos de medición o el lado de alto voltaje de los transformadores de los usuarios.

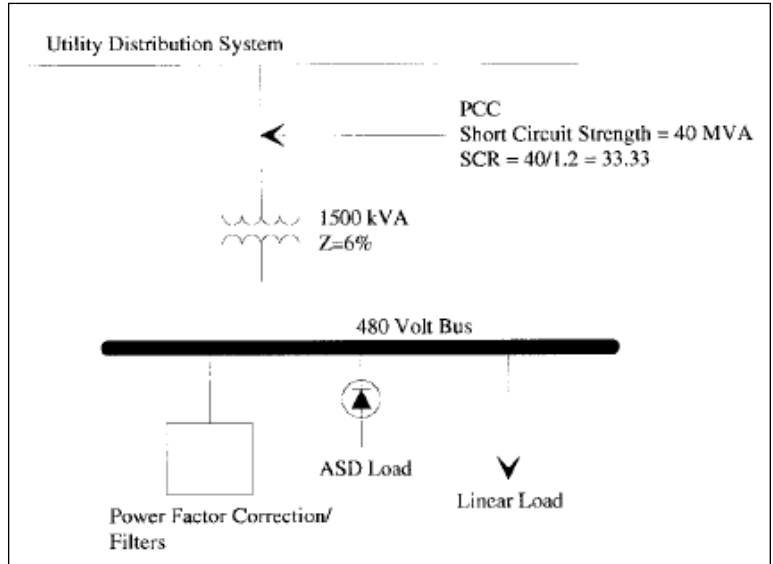


Figura 6. 23: Sistema de Distribución [69]

El agregar capacitores para corrección de factor de potencia en los 480V de la figura anterior, causa resonancia en paralelo entre los capacitores y la inductancia del sistema, como se muestra en la Figura 6. 24.

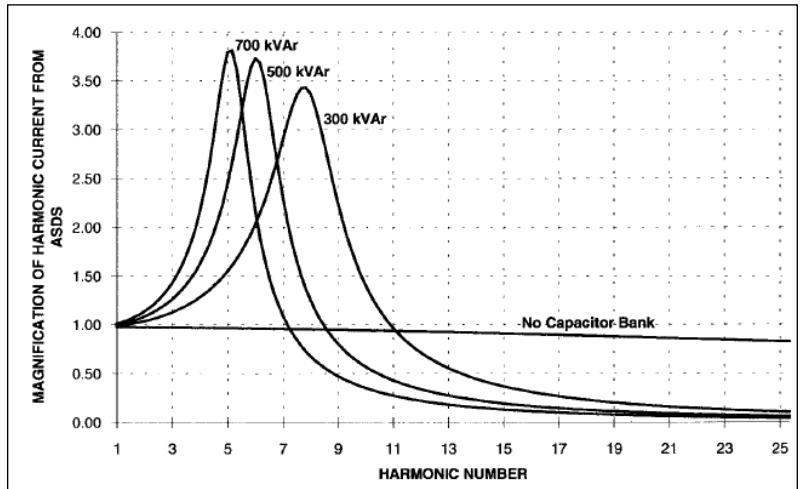


Figura 6. 24: Efecto de agregar capacitores en las corrientes armónicas en PCC [69]

El método más simple para proveer un nivel de control de armónicas y al mismo tiempo lograr corrección de factor de potencia es agregar la corrección del factor de potencia en la forma de banco de capacitores sintonizados. De esta manera se previene la magnificación de armónicas características de los *drives*. Esta configuración se muestra en la Figura 6. 25.

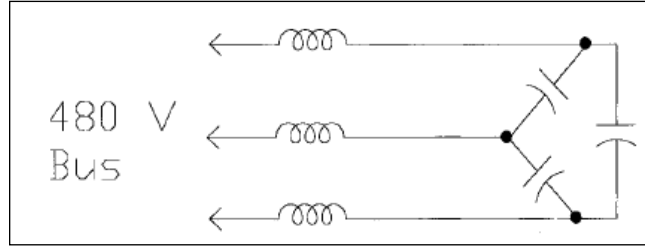


Figura 6. 25: Configuración básica para un banco de capacitores sintonizado para corrección de FP y control de armónicas [69]

Con el banco de capacitores sintonizado, la componente de séptima u onceava armónica del ASD será la componente límite cuando se evalúen los límites de la IEEE 519. La Figura 6. 26 muestra estas componentes armónicas en el PCC como una función de la carga de ASD con un banco sintonizado de 500 kVAr.

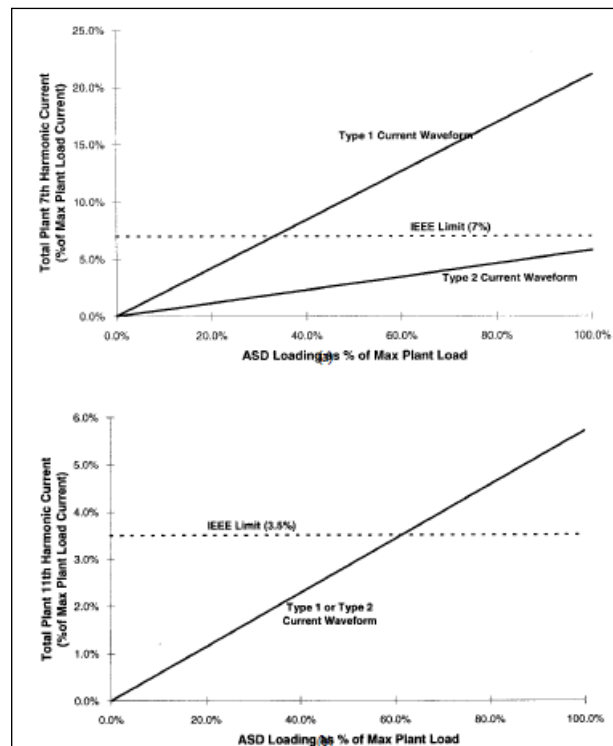


Figura 6. 26: a) Componente de séptima armónica de la corriente de carga de la planta como función de ASD con un banco de capacitores sintonizado a 4.7; b) Igual que a) pero con la onceava componente armónica

6.7 Soluciones Activas

La corrección de factor de potencia de manera activa utiliza switches controlados para remover las limitaciones de las soluciones pasivas. Sin embargo en algunos circuitos los switches están sincronizados con la línea y operan a la frecuencia fundamental o a una frecuencia de menor orden que la fundamental, muy comúnmente a una frecuencia dentro del rango de audio. Algunos de estos dispositivos son:

6.7.1 Correctores de Factor de potencia de alta frecuencia con almacenamiento de energía inductiva

Los convertidores *buck* y *buck-boost* pueden ser utilizados como correctores de factor de potencia con almacenamiento de energía. En ambos esquemas, un inductor muy grande es utilizado, el cual lleva una corriente constante esencial. El ciclo de trabajo del switch varia entre cero y un máximo en proporción del voltaje rectificado. El principal problema con estos esquemas es que necesitan de una inductancia muy grande, la respuesta transitoria de la carga es lenta debido a esto, y se necesita de un switch flotado. Por estas razones son raramente utilizados.

6.7.2 Correctores de factor de potencia de alta frecuencia no aislados con almacenamiento de energía capacitiva

Son la mejor solución al factor de potencia en alimentaciones de potencia que conmutan. Una topología es el corrector *boost*. Ofrece la mejor utilización del switch de potencia, provee el control más robusto sobre la forma de onda de la corriente, inyecta solo una modesta cantidad de ruido de alta frecuencia en la línea, tiene el capacitor para almacenar energía más pequeño, y utiliza un switch referenciado a tierra. El problema principal es que no tiene un switch entre la línea y la salida, y que la salida siempre es más alta que los picos de voltaje en la entrada.

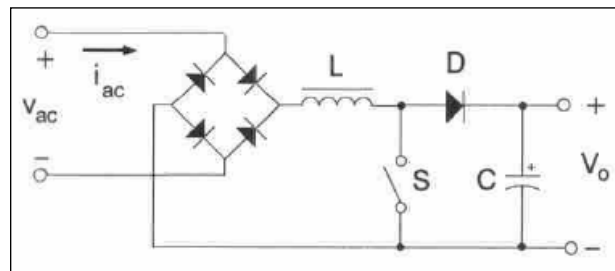


Figura 6. 27: Corrector tipo *boost*

Otra topología es el corrector tipo *buck*. Este no tiene los dos problemas que tiene el tipo *boost*, sin embargo tiene otras:

Cuando el voltaje de línea instantáneo es menor que el voltaje de salida no hay corriente de línea, llevando a una significativa distorsión de corriente de línea. Se necesita de un switch flotado ya que la corriente RMS en el switch es muy alta [70].

Aquí solo se muestra que existen otras técnicas para corrección de factor de potencia, todas ellas difieren en costos, distorsión, rango de potencias, utilización de dispositivos semiconductores, regulación de voltaje, facilidad de diseño, etc. Y como todo, seleccionar la que mejor aplique para un problema en particular requiere de una cuidadosa consideración de varios factores.

6.7.3 Filtros Activos (AF)

Hoy en día los Filtros Activos para la potencia eléctrica son una tecnología madura para combatir armónicas y para compensación de potencia reactiva en dos líneas, tres líneas y cuatro líneas para cargas no lineales.

La creciente contaminación de la red eléctrica ha llamado la atención de ingenieros de potencia y de electrónica de potencia para desarrollar soluciones dinámicas y ajustables a los problemas de calidad de potencia. Tal equipo, generalmente conocido como AF son también llamados acondicionadores activos de línea de potencia (APLC), compensadores instantáneos de potencia reactiva (IRPC), filtros activos de potencia (APF) y acondicionadores activos de calidad de energía (APQC) [71], [72], [73], [74], [75], [76]. Los filtros activos pueden ser utilizados para eliminar los voltajes armónicos, para regular los voltajes en terminales, para eliminar flicker de voltaje, y para mejorar el balance de voltaje en sistemas trifásicos [76].

En general los AF son utilizados para compensar armónicas de corriente y voltaje, pero en la mayoría de los casos, tienen funciones adicionales, tales como compensación de potencia reactiva, desbalance de corriente y voltaje, corriente al neutro, flicker de voltaje, picos de voltaje, y regulación de voltaje. La mayoría de las regulaciones de voltaje son reducidas utilizando AF en serie, mientras que las compensaciones relacionadas con corriente son atacadas utilizando AF en paralelo [76]. En la Tabla 6. 4 se muestra mejor como atacar los distintos disturbios eléctricos con AF.

Tabla 6. 4: Selección de FA para aplicaciones específicas. Configuración preferible con mayor cantidad de asteriscos.

| Compensation for Specific Application | Active Filters | | | |
|---------------------------------------|----------------|--------------|---|--|
| | Active Series | Active Shunt | Hybrid of Active Series and Passive Shunt | Hybrid of Active Shunt and Active Series |
| A. Current Harmonics | | ** | *** | * |
| B. Reactive Power | | *** | ** | * |
| C. Load Balancing | | * | | |
| D. Neutral Current | | ** | * | |
| E. Voltage Harmonics | *** | | ** | * |
| F. Voltage Regulation | *** | * | ** | * |
| G. Voltage Balancing | *** | | ** | * |
| H. Voltage Flicker | ** | *** | | * |
| I. Voltage Sag&Dips | *** | * | ** | * |
| J. (A + B) | | *** | ** | * |
| K. (A+B+C) | | ** | | * |
| L. (A+B+C+D) | | * | | |
| M. (E+F) | ** | | | * |
| N. (E+F+H+I) | ** | | | * |
| O. (A+E) | | | ** | * |
| P. (A+B+E+F) | | | * | ** |
| Q. (F+G) | ** | | * | |
| R. (B+C) | | * | | |
| S. (B+C+D) | | * | | |
| T. (A+B+G) | | ** | * | |
| U. (A+C) | | * | | |
| V. (A+D+G) | | * | ** | |

En la Tabla 6. 5 se muestra la contribución de corrientes armónicas que se presentan para distintos *drives*.

Tabla 6. 5: Corrientes Armónicas, THD de corriente y Factor de Armónica para varios tipos de *Drives* Variadores de Frecuencia [77].

| No. | TYPE OF VFD/CONVERTER | HARMONIC CURRENTS, % OF FUNDAMENTAL | | | | | | | | | | | | | | Current THD % | HP |
|-----|-------------------------------------|-------------------------------------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---------------|-------|
| | | Harmonic order, h | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 23 | 25 | 29 | 31 | 35 | 37 | 41 | 43 | | |
| 1. | Convertidor de 6 pulsos | 17.5 | 11.0 | 4.5 | 2.9 | 1.5 | 1.0 | 0.9 | 0.8 | 0 | | | | | | 21.46 | 1.39 |
| 2. | Convertidor de 12 pulsos | 2.6 | 1.6 | 4.5 | 2.9 | 0.2 | 0.1 | 0.9 | 0.8 | 0 | | | | | | 6.28 | 0.71 |
| 3. | Convertidor de 18 pulsos | 2.6 | 1.6 | 0.7 | 0.4 | 1.5 | 1.0 | 0.1 | 0.1 | 0 | | | | | | 3.64 | 0.38 |
| 4. | Convertidor de 24 pulsos | 2.6 | 1.6 | 0.7 | 0.4 | 0.2 | 0.1 | 0.9 | 0.8 | 0 | | | | | | 3.39 | 0.36 |
| 5. | Rectificador de 6 pulsos 150KVA | 49.5 | 14.5 | 14.1 | 9.7 | 5.8 | 6.6 | 2.8 | 2.0 | 0 | | | | | | 56.15 | 3.75 |
| 6. | VFD CSI 6 pulsos 250hp 480V | 17.2 | 8.7 | 6.2 | 2.3 | 3.2 | 0.7 | 2.1 | 0.4 | 0.8 | 0.8 | 0.2 | 0.5 | 0.2 | 0.2 | 20.78 | 1.51 |
| 7. | VFD CSI 6 pulsos 150hp 480V | 24.8 | 10.5 | 7.7 | 7.0 | 5.5 | 4.3 | 3.4 | 3.9 | 2.9 | 3.2 | 2.4 | 2.9 | 2.1 | 3.8 | 30.76 | 3.30 |
| 8. | VFD LCI 6 pulsos 2250hp 575V | 19.2 | 13.1 | 7.3 | 5.6 | 3.2 | 2.5 | 1.3 | 0.9 | 0.3 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | | | 25.38 | 1.91 |
| 9. | CD Drive Tiristores 6 pulsos 450hp | 31.1 | 7.5 | 8.9 | 4.2 | 5.6 | 3.1 | 2.5 | 2.3 | 0 | | | | | | 34.24 | 2.38 |
| 10. | CD Drive Tiristores 12 pulsos 450hp | 1.2 | 0.6 | 7.6 | 1.1 | 0.3 | 0.3 | 1.3 | 1.1 | 0 | | | | | | 7.99 | 0.94 |
| 11. | VFD PWM 6 pulsos 125hp | 28.0 | 13.0 | 8.6 | 6.9 | 5.5 | 4.5 | 0 | 0 | 0 | | | | | | 33.54 | 2.49 |
| 12. | VFD PWM 6 pulsos 1-5hp | 89.6 | 80.1 | 56.5 | 43.6 | 20.9 | 11.9 | 1.4 | 2.8 | 3.8 | 2.8 | 0.9 | 1.1 | | | 141.9 | 11.95 |
| 13. | VFD PWM 6 pulsos 5-150hp | 42.5 | 13.1 | 1.9 | 1.1 | 1.8 | 1.8 | 1.9 | 1.8 | 1.5 | 1.4 | 1.3 | 1.2 | 1.1 | | 44.77 | 2.64 |
| 14. | VFD PWM 6 pulsos 150-500hp | 30.1 | 2.7 | 8.5 | 3.4 | 4.9 | 2.7 | 3.5 | 2.2 | 2.7 | 1.8 | 2.2 | 1.6 | 1.8 | 1.4 | 32.65 | 2.71 |
| 15. | VFD PWM 6 pulsos 2hp sin inductor | 47.4 | 27.0 | 4.1 | 4.6 | 2.9 | 1.5 | 0 | 0 | 0 | | 0 | | | | 54.99 | 3.17 |
| 16. | VFD PWM 6 pulsos 50hp con inductor | 31.3 | 9.3 | 6.4 | 3.4 | 2.4 | 1.9 | 1.1 | 1.1 | 0.7 | 0.6 | 0.5 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 33.60 | 2.04 |
| 17. | VFD PWM 6 pulsos 25hp con inductor | 33.8 | 10.7 | 6.9 | 3.4 | 2.8 | 2.0 | 1.2 | 0.7 | 0.7 | 0.5 | 0.5 | 0.4 | 0.4 | 0.3 | 36.45 | 2.19 |
| 18. | VFD PWM 6 pulsos 15hp con inductor | 50.15 | 25.6 | 7.8 | 5.4 | 3.6 | 2.3 | 2.1 | 1.4 | 1.4 | 0.9 | 0.9 | 0.7 | 0.7 | 0.6 | 57.3 | 3.47 |
| 19. | VFD PWM 6 pulsos 2hp con inductor | 87.0 | 75.5 | 47.7 | 34.2 | 13.8 | 9.2 | 8.2 | 7.6 | 4.8 | 3.7 | 3.4 | 3.3 | 2.4 | 2.0 | 131.1 | 10.69 |
| 20. | VFD PWM 6 pulsos 150hp con trafo | 33.7 | 1.09 | 7.37 | 3.5 | 3.5 | 2.1 | 1.6 | 1.4 | 0.8 | 0.9 | 0.6 | 0.5 | 0.4 | 0.3 | 36.7 | 2.19 |
| 21. | VFD LCI 12 pulsos 1250hp 1100V | 2.6 | 1.0 | 8.6 | 6.0 | 2.6 | 0 | 3.4 | 2.5 | 0 | | 1.7 | 1.7 | | | 12.16 | 1.77 |

6.8 Soluciones Pasivas

A diferencia de las soluciones activas, las cuales por supuesto tienen un espectro mas amplio de acción, éstas ofrecen confiabilidad, robustez y funcionamiento silencioso para reducción de corrientes armónicas y son insensibles a picos de voltajes, pero tienen numerosas desventajas:

- Son pesadas y grandes comparadas con soluciones activas.
- Algunos circuitos son sensibles a frecuencias de línea.
- Algunos circuitos proveen exceso de desfaseamiento para la frecuencia fundamental, reduciendo el factor de potencia de desplazamiento.
- Algunos circuitos no pueden operar con amplios rangos de voltaje de entrada.
- No tienen regulación de voltaje
- La respuesta dinámica es muy pobre
- El diseño es complicado

La característica principal de las soluciones pasivas es que no utilizan switches controlados.

6.8.1 Rectificador con filtro inductivo

Utilizando una gran inductancia y cero capacitancia se obtiene una corriente de línea cuadrada y 90% de factor de potencia. Haciendo una combinación correcta de capacitancia e inductancia se puede elevar el factor de potencia a 90.5%

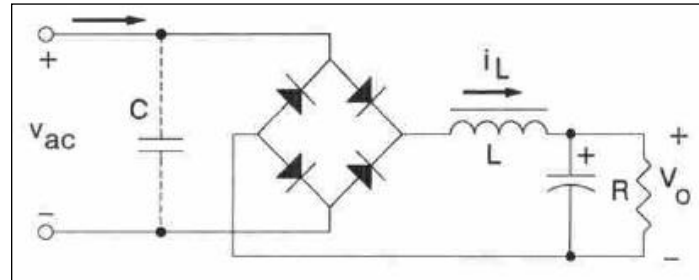


Figura 6. 28: Rectificador con filtro inductivo

6.8.2 Rectificador con circuitos sintonizados

En lugar de usar un inductor, la corriente de línea puede ser modificada con circuitos LC sintonizados. Las dos variaciones más sencillas son un rectificador con un resonador en serie sintonizado a la frecuencia fundamental.

6.8.3 Reactores en Serie

Reactores en serie suplementarios, en sistemas con presencia de hornos de arco eléctrico, ayudan a mejorar la estabilidad del arco, reducen el consumo de electrodos y rupturas, reducen los tiempos de colada, incrementan la potencia promedio al horno, e inclusive pueden reducir el flicker de la línea de alimentación [78], [79].

6.8.4 Factor K.

Cuando se tiene presencia de corrientes en la carga no senoidales, los transformadores con factor K son una buena solución [80]. Estos evitan la saturación magnética en el nucleo debido a que tienen una manufactura especial.

6.8.5 Compensadores en Serie (SC)

Un compensador en serie diseñado para mitigar perturbaciones de voltaje en formas de *Sags* y *Swells* de voltaje, logra la función de mitigación inyectando un voltaje generado por un sistema inversor de voltaje de alimentación (VSI).

El SC se conecta de la carga más sensible con un transformador de inyección. Se conecta en serie con la carga más sensible. La función del SC es asegurarse que el voltaje en terminales de la carga sensible sea de alta calidad. La parte central del SC es un sistema de almacenamiento de energía (EES) y un VSI donde un esquema de conmutación tipo PWM es utilizado. El EES puede ser un capacitor. La Figura 6. 29b muestra el diagrama unifilar de la rama del SC y la carga sensible, donde gracias al voltaje V_{out} se puede compensar para voltajes armónicos.

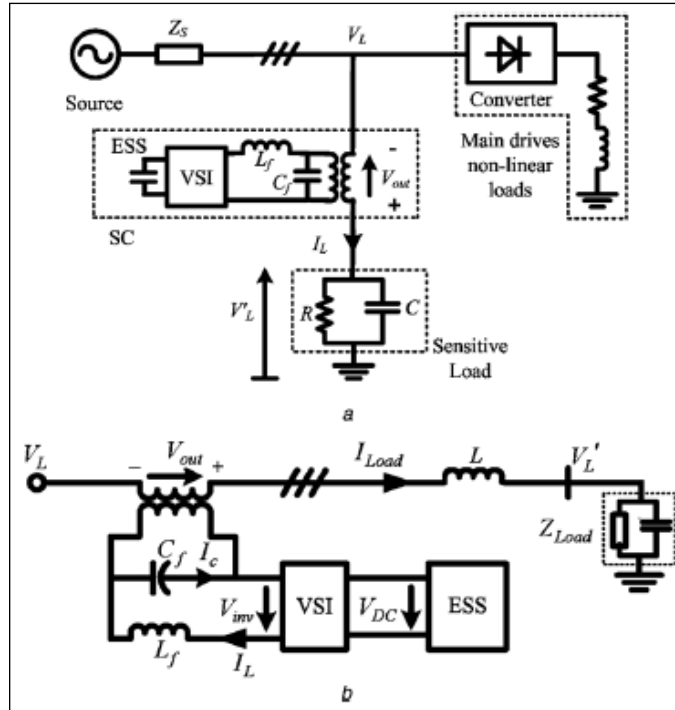


Figura 6. 29: Modelo de un sistema de potencia; a) Diagrama Esquemático; b) Diagrama unifilar

La Figura 6. 30a muestra las formas de onda del voltaje en terminales y la corriente demandada por la carga sensible con y sin el SC en servicio.

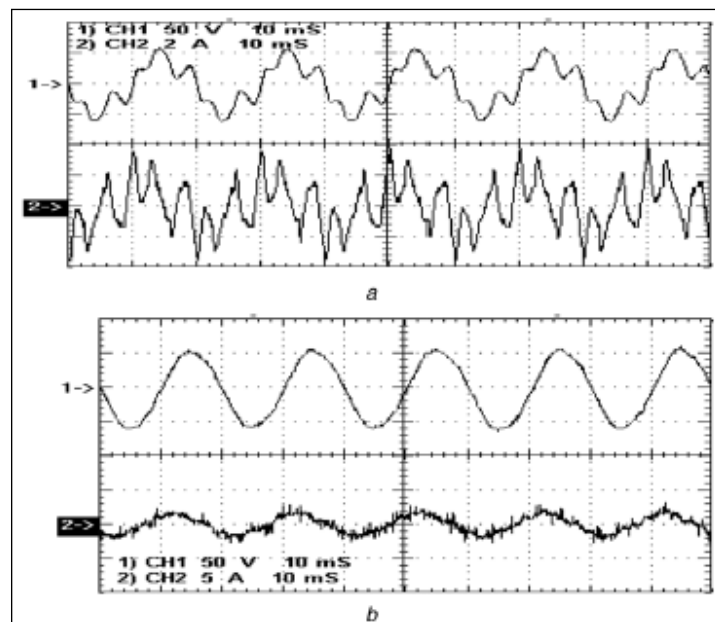


Figura 6. 30: Mediciones del voltaje en terminales de una carga sensible; a) sin SC; b) con SC

La Figura 6. 31a muestra el voltaje a través del EES sin el ajuste de fase de la componente de frecuencia fundamental del voltaje de referencia.

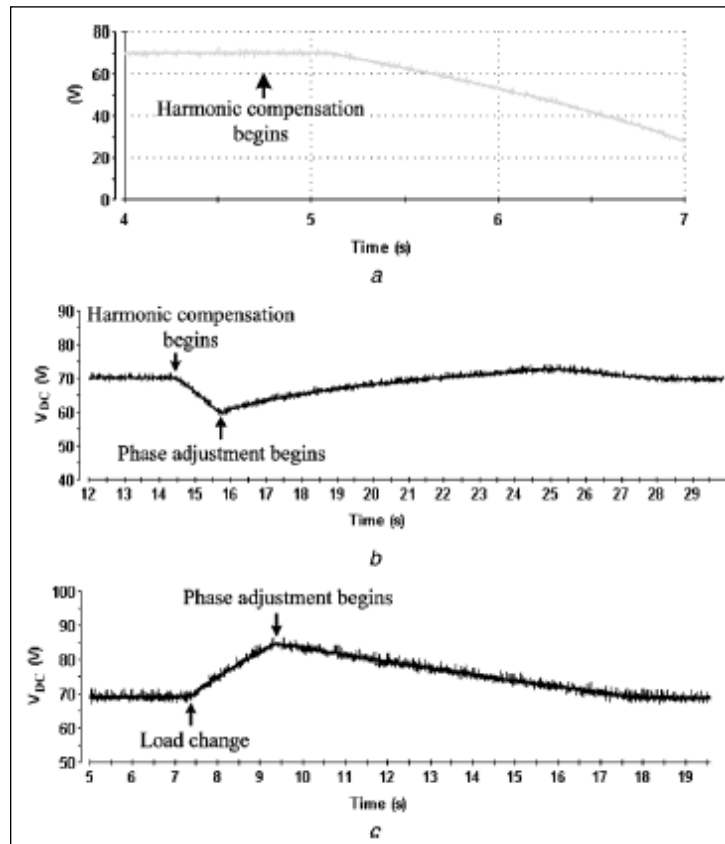


Figura 6. 31: Mediciones de voltaje en terminales de EES; a) Sin cambio de fase; b) Con cambio de fase; c) Siguiendo un cambio en la carga de -20% [81].

Capítulo 7.- Análisis del Fenómeno *Sag*

Se realizó un estudio de calidad de energía en la planta de Ternium Puebla puesto que según las tres hipótesis que se plantearon al inicio, se cree que la causa de los paros de producción no programados en el área de laminación se debe a disturbios eléctricos.

Se consiguieron los analizadores de calidad de energía adecuados para poder monitorear el estado actual de la red eléctrica. Para esto se identificaron 3 puntos críticos donde fuera conveniente poner tales mediciones, de tal manera que se pudiera obtener la máxima información con el mínimo equipo posible.

Los equipos utilizados fueron dos analizadores PQ de la marca Fluke, serie 435, dos medidores PQ de la marca ION, e independientemente se instalaron analizadores de la marca Dranetz. Las mediciones se realizaron por periodos de tiempo intercalados, debido a que el equipo se obtuvo prestado de distintas fuentes.

Los tres puntos críticos que se eligieron para instalar los analizadores fueron: La acometida en 230 kV, la entrada al bus de laminación en 13.2 kV y la alimentación a los *drives* en 825 y 220 V.

Al momento de elegir 3 puntos en tres niveles de voltaje se tiene una buena visión de toda la red eléctrica. De esta manera si ocurre algún *Sag*, nos es posible saber el nivel de voltaje de origen de éste, sin necesidad de estar monitoreando corriente; aunque en algunas ocasiones también se estuvo monitoreando la corriente a la par del voltaje.

La metodología utilizada para estudiar este fenómeno de *Sags* fue la especificada en el estándar 1346 de la IEEE, el cual abarca los siguientes apartados:

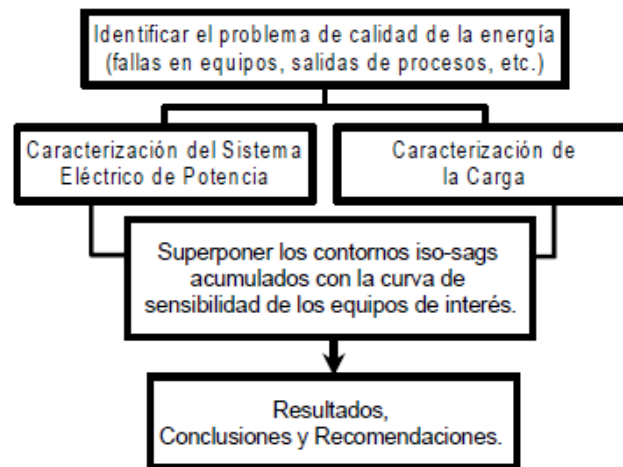


Figura 7. 1: Metodología propuesta para analizar *Sags* [82]

La metodología mostrada te permite visualizar el comportamiento del Sistema de Potencia en un nivel de voltaje específico de acuerdo a un diagrama de contornos Iso-*Sags*. Este diagrama de contornos muestra la probabilidad de ocurrencia de *Sags* solo en un nivel de voltaje, por lo tanto es necesario calcular un diagrama de contornos único para cada nivel de voltaje analizado. Debido a esto se hicieron tres análisis

de *Sags* paralelos para cada nivel de voltaje capturado (230 kV, 13.2 kV y 825 V). Un esquema de cómo están distribuidos los tres niveles de voltaje se muestra a continuación.

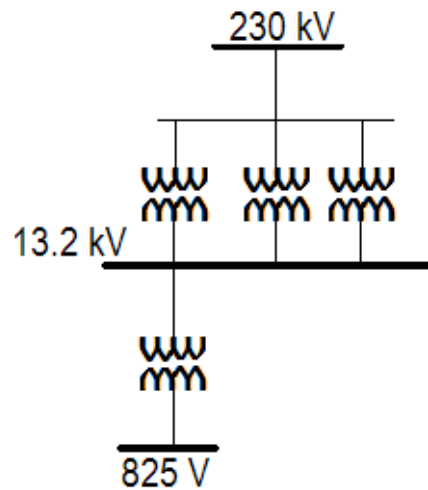


Figura 7. 2: Distribución del SEP en la industria siderúrgica evaluada.

7.1 Acometida 230 kV

La acometida es el punto que alimenta a toda la planta, CFE suministra 230 kV de CA a 60 Hz a este punto, teóricamente las formas de onda de voltaje y corriente que suministra CFE son de factor de potencia unitario, de voltaje constante y sin componentes armónicas, en otras palabras la energía suministrada es de excelente calidad.

Se eligió este punto para monitoreo debido a que si surge algún disturbio eléctrico a este nivel se espera que este disturbio sea de una magnitud tal que afecte alguna parte de la planta, y monitoreando este nodo podremos tener registro de él.

Como se ha observado en capítulos anteriores, el origen del disturbio puede ser externo o interno. De ser interno tuvo que haber sido generado en alguna de las cargas que están a niveles de voltaje por debajo que el de acometida. Pero si este disturbio llega a visualizarse a nivel de acometida, significará que la falla fue drástica y es probable que esta afecte a otras cargas. En cambio si el origen del disturbio fuera externo, seguramente se podrá visualizar en la acometida, sin embargo habrá que averiguar si este disturbio viajó a niveles de voltaje más bajos, y si provocó algún malfuncionamiento en el equipo.

En este punto se instaló un medidor de calidad de energía de la marca ION. Este dispositivo es el único dispositivo perteneciente a la planta, más específicamente al área de subestación. A pesar que su instalación es permanente, este dispositivo fue instalado aproximadamente a mediados del 2008 por motivos ajenos a esta investigación, y desde entonces estuvo obteniendo información en periodos de tiempo intercalados. Para esta investigación se recopiló la información que obtuvo en el periodo del 12 de Febrero al 6 de abril del 2009, durante este tiempo este dispositivo estuvo midiendo el Voltaje de línea a línea RMS de las tres fases. La Figura Anexo A. 1, Anexo A. 2 y Anexo A. 3 muestran el historial de voltaje que se obtuvo en este punto durante los meses de Febrero, Marzo y Abril.

Durante los tres meses se puede observar que el promedio del voltaje se estabiliza en 1.02%, lo que indica que está un 2% por arriba del voltaje nominal, que es 230 kV. Sin embargo es evidente una variación del

voltaje de pico a pico del 5%. Esta variación es constante en la mayoría del tiempo, sin embargo un acercamiento de esta variación puede observarse en la Figura 7. 3. Como diagnostico puede decirse que esta variación se debe a la producción del HAE que demanda más voltaje cada vez que necesita hacer la fundición. Entonces cada pico observable es la duración de una colada.

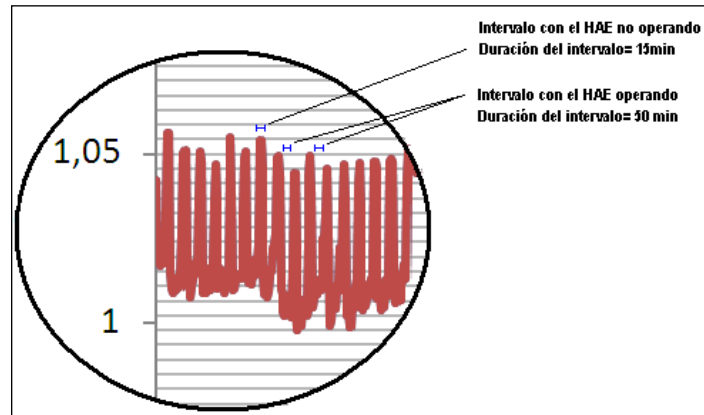


Figura 7. 3: Acercamiento de la variación del Vrms de acometida.

Los datos obtenidos por el ION son almacenados automáticamente en Excel para su análisis. Al realizar la gráfica de estos datos, esta se muestra con poca resolución y con un grosor de línea que no favorece para la observación de los intervalos. Sin embargo para referenciar la veracidad de los datos expuestos, muestro los intervalos de duración de cada pico y de cada cresta. Donde el pico es el voltaje en promedio alrededor de 1.05 pu, y es cuando el Horno no está operando, a esto se debe que haya un voltaje alto, puesto que no hay una demanda significativa de potencia en ese momento. Precisamente el tiempo el cual el voltaje permanece alto, según los datos obtenidos del ION es de 15 min, precisamente el tiempo entre colada y colada.

Por otro lado el intervalo de duración de la cresta, que está marcado en la Figura 7. 3 dos veces, el voltaje en promedio esta en 1 pu, el voltaje es menor que el promedio habitual. Esto se debe a que durante este intervalo de tiempo el Horno esta activo y fundiendo, la duración de este intervalo es de aproximadamente 50 min, precisamente lo que dura una colada.

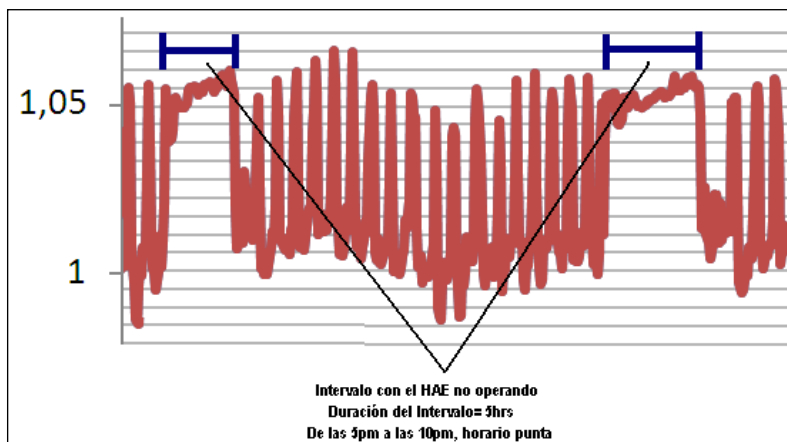


Figura 7. 4: Horario Punta

Por otro lado se encuentran los intervalos mostrados en la Figura 7. 4, los cuales corresponden a intervalos de tiempo más largos donde el Horno está inactivo. Como se muestra en la figura, estos son intervalos que duran aproximadamente 5 hrs, y precisamente ocurren diariamente entre las 5 y 10 de la noche, coinciden con el horario punta en el cual el Horno deja de trabajar porque la energía eléctrica es más cara en ese horario.

Además de los periodos de tiempo que se mencionan se encuentra también otras variaciones que son casos especiales que valdría la pena identificar, éstas se listan en la siguiente tabla.

Tabla 7. 1: Lista de eventos anormales en acometida (*Eventos que hace falta correlacionar con acontecimientos anormales en la planta)

| Fecha de Inicio | Fecha de Término | Característica | Gráfica donde aparece | Comentarios |
|------------------------|-------------------------|---|------------------------------|--|
| 15/02/09 1:20 am | 15/02/09 10:30 pm | Voltaje en promedio en 1.02 pu | Anexo A. 1 | Es Domingo y el horno no trabaja. |
| 22/02/09 12:50 am | 23/02/09 3:05 am | Voltaje en promedio en 1.05 pu por largo tiempo | Anexo A. 1 | Es Domingo y el Horno no trabaja |
| 26/02/09 11:50 pm | 28/02/09 11:25 pm | Voltaje en promedio en 1.02 pu por largo tiempo | Anexo A. 1 | Sucede de Jueves a Sábado* |
| 12/03/09 09:05 pm | 13/03/09 10:00 am | Bajón de Voltaje hasta el 70% | Anexo A. 2 | Sucede la noche del Jueves al Viernes* |
| 16/03/09 7:10 am | 17/03/09 11:10 pm | Voltaje en promedio en 1.02 pu | Anexo A. 2 | Sucede en Lunes y Martes* |
| 26/03/09 10:35 pm | 31/03/09 10:35 pm | Voltaje en promedio en 1.02 pu por largo tiempo | Anexo A. 2 | Sucede de Jueves a Martes* |

El ION y la mayoría de los analizadores de calidad de energía, al momento de capturar Voltajes RMS, lo que hacen es muestrear el voltaje con una frecuencia determinada y calcular un promedio de los voltajes obtenidos. Esta operación la realizan cada 5 minutos, el resultado de la operación es el dato que guardan en su memoria. De no hacerlo de esta manera no habría memoria suficiente para guardar tanta información, de esta manera estos dispositivos tienen la capacidad de permanecer hasta 1 mes capturando información. El valor de Voltaje RMS que se obtiene de ésta manera es válido, ya que si lo que se busca es conocer las tendencias del voltaje, no se necesita conocer su valor en cada instante de tiempo, basta con conocerlo cada cinco minutos.

Sin embargo si lo que se busca es hacer un análisis de *Sag*, los cuales tienen una duración normal menor a 1 segundo, no basta con la lectura de V_{rms} , puesto que esta lectura ignorará este *Sag* al momento de hacer el cálculo del promedio cada 5 min. Para esto se necesita habilitar el analizador para que también detecte *Sags* y *Swells*.

Durante este modo de operación, el analizador toma muestras del valor del voltaje cada determinada frecuencia (aproximadamente cada ciclo), al momento de presentarse algún *Sag* o *Swell*, el dispositivo guarda la fecha, duración y magnitud de este disturbio. De esta manera el dispositivo tiene capacidad para guardar cientos o miles de disturbios, claro que esto no es común que ocurra; en las peores condiciones de calidad de energía se tienen en promedio 30 *Sags* al mes.

El ION instalado en la Acometida estuvo trabajando también en modo de *Sags* y *Swells* (SS) desde el 12 de febrero al 6 de abril, y durante este tiempo capturó cientos de eventos los cuales son mostrados en la Tabla del Anexo B.

Como ya se mencionó, se realizaron mediciones con distintos equipos y en distintas fechas. Durante el 13 al 15 de Octubre se realizaron mediciones con un analizador de la marca Dranetz que exclusivamente estuvo capturando información para *Sags* y *Swells*. Los eventos más representativos encontrados durante este corto tiempo se presentan de la Figura 7. 5 a la Figura 7. 10.

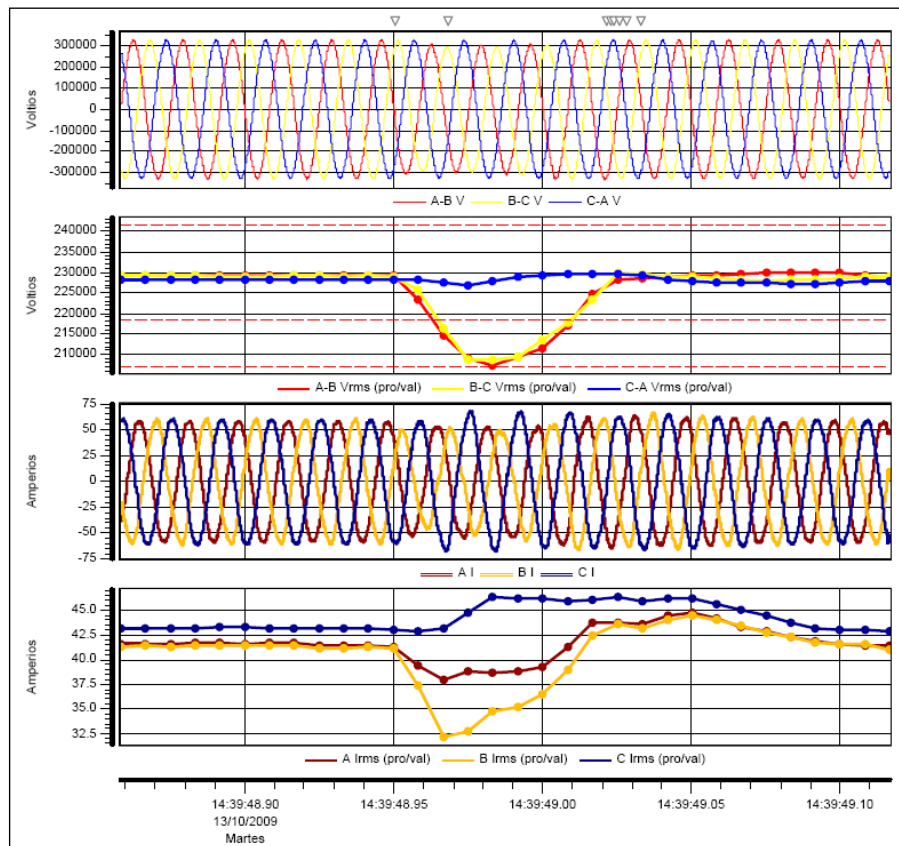


Figura 7. 5: Evento capturado por Dranetz el 13/10/09 a las 14:39

La Figura 7. 5 muestra las formas de ondas del voltaje, de la corriente y los RMS de voltaje y corriente propiamente. Puede observarse como ocurre un *Sag* en las fases A y B con duración de aproximadamente 60 milisegundos (3.75 ciclos) y que cae a un valor del 95.45%. Observando el comportamiento de la corriente, la cual disminuye en las fases donde se presenta el *Sag*, se puede concluir que el *Sag* tuvo origen aguas arriba del medidor, y debido a que este medidor está en la acometida, se puede concluir que este *Sag* ocurrió en algún nodo externo a la planta. Por el comportamiento de la corriente contra el voltaje, es probable que la causa de este *Sag* haya sido una falla de corto circuito de una línea a tierra (SLFG), donde la fase donde ocurrió la falla fue la C.

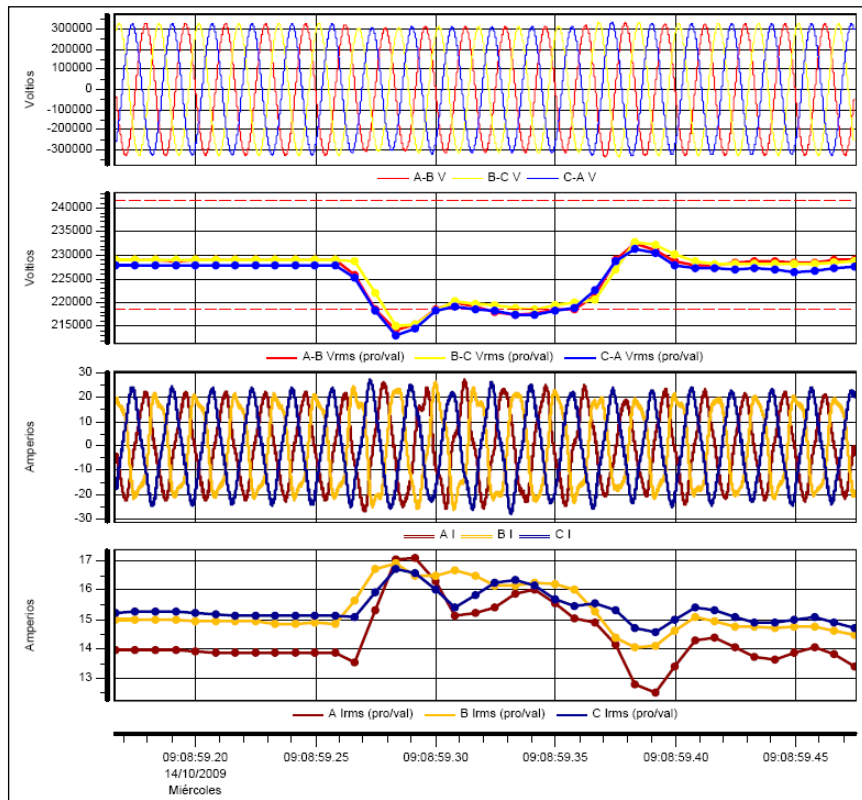


Figura 7. 6: Evento capturado por Dranetz el 14/10/09 a las 09:08

En la Figura 7. 6 puede observarse otro *Sag* capturado por Dranetz, esta vez trifásico de 100 milisegundos (6 ciclos) y cayendo a un voltaje del 97%. De la captura de corriente podemos observar que esta incrementa en sus tres fases, esto significa que la causa del *Sag* fue aguas abajo del medidor, a diferencia del evento anterior. Tan solo con este punto de medición es imposible acertar exactamente qué fue lo que provoco este evento, pero al menos se sabe que no es proveniente del exterior y que tampoco fue de una magnitud severa, por lo que no se espera que un *Sag* de esta índole repercuta en el tren de laminación.

En la Figura 7. 7 se observa otro evento muy similar al anterior, de la misma manera puede observarse que ante la presencia del *Sag*, la corriente en la fase perjudicada aumenta, por lo que el disturbio o falla causante del *Sag* ocurrió aguas abajo del medidor. Este *Sag* se presenta solo en la fase B con una duración de 6 ciclos disminuyendo en 5% del valor nominal.

La Figura 7. 8 muestra un evento particular. El cual es una disminución del voltaje en las tres fases de la línea, pero a su vez es una elevación en la magnitud de la corriente pero deformando en gran medida la forma de onda de ésta. Agregado a esto, la duración de este disturbio es de más de 18 ciclos, por lo que se puede atribuir al arranque de una carga muy pesada en la planta, como tal vez un motor de gran capacidad.

La Figura 7. 9 y Figura 7. 10 muestran dos eventos cuyo origen ocurre fuera de la planta, de acuerdo al análisis de voltaje contra corriente. El primero de ellos de 93% de magnitud y 3.7 ciclos de duración, mientras que el segundo de 81% de magnitud y 2.5 de duración. A pesar de la magnitud de estos *Sags*, ningún efecto negativo como atorones o paros de producción fue detectado en laminación durante la ocurrencia de estos eventos.

La Figura Anexo A. 20 muestra gran número de eventos registrado entre el 11 y el 23 de Abril, valdría la pena verificar en algún historial de fallas en la planta si alguno de estos repercutió en la operación y esto es un trabajo pendiente.

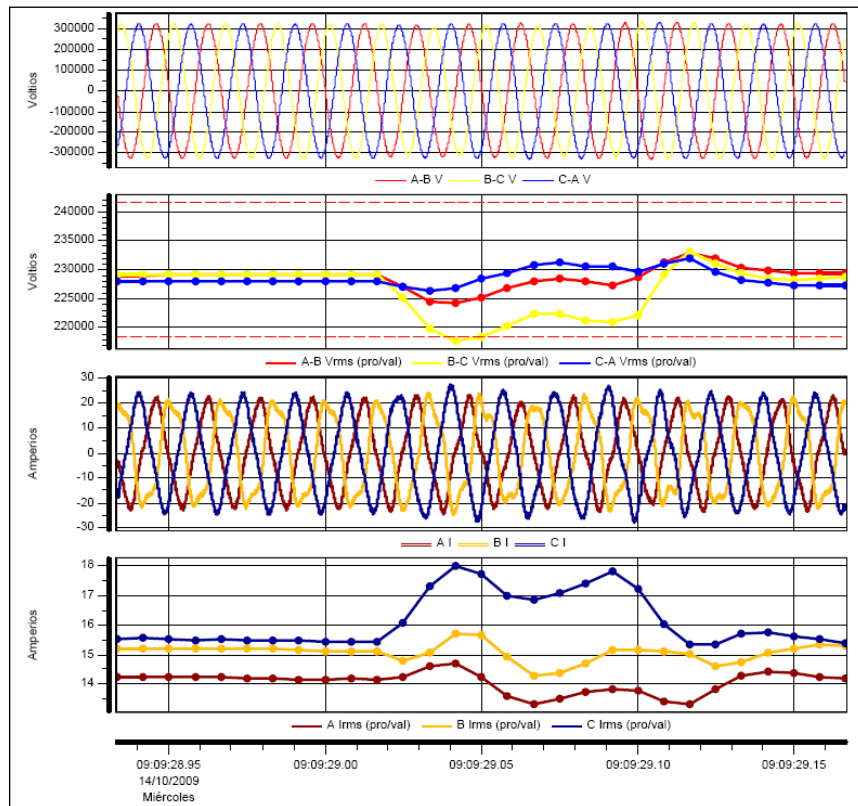


Figura 7. 7: Evento capturado por Dranetz el 14/10/09 a las 09:29

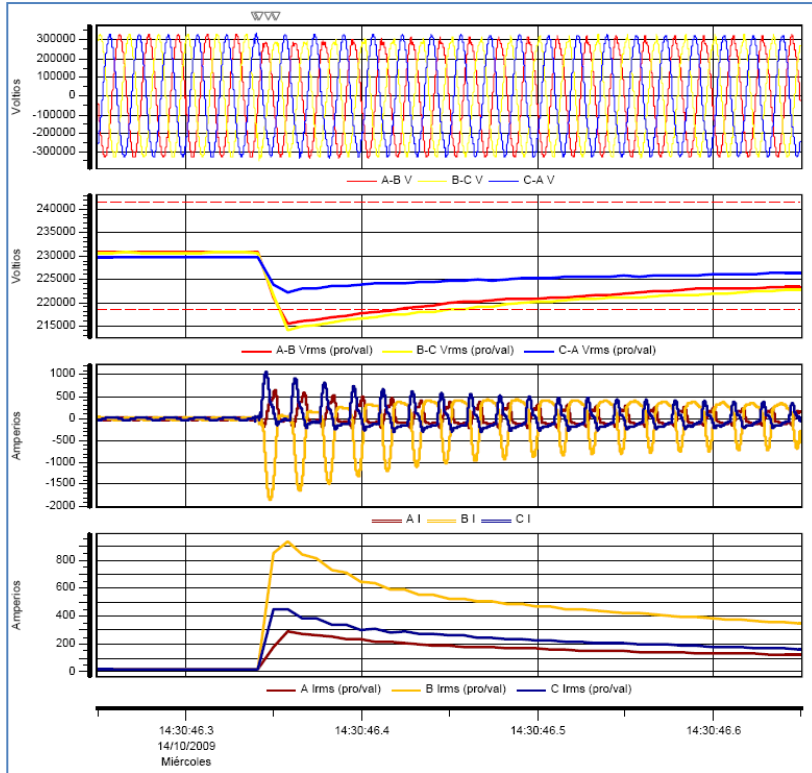


Figura 7. 8: Evento capturado por Dranetz el 14/10/09 a las 14:30

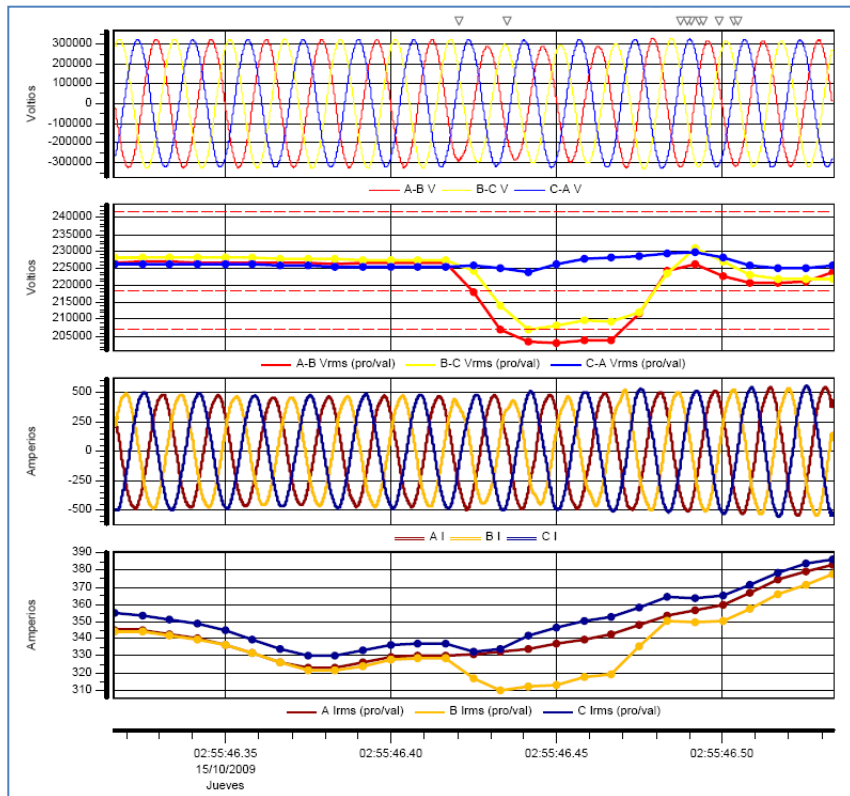


Figura 7. 9: Evento capturado por Dranetz el 15/10/09 a las 02:55

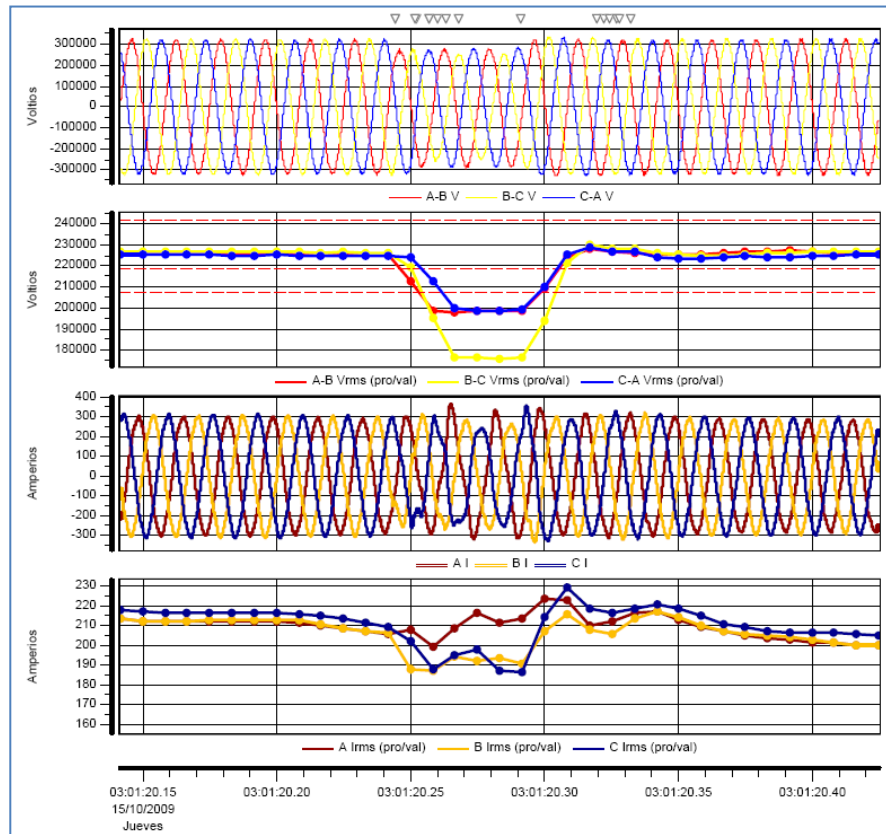


Figura 7. 10: Evento capturado por Dranetz el 15/10/09 a las 03:01

7.1.1 Caracterización del SEP en 230 kV

Para el nivel de 230 kV se eligió como punto crítico el nodo de alimentación a la planta, el cual es suministrado por CFE. Para poder monitorear la calidad de energía en este punto de alto voltaje es necesario disminuir los niveles de tensión. Es muy común encontrar puntos estratégicos dentro del sistema de potencia donde se conecten transformadores de corriente (TC's) y transformadores de potencial (TP's) para medir los niveles de voltaje y corriente en el nodo.

Debido a que éste nodo, nombrado “acometida”, es el nodo más importante de toda la planta, puesto que es el que recibe y distribuye la energía, es también un punto estratégico donde no faltan TC's y TP's para el monitoreo. Por lo tanto instalar equipo analizador de calidad de energía en este punto no es problema, pues la misma instalación eléctrica facilita la conexión.

El analizador de calidad de energía utilizado para este punto fue el ION, el cual ya se encontraba conectado previamente a nuestro estudio, y mucha de la información aquí presentada se obtuvo de una base de datos de la empresa.

El tiempo que se estuvo capturando datos a este nivel de voltaje fue desde el 14 de Agosto del 2008 hasta el 12 de Septiembre del mismo año, como primera parte. Posteriormente se capturo del 15 de Marzo del

2009 hasta el 11 de Abril del 2009; dando como resultado un total de 2 meses efectivos aproximadamente.

Los datos capturados durante estos dos meses fueron voltajes RMS y *Sags*. Según la metodología antes descrita, cada evento de *Sag* capturado debe mostrarse en una tabla como la siguiente:

Tabla 7. 2: Presentación de Eventos según la metodología de la IEEE

| Número | Evento | Amplitud (Volts) | Duración (segundos) | Fecha y Tiempo | VRMS (pu) | Causa |
|--------|--------|------------------|---------------------|----------------|-----------|-------|
| | | | | | | |
| | | | | | | |

Descripción de la Tabla:

Número.- Muestra el número asociado a cada evento registrado. Este número puede ser una simple numeración para indicar la cantidad de eventos registrados, o puede ser un código para identificar el evento en una base de datos.

Para este estudio se ha utilizado una numeración simple, solamente con el fin de enumerar la cantidad de eventos registrados. Es recomendable que la industria automáticamente capture y guarde esta información en una base de datos que asigne un código a cada evento almacenado en memoria, con el fin de llevar un registro organizado de todos los eventos y así generar información de respaldo para consultar en caso de fallas en el proceso.

Evento.- Describe la característica principal del evento registrado. Este apartado especifica si el evento es un *Sag* o un *Swell* y en que fase o fases ocurrió.

Amplitud.- Muestra la magnitud del voltaje efectivo residual en volts durante la presencia del fenómeno. En otras palabras es la magnitud del voltaje medido directamente en el bus.

Duración.- Se presenta en segundos, y es el tiempo desde que la magnitud disminuye por debajo del 95% de su valor nominal hasta que se eleve por encima del 95%. Dependiendo de la configuración del analizador de calidad de energía, el evento se registra en cuanto la magnitud del voltaje capturado es menor que el umbral especificado en la configuración. Una vez pasando este umbral, el dispositivo analizador contabiliza el tiempo que tarda el voltaje en sobrepasar el umbral especificado.

Fecha y Tiempo.- Se muestra el día, el mes, el año, la hora, minuto y segundo en el cual se detectó el evento. Este apartado ayuda mucho a correlacionar estos eventos con fallas en los equipos industriales. Siempre y cuando se lleve un correcto registro de las fallas o paros en la producción, y un correcto registro de los eventos capturados, fácilmente puede encontrarse la causa de miles de estos paros tan solo con mirar a ambos registros.

VRMS.- Es la magnitud del voltaje residual medido durante el evento pero normalizado de acuerdo al voltaje nominal. Este apartado puede ser presentado en pu o en %. Un *Sag* del 60% o 0.6 pu significa que

al medir la magnitud del voltaje presente en el bus se encontrará el 60% del voltaje nominal, y no que el voltaje haya disminuido un 60%.

Causa.- Como agregado al registro, si desde un principio se conoce la causa que produjo el evento, ésta se registra en este apartado.

Para este proyecto solo se agregó la causa para los eventos cuya aparición coincidió con el registro de fallas de la planta.

Durante el intervalo de tiempo de dos meses que estuvo midiendo el ION, se capturaron 2687 *Sags*. Se realizaron los procedimientos necesarios para obtener la caracterización de la SEP, sin embargo la tabla de eventos no se anexa en este documento debido a su longitud.

7.1.2 Diagramas de Densidad de *Sags* en 230 kV

Presentar la información capturada de acuerdo a la tabla anterior no es suficiente para realizar un análisis completo del disturbio. Según la metodología de la IEEE lo siguiente es realizar un diagrama de Densidad de *Sags* con los datos capturados.

Se capturaron eventos que entran dentro de la clasificación de transitorios instantáneos, momentáneos y temporales. Debido a esta situación se presentan tres gráficas de densidad de *Sags*, una para cada clasificación.

El diagrama de densidad presenta un plano mallado en dos dimensiones. Donde uno de sus ejes muestra una escala de tiempos de duración del evento en ciclos o segundos, y el otro eje muestra una escala de magnitud del voltaje del evento en porcentaje. Cada celda dentro de la malla muestra una columna de “n” eventos que se compara contra un eje vertical de frecuencias absolutas. Este diagrama te muestra de una manera sencilla, cuantos eventos se capturaron, y que magnitud y duración tuvieron cada uno de ellos. Los diagramas de densidad para los *Sags* instantáneos, momentáneos y temporales se muestran en las siguientes figuras.

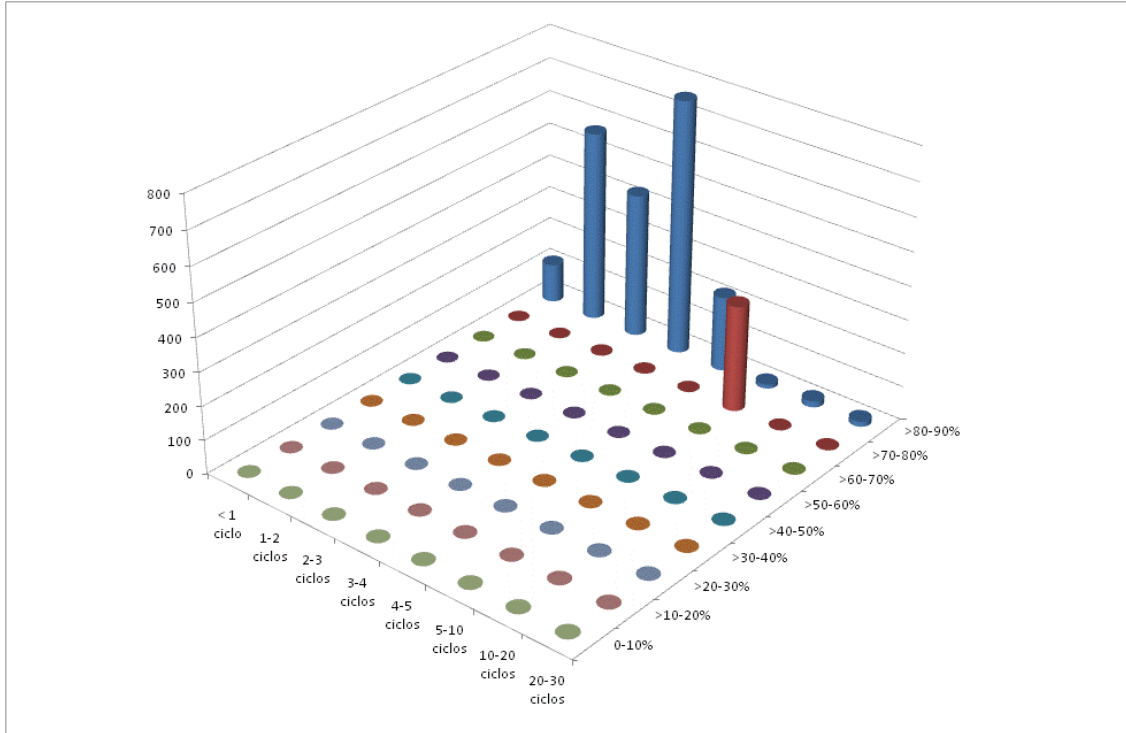


Figura 7. 11: Densidad de Sags instantáneos en 230 kV

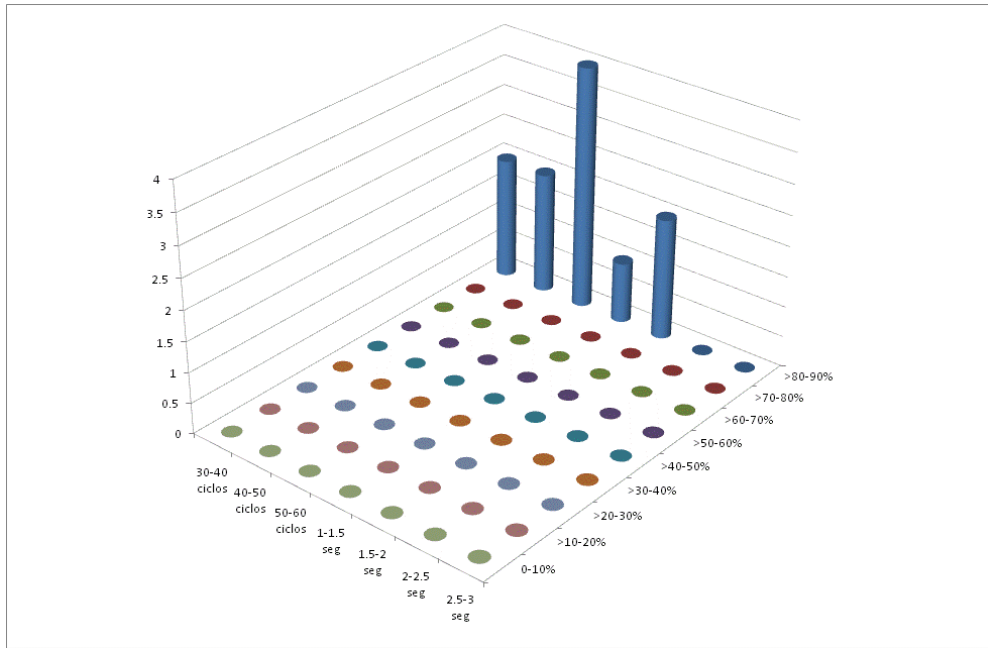


Figura 7. 12: Densidad de Sags Momentáneos en 230 kV

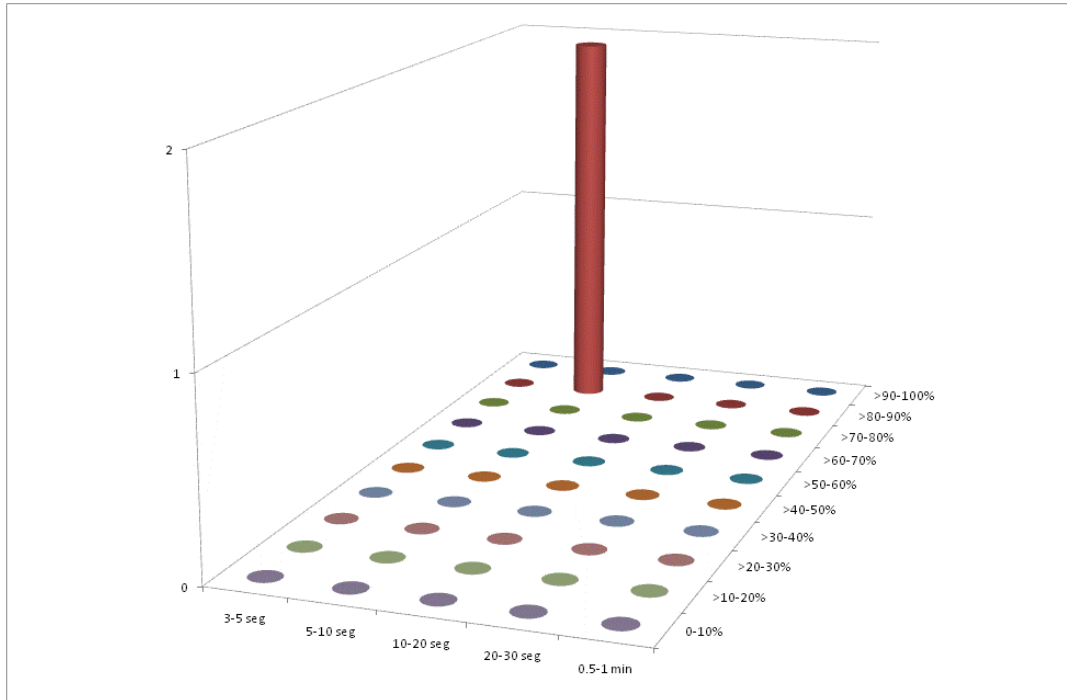


Figura 7. 13: Densidad de Sags Temporales en 230 kV

Analizando los diagramas anteriores puede observarse como predominan claramente eventos instantáneos y prácticamente no hubo eventos temporales. Sin embargo hubo demasiados eventos instantáneos. Considerando que este nodo evaluado está a 230 kV, debería ser uno donde casi no hubiera Sags, puesto que los sistemas de potencia tienden a ser más robustos conforme se elevan los voltajes. Sin embargo si se compara la densidad de Sags de este nivel de voltaje contra los otros dos posteriores, se encontrará que éste es el menos robusto, cosa poco inusual.

Situaciones como esta promueven un seguimiento en el monitoreo y estudio de la energía eléctrica con el fin de diagnosticar estos casos especiales.

7.1.3 Contornos Iso-Sags acumulados para 230 kV

Una vez conocida la densidad de Sags para un sistema de potencia se procede a realizar el diagrama de contornos Iso-Sags, el cual caracteriza propiamente al sistema de potencia. Se debe realizar un diagrama Iso-Sag para cada nivel de potencia estudiado. En este estudio se han realizado cuatro para así cubrir las zonas más representativas de la planta.

Un diagrama de contornos Iso-Sags presenta dos ejes en el plano de la hoja. Donde uno de ellos es la duración en ciclos de los eventos y el otro es la magnitud Vrms en porcentaje. Sin embargo, estos ejes son ejes acumulativos y no absolutos. Esto significa que en el eje horizontal los valores presentados abarcan desde el infinito hasta el valor elegido. Y en el eje vertical los valores indicados abarcan desde cero hasta el valor presentado.

La siguiente figura es un ejemplo que pretende dejar mas claro lo antes descrito. En la figura se presenta un punto el cual cruza los ejes en 5 ciclos y 70% de magnitud. A este punto se le denomina “rodilla”. Tan solo este punto o rodilla abarca todos los *Sags* con magnitud máxima de 70% y con duración mínima de 5 ciclos, es debido a esto que se refiere a los ejes como ejes acumulativos.

La línea roja presente en la figura es un contorno *Iso-Sags*. Esta línea corresponde con todos los puntos o rodillas que tienen una frecuencia de ocurrencia común en un intervalo de tiempo específico. Por ejemplo, para este diagrama podemos decir que ese contorno *Iso-Sag* es igual a 20. Esto significa que se detectaron 20 *Sags* con duración mínima de 5 ciclos y una magnitud de voltaje V_{rms} máxima de 0.70 pu's. Continuando con la línea *Iso-Sag*, también se encontraron 20 eventos con duración mínima de 1 ciclo y magnitud de voltaje RMS máxima de 0.59 pu's.

Así como se dibujó ese contorno *Iso-Sag*, se pueden dibujar muchos otros mas, cada uno de ellos con su respectivo valor de frecuencia. A mayores frecuencias los contornos se dibujan hacia la izquierda, a menores frecuencias se dibujan a la derecha. Una vez teniendo varios contornos es posible interpolar para conocer las frecuencias de los contornos no dibujados. Finalmente en un diagrama de contornos *Iso-Sags* se presentan *Sags* equi-frecuentes

Una vez obtenidos los diagramas de densidades de *Sags*, los cuales provienen de tablas de frecuencias absolutas, es necesario modificar esa misma tabla pero ahora con frecuencias relativas, para así ir construyendo el diagrama de contornos.

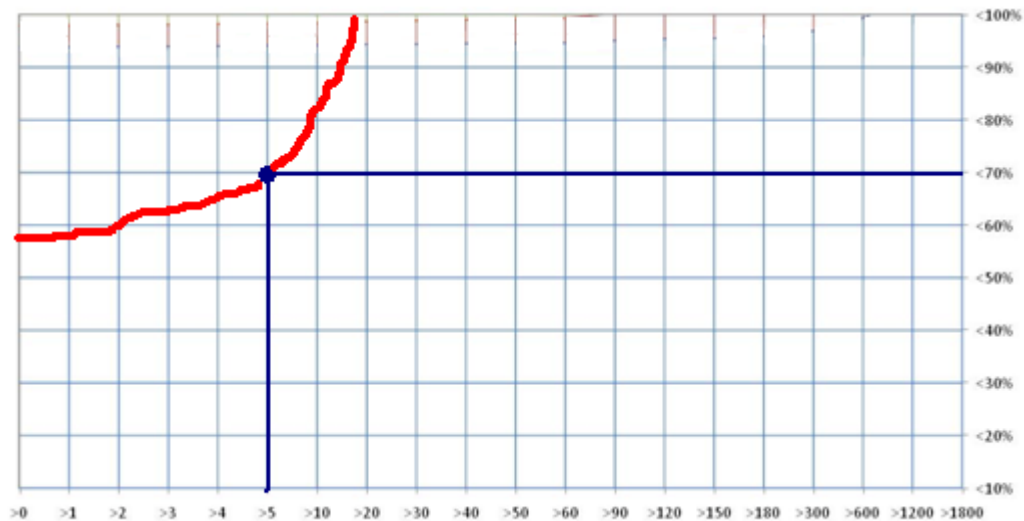


Figura 7. 14: Ejemplo de Contornos Iso-Sags

Solo se obtiene un diagrama de contornos para cada sistema de potencia. Con este diagrama se logra caracterizar el sistema. Estos diagramas muestran de una manera simple pero significativa el comportamiento de este sistema de potencia.

Se realizo el ejercicio para este nivel de voltaje y se encontró el siguiente Diagrama de Contornos:

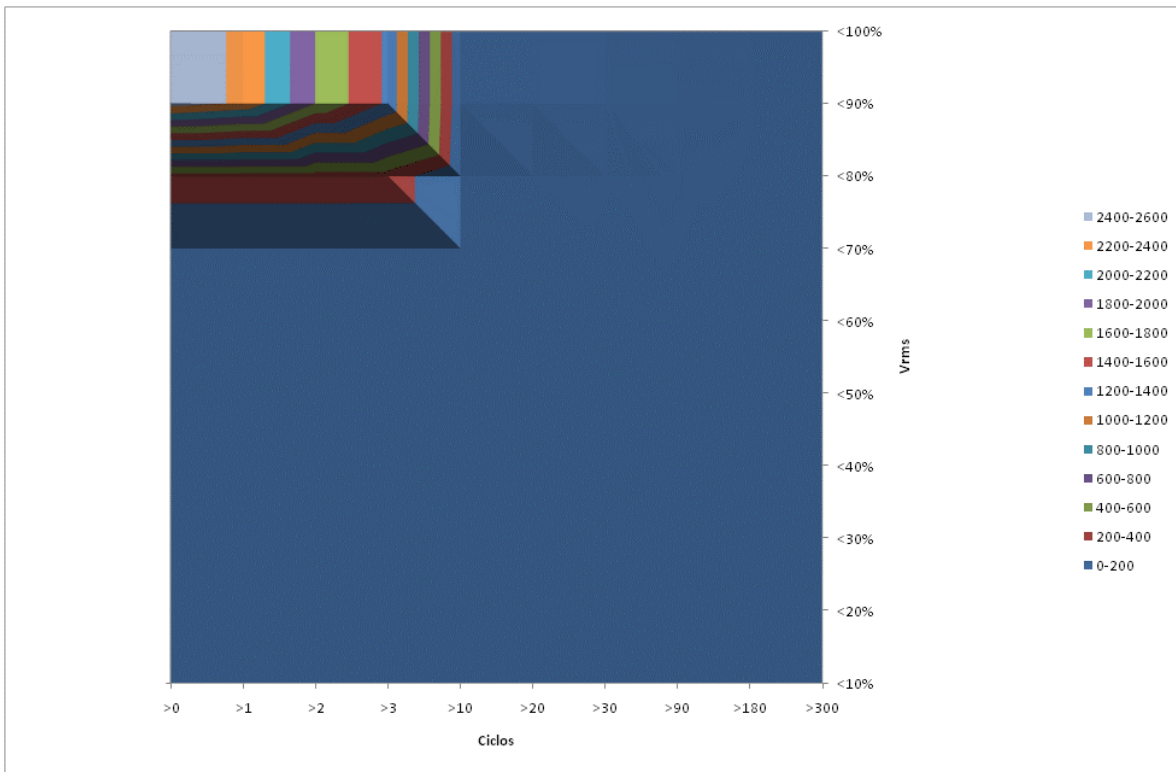


Figura 7. 15: Diagrama de Contornos Iso-Sags para 230 kV

Mucha información puede ser obtenida analizando este solo diagrama. La ventaja que tiene es que concentra toda la información en un solo cuadro.

- La esquina superior izquierda muestra la cantidad total de eventos capturados, que para este caso es de 2600 aproximadamente.
- No hubo ningún evento por debajo de 70 %
- Comparado con el resto de los eventos, se puede decir que prácticamente no ocurrieron eventos con duración mayor a 10 ciclos.
- La concentración máxima de eventos se encuentra en los 10 ciclos de duración como máximo y en los 0.8 pu's de magnitud como mínimo.

Es importante conocer las características de los sistemas de potencia más representativos de la planta para poder tomar decisiones en cuanto al crecimiento de esta.

7.1.4 Caracterización de las Cargas

Una vez obtenido el diagrama de contornos Iso-Sag que permite caracterizar el SEP de la planta, es necesario comparar tal diagrama con las curvas de inmunidad de cada carga crítica para saber a qué cargas críticas les pega y a cuáles no. Para esto se necesita conocer las curvas para las cargas críticas de interés.

Para este estudio se han utilizado las cargas críticas obtenidas del estándar 1346 de la IEEE [83] puesto que aplican para esta industria. Éstas son presentadas en las siguientes figuras. El eje horizontal está presentado en milisegundos y en ciclos.

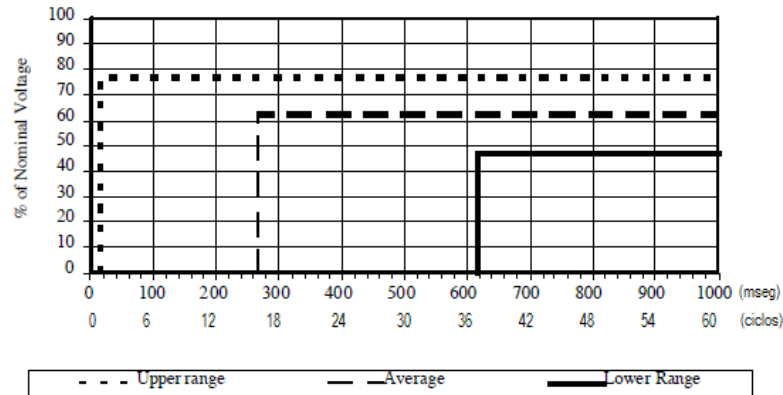


Figura 7.16: Curvas de Tolerancia de Sags de Voltaje para PLC's

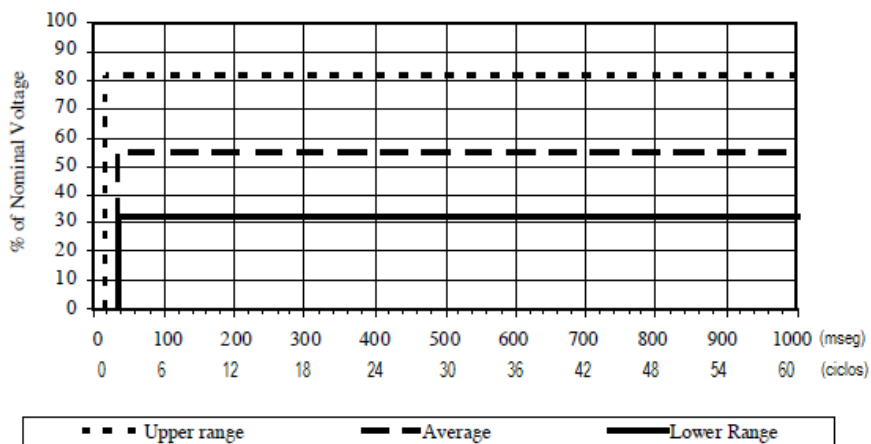


Figura 7.17: Curvas de Inmunidad de Sags de Voltaje para tarjetas de entradas digitales de PLC (DI PLC Card)

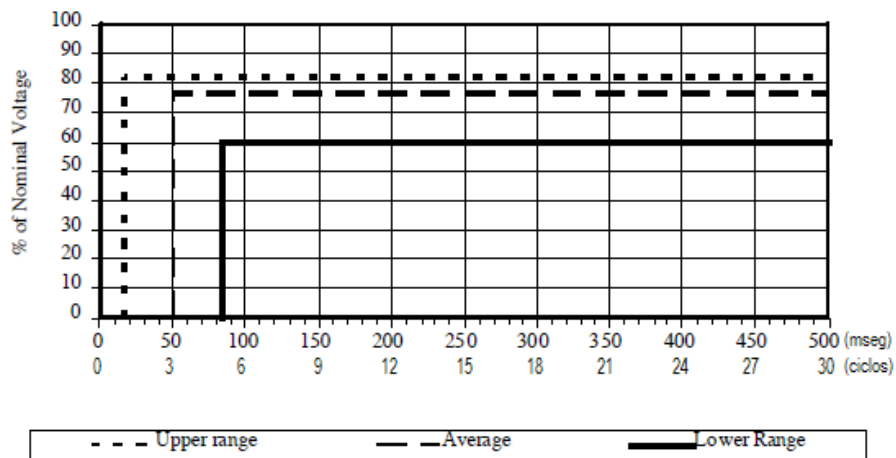


Figura 7.18: Curvas de Inmunidad de Sags de Voltaje para Drives variadores de velocidad (ASD)

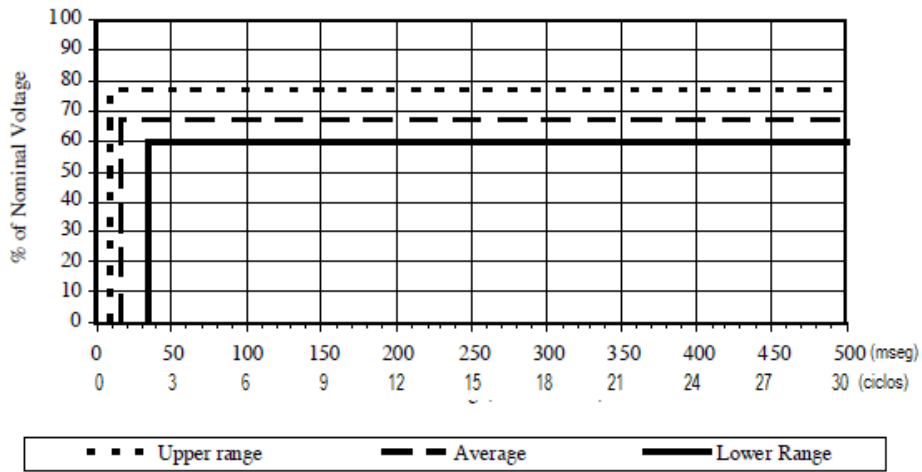


Figura 7. 19: Curvas de Inmunidad de Sags de Voltaje para Relevadores de CA.

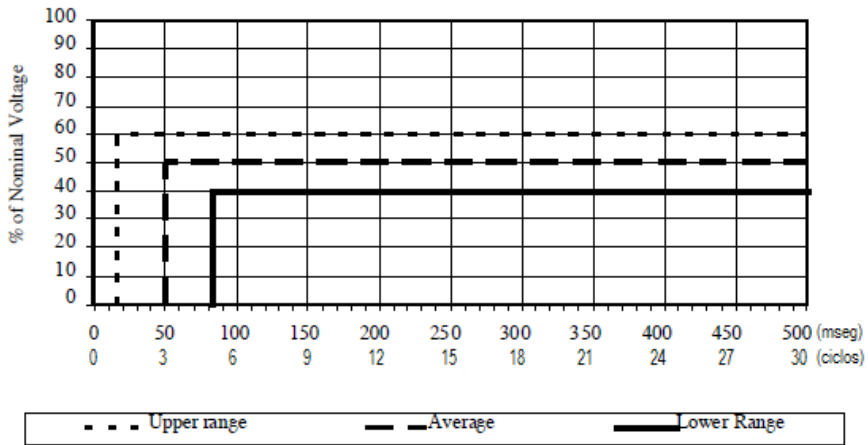


Figura 7. 20: Curvas de Inmunidad de Sags de Voltaje para bobinas de arrancadores de motores.

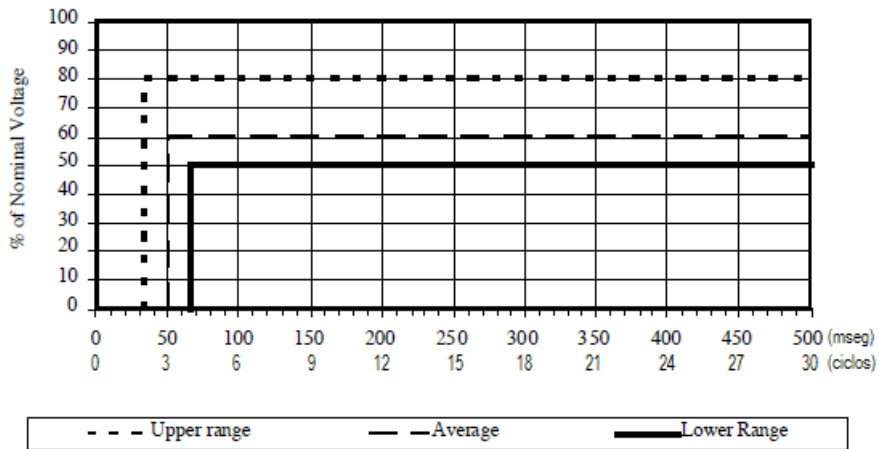


Figura 7. 21: Curvas de Inmunidad de Sags de Voltaje para Computadoras Personales.

Estos diagramas de inmunidad están representados de igual manera que los diagramas de contornos. Los ejes vertical y horizontal son acumulativos, y el punto donde se cruzan ambas líneas mostradas es la rodilla. La rodilla contiene a todos los eventos con una duración mínima específica, y a todos los eventos con una magnitud del voltaje máximo específico.

Todos los eventos con características contenidas dentro del área de la rodilla son dañinos para el dispositivo al que se refieren las curvas. En cada diagrama de inmunidad se pueden observar tres áreas. El área que indica el rango superior, el rango inferior y el promedio. Las curvas anteriormente mostradas fueron obtenidas por estudios experimentales y a esto se debe que tengan un límite superior, inferior y promedio. La persona encargada de hacer el estudio tiene la posibilidad de elegir entre cual de las tres líneas utilizar. Al utilizar la línea del límite superior se está siendo muy cuidadoso y se busca estar sobreprotegido contra todos los *Sags*. Utilizar el límite inferior es como poner poca defensa contra *Sags* y algunos de ellos podrían ocasionar fallas, por lo tanto lo más recomendable es utilizar el promedio para no estar ni sobredimensionado ni desprotegido.

7.1.5 Superposición de contornos Iso-*Sags* con Curvas de Inmunidad de cargas críticas

Este es el último paso en la metodología de estudio de *Sags*. Comparando el diagrama de contornos contra las distintas curvas de inmunidad, se puede encontrar qué cargas son las más afectadas ante la presencia del fenómeno, así como se puede conocer con qué frecuencia en un periodo de tiempo determinado se espera que la carga tenga un mal funcionamiento causado por la presencia de *Sags*. En consecuencia, llevar la metodología a su fin es un análisis necesario antes de tomar decisiones sobre protección de equipos.

Las curvas mostradas en el estándar SEMI F47 [84] son las más actuales en cuanto al estudio de *Sags*. Varias modificaciones se han ido realizando en los estándares a lo largo de los años, y la SEMI F47 contiene las últimas actualizaciones, es por lo tanto la más confiable para realizar estos estudios.

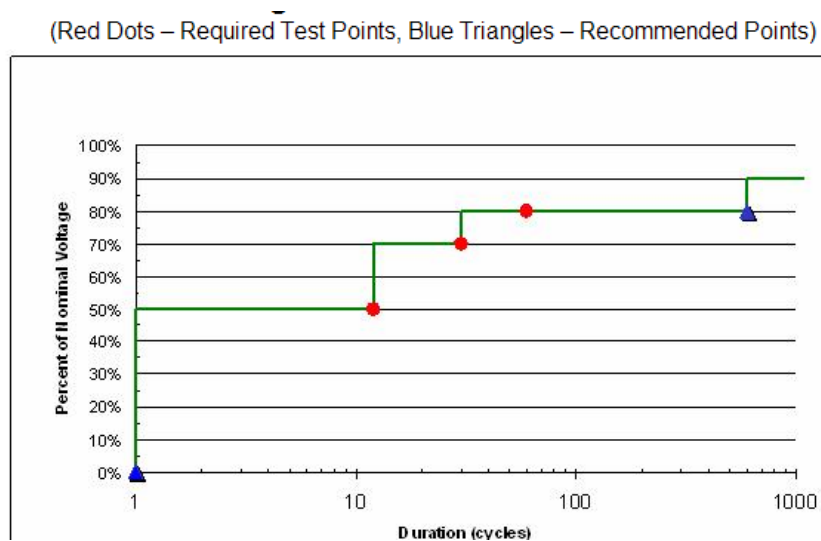


Figura 7. 22: Curva SEMI F47 de *Sags* [84]

Lo que prosigue en la metodología es superponer la curva de la Figura 7. 22 con el diagrama de contornos Iso-*Sags* de la Figura 7. 15. De esta manera puede identificarse rápidamente si el sistema eléctrico para este nivel de voltaje se encuentra dentro del área de afectación de dispositivos. La figura siguiente muestra la superposición de estos dos diagramas.

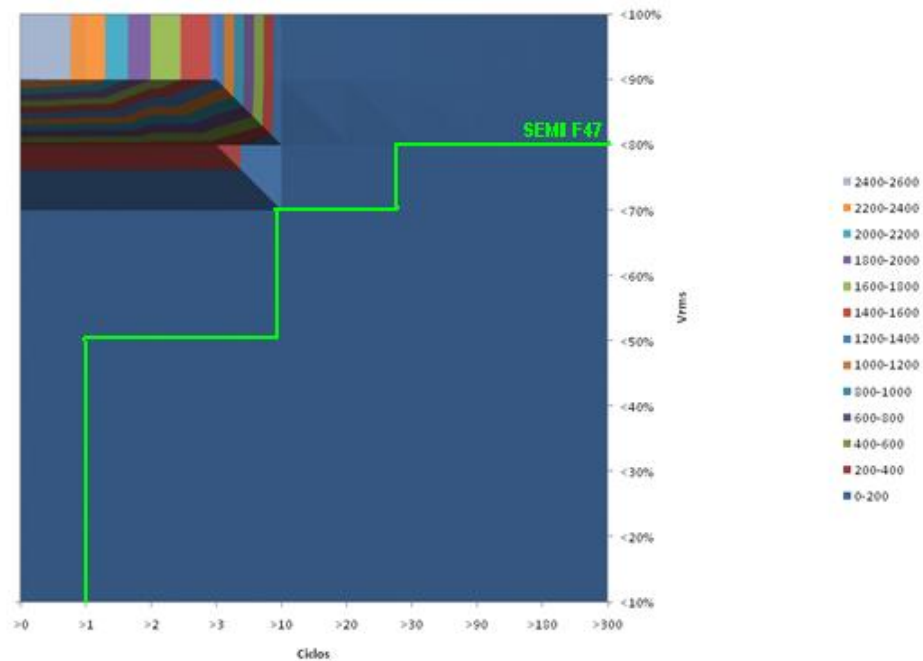


Figura 7. 23: Superposición de contornos Iso-*Sags* en 230 kV con curva SEMI F47

De la figura anterior puede observarse que no existe ningún evento que pueda afectar el sistema en general. Sin embargo no es conveniente terminar el estudio de *Sags* aquí. Puesto que hay cargas particulares que no están incluidas dentro de la curva genérica de la SEMI F47. Debido a esto se continúa con la superposición de los contornos Iso-*Sags* contra las curvas de inmunidad para cada carga crítica presentada desde la Figura 7. 16 a la Figura 7. 21.

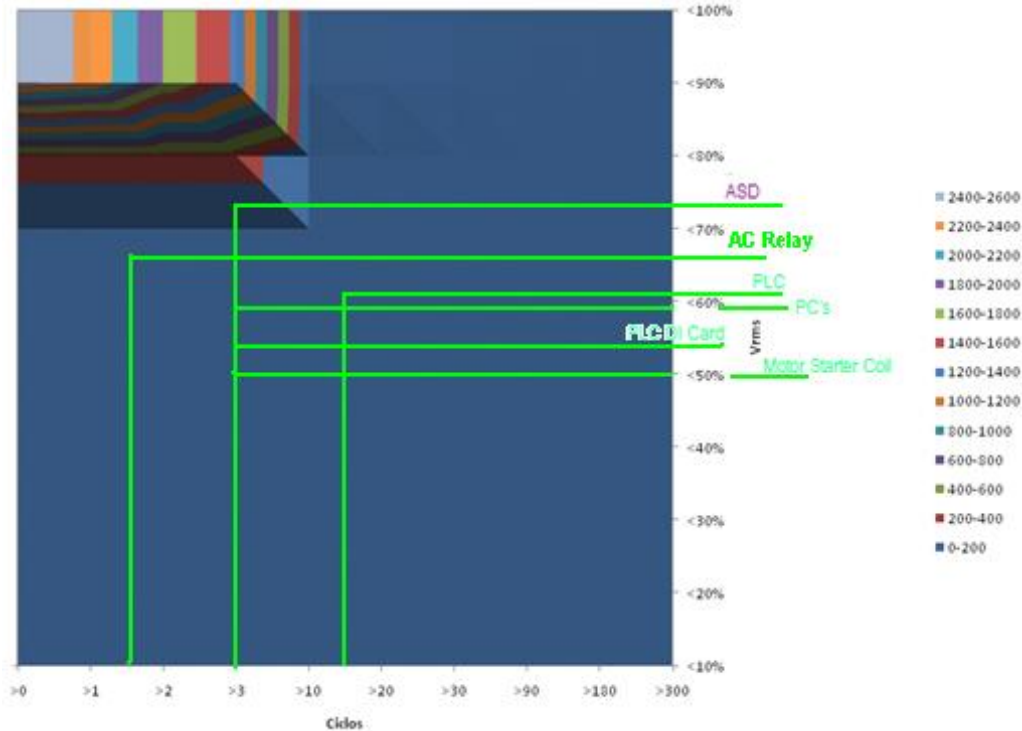


Figura 7. 24: Superposición entre diagramas de contornos Iso-Sags en 230 kV contra curvas de inmunidad de cargas críticas

De la superposición anterior puede observarse que solamente los *drives* de velocidad ajustable (ASD) son los afectados ante la presencia de *Sags* a este nivel. Inclusive se pueden calcular los datos involucrados en la rodilla que se encuentra dentro de los contornos.

Analizando de esta manera se encuentre que en operaciones normales se presentarán 100 *Sags* en un periodo de 2 meses, los cuales tendrán una magnitud de cómo mínimo 70% y duración de cómo máximo 10 ciclos, los cuales afectaran a los *drives* controladores de motores.

Este resultado es preocupante para la planta puesto que la producción en laminación depende enteramente de la sincronización de los *drives*. Este análisis abre camino para futuros análisis que vayan aun más a fondo en el estudio de este fenómeno.

7.1.6 Recomendaciones para 230 kV

- Se encontraron variaciones de voltaje anormales para un nivel tan robusto como lo es 230 kV.
- Debido a estos resultados se recomienda realizar estudios más profundos para encontrar las causas de estas variaciones, que pudieran ser errores en conexiones o alguna alteración en la medición por ruido por ejemplo.
- Se encontró que los *Drives* son los únicos dispositivos dentro de las cargas críticas que sufren interferencias debido a las características que presenta este sistema.
- Como trabajos futuros, hace falta instalar un monitoreo permanente en este nivel de voltaje, puesto que es el más importante dado que alimenta a toda la planta.

- El monitoreo puede ser realizado con dispositivos ION actuales que estén conectados a una base de datos para almacenar principalmente los eventos *Sags* encontrados durante el año.
- Se recomienda que el almacenamiento de datos hacia la base de datos esté automatizado para que la información se presente como lo indica la metodología aquí descrita.
- Una vez con las instalaciones de monitoreo descritas y la información capturada durante mínimo 1 año, se abre camino para trabajos de investigación futuros, que de la mano de este proyecto realicen análisis de disturbios que tengan resultados más confiables que los presentados aquí.
- Con los resultados de estos análisis futuros, se recomienda tomar medidas protegiendo efectivamente a las cargas críticas más influyentes para el proceso, de acuerdo a la información que se presenta en este trabajo.

7.2 Bus de Laminación GR1-6 (13.2 kV)

Este es el segundo punto elegido para el monitoreo de calidad de energía. Con este punto en conjunto con el de acometida, ya se tiene una visión mucho más clara de los orígenes de los disturbios. Este punto se encuentra a 13.2 kV y es justamente el nodo que alimenta toda la sección de laminación proveniente del Transformador T1. En el periodo en el que se realizó este análisis, el transformador T2 no estuvo conectado, puesto que solo está presente para respaldo.

En este punto se tuvieron capturando información dos analizadores de calidad de energía. El Fuke 435 del 06 al 23 de Abril, y un dispositivo de la marca ION del 05 de Mayo al 21 de Julio y del 11 al 29 de Septiembre. El Fluke fue proporcionado por el Centro de Estudios de Energía del Tecnológico de Monterrey, mientras que el ION fue proporcionado por CFE a la planta Ternium.

De la Figura Anexo A. 5 a la Figura Anexo A. 7 se muestra el Historial del voltaje de línea a línea y la corriente de fase en las líneas del bus nombrado GR1-6 durante un minuto del día 06 de Abril, de las 10:59 a las 11:00 am. Durante este pequeño intervalo de tiempo se detectaron 2 *Sags* de una magnitud entre el 90 y 100%, los cuales son eventos comunes y que según estándares no causan problemas a equipo eléctrico. Estos *Sags* están representados en una gráfica estadística en la Figura Anexo A. 8.

De la Figura Anexo A. 9 a la Figura Anexo A. 11 se muestra el historial de voltaje de línea a línea y la corriente de fase durante las 11:22 y 13:47 horas del día 06 de Abril. Al centro de la gráfica puede observarse un bajón en la demanda de corriente que dura 10 minutos, de las 12:09 a las 12:19 en el medio día. Este bajón es común para las tres fases. De igual manera puede observarse a los extremos de las gráficas que hay disminuciones en el voltaje RMS. El del extremo izquierdo disminuye el voltaje a 0.34 pu y en el extremo izquierdo disminuye la corriente y el voltaje a prácticamente cero. Es buena práctica corroborar estas anomalías con algún historial de fallas dentro de la planta. De igual manera, en la Figura Anexo A. 12 se puede observar que se detectaron 5 *Sags*, tres de ellos con magnitud entre 70 y 80 %, mientras que los otros dos entre 70 y 60 % y 50 y 60% respectivamente. Es importante reflexionar que durante un periodo de tan solo 2 horas se detectaron 5 *Sags* y de una magnitud y representativa. Lo que comprueba que no se tiene una buena calidad de energía en este bus.

En la Figura Anexo A. 13, Figura Anexo A. 14 y Figura Anexo A. 15 se puede observar el historial de voltaje en las tres fases desde el 06 al 11 de Abril, el cual se comporta de la misma manera que las gráficas presentadas en la sección de acometida. Donde existen pequeños picos de voltaje donde el Horno no opera de duración de 15 minutos, pequeñas crestas donde el Horno opera de duración de 50 min y unos intervalos de voltaje elevado mas prolongados que son las horas punta. A diferencia del comportamiento normal de la planta se puede observar un pequeño bajón en el voltaje que solo es evidente entre las líneas bc y ca y que llega a un voltaje de 0.87 pu.

En la Figura Anexo A. 16 se muestran los eventos registrados durante este intervalo de tiempo, que a pesar de ser durante varios días solo se registraron 2 *Sags*, ambos de magnitud considerable y que pudieron haber causado algún problema en algún equipo. Las características de estos *Sags* se muestran en la figura.

En la Figura Anexo A. 17, Figura Anexo A. 18 y Figura Anexo A. 19 además del comportamiento normal del sistema, se muestran 3 bajones de voltaje que se repiten en las tres fases, es importante notar que estas disminuciones de voltaje también aparecen en las mediciones echas en las alimentaciones al drive.

Desde la Figura Anexo A. 21 hasta la Figura Anexo A. 32 se muestran distintos historiales de voltaje entre por distintos periodos de tiempo, donde no se observa ningún acontecimiento fuera de la operación normal, la cual es una variación constante en el V_{rms} con una tolerancia del 10%.

Finalmente en la Figura Anexo A. 33, Figura Anexo A. 34 y Figura Anexo A. 35 y las correspondientes a las otras dos fases, ocurre un acontecimiento no común con el voltaje, que de igual manera que los anteriores hay que correlacionar con el historial de fallas.

En resumen en la siguiente tabla se muestra la lista de anomalías encontradas durante las mediciones en este nodo.

Tabla 7. 3: Lista de eventos anormales en bus GR1-6 (*Eventos que hace falta correlacionar con acontecimientos anormales en la planta)

| Fecha de Inicio | Fecha de Término | Característica | Figura donde aparece |
|------------------------|-------------------------|--|--|
| 06/04/09 12:09:19 | 06/04/09 12:19:15 | Disminución de corriente | Anexo A. 9 Anexo A. 10 Anexo A. 11 |
| 06/04/09 11:19:42 | Instantáneo | Solo el Voltaje en la fase AB disminuye hasta 0.34 pu. | Anexo A. 9 Anexo A. 10 |
| 06/04/09 13:48:32 | Instantáneo | Ia y Vab disminuyen hasta 0. | Anexo A. 9 Anexo A. 10 Anexo A. 11 |
| 09/04/09 23:49:35 | Instantáneo | Vbc y Vca disminuyen a 0.87 pu | Anexo A. 14 Anexo A. 15 |

| | | | |
|----------------------|----------------------|--|---|
| 16/04/09 01:44:29 | Instantáneo | El voltaje trifásico disminuye hasta 0.88 pu | Anexo A. 17 Anexo A. 18 Anexo A. 19 |
| 17/04/09 20:08:58 | Instantáneo | El voltaje trifásico disminuye hasta 0.9 pu | Anexo A. 17 Anexo A. 18 Anexo A. 19 |
| 19/04/09 06:08:00 | Instantáneo | El voltaje trifásico disminuye hasta 0.82 pu | Anexo A. 17 Anexo A. 18 Anexo A. 19 |
| 02/06/09 00:15:00 | 02/06/09 19:45:00 | Disminuye el voltaje y la corriente a 0 pu | Anexo A. 33 Anexo A. 34 Anexo A. 35 |

7.2.1 Caracterización del SEP para el nivel de voltaje de 13.2 kV

Como se mencionó en el apartado anterior, se eligió como punto crítico de estudio el bus de laminación GR1-6, que se encuentra a un voltaje nominal de 13.2 kV. Se hizo uso del analizador de calidad de energía Fluke 435 y se conectó en modo *Sags&Swells* a los gabinetes correspondientes, para dejarlo capturando eventos durante 1 mes, por el mes de Abril de este año. Los eventos capturados se presentan en la Tabla 7.4 de acuerdo a la metodología descrita.

Tabla 7. 4: Lista de Sags capturados.

| Número | Evento | Amplitud (Volts) | Duración (segundos) | Fecha y Tiempo | VRMS (pu) | Causa |
|--------|------------|------------------|---------------------|----------------------------|------------|-----------------|
| 1 | <i>Sag</i> | 9259.8 | 0.016 | 04/06/2009 11:20:2.165 | 0.7015 | No hay registro |
| 2 | <i>Sag</i> | 10317.7 | 0.033 | 04/06/2009 11:20:2.007 | 0.78164394 | No hay registro |
| 3 | <i>Sag</i> | 9530.7 | 0.042 | 04/06/2009 11:20:5.833 | 0.72202273 | No hay registro |
| 4 | <i>Sag</i> | 8924.3 | 0.076 | 04/06/2009 11:20:2.306 | 0.67608333 | No hay registro |
| 5 | <i>Sag</i> | 6908.8 | 0.083 | 04/06/2009 11:20:2.19 | 0.52339394 | No hay registro |
| 6 | <i>Sag</i> | 8309.7 | 9.796 | 04/06/2009 11:19:52.195 | 0.62952273 | No hay registro |
| 7 | <i>Sag</i> | 9645.7 | 0.026 | 04/06/2009 14:23:51.564 | 0.73073485 | No hay registro |
| 8 | <i>Sag</i> | 7659.6 | 0.065 | 04/06/2009 14:23:51.622 | 0.58027273 | No hay registro |

7.2.2 Diagramas de Densidad de Sags para 13.2 kV

Es buena práctica presentar tablas de densidad de Sags, para así saber la frecuencia en la cual aparecen Sags de distinta clasificación. Debido a que durante el periodo de captura de Sags, se encontraron eventos que caen dentro de las tres clasificaciones antes mencionadas, a continuación se presentan tres diagramas de densidad de Sags para la categoría Instantánea, Momentánea y Temporal.

En este nivel de voltaje, para la presentación de los Diagramas decidí abarcar desde el 100% hasta el 0% del voltaje RMS. En documentos estandarizados no se suele ver un Diagrama como los que presento aquí, puesto que se acostumbra poner como nivel máximo de Voltaje hasta el 90%. Dado que la definición propia de Sag comienza en 90% y de ahí disminuye. Sin embargo me tome la libertad de incluir por arriba del 90% en los Diagramas solamente para evidenciar la variación que existe en eventos Momentáneos y Temporales, que de otra manera no sería evidente.

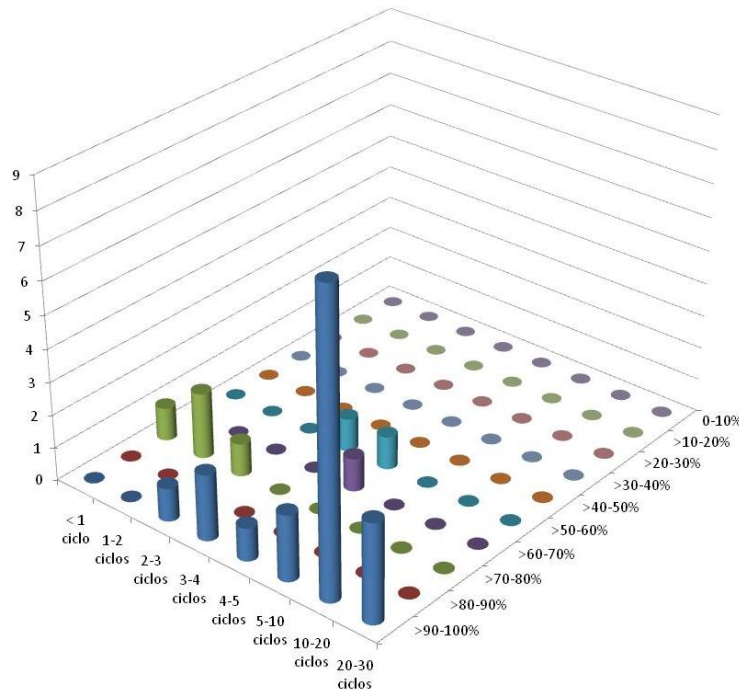


Figura 7. 25: Ocurrencia de Sags Instantáneos.

En el diagrama anterior puede observarse que existieron 8 Sags en 1 mes, de los cuales dos fueron de magnitud severa (entre el 50 y el 60%), mientras que el resto se encuentran por arriba del 60%. Posteriormente se utilizará esta información para realizar el diagrama ISO- Sag del SEP de la planta.

Es recomendable prolongar este estudio a lo largo de 5 años, con el fin de obtener una muestra confiable de la cantidad de Sags al año a la cual esta expuesta esta planta. Sin embargo, con la corta información de

la cual dispongo puedo afirmar con poca seguridad que se tienen 8 *Sags* al mes, lo que daría como resultado 96 *Sags* al año.

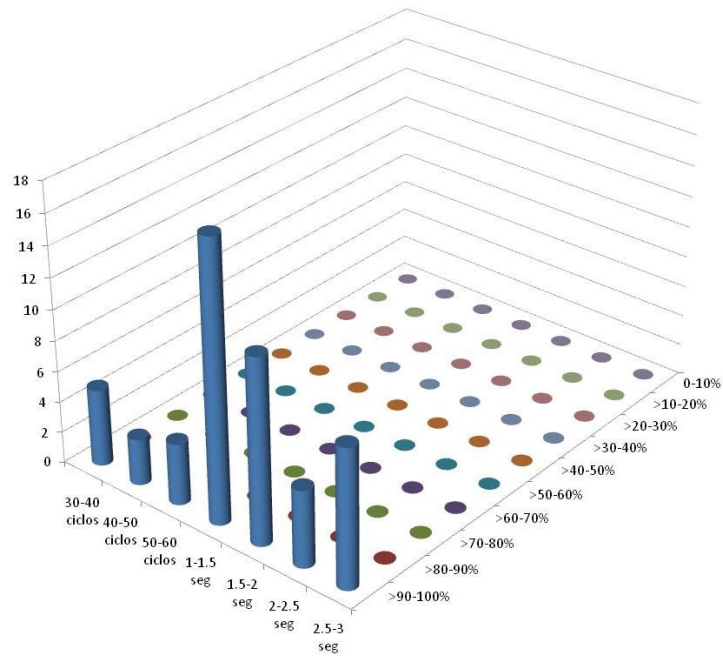


Figura 7. 26: Ocurrencia de *Sags* Momentáneos.

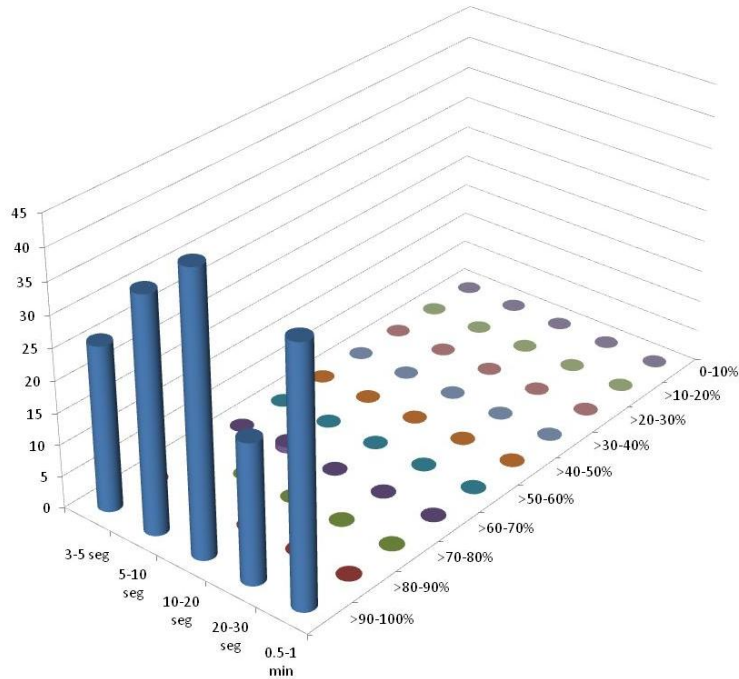


Figura 7. 27: Ocurrencia de *Sags* Temporales.

Como puede observarse en la Figura 7.26 y la Figura 7.27, prácticamente no se encontró ningún *Sag* por debajo del 90% que tuviera duración mayor a 30 ciclos. Sin embargo se encontraron gran cantidad de

disminuciones en el voltaje apenas por debajo del 95% que tuvieron duraciones considerables. Es importante tomar en cuenta estas variaciones para crear las curvas Iso- *Sags* posteriores.

7.2.3 Contornos Iso- *Sags* para 13.2kV

Los contornos Iso *Sags* provienen de una tabla de Frecuencias acumuladas. Estos permiten que si se mira por arriba el histograma de frecuencias, se observe una familia de funciones de dos dimensiones con un eje horizontal regido por la duración y un eje vertical regido por la magnitud de la tensión y cuyos elementos tengan como parámetros equivalentes que enlacen frecuencias acumuladas iguales. De esta manera se obtiene un método simple que describe con valores estadísticos la relación entre el comportamiento de la empresa proveedora de energía y que puede ser comparable con las características de las cargas.

Después de hacer este ejercicio con los datos capturados de la empresa, se obtuvo el siguiente perfil de contornos Iso-*Sag*. Este perfil de contornos fue realizado considerando los *Sags* evaluados entre el 90 y 100%, lo que provoca que la mayoría de los *Sags* caigan en este rango y no permita una buena visualización del resto de los contornos. Sin embargo ésta es la caracterización real del sistema eléctrico de potencia para 13.2kV.

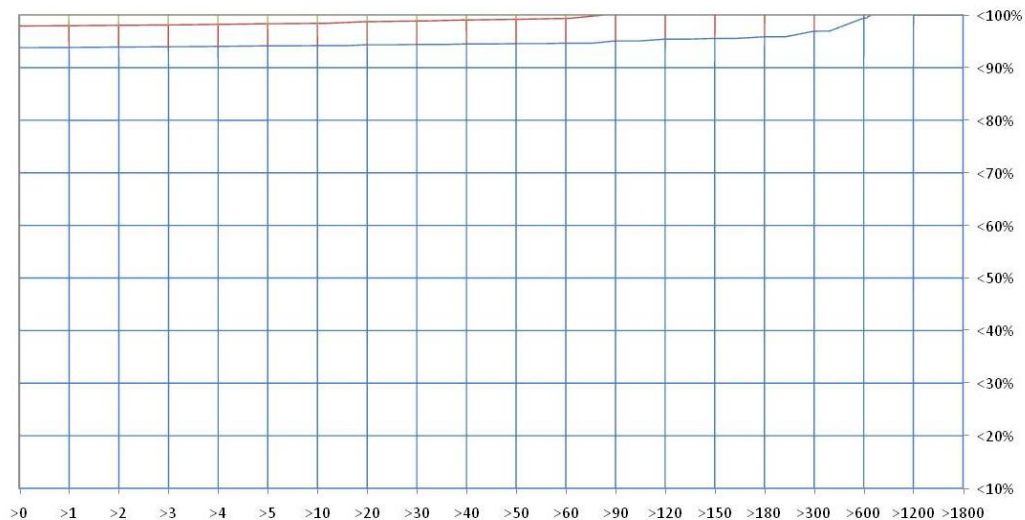


Figura 7. 28: Caracterización del SEP considerando *Sags* desde 95% de magnitud.

Al eliminar del diagrama los *Sags* por arriba del 90%, que según estándares no deben ser considerados como *Sags*, obtenemos el siguiente diagrama de contornos Iso-*Sags*. En él se puede observar más claramente la caracterización del SEP, inclusive la caracterización obtenida concuerda con clasificaciones comunes para estos niveles de voltaje.

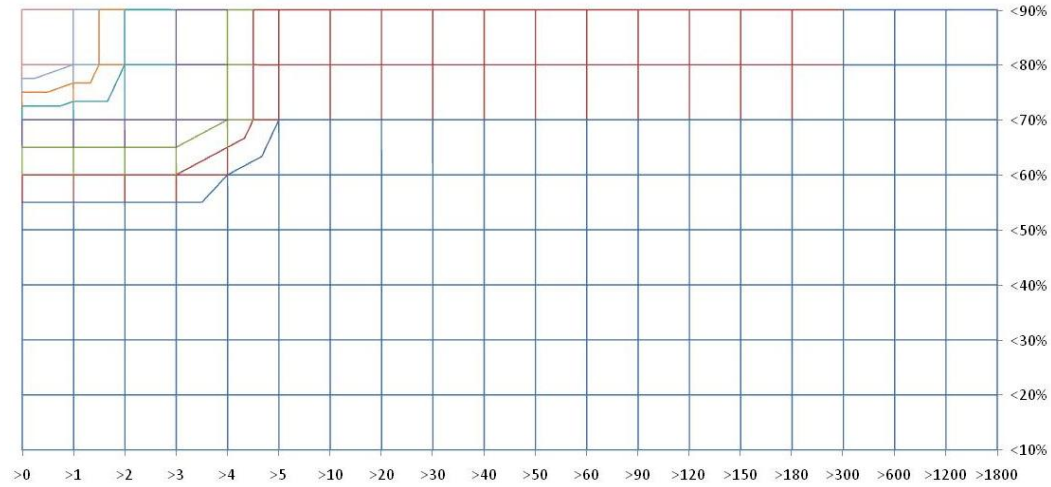


Figura 7. 29: Caracterización del SEP considerando Sags desde el 90% de magnitud.

El diagrama de contornos Iso-Sags es utilizado para caracterizar el SEP en cualquier industria y a distintos niveles de voltaje. En este caso, el diagrama anterior muestra la caracterización del SEP para el nivel de voltaje de 13.2kV. Sin embargo se volvió a realizar el diagrama Iso-Sag con una distinta escala de tiempos de duración y colores para así poder observar mejor la frecuencia de Sags ocurrentes en este nivel. El objetivo de recomodar la escala horizontal es con la finalidad de que al comparar el diagrama de contornos Iso-Sags con las curvas de inmunidad de las cargas críticas, se pueda observar mejor el fenómeno y así obtener mejores conclusiones.

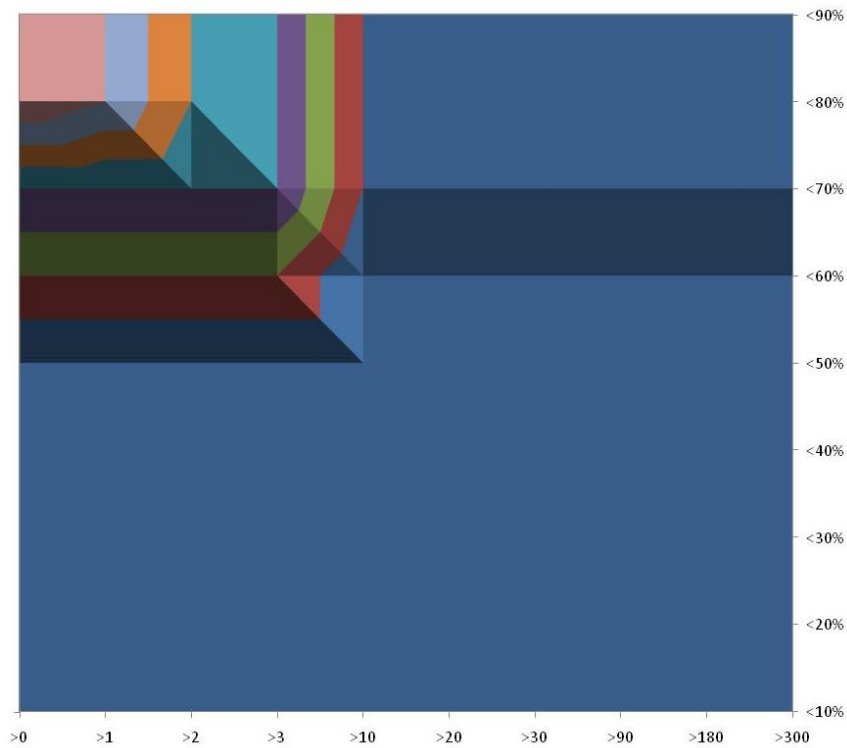


Figura 7. 30: Diagrama de Contornos Iso-Sags del SEP de esta industria Siderúrgica en particular.

7.2.4 Caracterización de las Cargas

Las cargas críticas son las mismas para todos los niveles de voltaje. Esto es porque la presencia de un *Sag* en cualquier nivel de voltaje no garantiza que este *Sag* no viaje y se vea reflejado en el resto de los niveles de voltaje. Es por esta razón que no podemos limitarnos a evaluar solo cargas críticas que se conecten directamente a este nivel de voltaje, sino que se deben evaluar todas las cargas críticas identificadas en la planta. Por lo tanto las curvas de inmunidad de las cargas críticas son las mismas que las mostradas en el análisis anterior.

7.2.5 Superposición de contornos Iso-Sags contra Curvas de Inmunidad

En la curva de la SEMI F47 de la Figura 7. 22, podemos ver los eventos, que según este estándar, son eventos que ocasionarán fallas a la industria, por lo tanto tener presencia de estos eventos no es adecuado. La metodología descrita en este escrito abarca la superposición de la presente curva con el diagrama de contornos Iso-Sags para así poder caracterizar al SEP de este nivel de voltaje. El resultado de esta superposición es el siguiente:

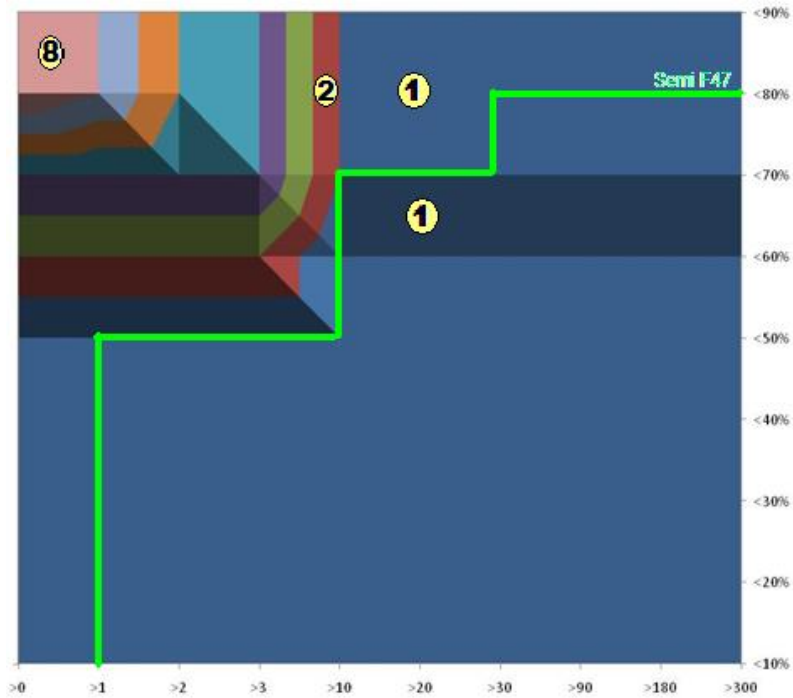


Figura 7. 31: Comparación de la caracterización de la SEP contra la curva SEMI F47.

La línea verde es la curva de la SEMI F47 sobrepuesta en el diagrama de contornos Iso-Sags. Los números 1,2 y 8 son las frecuencias para cada color, donde el color azul significa que existe una frecuencia de 1 *Sag* al mes, mientras que el color rosa significa que existe una frecuencia de 8 *Sags* al mes. La frecuencia para el resto de los colores puede calcularse fácilmente interpolando.

Como puede observarse, toda la ocurrencia de *Sags* esta fuera de zona preocupante para equipo en general según la curva SEMI F47. Sin embargo de igual manera se comparará el diagrama de contornos Iso-Sags con las curvas para cada equipo específico. Las comparaciones se muestran a continuación:

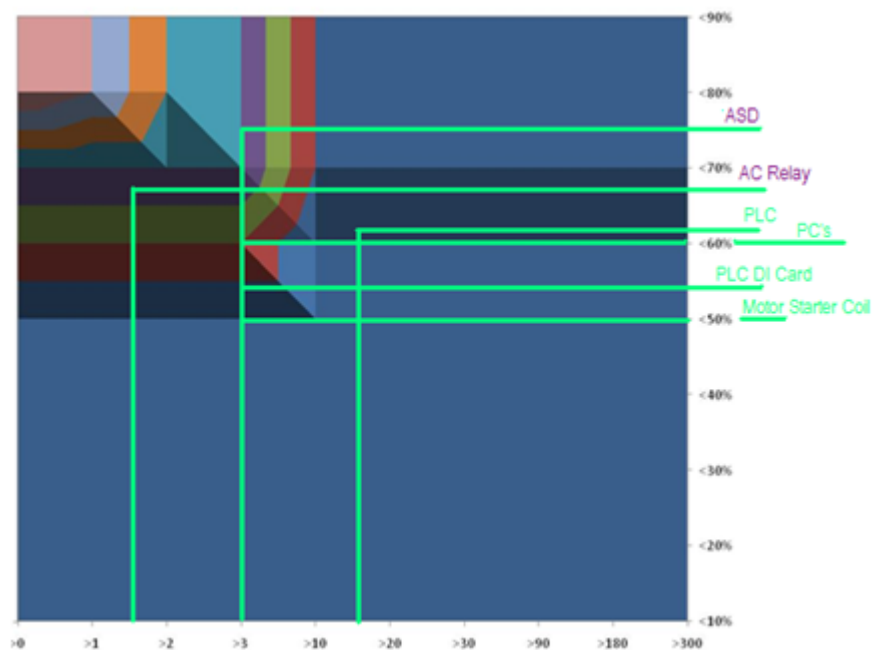


Figura 7. 32: Comparación de curvas de cargas críticas contra contornos Iso-Sags.

Lo anterior se puede interpretar de la siguiente manera:

- Los *drives* (*Adjustable Speed Drives* ASD) son los dispositivos más sensibles de todos los evaluados en este proyecto, y por lo tanto son los más perjudicados. Según la evaluación, existe una probabilidad de ocurrencia de 4 *Sags* al mes que duren mínimo 3 ciclos y tengan una magnitud de como máximo 0.75pu, eventos que perjudicaran la operación de los *Drives*.
- De la misma manera los AC relay se encuentran en el área de ocurrencia de 4 *Sags* al mes, aunque a estos les afectan todos aquellos *Sags* que duren como mínimo 1.5 ciclos y tengan una magnitud de como máximo 0.68 pu.
- Puede observarse que las Computadoras portátiles (PC) y las tarjetas de entradas digitales de los PLC (DI Card) son levemente afectados, pues tienen una probabilidad de ocurrencia de 2 *Sags* al mes y son sensibles a eventos con duración mínima de 3 ciclos y magnitud máxima de 60%.
- Finalmente los PLC y las bobinas de arranque de motores no presentarán ningún problema debido a *Sags* según las características de este sistema de potencia.
- Al superponer ambos diagramas, se puede conocer el impacto que tienen las condiciones del sistema de potencia sobre el equipo sensible. Con la superposición de las gráficas ya realizada, es posible recomendar al operador de red determinadas prácticas de protección y a los usuarios nuevas distribuciones de la carga.

7.2.6 Resultados y Recomendaciones para 13.2kV

- Aplicar una metodología estandarizada como la anterior a un sistema de potencia permite caracterizar la calidad de energía desde la perspectiva del usuario, y de esta manera dar indicios acerca de las posibles acciones que pueden ejecutarse para mejorarla. Permite además obtener un resultado importante para la tensión en una subestación dada, sometida a un número elevado de

perturbaciones o fallas y complementa eficazmente el monitoreo o la medición directa que usualmente efectúan las empresas de energía.

- La caracterización completa de *Sags* es una metodología que debe ser implementada, no solo por empresas de energía, sino por usuarios consumidores de grandes cantidades de energía, con el fin de crear una compatibilidad electromagnética adecuada entre las cargas y el sistema de potencia.
- Este escrito trata de comprobar cómo un problema tan grave y común como lo es los *Sags* puede causar grandes pérdidas económicas afectando a las cargas críticas dentro de la industria.
- Finalmente se pretende que empresas como la evaluada en este proyecto, se concienticen de estas pérdidas y actúen de tal forma que se protejan contra disturbios de esta índole y apoyen futuros proyectos referentes a la investigación del tema.
- Una vez instalada la infraestructura de monitoreo en 230 kV se recomienda este bus de voltaje como el segundo a tratar de la misma manera que el bus de acometida.

7.3 Alimentación a *Drives* (825 y 220 V)

Por último se realizaron mediciones en dos alimentaciones a *drives*, los cuales son los más delicados dentro de toda la línea de laminación, uno de ellos es el RSM. El Drive RSM se alimenta con 825V, mientras que un segundo Drive con 220 V. En el bus de 825 V no se encontraron eventos, sin embargo se capturaron voltajes RMS y lo que se encontró se presenta a continuación.

De la Figura Anexo A. 42 a la Figura Anexo A. 57 se muestran los historiales de voltajes obtenidos para este nodo. En esta ocasión se utilizaron medidores de la marca Fluke y de la marca ION para monitorear la calidad de energía. El lector puede seguir cada imagen y verificar que cuando surge alguna disminución de voltaje en este nivel de voltaje, éste se ve reproducido pero con magnitud un poco menor, en los niveles mayores de voltaje. Las imágenes se muestran en el anexo A.

En la siguiente tabla se muestran los eventos anormales que se encontraron en estas mediciones.

Tabla 7. 5: Listado de Eventos anormales en bus de alimentación al Drive

| Fecha de Inicio | Fecha de Término | Característica | Figura donde aparece |
|------------------------|-------------------------|--|---|
| 10/04/09 00:10:30 | Instantáneo | Solamente el Voltaje de A a C decae a 0.92 pu. | Anexo A. 44 |
| 15/04/09 15:56:57 | 15/04/09 20:33:26 | Decae el voltaje trifásico a 0 V. | Anexo A. 45 Anexo A. 46 Anexo A. 47 |
| 17/04/09 19:55:59 | Instantáneo | Decae el voltaje a 0.91 Volts en las tres fases. | Anexo A. 45 Anexo A. 46 Anexo A. 47 |
| 19/04/09 05:46:23 | Instantáneo | Decae el voltaje a 0.88 en las tres fases. | Anexo A. 45 Anexo A. 46 Anexo A. 47 |

| | | | |
|----------------------|----------------------|--|---|
| 20/04/09 20:08:57 | 21/04/09 03:46:52 | Decae el voltaje trifásico a 0V | Anexo A. 45 Anexo A. 46 Anexo A. 47 |
| 18/08/09 00:00:00 | Instantáneo | Decae el voltaje trifásico a 0V | Anexo A. 49 Anexo A. 50 Anexo A. 51 |
| 03/09/09 08:45:00 | 04/09/09 14:45:00 | Interrupción de Corriente habiendo voltaje | Anexo A. 52 Anexo A. 53 Anexo A. 54 |
| 09/09/09 09:45:00 | 09/09/09 14:15:00 | Interrupción de Corriente habiendo voltaje presente. | Anexo A. 52 Anexo A. 53 Anexo A. 54 |
| 19/09/09 18:00:00 | Instantáneo | Interrupción de corriente habiendo voltaje presente. | Anexo A. 55 Anexo A. 56 Anexo A. 57 |
| 23/09/09 15:45:00 | Instantáneo | Interrupción de corriente habiendo voltaje presente. | Anexo A. 55 Anexo A. 56 Anexo A. 57 |
| 24/09/09 08:45:00 | 24/09/09 13:00:00 | Interrupción de corriente. | Anexo A. 55 Anexo A. 56 Anexo A. 57 |

Los acontecimientos listados pretenden registrar los fenómenos anormales más importantes que se presentaron durante las mediciones. En conjunto se comparan tales acontecimientos contra un historial de fallas, para así correlacionar las fallas ocurridas con acontecimientos eléctricos.

En el bus de 220 V, donde se capturó la información con el ION se obtuvieron algunos eventos *Sags*, por lo que a continuación se presente el análisis de acuerdo a la metodología.

7.3.1 Caracterización del SEP para 220V

Como uno de los puntos críticos del estudio se eligió la alimentación a uno de los *drives* en laminación, es cual es un bus de 220V. El tiempo de captura para este bus comenzó el 11 de Agosto del 2009 y terminó el 30 de Septiembre del mismo año. Durante este periodo de dos meses se encontraron los siguientes eventos, los cuales se muestran en la Tabla 7. 6 de acuerdo a la metodología descrita previamente.

Tabla 7. 6: Eventos capturados en 220V presentados de acuerdo a la metodología de la IEEE

| Número | Evento | Amplitud (Volts) | Duración (Segundos) | Fecha y Tiempo | VRMS (%) | Duración (ciclos) |
|--------|-----------------|------------------|---------------------|--------------------------|-------------|-------------------|
| 111 | Sag en A y B | 197.004172 | 0.057 | 2009-Sep-11 17:59:02.736 | 85.65398788 | 3.420 |
| 112 | Sag en A y B | 197.568520 | 0.066 | 2009-Sep-11 18:02:58.153 | 85.89935684 | 3.959 |
| 107 | Sag en B y C | 198.225397 | 0.05799999 | 2009-Sep-08 19:09:03.383 | 86.1849556 | 3.479 |
| 101 | Sag en A, B y C | 199.527714 | 0.066 | 2009-Ago-27 14:24:38.673 | 86.75118001 | 3.959 |
| 117 | Sag en A y B | 199.744810 | 0.01600000 | 2009-Sep-28 00:05:36.581 | 86.84556961 | 0.960 |
| 115 | Sag en A y C | 200.071178 | 0.05999999 | 2009-Sep-15 17:08:33.447 | 86.98746872 | 3.599 |
| 114 | Sag en A, B y C | 200.388640 | 0.057 | 2009-Sep-13 17:42:26.986 | 87.12549591 | 3.420 |
| 106 | Sag en A, B y C | 204.569837 | 0.057 | 2009-Sep-06 18:33:41.724 | 88.94340769 | 3.420 |
| 105 | Sag en A, B y C | 205.378285 | 0.04899999 | 2009-Sep-06 18:14:14.175 | 89.29490662 | 2.939 |
| 113 | Sag en A y C | 205.766341 | 0.04899999 | 2009-Sep-11 18:04:22.520 | 89.46362686 | 2.939 |
| 104 | Sag en A, B y C | 206.837906 | 0.05799999 | 2009-Sep-05 16:23:04.432 | 89.92952474 | 3.479 |
| 99 | Sag en A y C | 206.945137 | 0.008 | 2009-Ago-15 19:48:04.841 | 89.9761467 | 0.480 |

7.3.2 Diagramas de Densidad de Sags en 220V

De igual manera que los apartados anteriores, a continuación se muestran los diagramas de densidad de Sags instantáneos y momentáneos. En este caso en particular no hubo registro de ningún Sag temporal. Esto puede corroborarse en la tabla anterior.

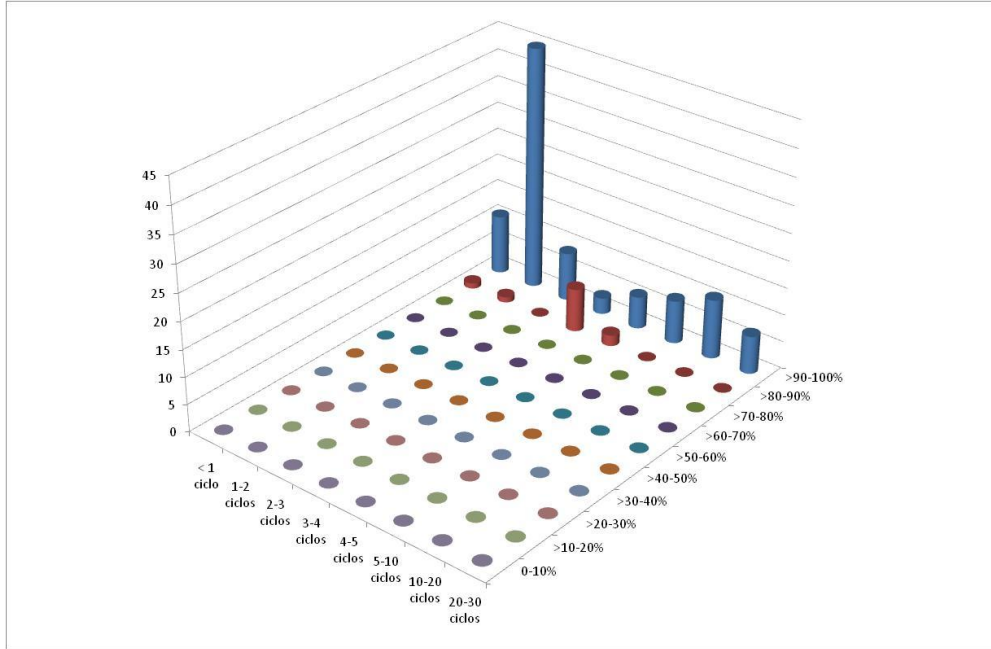


Figura 7. 33: Densidad de Sags instantáneos en 220V

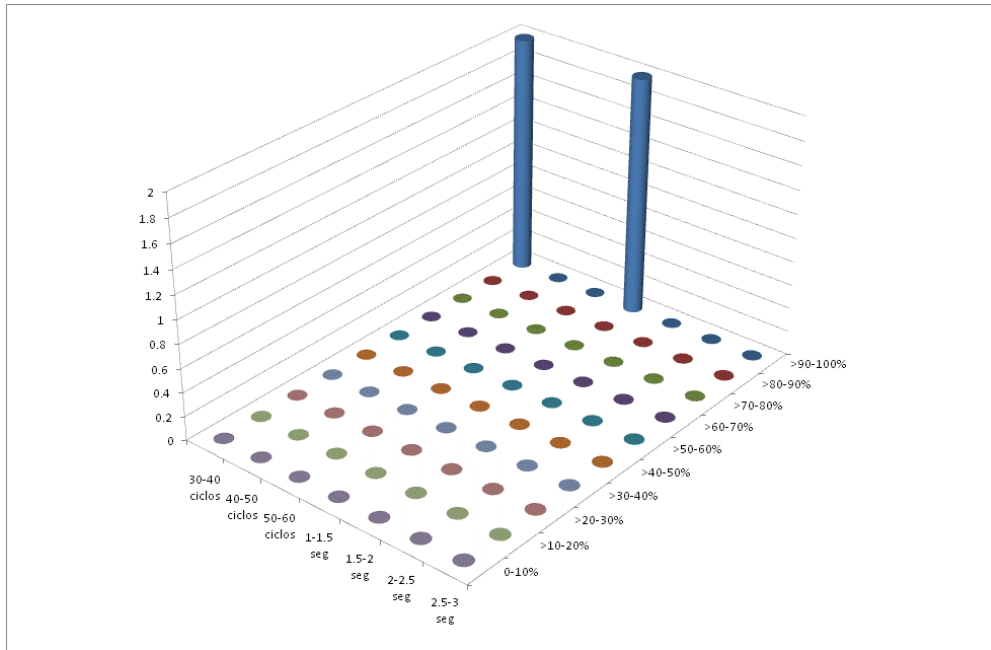


Figura 7. 34: Densidad de Sags momentáneos en 220V

Esta vez presento los diagramas de densidad incluyendo el intervalo entre los 90 y 95%, con el único fin de visualizar que aunque poca, también existen eventos registrado para este nivel. Obviamente al crear los diagramas Iso-Sags y comparar con las curvas de inmunidad, se encontrará que para la mayoría de las cargas, las variaciones en el voltaje RMS entre el 90 y 95% no deberían causar problemas.

7.3.3 Contornos Iso-Sags en 220 V

Una vez realizado el diagrama de contornos Iso-Sags para este nivel de voltaje, y así caracterizar el bus, se obtuvo el siguiente:

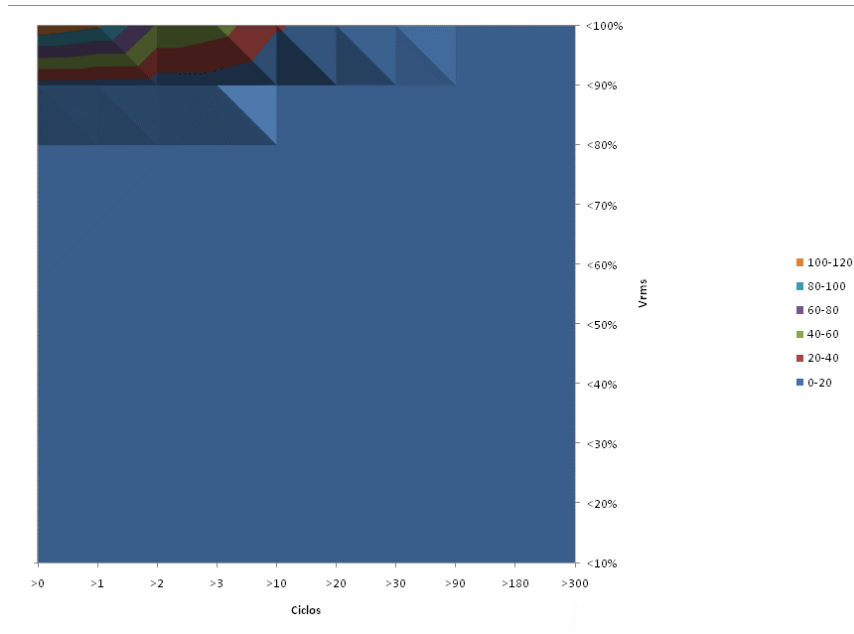


Figura 7. 35: Contornos Iso-Sags para 220V

Siguiendo la metodología pueden observarse los siguientes puntos:

- Durante el periodo de 2 meses de muestreo se capturaron 120 Sags con magnitud de voltaje máxima de 0.95 pu's.
- No hubo presencia de Sags por debajo de 80% del voltaje nominal.
- La concentración mas fuerte de Sags tiene magnitud de voltaje mínima de 0.9 pu's.
- Simplemente observando el diagrama nos podemos dar cuenta que ninguno de los eventos registrado deben afectar a las cargas críticas.

Sin embargo, siguiendo con la metodología se realizaron las superposiciones de curvas.

7.3.4 Caracterización de Cargas Críticas para 220V

De igual manera que para los niveles de voltaje anteriormente estudiados, la comparación de los contornos se realizará para todas las cargas críticas antes descritas.

7.3.5 Superposición de contornos Iso-Sags con Curvas de Inmunidad

De igual manera que en los análisis anteriores se realizó la superposición entre el diagrama de contornos Iso-Sag para este nivel de voltaje y la curva SEMI F47, y posteriormente contra las curvas de inmunidad de las cargas críticas. Los resultados se muestran a continuación:

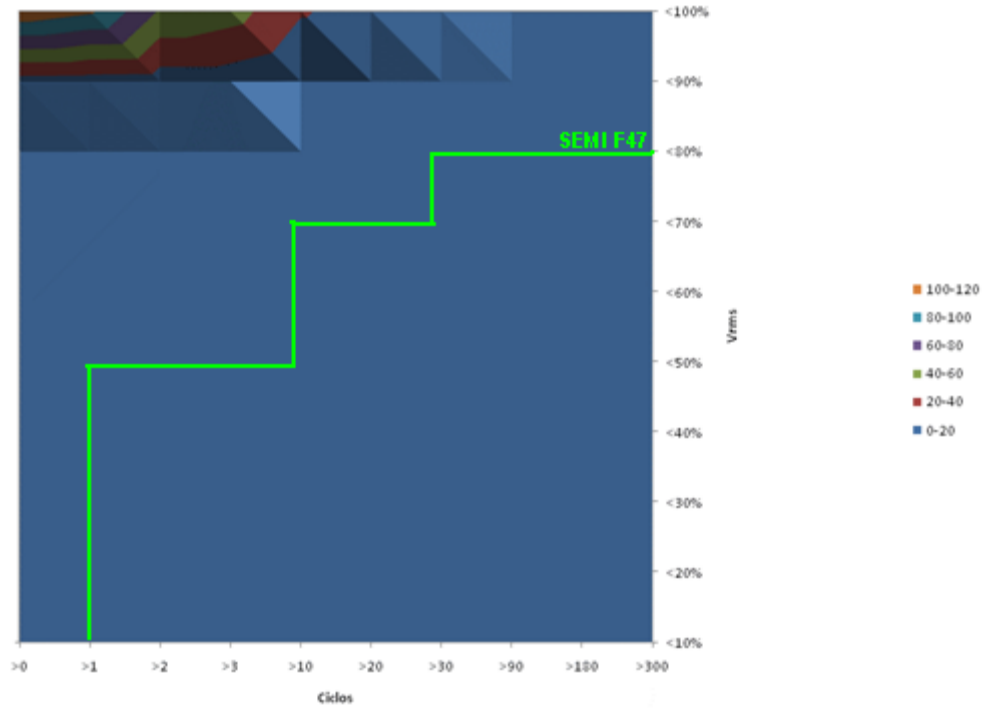


Figura 7. 36: Superposición de diagrama de contornos en 220V contra la curva SEMI F47

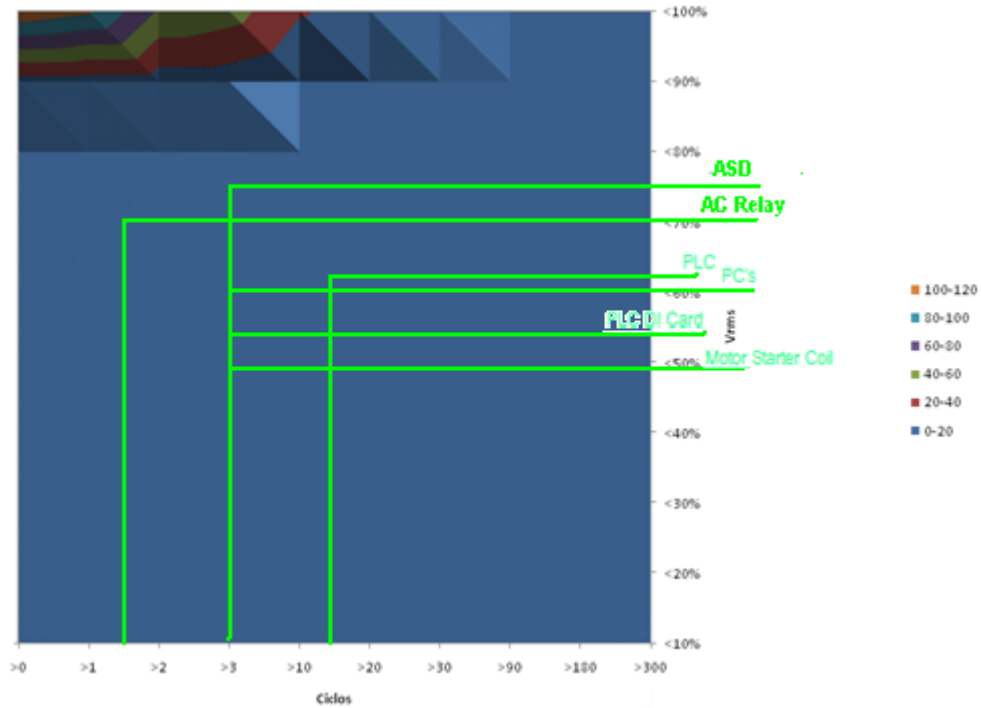


Figura 7. 37: Superposición de diagrama de contornos en 220V contra curvas de inmunidad de cargas críticas

Del primer diagrama puede observarse como según la curva SEMI F47 no existe ningún *Sag* que afecte este nivel. Sin embargo, como en los previos estudios esta visión general no ha permitido ver el efecto en

cargas específicas, se ha realizado también la comparación para cada carga crítica. Dándonos como resultado esta vez que ningún *Sag* afectará a las cargas críticas en este bus de voltaje.

7.3.6 Resultados y Recomendaciones para 220 V

- Debido a que, según este análisis, a este nivel no se encontraron eventos causantes de fallas, se recomienda concentrar los estudios en niveles mas altos de voltaje, siguiendo con las recomendaciones descritas en los anteriores análisis.
- Estos resultados encontrados son convenientes, puesto que indica que no es necesario un estudio tan específico en cada alimentación a cada carga. Basta con realizar un estudio en un bus genérico para poder tener un vistazo de los fenómenos eléctricos existentes.

Capítulo 8.- Resumen de Resultados, Recomendaciones y Contribuciones

8.1 Resultados Obtenidos del Análisis de *Sags*

- Se detectó una cantidad exagerada de *Sags* en el nivel de 230 kV, pero podría deberse a errores del sistema de medición (falso contacto).
- Toda la densidad de *Sags* medida para 230 kV se encontró por arriba del 70% y su duración fue menor a 10 ciclos.
- Se encontró que de todas las cargas críticas analizadas, solamente los *Drives* de Velocidad Ajustable (ASD) tienen mayores probabilidades de salir afectados ante la presencia de estos eventos.
- Analizados los diagramas Iso-*Sags*, se encontró que existe una ocurrencia de 2 *Sags* al mes que tendrán magnitud y/o duración que provocarían fallas a los equipos variadores de velocidad.
- Según el análisis estadístico y las mediciones realizadas, los *drives* tienen una probabilidad de fallar dos veces al mes. Este resultado es preocupante para la planta puesto que la producción en laminación depende enteramente de la sincronización de los *drives*. Este análisis abre camino para futuros análisis que vayan aun más a fondo en el estudio de este fenómeno.
- Se encontró por medición que el sistema de alimentación en 230 kV en estado estable tiene una variación en el voltaje de 8% pico a pico.
- Se encontró que al igual que los *drives*, los contactores electromagnéticos de CA también tienen probabilidades de fallar ante estos eventos. Aunque los contactores también tienen una probabilidad de falla de dos veces al mes, no se tiene información sobre la función que cumplen estos dispositivos en el sistema de control.
- Otras cargas críticas como computadoras portátiles y tarjetas de salidas digitales de PLC's son levemente afectadas. Sin embargo pudiera ocurrir que una falla en estos dispositivos repercuta en el proceso.
- Este estudio demuestra cómo un disturbio tan común como lo es un *Sag* puede causar grandes pérdidas económicas afectando a las cargas críticas dentro de la industria.
- Se concluyó de las mediciones realizadas que para baja tensión, la concentración de *Sags* no es significativa y los registrados estuvieron por encima del 90% en magnitud.
- En el único *drive* que se analizó de acuerdo a esta metodología colocándole equipo de medición no se encontró *Sags* que pudieran dañar al mismo.
- Es mas conveniente conectarse a un nivel de voltaje superior, donde se tengan contempladas la mayoría de las cargas críticas en un solo punto.

Según el presente estudio la ocurrencia de *Sags* ocasionaría entonces una variación en la velocidad a la cual gira el motor, lo que se traduciría en un atorón y un paro en la línea de producción de laminación.

Durante la estancia en la planta de Ternium Puebla se investigó que el minuto parado de Laminación cuesta 200 dolares. De igual manera cuando han existido paros en laminación debido a fallas, éstas pueden variar en su duración desde 30 minutos hasta 8 horas³, dependiendo de la magnitud de la falla.

Juntando todos estos datos y considerando que los *Sags* podrían ser responsables de dos paros mensuales, se puede calcular fácilmente que se pueden llegar a tener pérdidas de hasta 16 horas de producción al mes los cuales tendrán un costo variable entre 12,000 USD y 192,000 USD al mes.

Finalmente, los resultados de este análisis indican que la característica de *Sags* del Sistema de Potencia está poniendo en riesgo de falla a los controladores de velocidad al menos 2 veces por mes. Fallas que ocasionarán paros en la producción con pérdidas económicas significativas.

Para monitorear las causas de estas pérdidas en producción es recomendable instalar al menos una estación de monitoreo la cual tendría un costo aproximado de 20,000 USD y estaría constituida por equipo analizador de calidad de energía (ION recomendable) y una base de datos en donde guardar el registro, la cual puede ser QNX puesto que ya esta instalada en planta. Esta estación de monitoreo no requiere de personal que la opera, sin embargo lo necesita para la correcta instalación, configuración y programación. Lo más recomendable es tener no una, sino 2 estaciones de monitoreo localizadas en distintos puntos estratégicos de la planta. Más contribuciones se listan en la siguiente sección.

8.2 Contribuciones

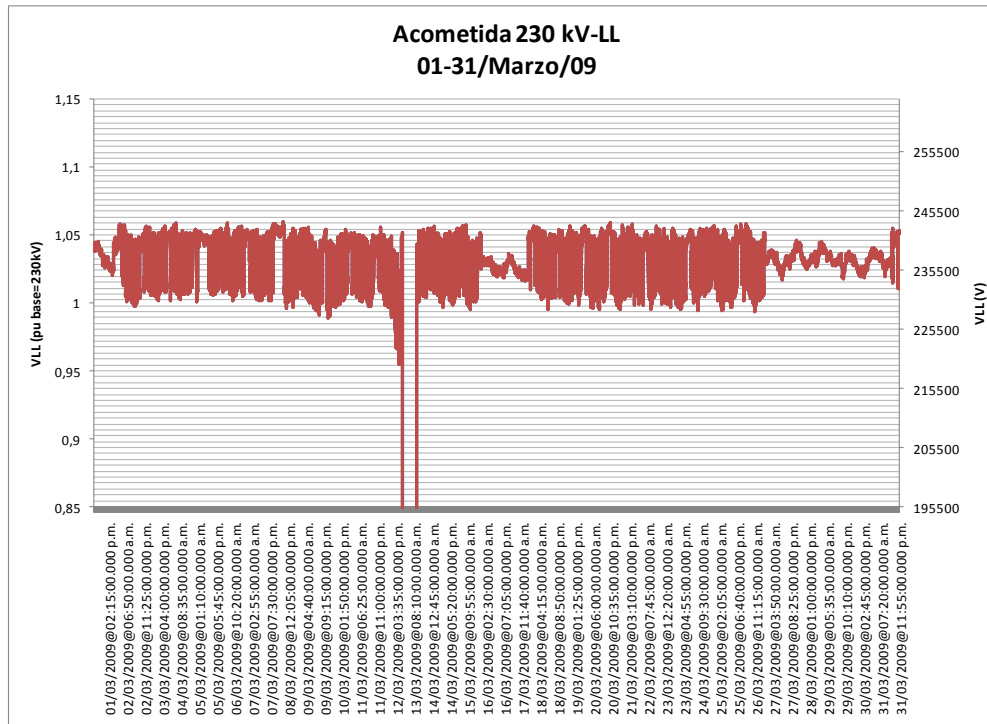
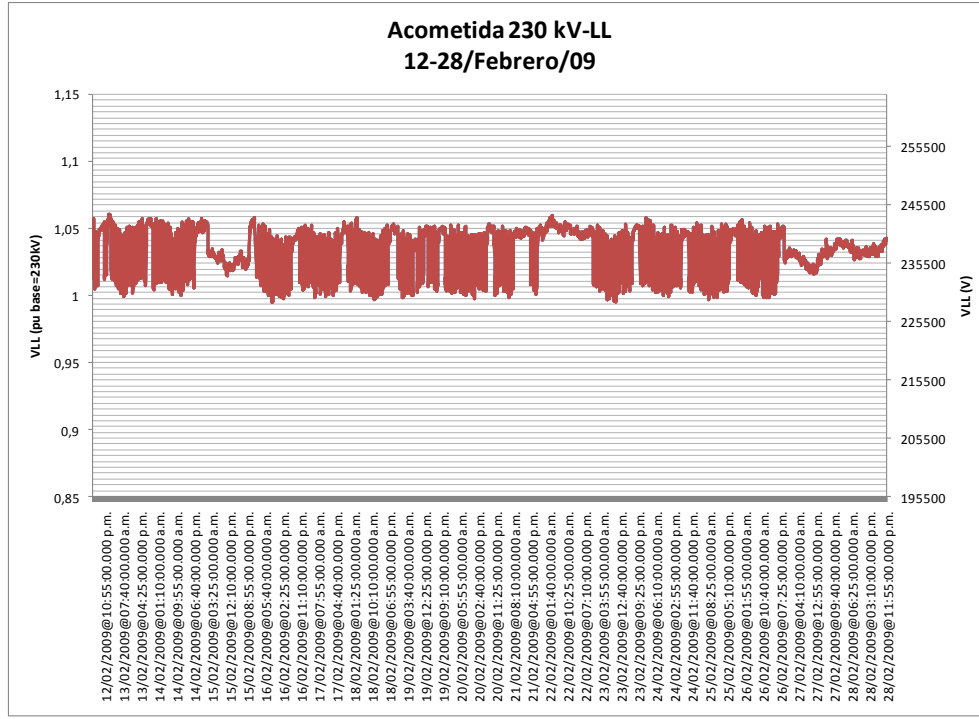
1. Primer trabajo en idioma español que reúne en un solo documento la problemática de los disturbios eléctricos de una industria siderúrgica.
2. Primer estudio de *Sags* que aporta las características para tres niveles de tensión, alta, media y baja, en la planta de Ternium Puebla.
3. Se abre camino para trabajos de investigación futuros, que de la mano de este proyecto realicen análisis de *Sags* que tengan tiempos más prolongados y así caractericen el comportamiento anual de la planta.
4. Se abre camino para trabajos de investigación futuros que estudien el resto de los disturbios eléctricos, mostrados en la Tabla 1. 1, que deterioran la calidad de energía y que pudieran estar afectando a la industria actualmente.
5. Gracias al análisis experimental que se realizó se dan indicios acerca de las posibles acciones que pueden ejecutarse para solucionar el problema.
6. Se pretende que la presentación de este trabajo sirva de referencia para los grandes usuarios de energía y que éstos puedan estudiar los temas de compatibilidad electromagnética adecuada entre las cargas y el sistema de potencia.

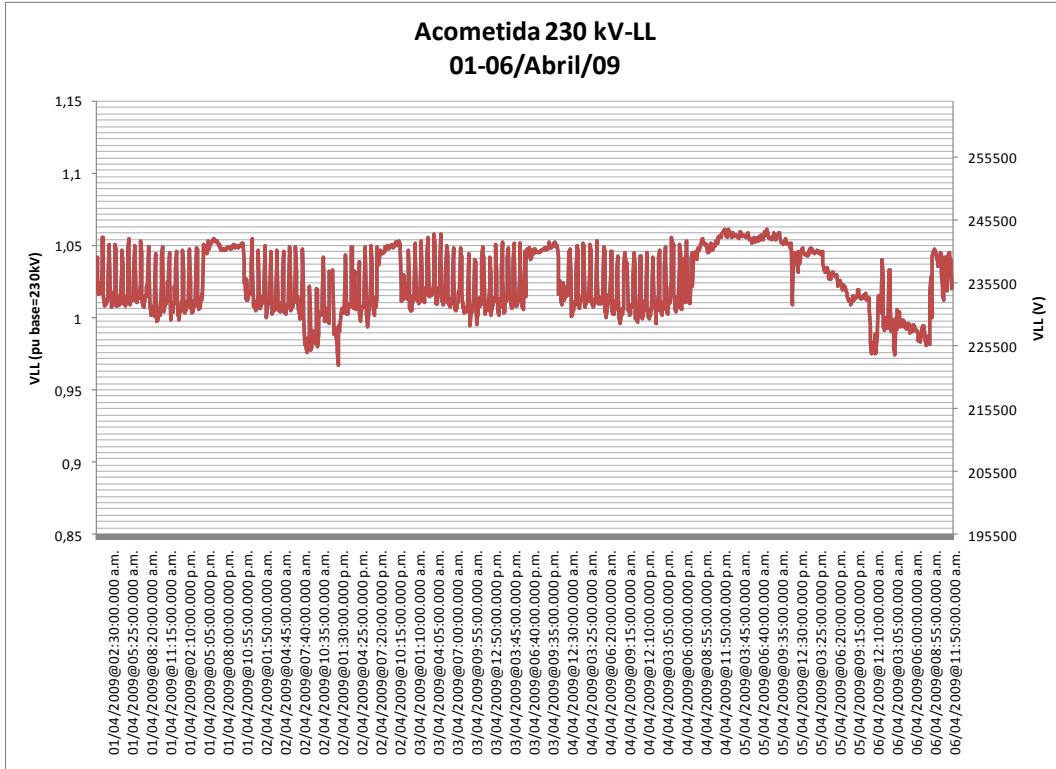
³ Datos proporcionados por personal de la Planta Ternium Puebla, no referenciados.

8.3 Recomendaciones para Trabajo Futuros

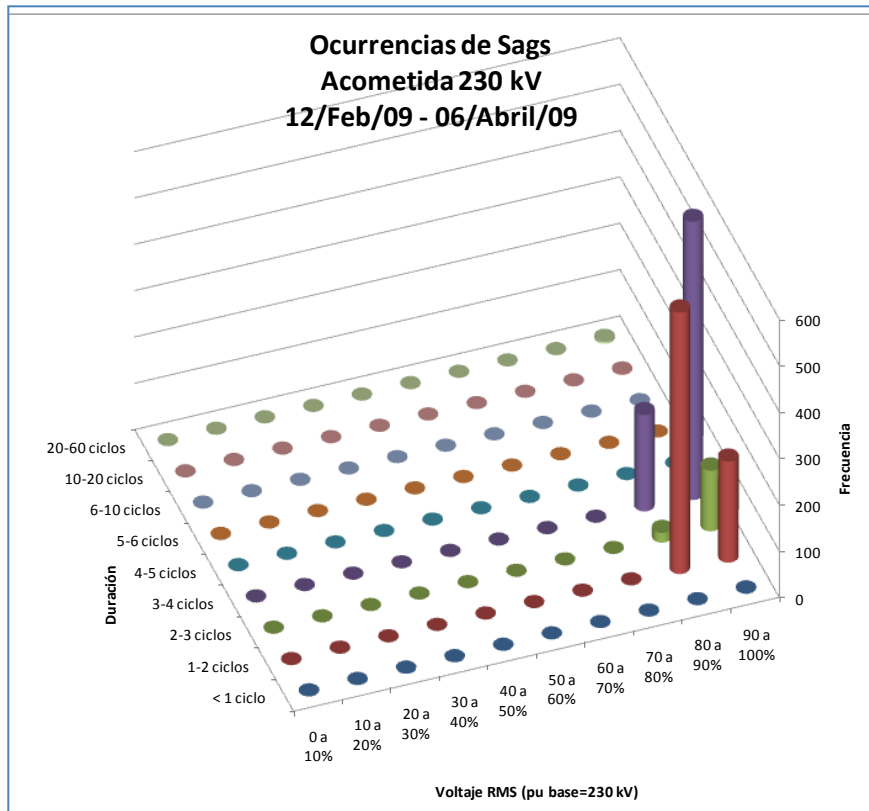
- En este documento se presentó el estudio para algunos puntos importantes de la planta. Sin embargo realizar el mismo análisis de acuerdo a la metodología aquí descrita en otros puntos críticos será favorable para diagnosticar el estado actual de la energía en toda la planta.
- Se recomienda realizar un análisis de esta magnitud en puntos estratégicos de la planta para todos los disturbios clasificados en este documento, con el fin de diagnosticar cómo mejorar la calidad de energía.
- Como trabajos futuros, se recomienda instalar un monitoreo permanente en el nivel de voltaje de 230 kV, dado que el monitoreo desde este punto daría una buena visión de lo que se puede esperar ocurra en el resto de la planta.
- Se recomienda realizar un análisis mas prolongado del mismo disturbio para así encontrar resultados más cercanos a la realidad. Se recomienda que el tiempo de análisis mínimo sea de un año.
- Se recomienda que el monitoreo sea realizado con dispositivos ION actuales (o similares) que estén conectados a una base de datos para almacenar principalmente los eventos *Sags* encontrados durante el año.
- Se recomienda que el almacenamiento de datos hacia la base de datos esté automatizado para que la información se presente como lo indica la metodología aquí descrita.
- Con los resultados de estos análisis futuros, se recomienda tomar medidas protegiendo efectivamente a las cargas críticas más influyentes para el proceso, de acuerdo con las líneas que se presentan en este trabajo.
- Se recomienda que una vez conociendo el SEP de la planta se protejan los equipos sensibles contra disturbios de esta índole y se apoyen futuros proyectos referentes a la investigación del tema.
- Una vez instalada la infraestructura de monitoreo en 230 kV se recomienda replicar la misma en el bus de 13.2kV.
- Se recomienda que antes de analizar el sistema para una carga específica se analicen permanentemente los dos niveles de voltaje mencionados anteriormente.

Anexo A.- Gráficas de Voltaje y Corriente efectivos capturados

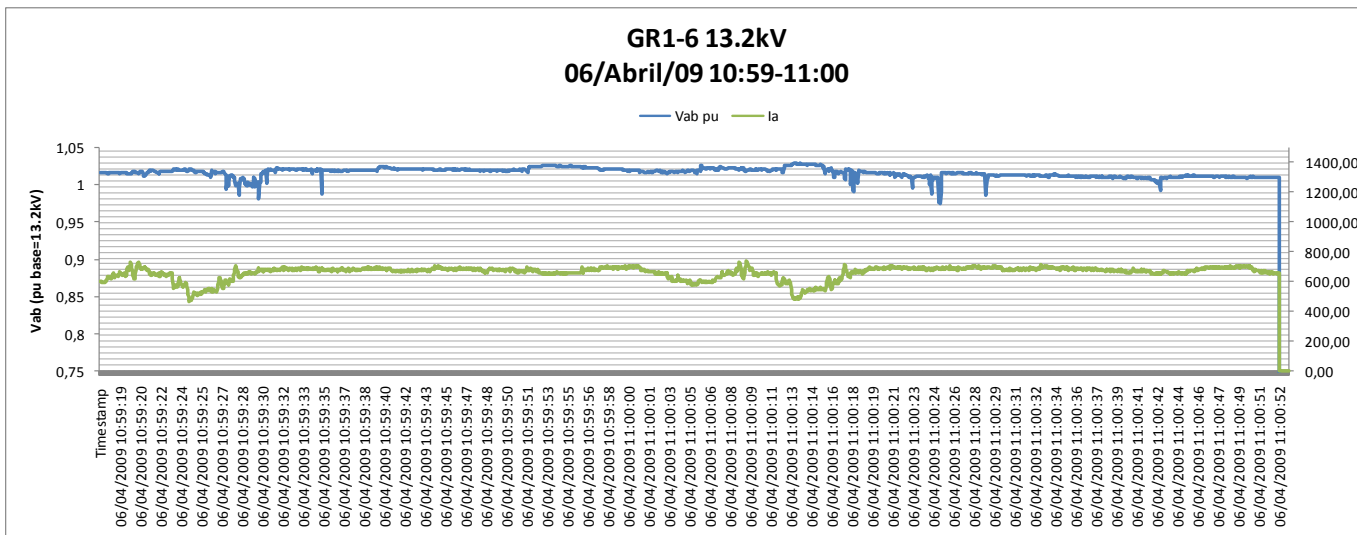




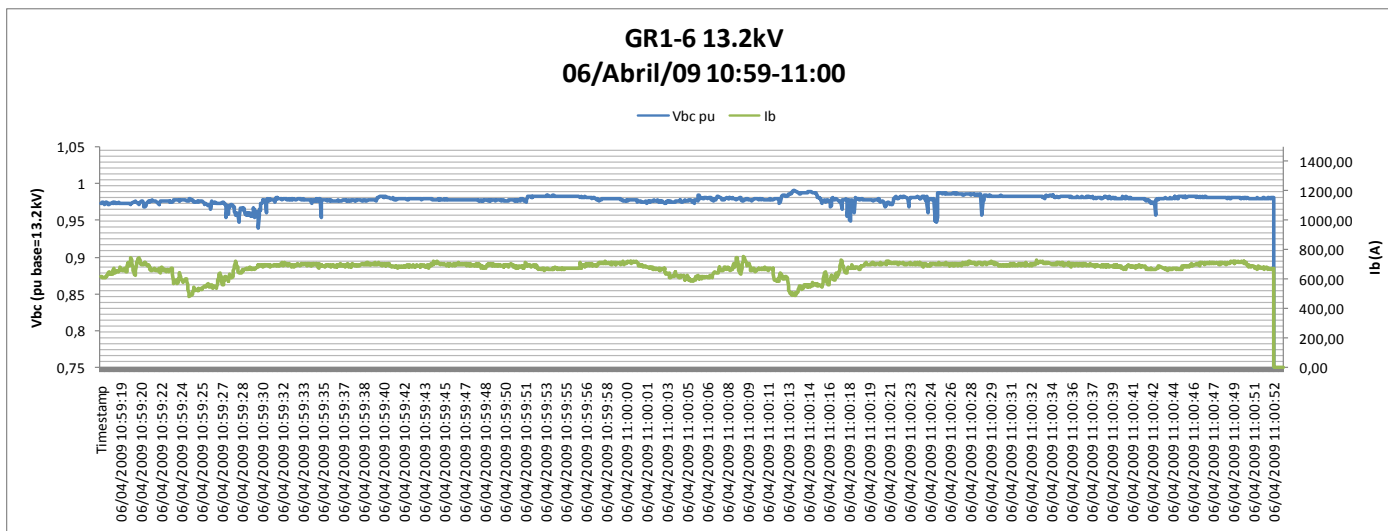
Anexo A. 3: Historial de Voltaje obtenido por ION



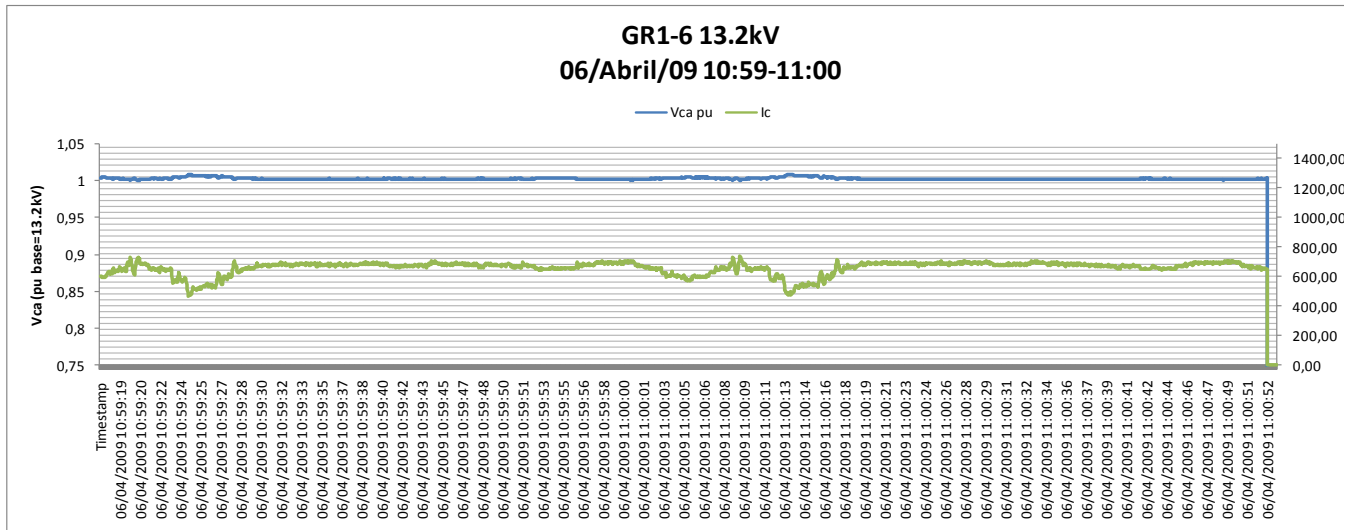
Anexo A. 4: Gráfica Estadística de Eventos obtenidos por ION



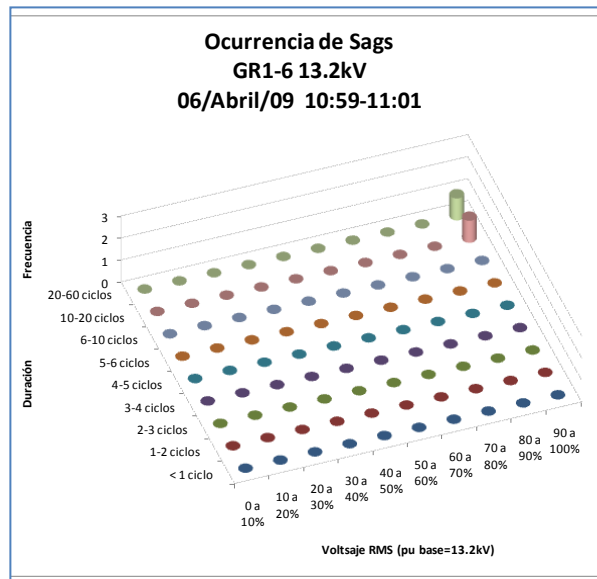
Anexo A. 5: Historial de Vab obtenido por Fluke 06/Abril



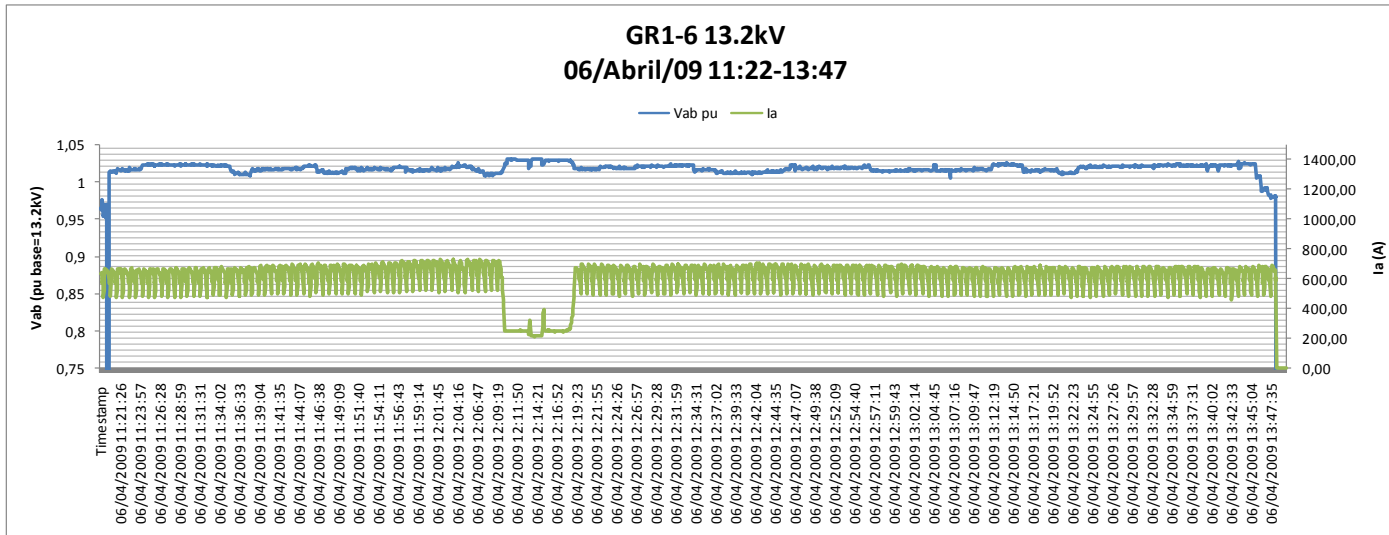
Anexo A. 6: Historial de Vbc obtenido por Fluke 06/Abril



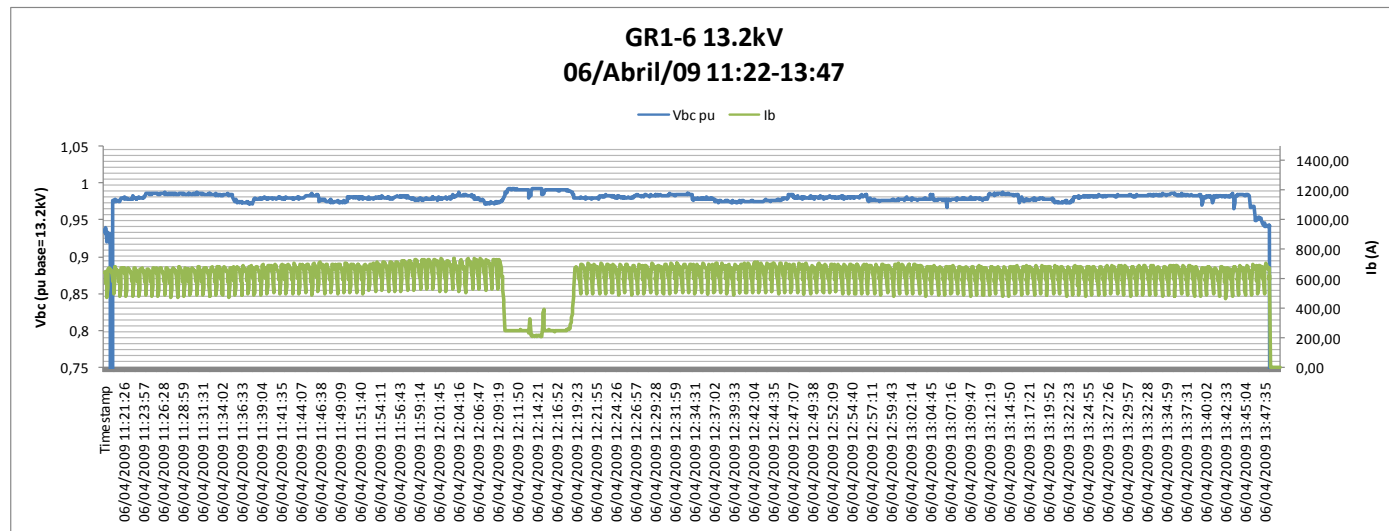
Anexo A. 7: Historial de Vca obtenido por Fluke 06/Abril



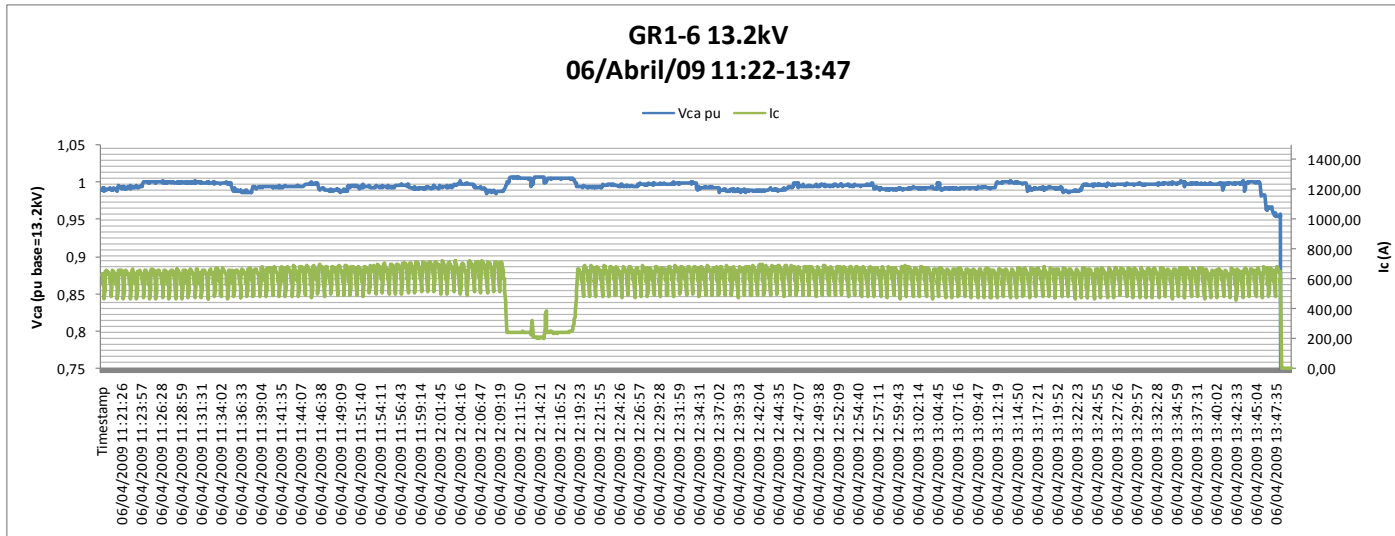
Anexo A. 8: Gráfica estadística de eventos obtenidos por Fluke 06/Abril



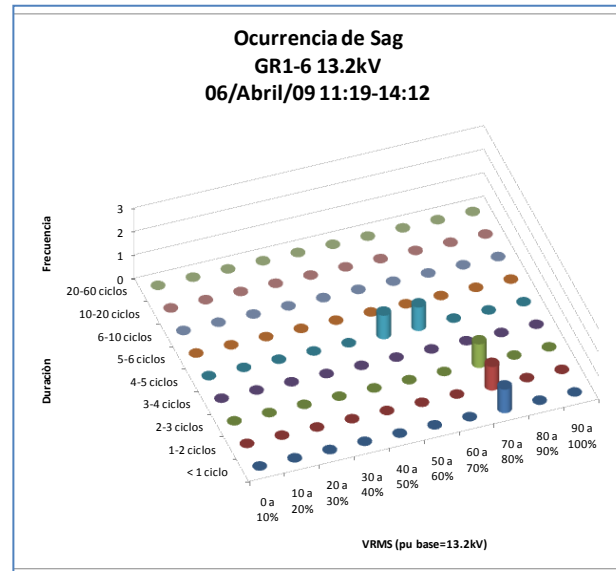
Anexo A. 9: Historial de Vab obtenida por Fluke 06/Abril



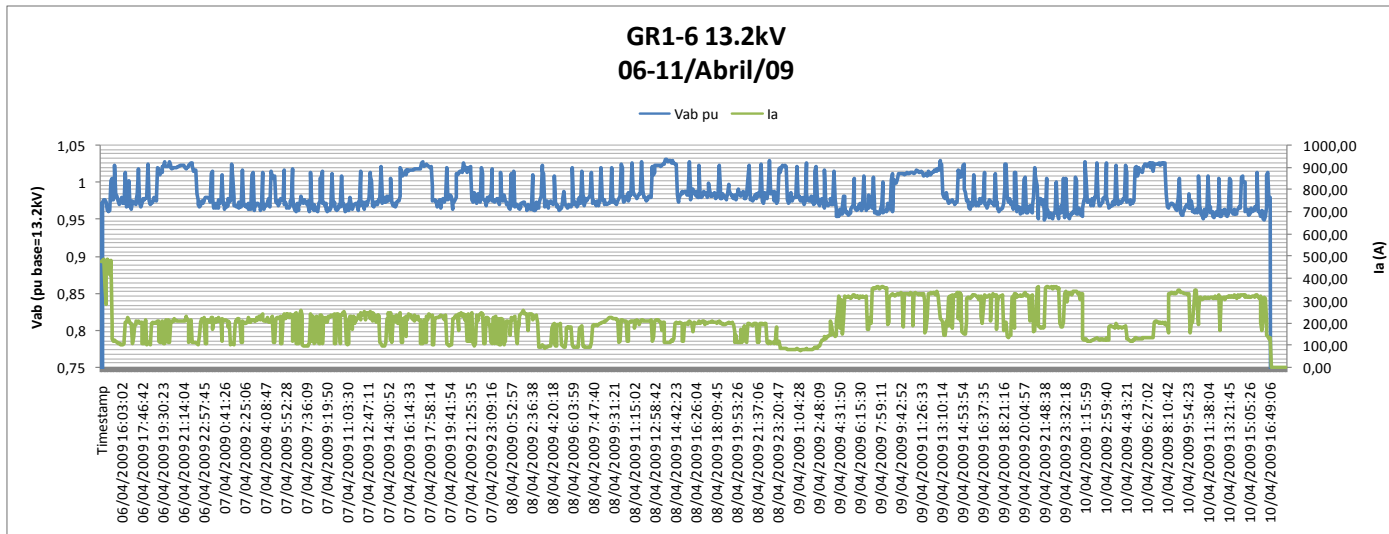
Anexo A. 10: Historial de Vbc obtenido por Fluke 06/Abril



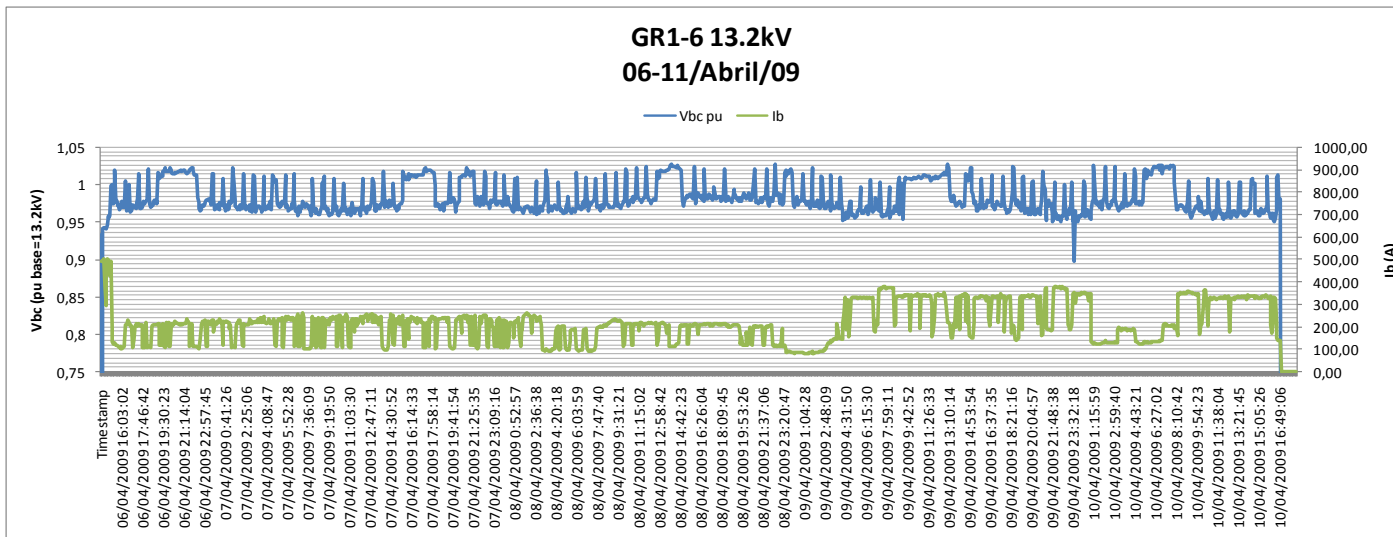
Anexo A. 11: Historial de Vca obtenido por Fluke 06/Abril



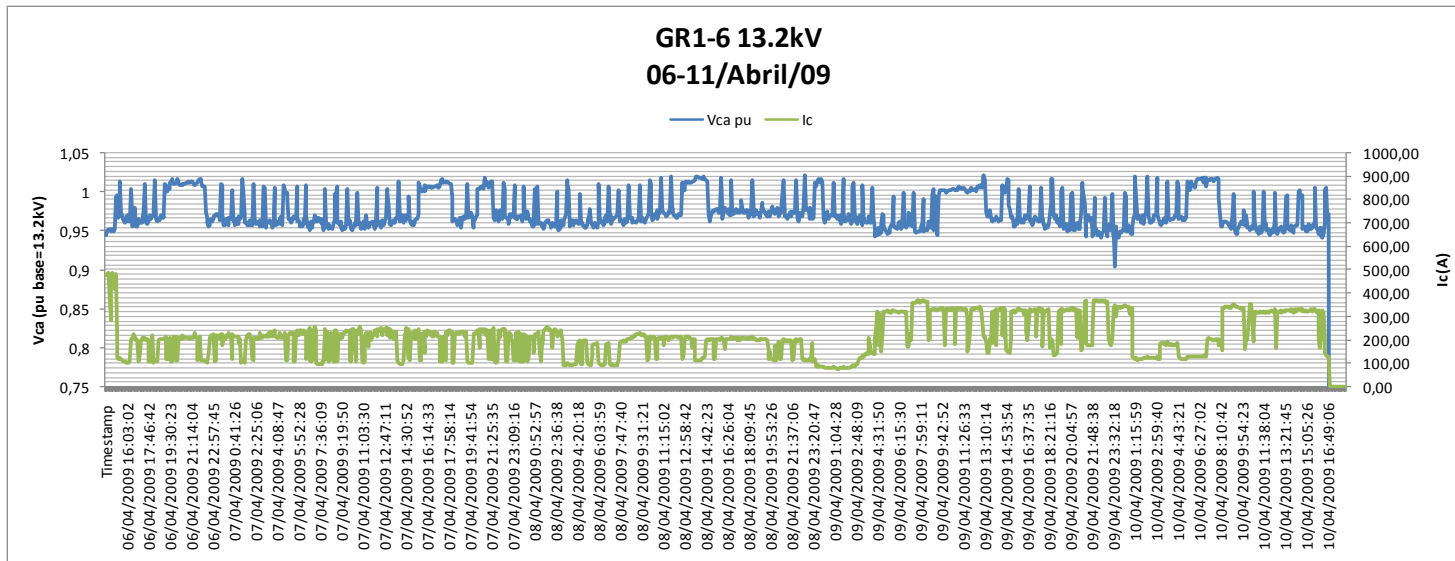
Anexo A. 12: Gráfica estadística de eventos obtenidos por Fluke 06/Abril



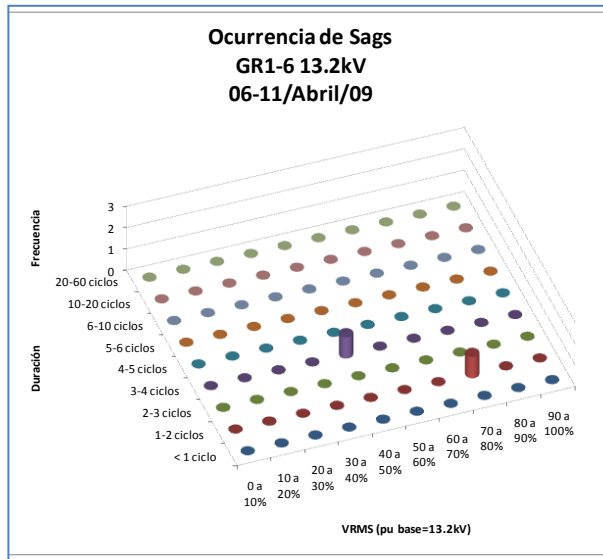
Anexo A. 13: Historial de Vab obtenido por Fluke 06-11/Abril



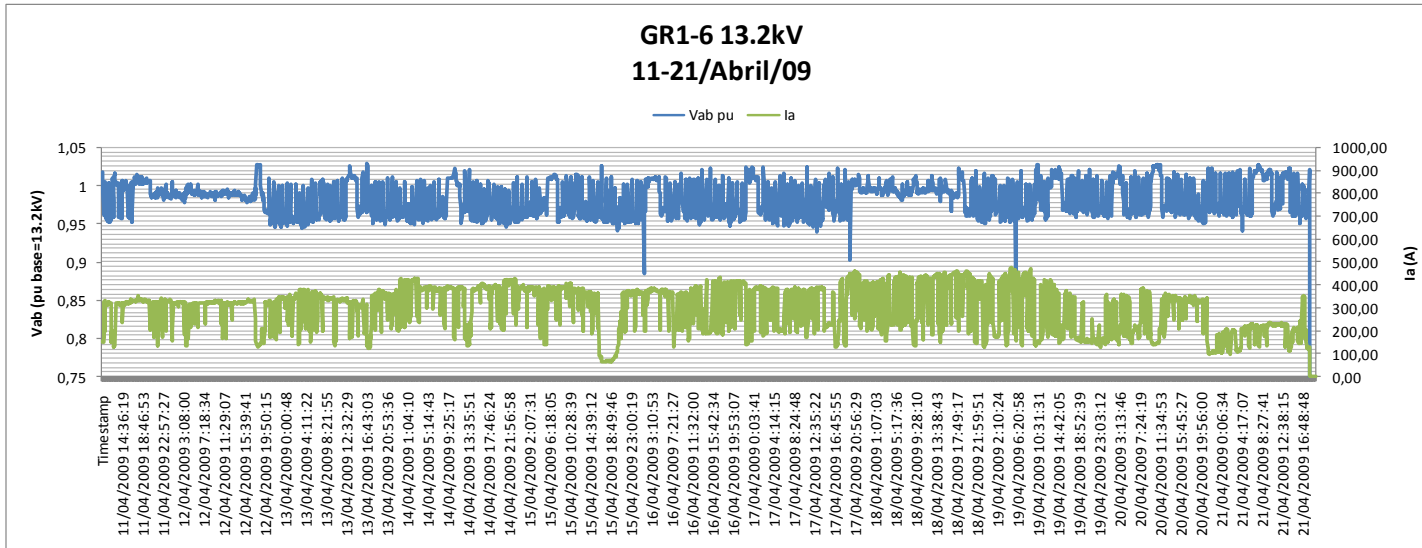
Anexo A. 14: Historial de Vbc obtenido por Fluke 06-11/Abril



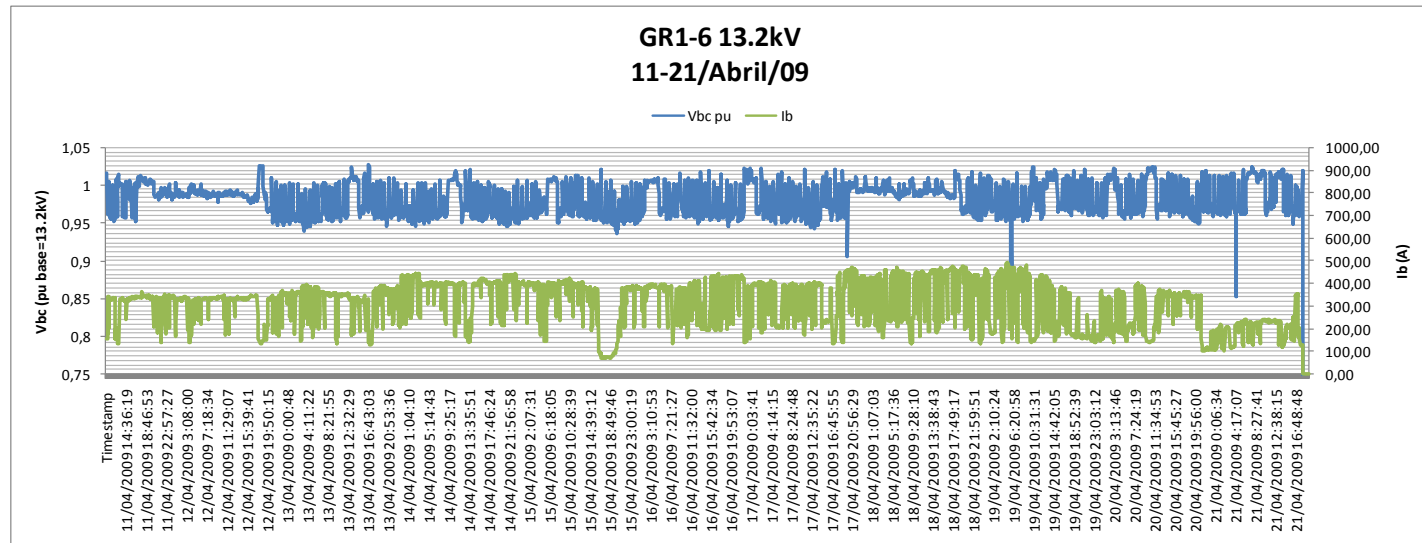
Anexo A. 15: Historial de Vca obtenido por Fluke 06-11/Abril



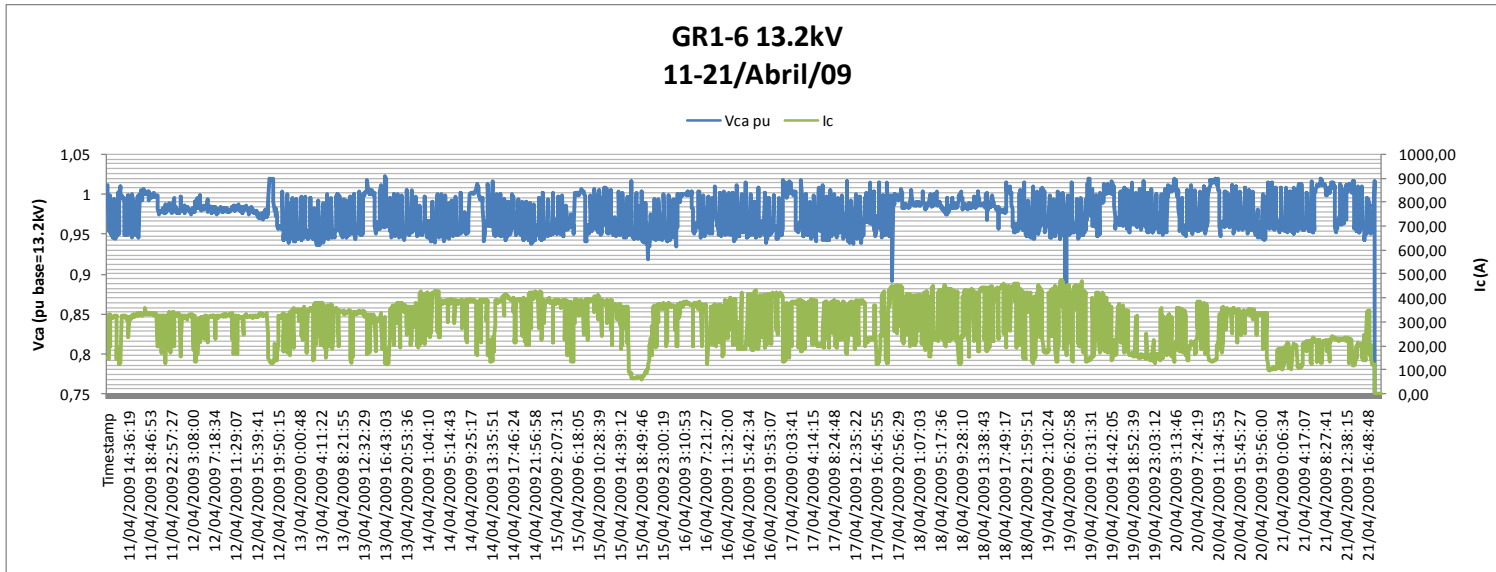
Anexo A. 16: Gráfica Estadística de eventos obtenidos por Fluke 06-11/Abril



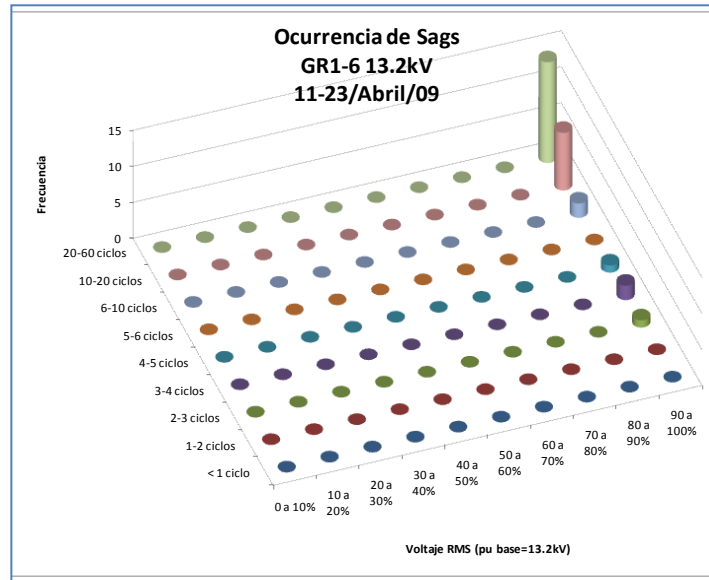
Anexo A. 17: Historial de Vab obtenido por Fluke 11-21/Abril



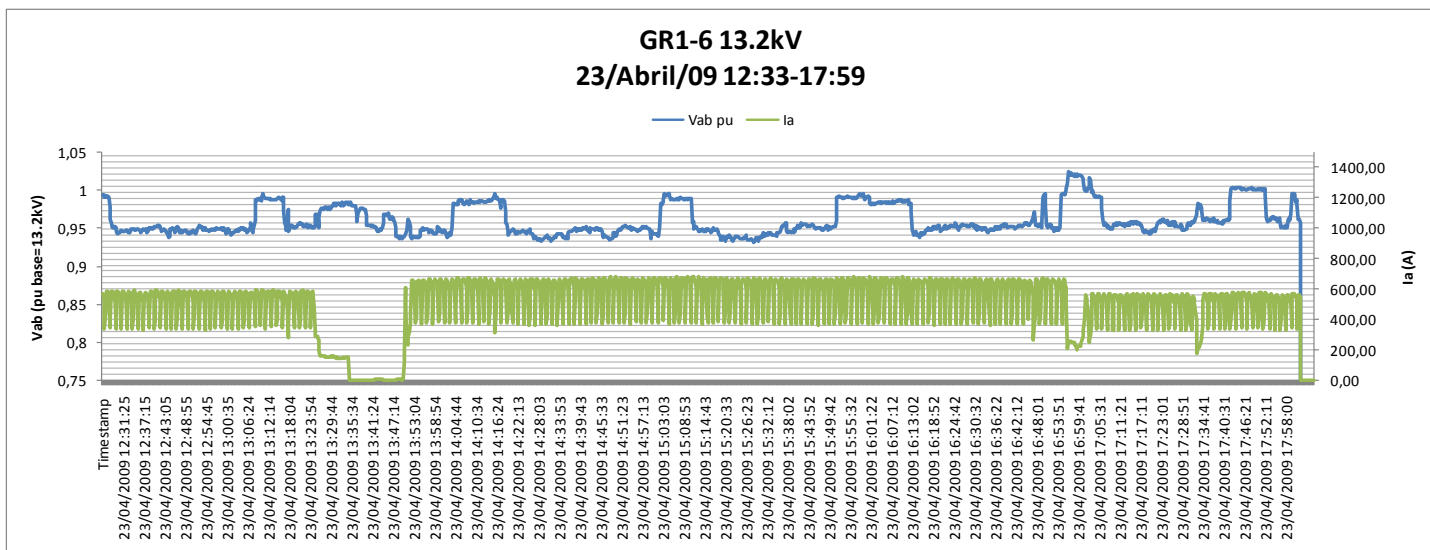
Anexo A. 18: Historial de Vbc obtenido por Fluke 11-21/Abril



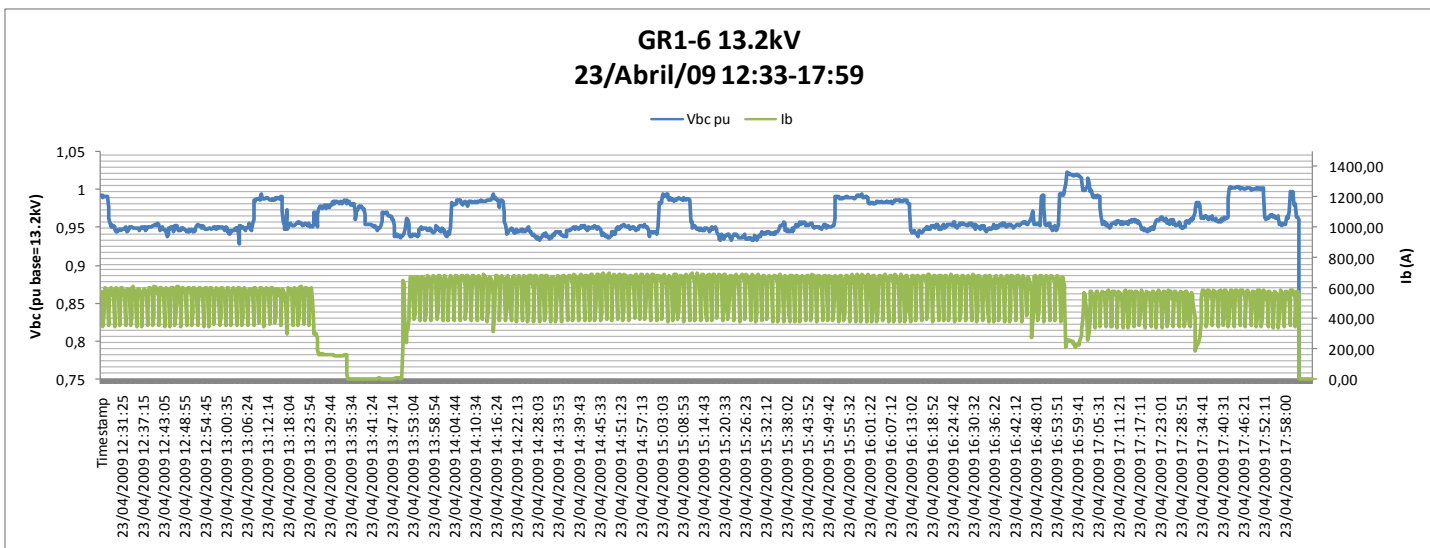
Anexo A. 19: Historial de Vca obtenido por Fluke 11-21/Abril



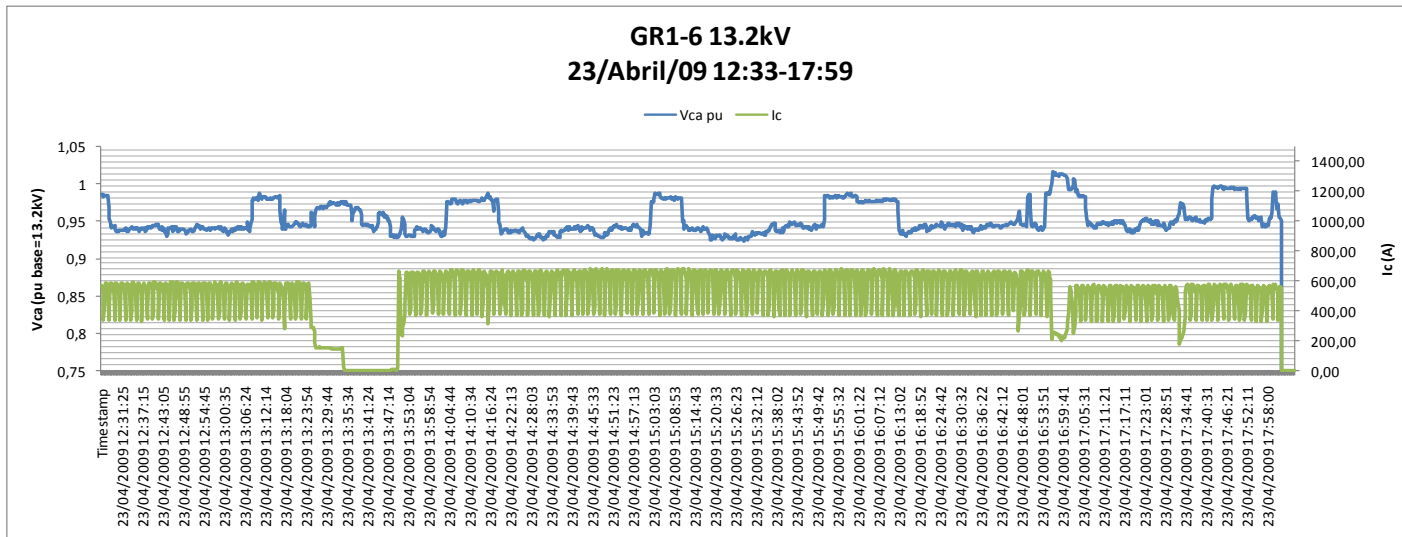
Anexo A. 20: Gráfica estadística de eventos obtenidos por Fluke 11-23/Abril



Anexo A. 21: Historial de Vab obtenido por Fluke 23/Abril

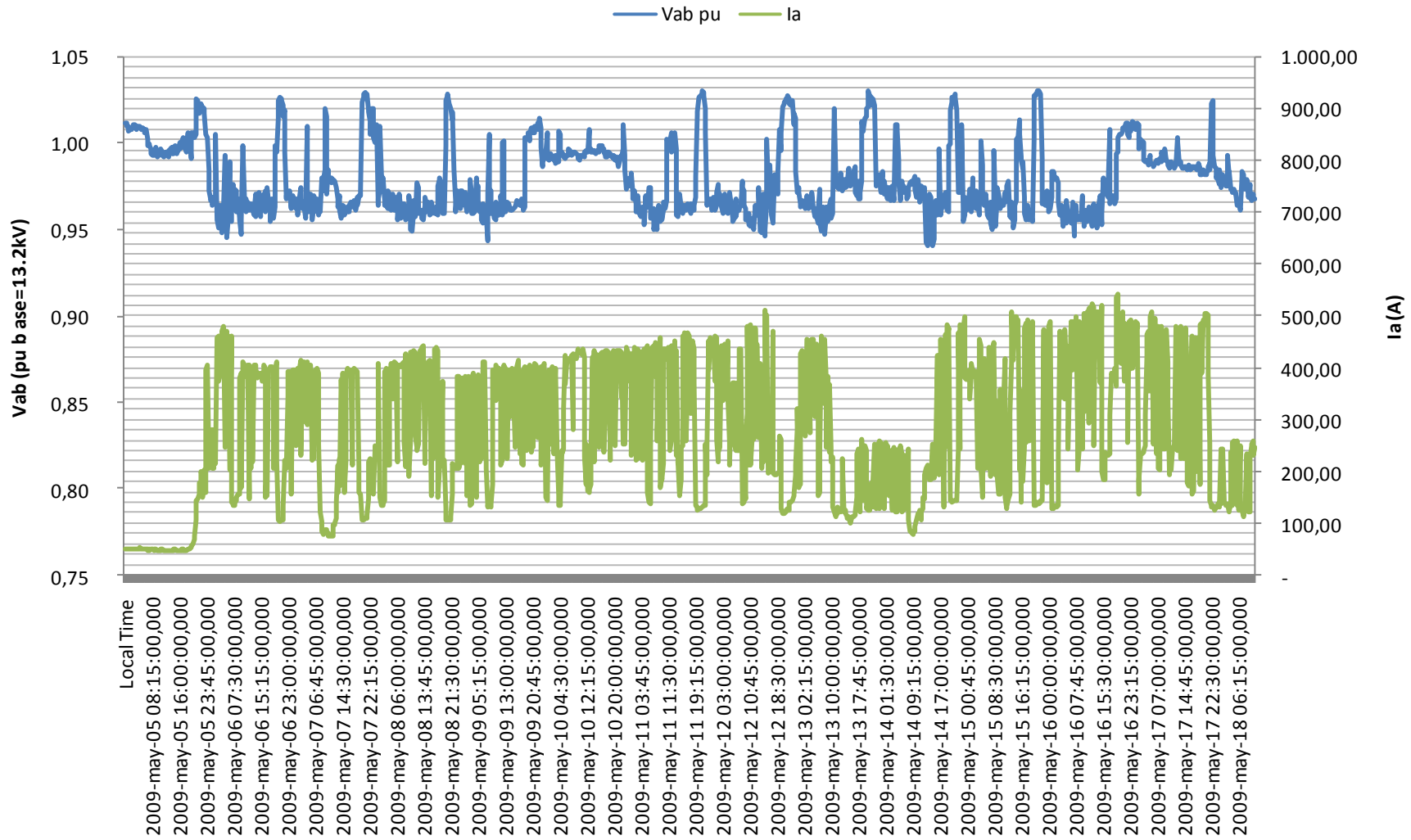


Anexo A. 22: Historial de Vbc obtenido por Fluke 23/Abril



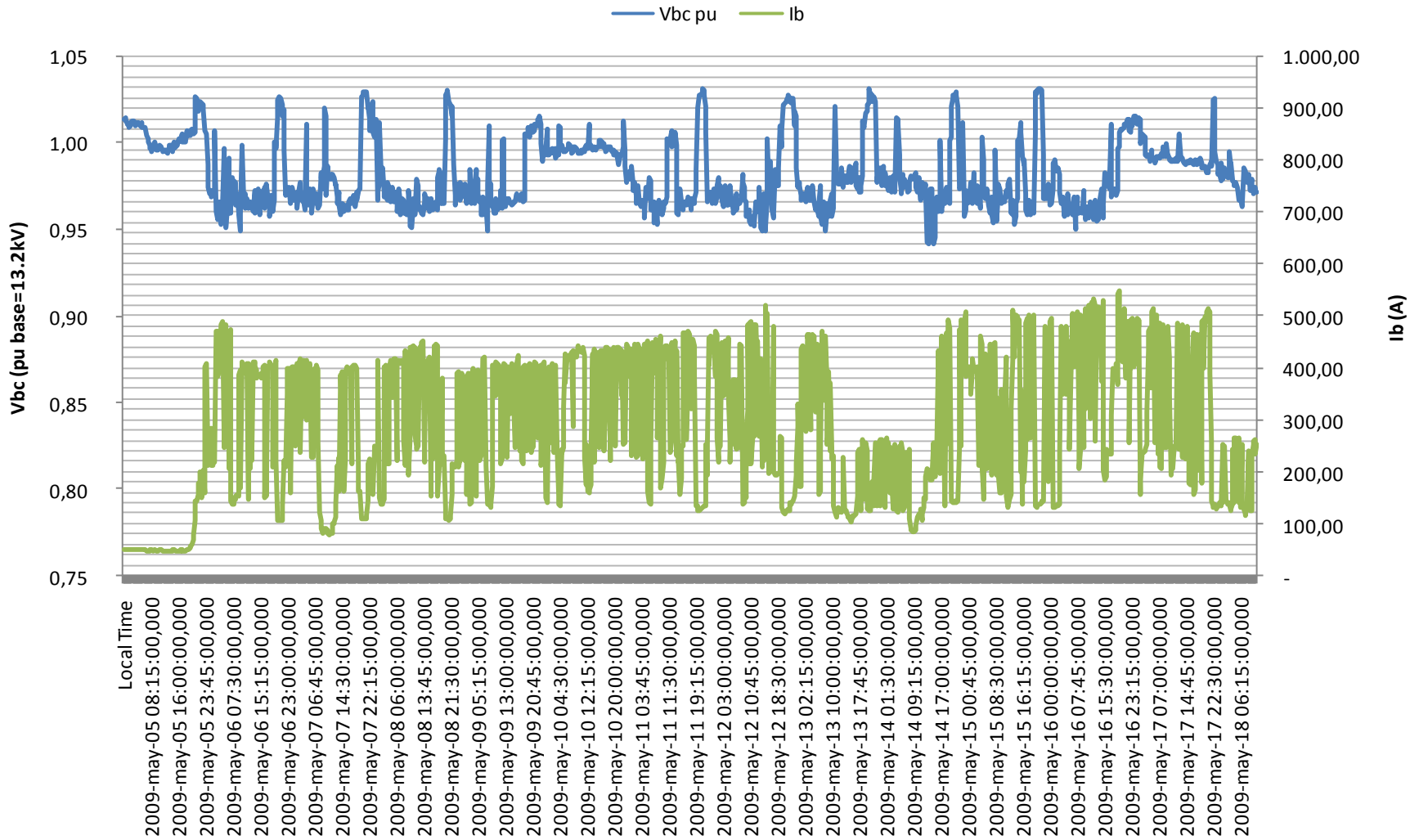
Anexo A. 23: Historial de Vca obtenido por Fluke 23/Abril

Gr1-6 13.2 kV 05-18/Mayo/09



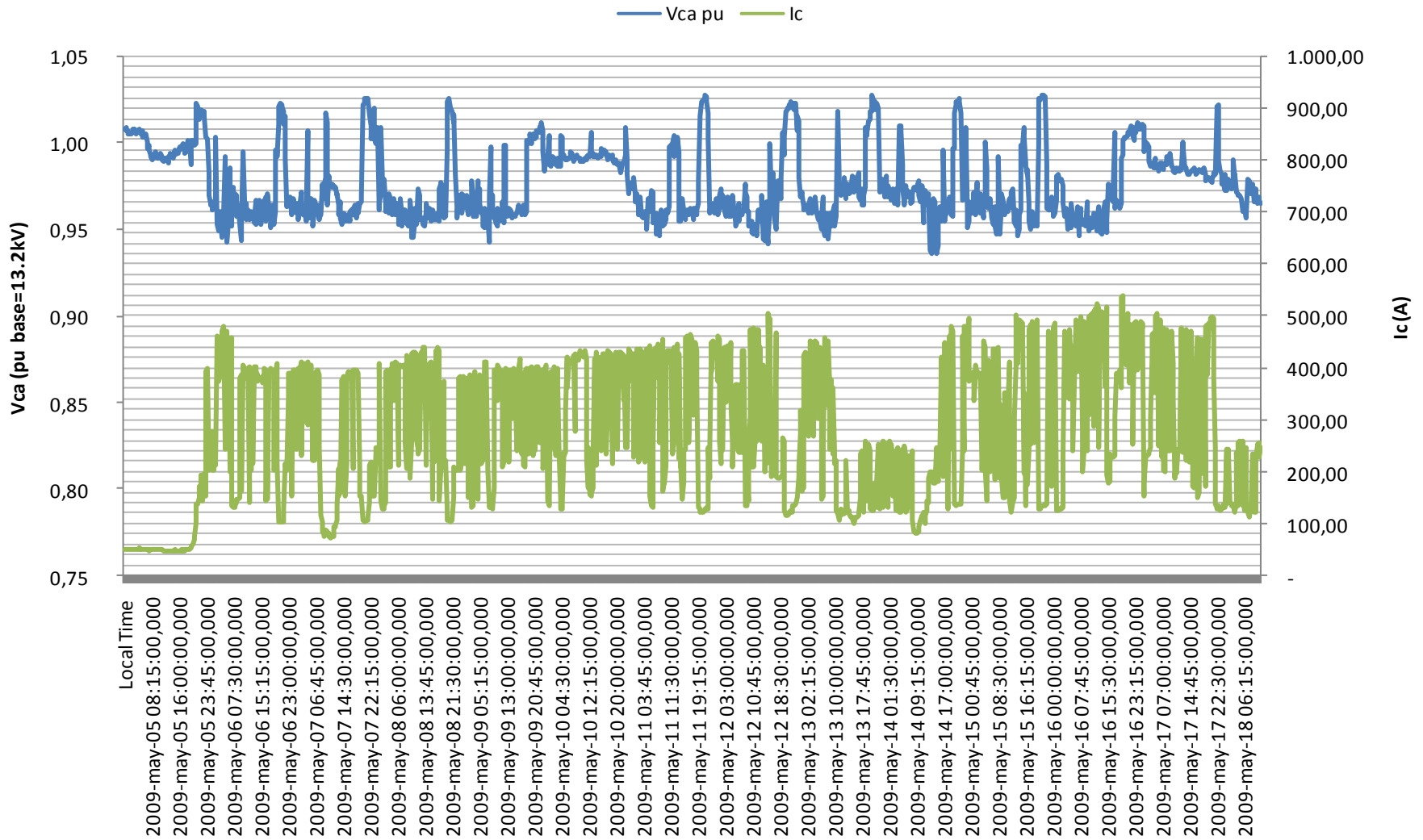
Anexo A. 27: Historial de Vab obtenido por ION 05-18/Mayo

Gr1-6 13.2 kV 05-18/Mayo/09



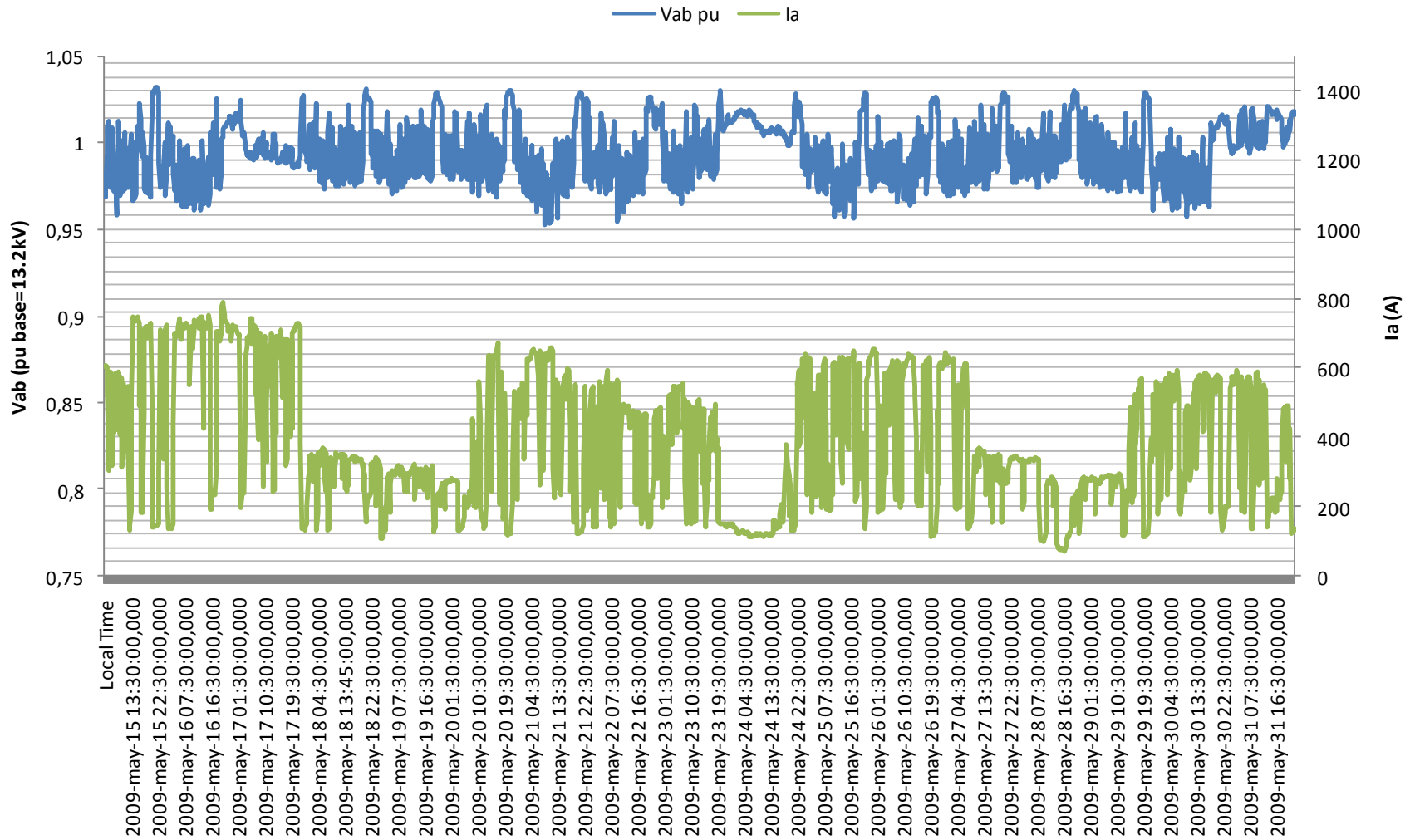
Anexo A. 28: Historial de Vbc obtenido por ION 05-18/Mayo

Gr1-6 13.2 kV 05-18/Mayo/09



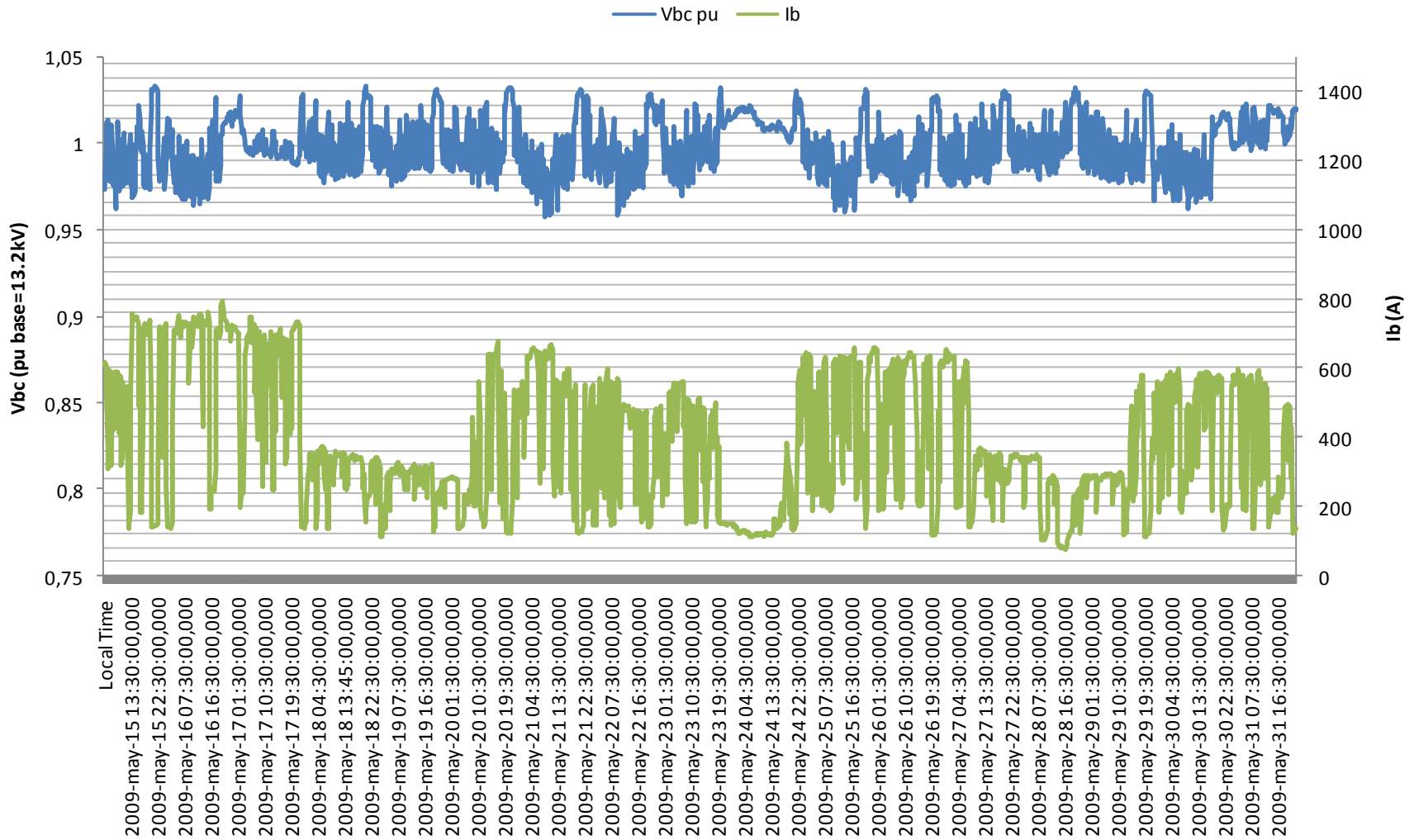
Anexo A. 29: Historial de Vca obtenido por ION 05-18/Mayo

Gr1-6 13.2kV 15-31/Mayo/09



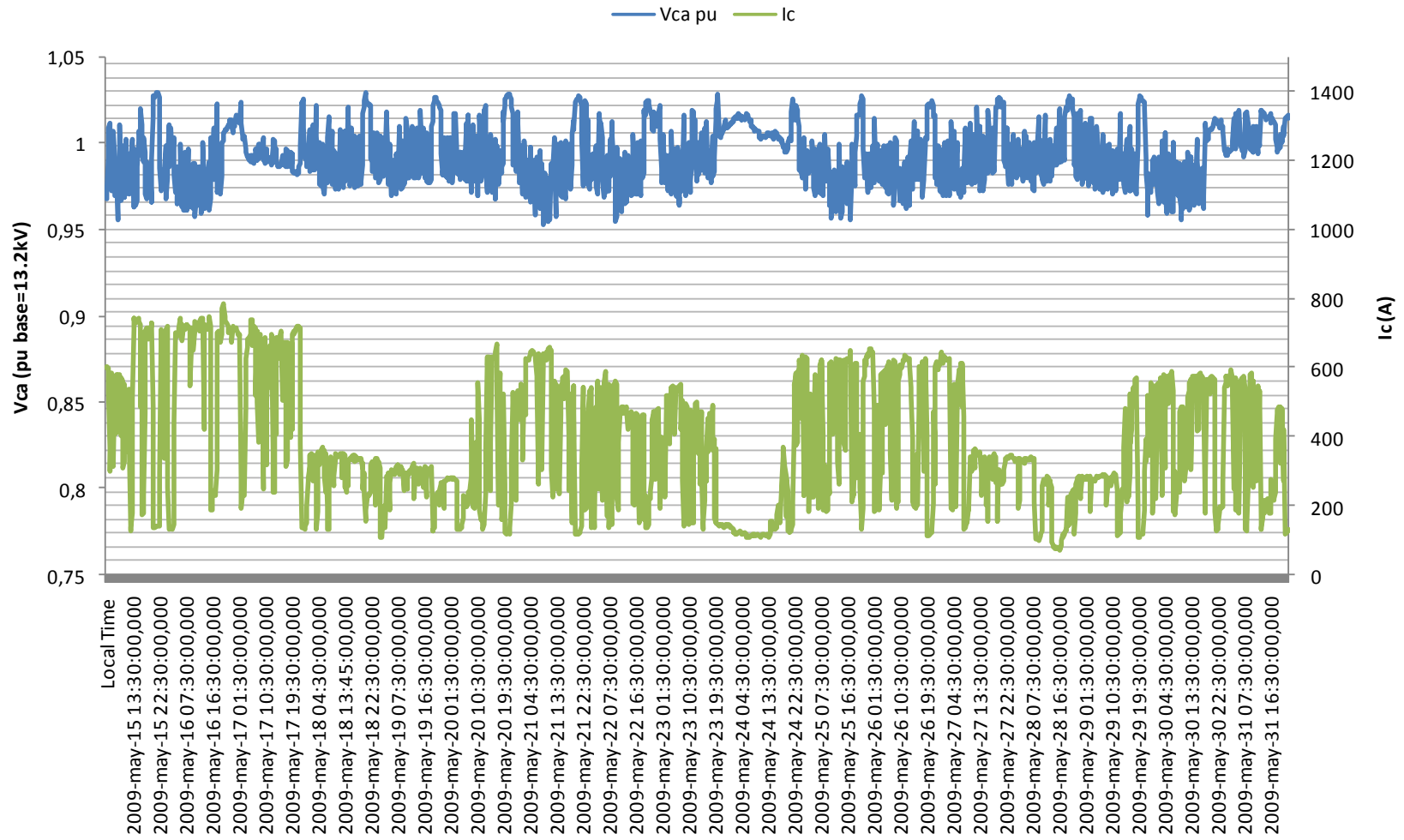
Anexo A. 30: Historial de Vab obtenido por ION 15-31/Mayo

Gr1-6 13.2kV 15-31/Mayo/09



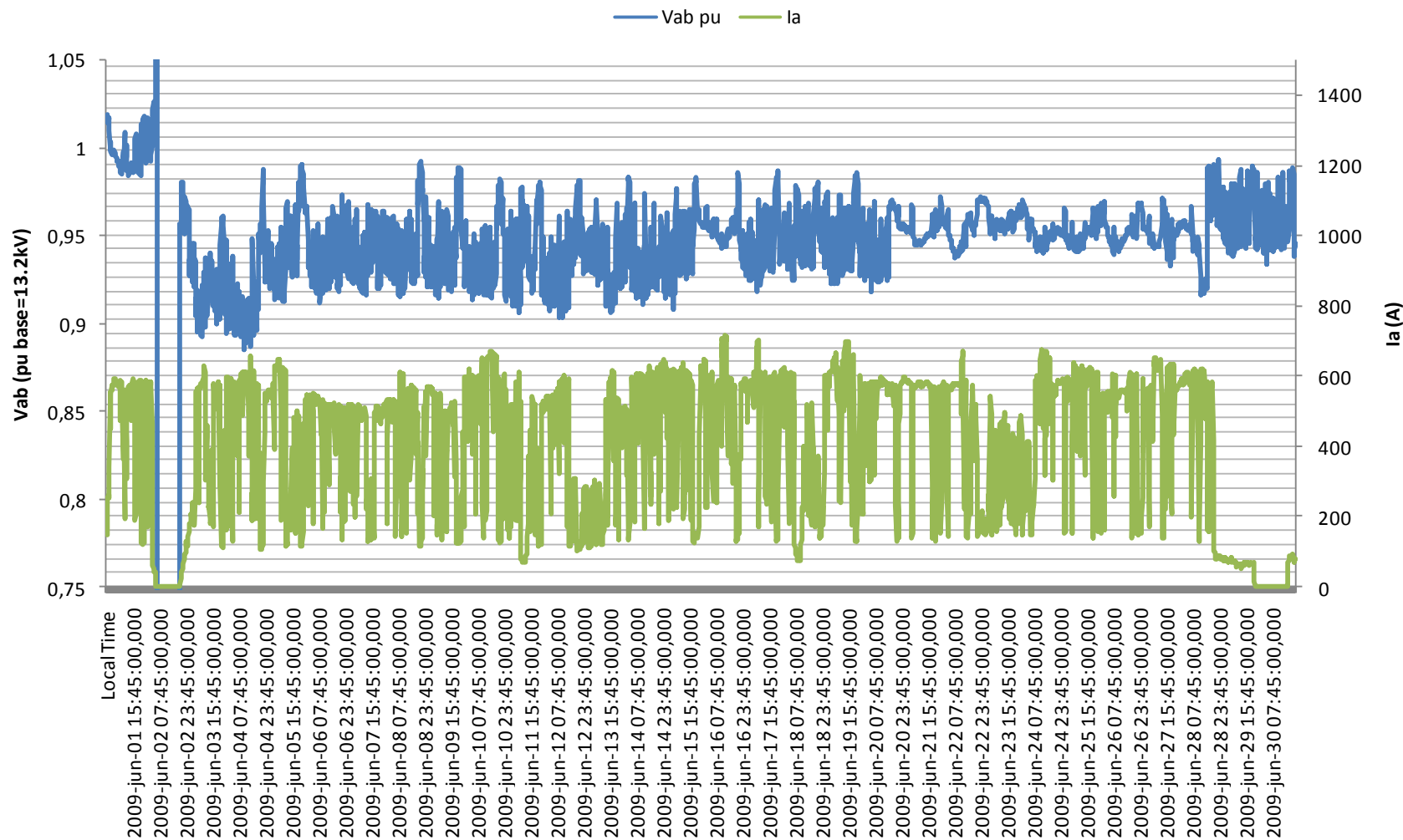
Anexo A. 31: Historial de Vbc obtenido por ION 15-31/Mayo

Gr1-6 13.2kV 15-31/Mayo/09

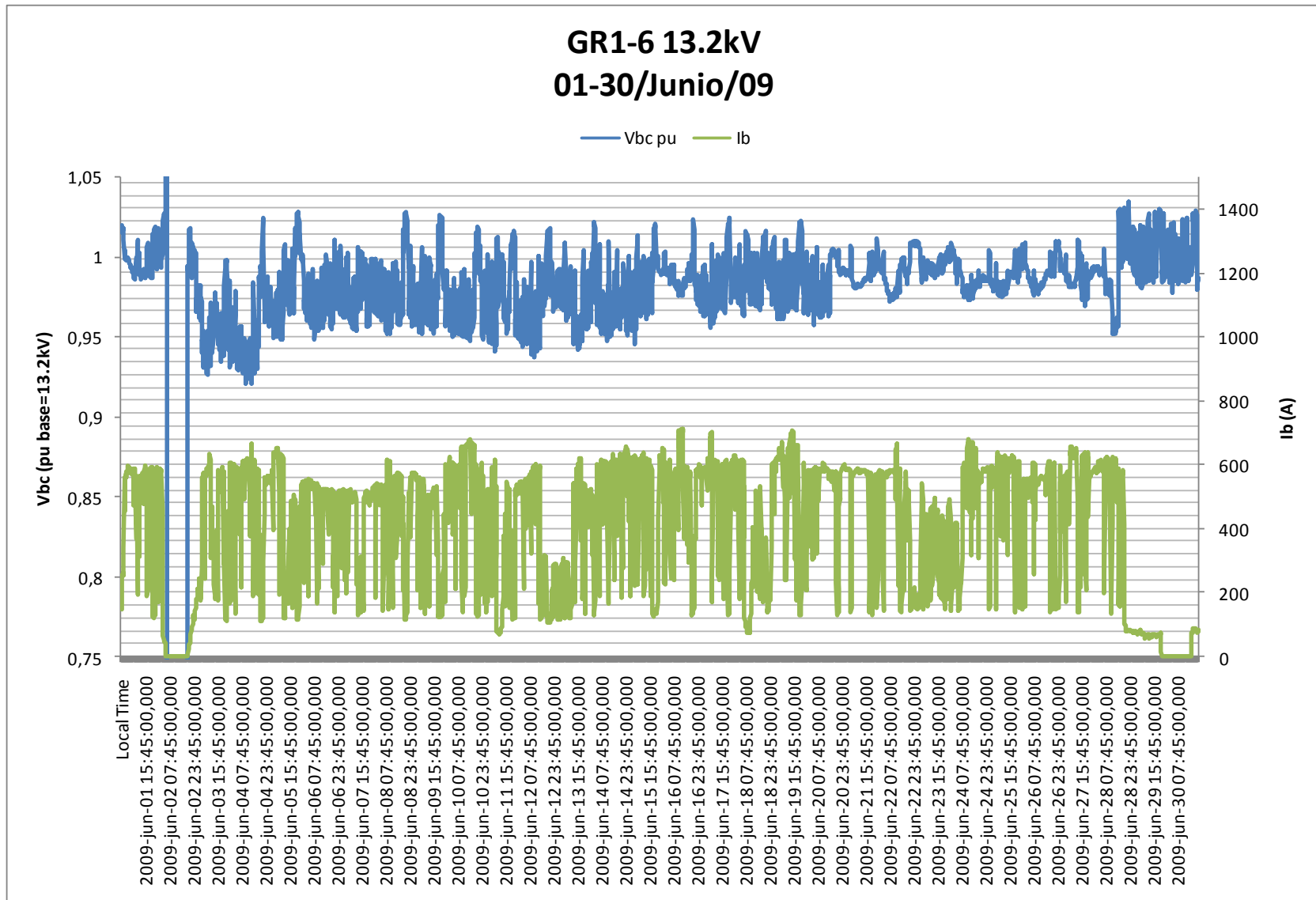


Anexo A. 32: Historial de Vca obtenido por ION 15-31/Mayo

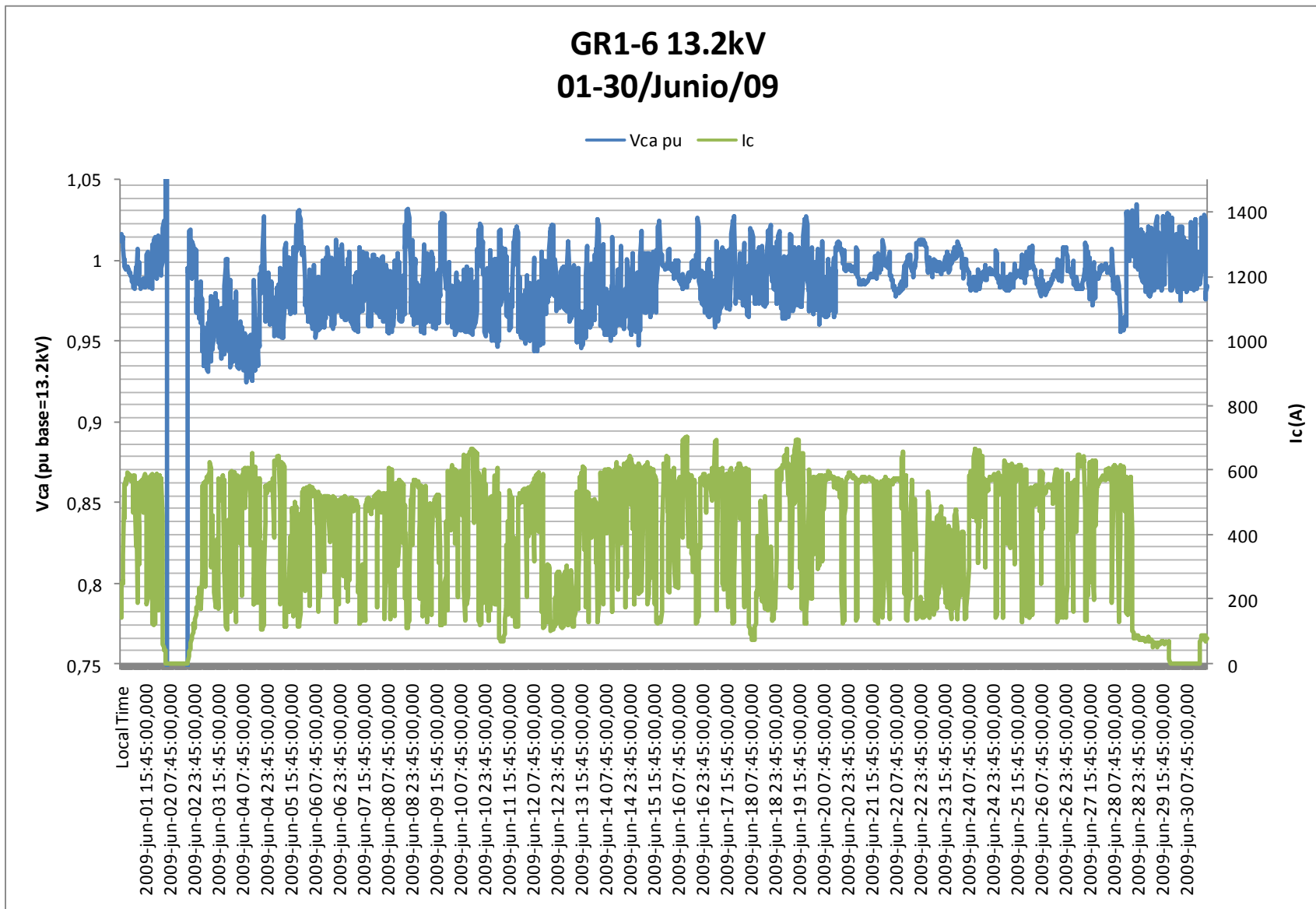
GR1-6 13.2kV 01-30/Junio/09



Anexo A. 33: Historial de Vab obtenido por ION 01-30/Junio

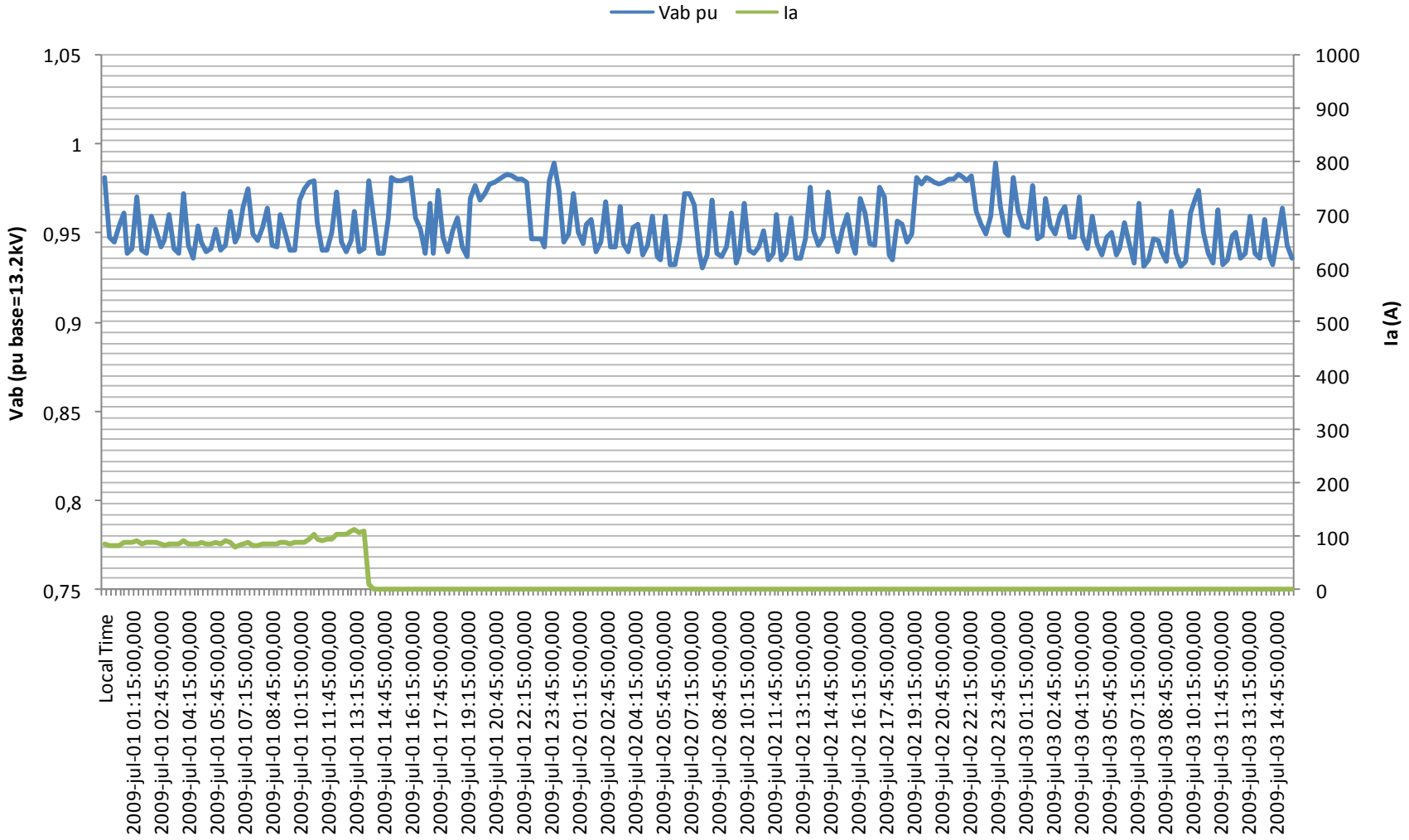


Anexo A. 34: Historial de Vbc obtenido por ION 01-30/Junio

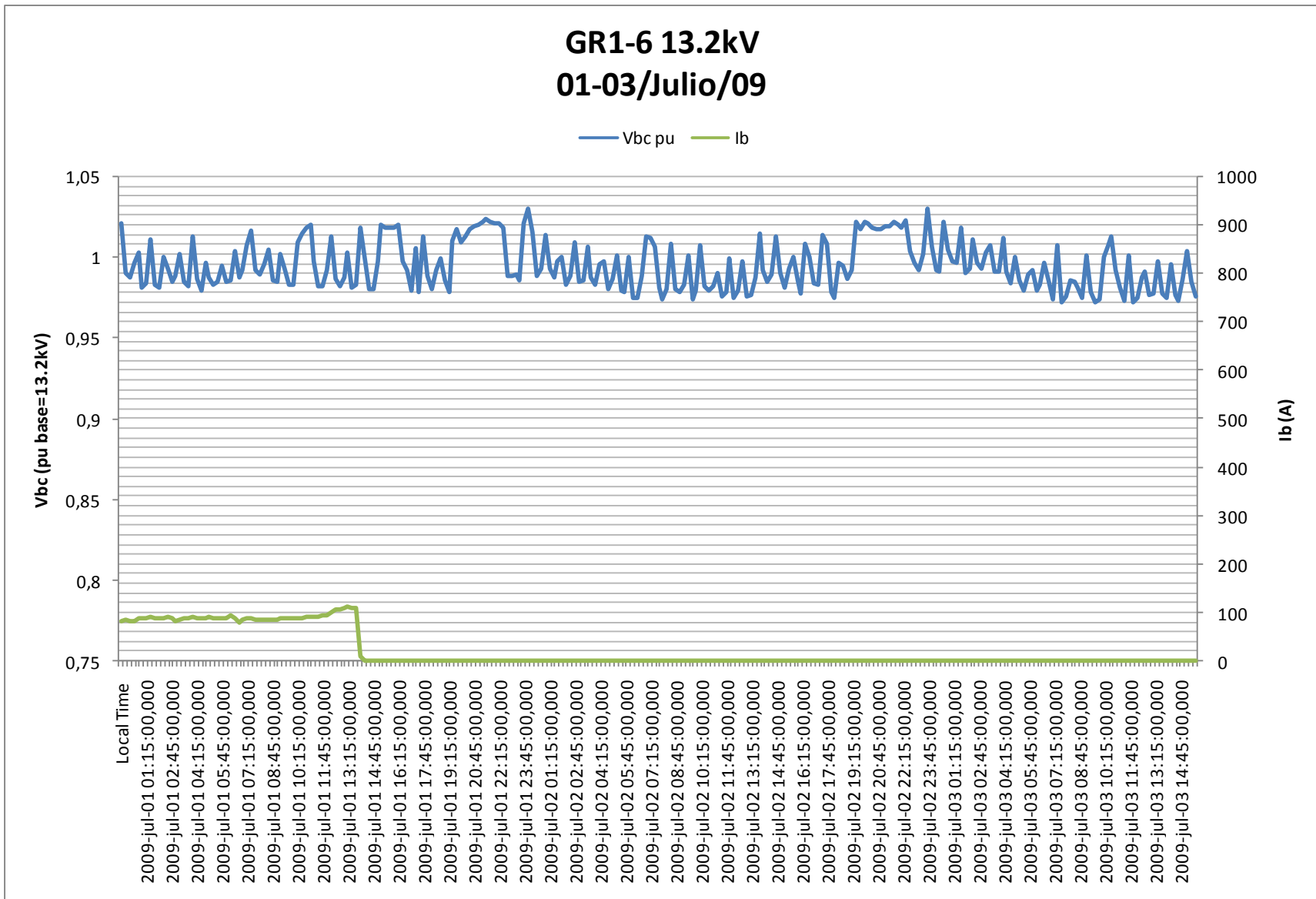


Anexo A. 35: Historial de Vca obtenido por ION 01-30/Junio

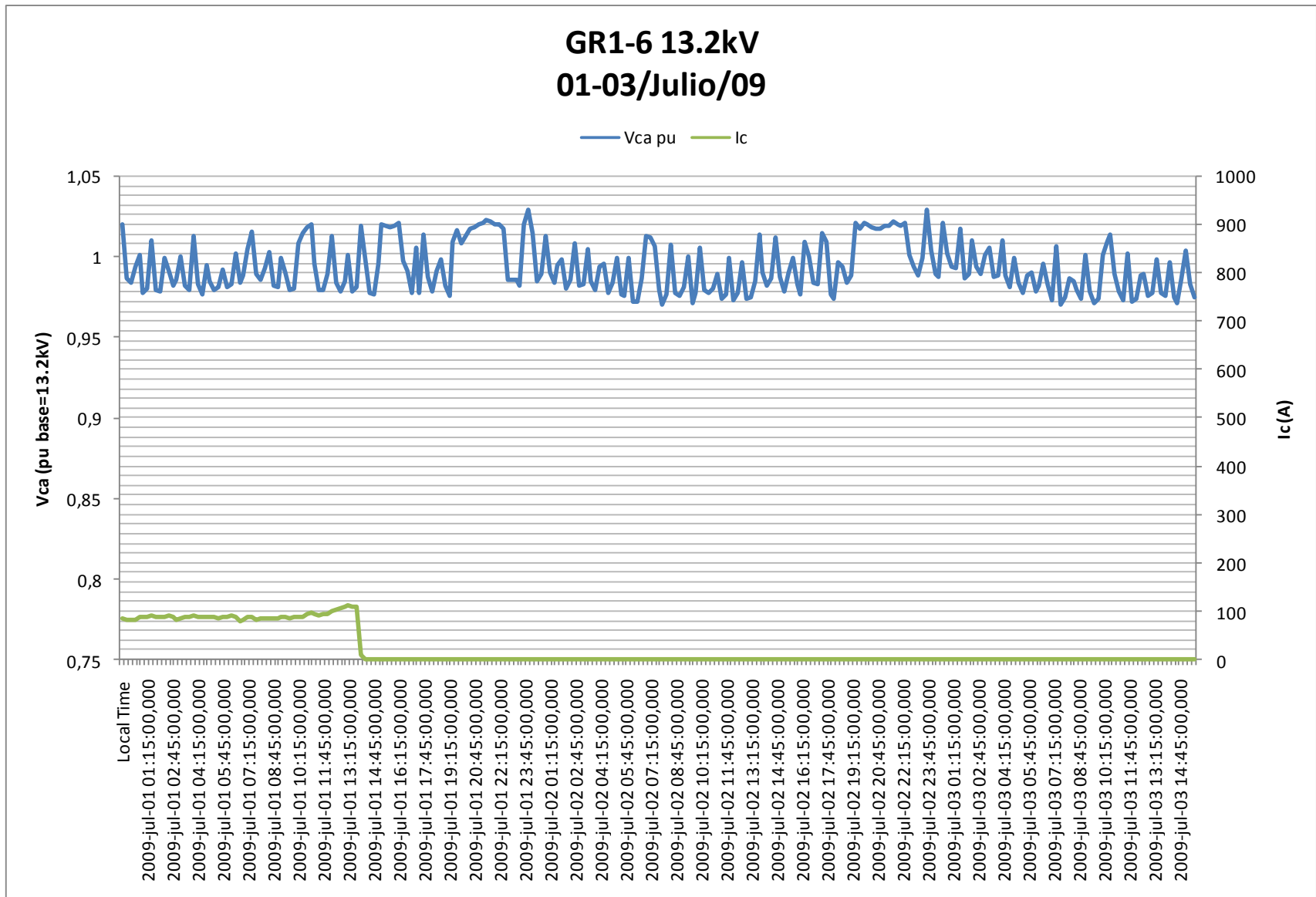
GR1-6 13.2kV 01-03/Julio/09



Anexo A. 36: Historial de Vab obtenido por ION 01-03/Julio

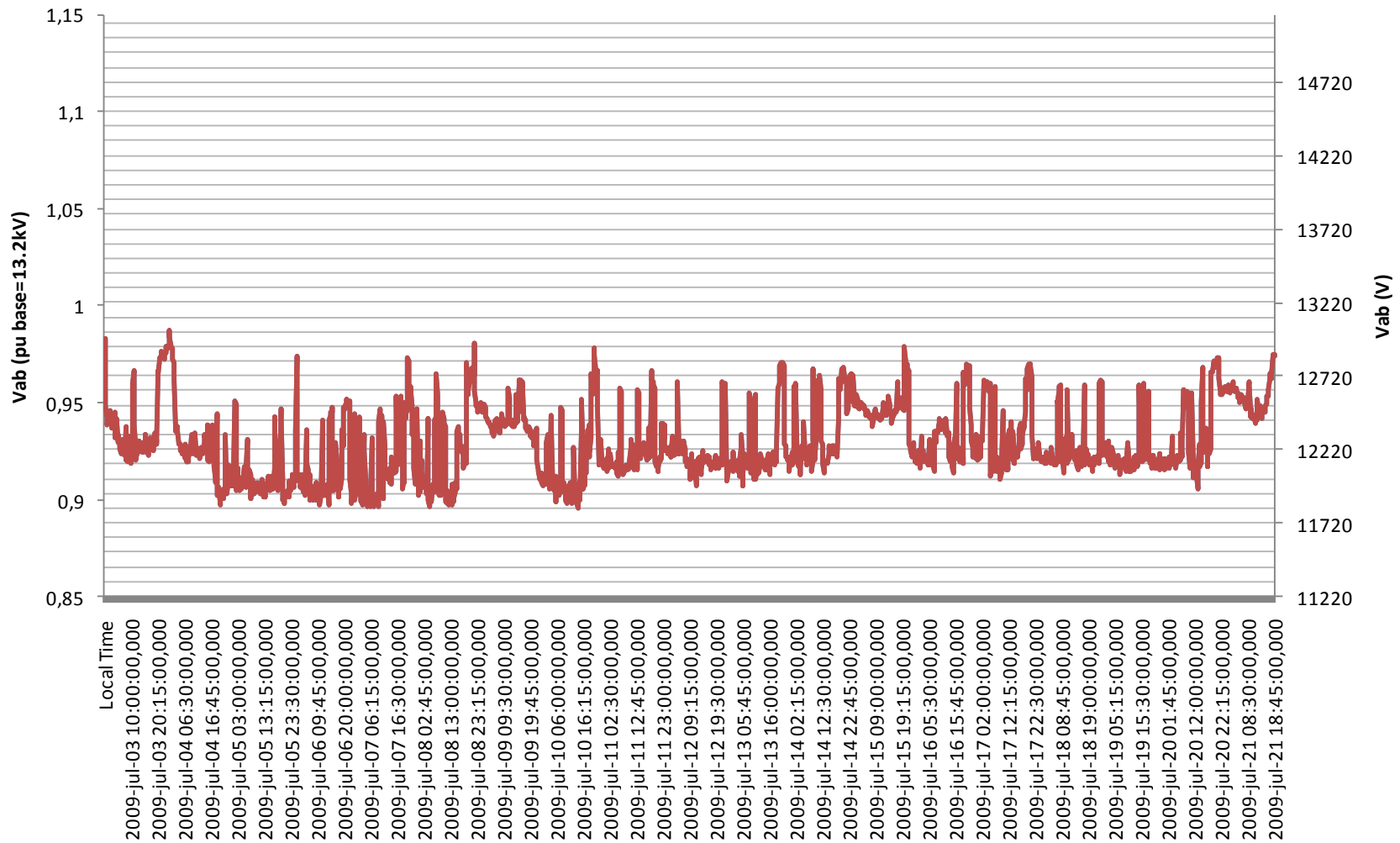


Anexo A. 37: Historial de Vbc obtenido por ION 01-03/Julio



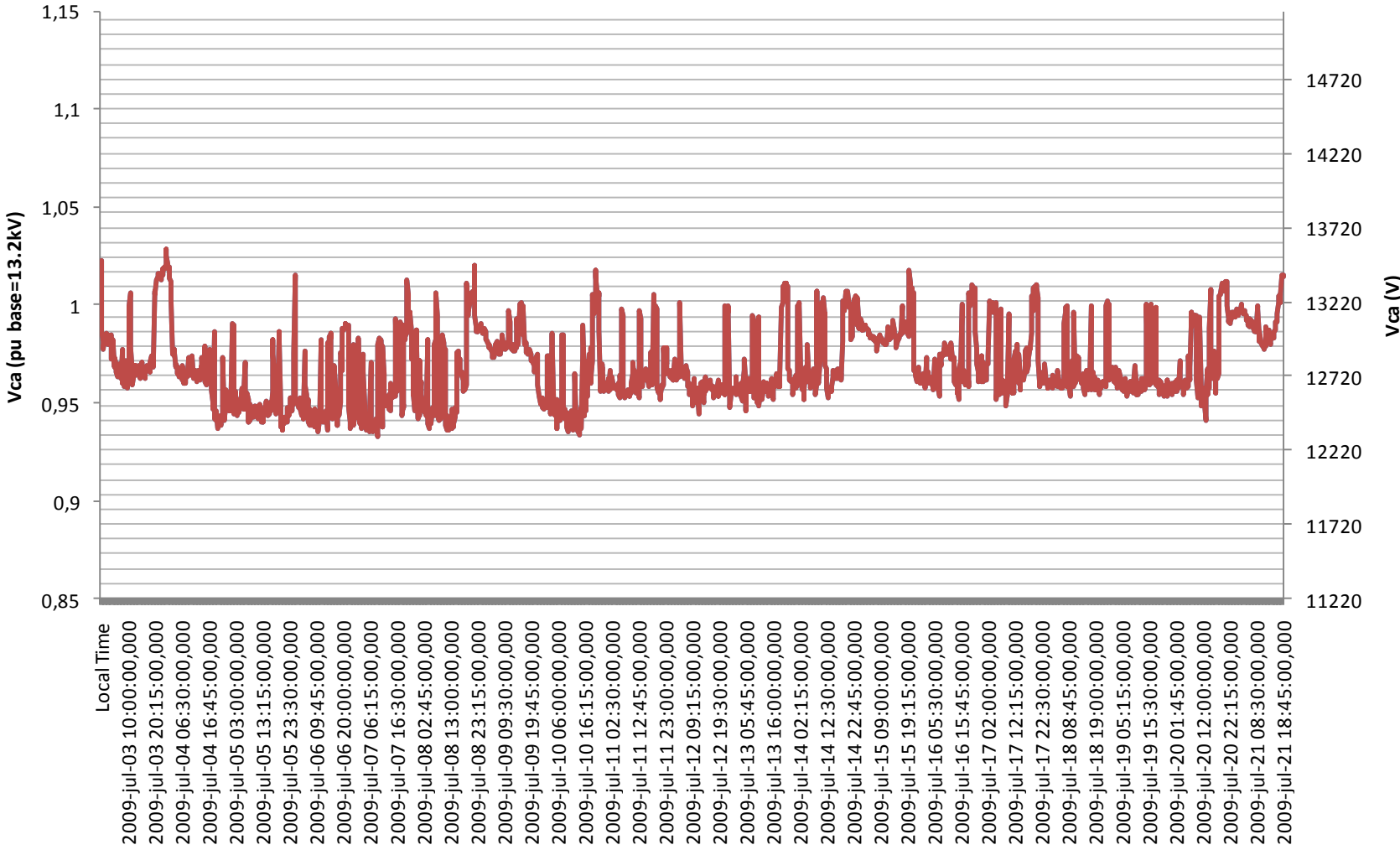
Anexo A. 38: Historial de Vca obtenido por ION 01-03/Julio

GR1-6 13.2kV 03-21/Julio/09



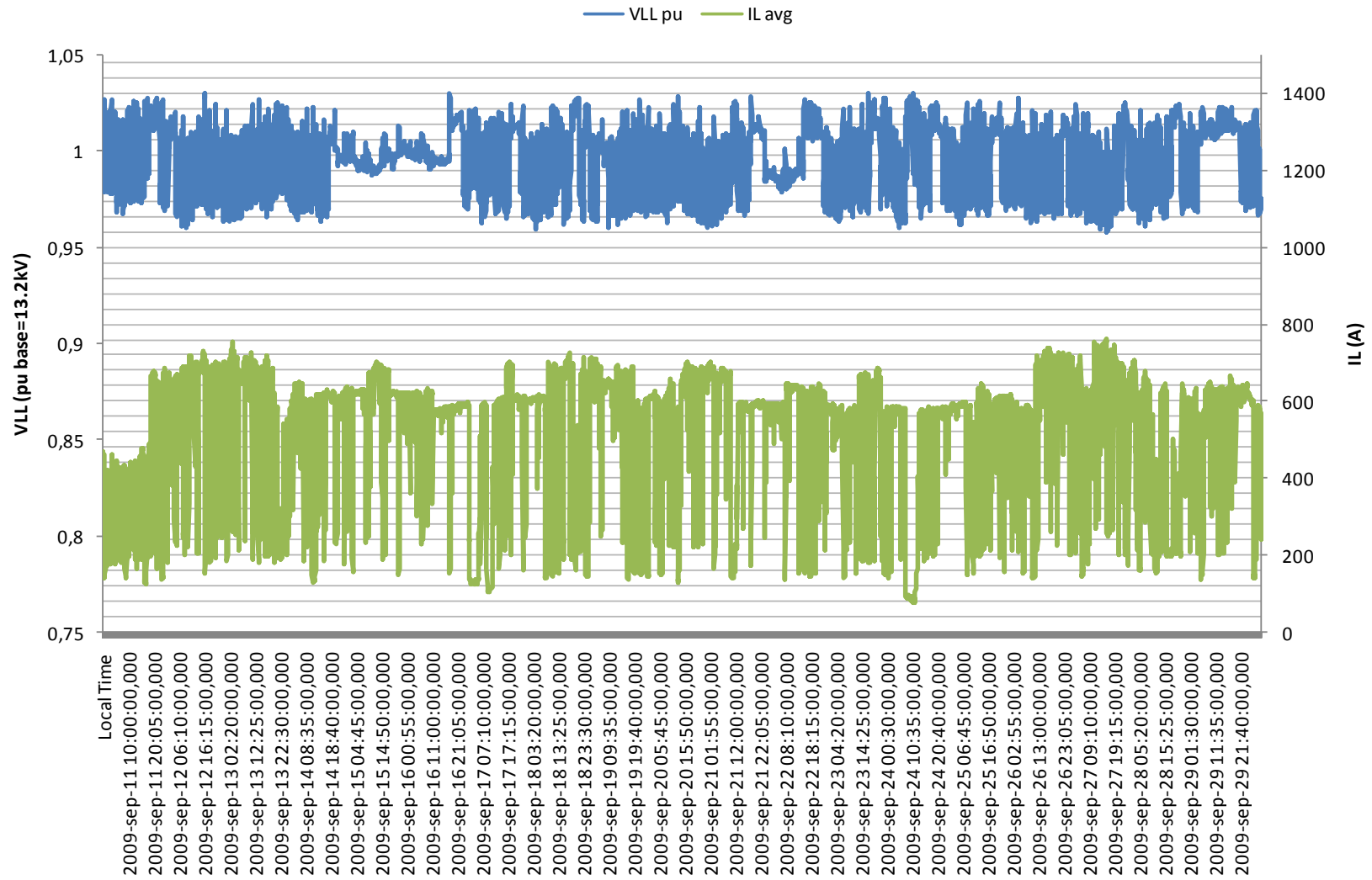
Anexo A. 39: Historial de Vab obtenido por ION 03-21/Julio

GR1-6 13.2kV
03-21/Julio/09

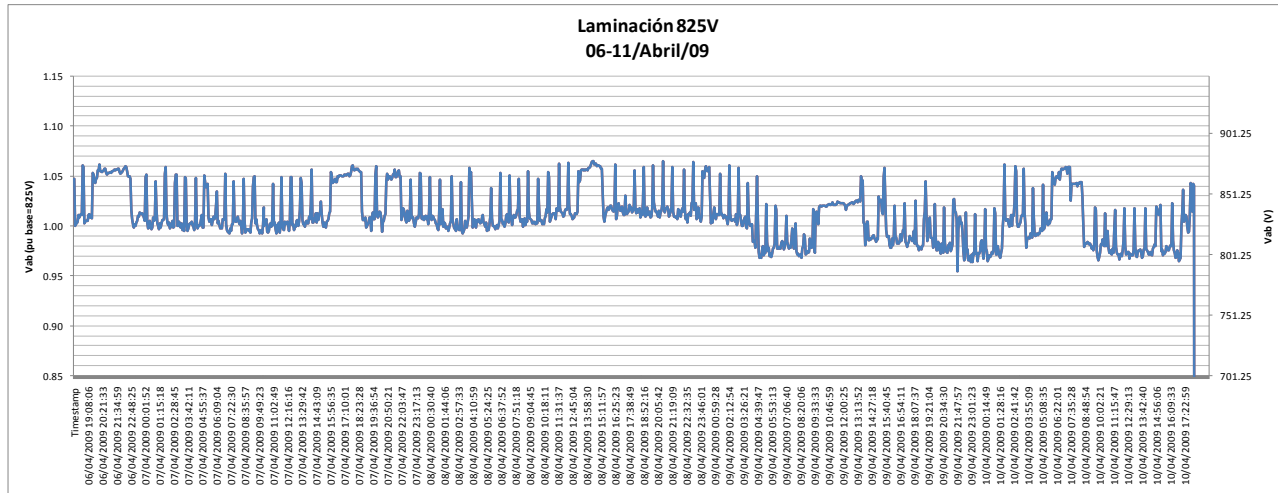


Anexo A. 40: Historial de Vca obtenido por ION 03-21/Julio

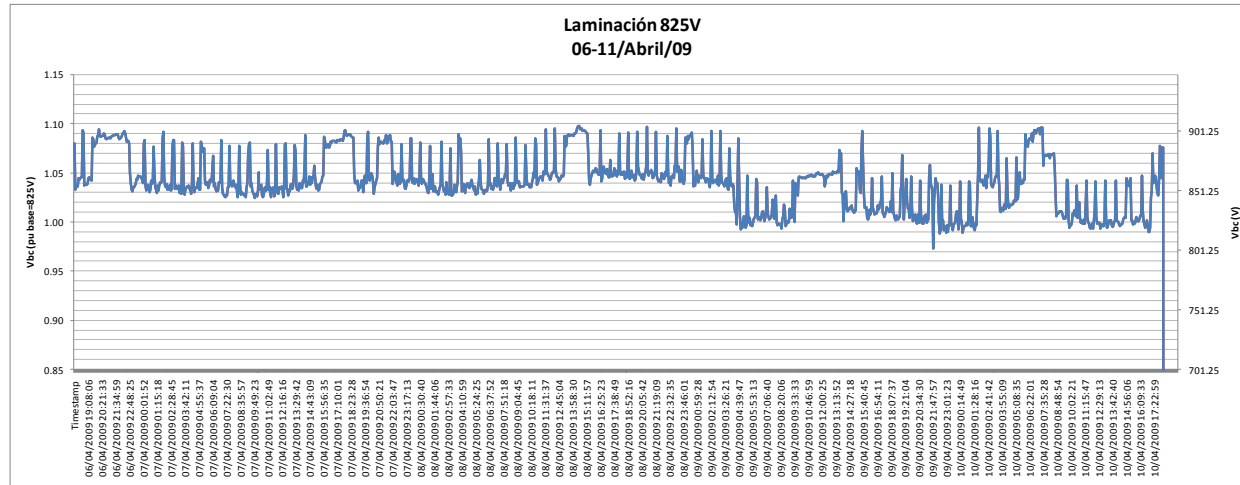
GR1-6 13.2kV 11-29/Sept/09



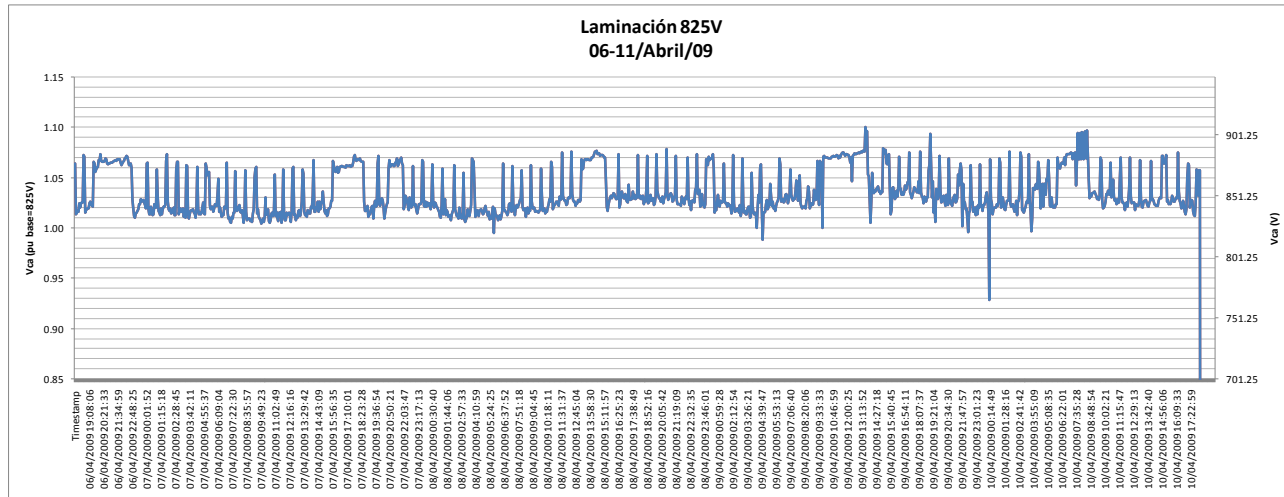
Anexo A. 41: Historial de VLL obtenido por ION 11-29/Sept



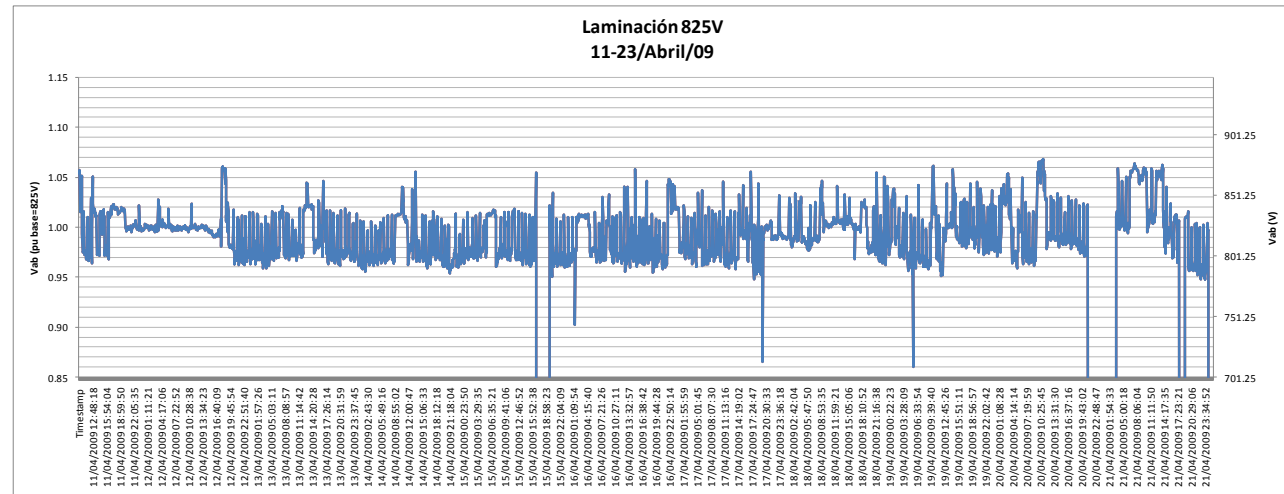
Anexo A. 42: Historial de Vab obtenido por Fluke 06-11/Abril



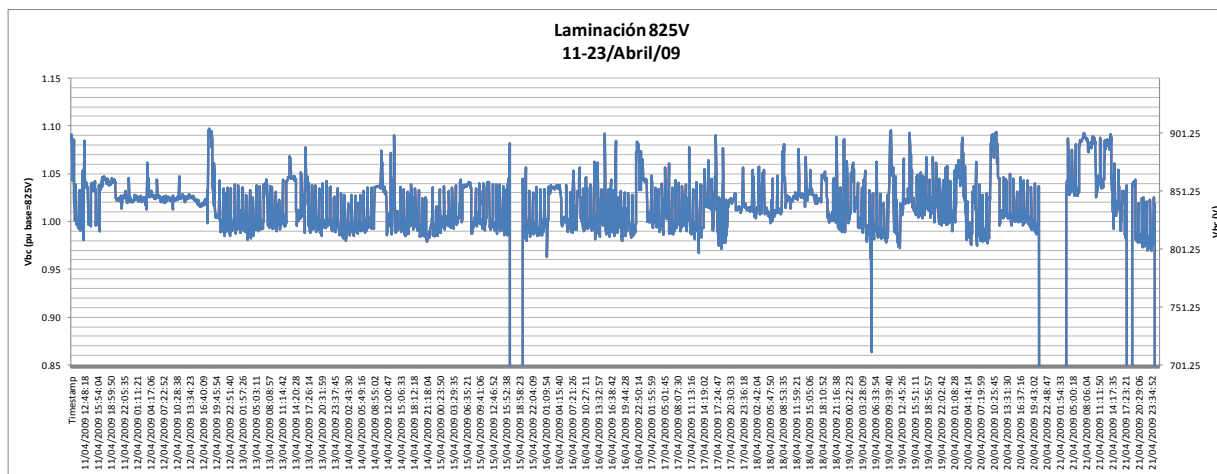
Anexo A. 43: Historial de Vbc obtenido por Fluke 06-11/Abril



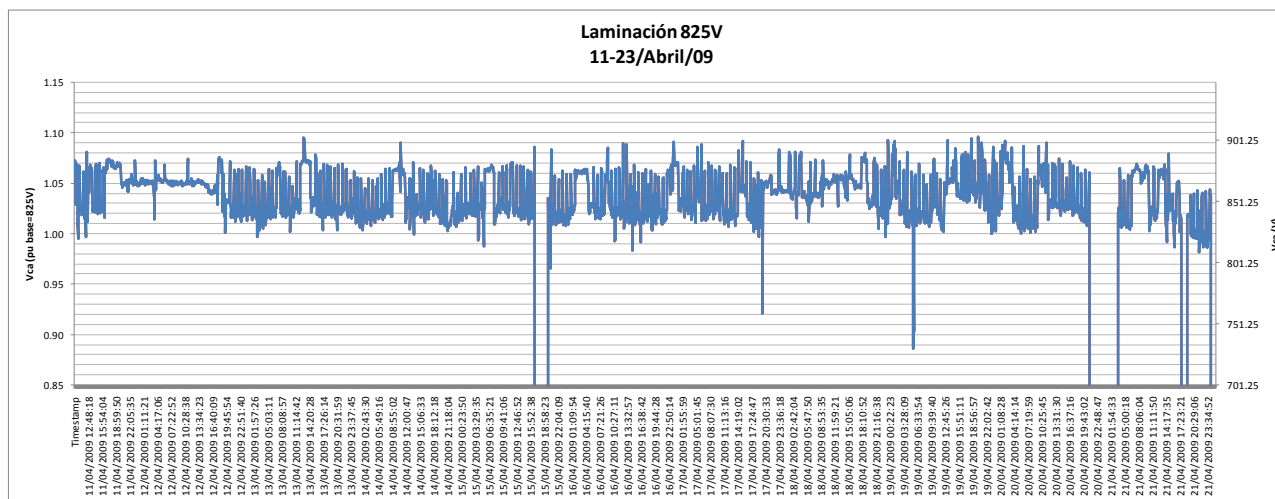
Anexo A. 44: Historial de Vca obtenido por Fluke 06-11/Abril



Anexo A. 45: Historial de Vab obtenido por Fluke 11-23/Abril

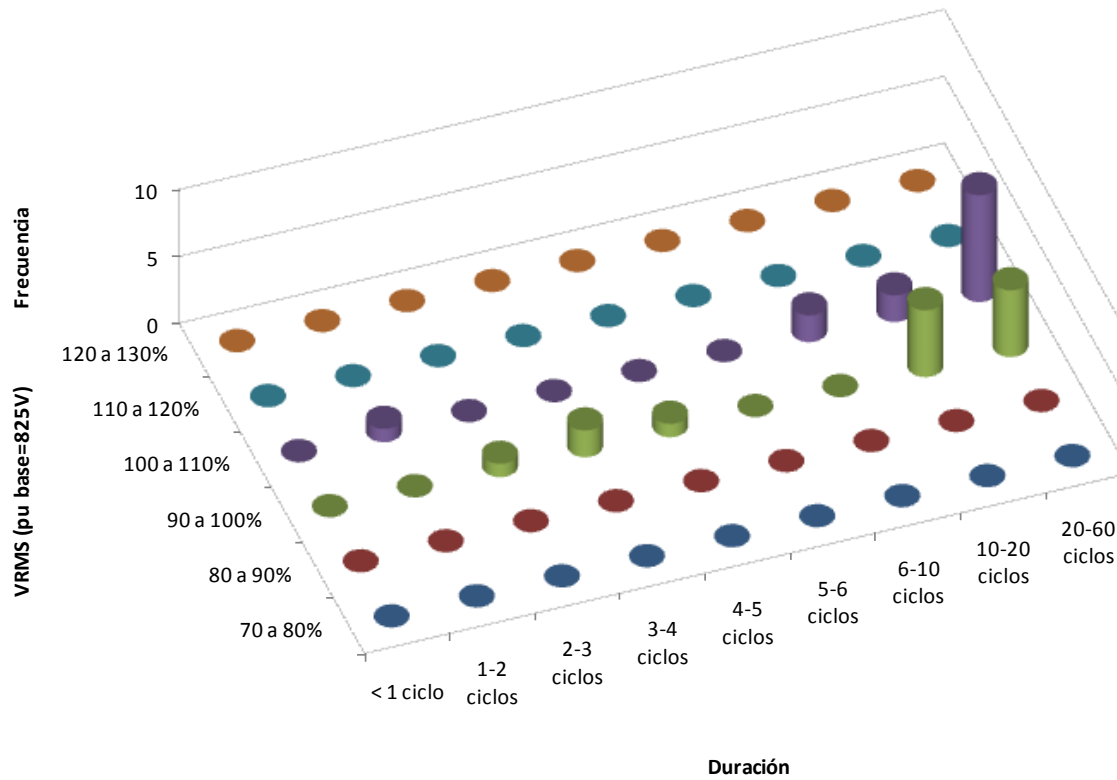


Anexo A. 46: Historial de Vbc obtenido por Fluke 11-23/Abril



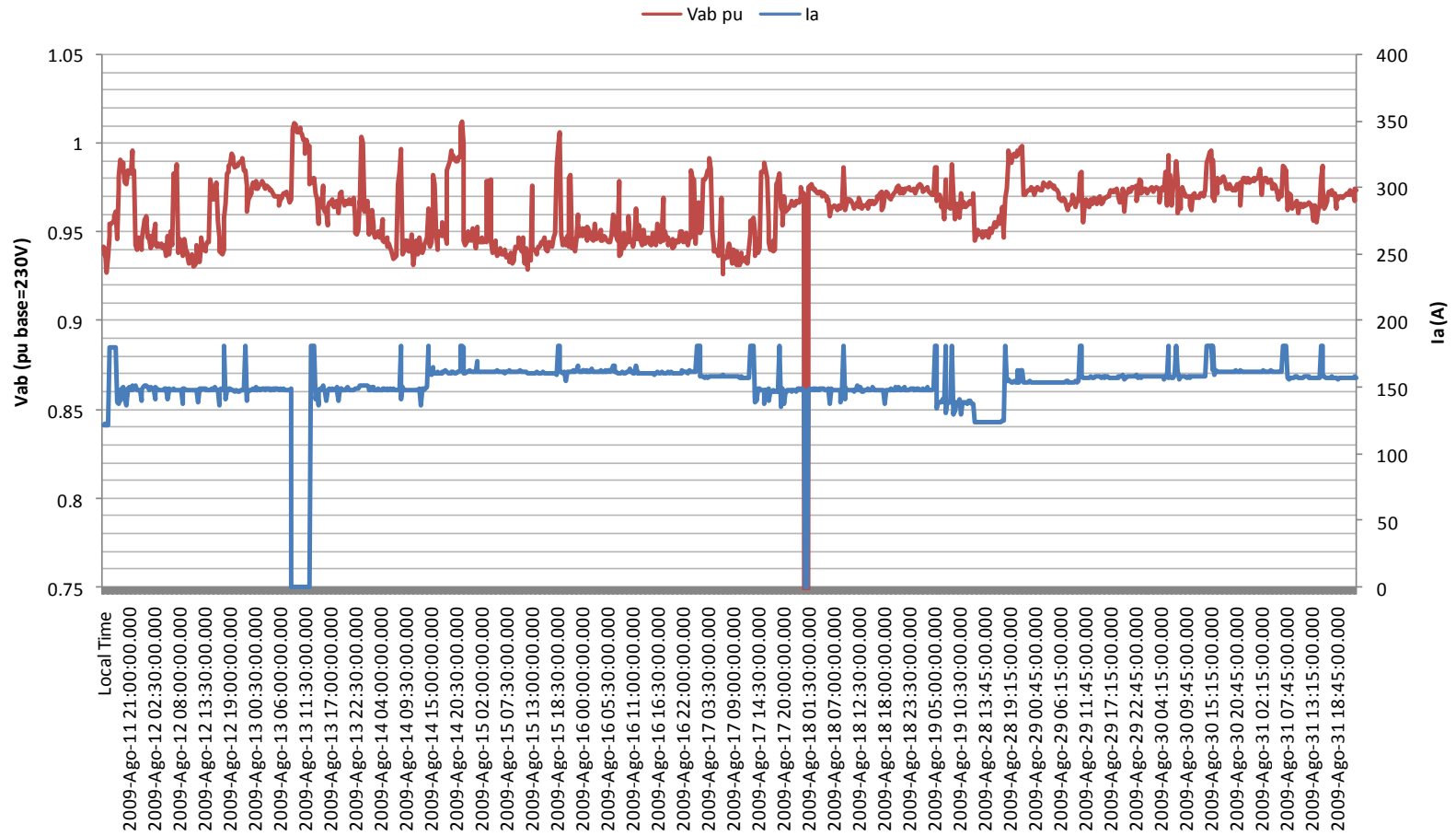
Anexo A. 47: Historial de Vca obtenido por Fluke 11-23/Abril

**Ocurrencia de Sags & Swells
Laminación 825V
11-23/Abril/09**



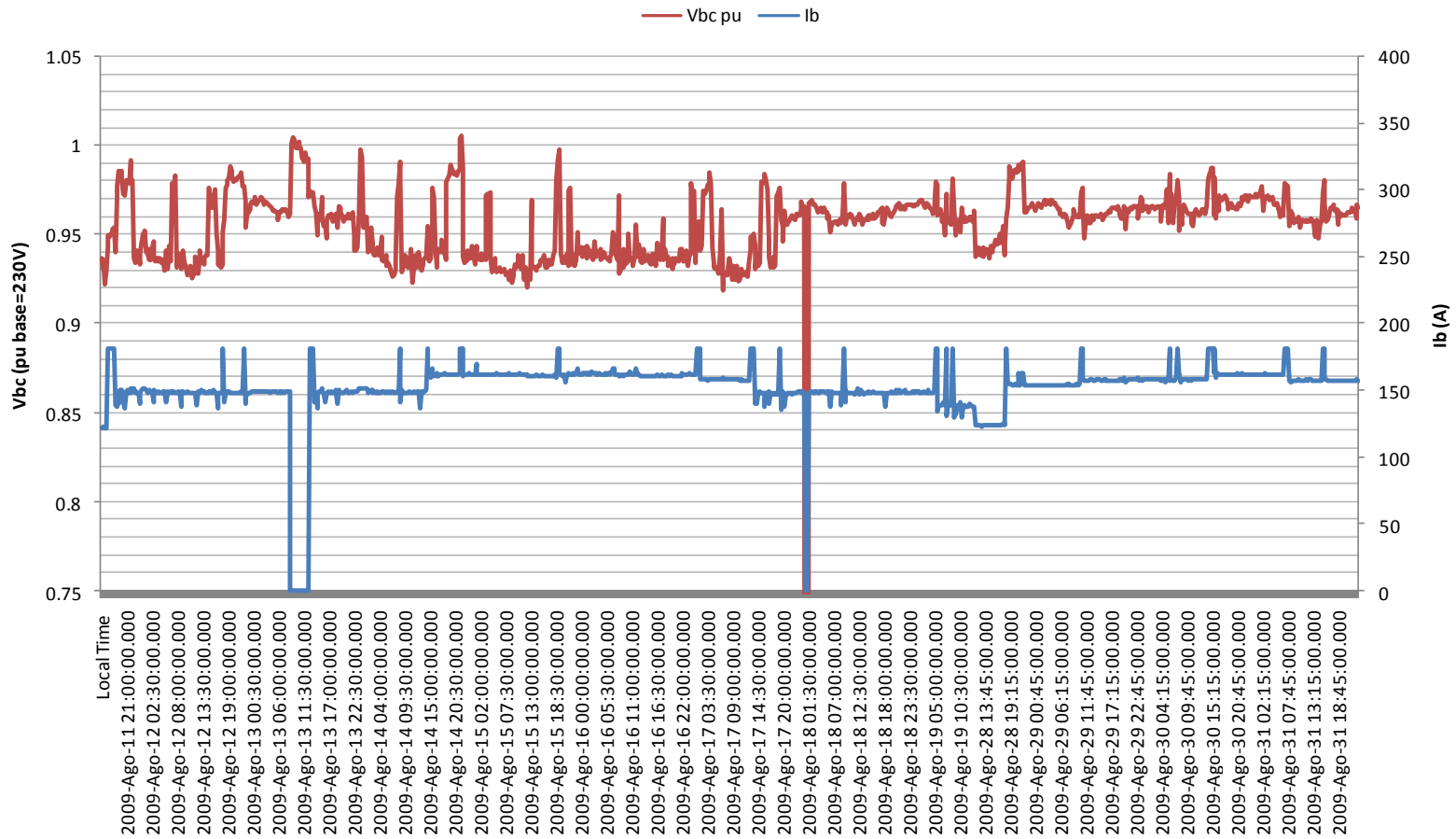
Anexo A. 48: Gráfica estadística de eventos obtenidos por Fluke 11-23/Abril

Laminación 230V 11-31/Agosto/09



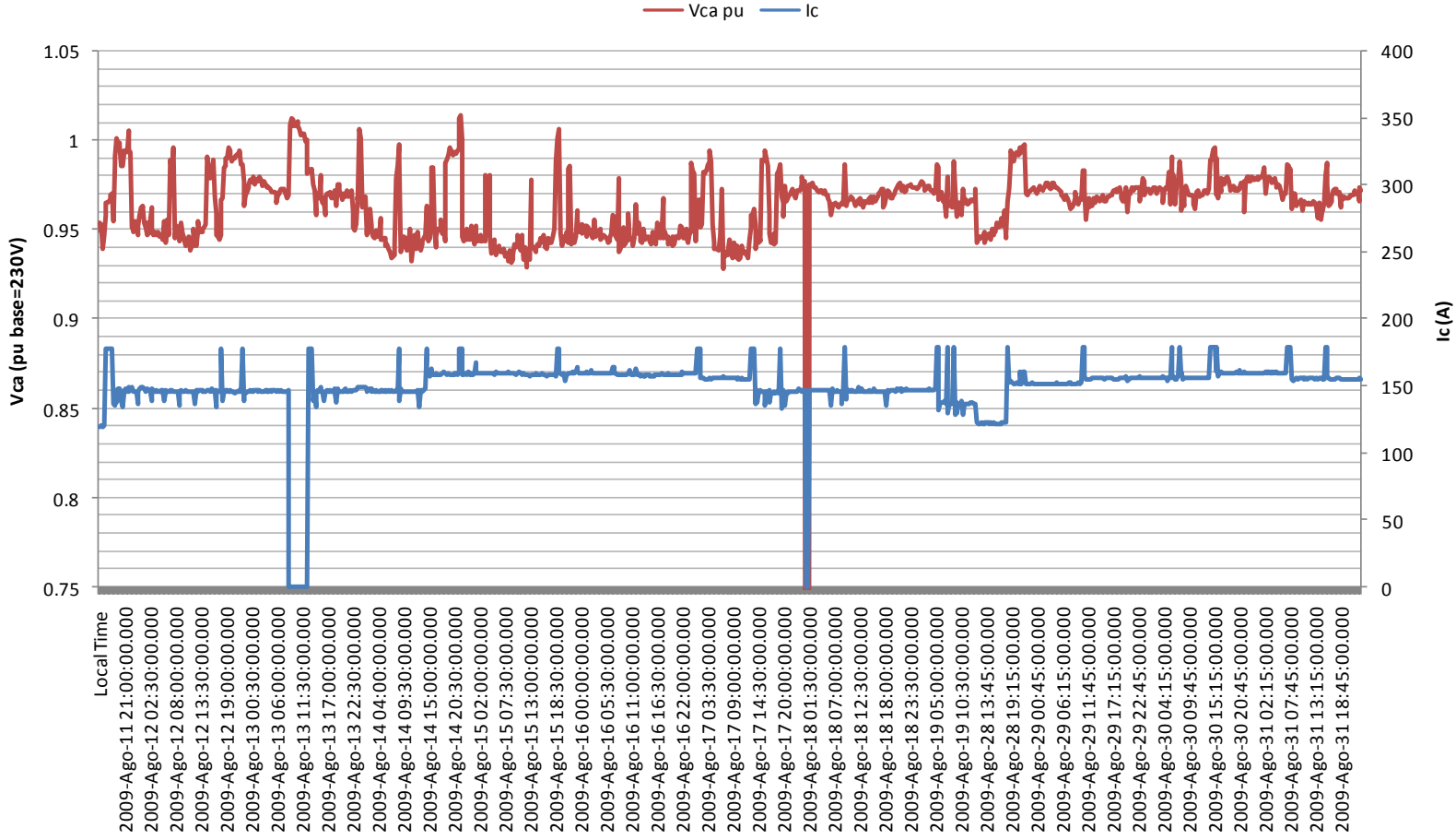
Anexo A. 49: Historial de Vab obtenido por ION 11-31/Agosto

Laminación 230V 11-31/Agosto/09



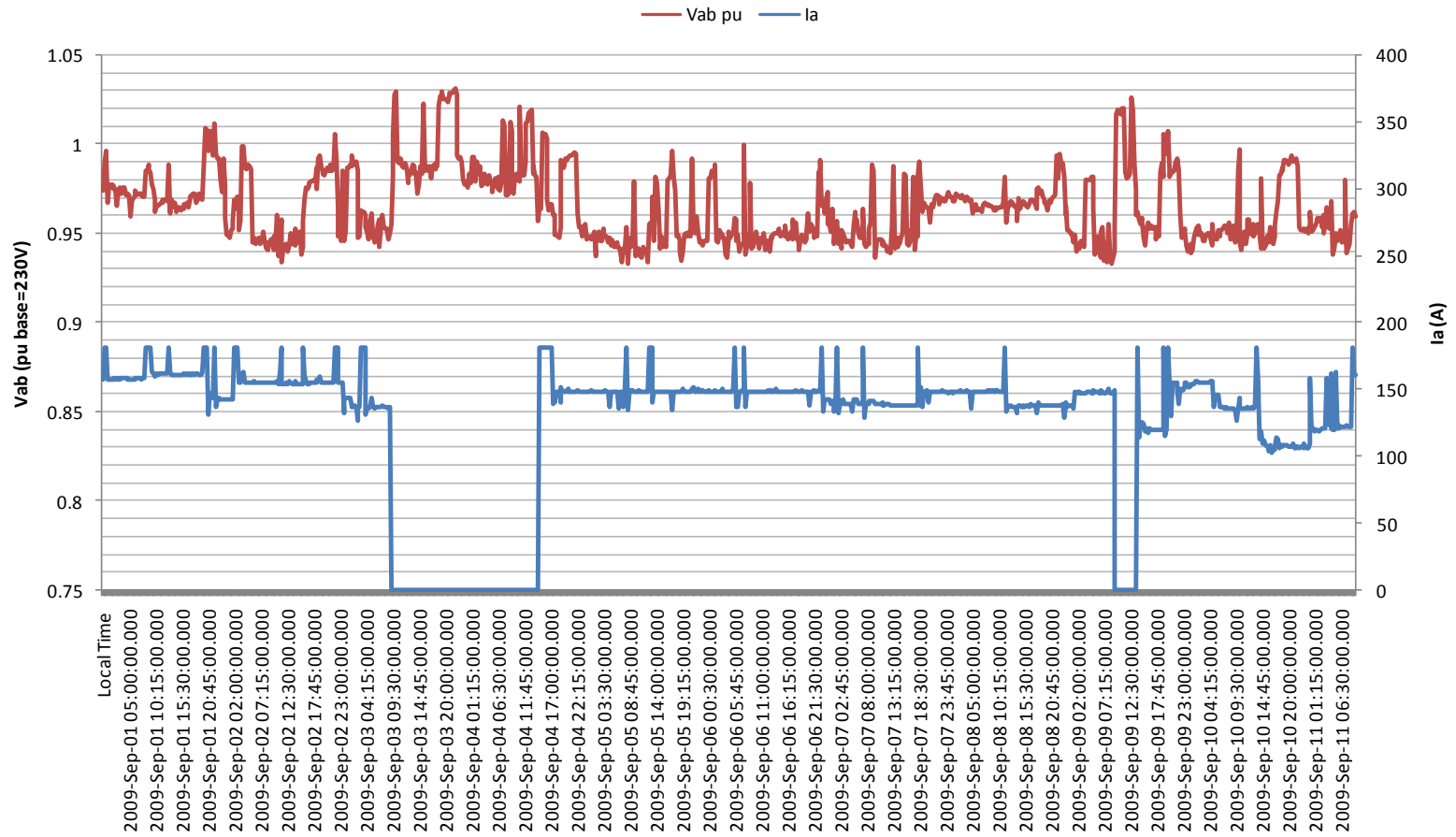
Anexo A. 50: Historial de Vbc obtenido por ION 11-31/Agosto

Laminación 230V 11-31/Agosto/09



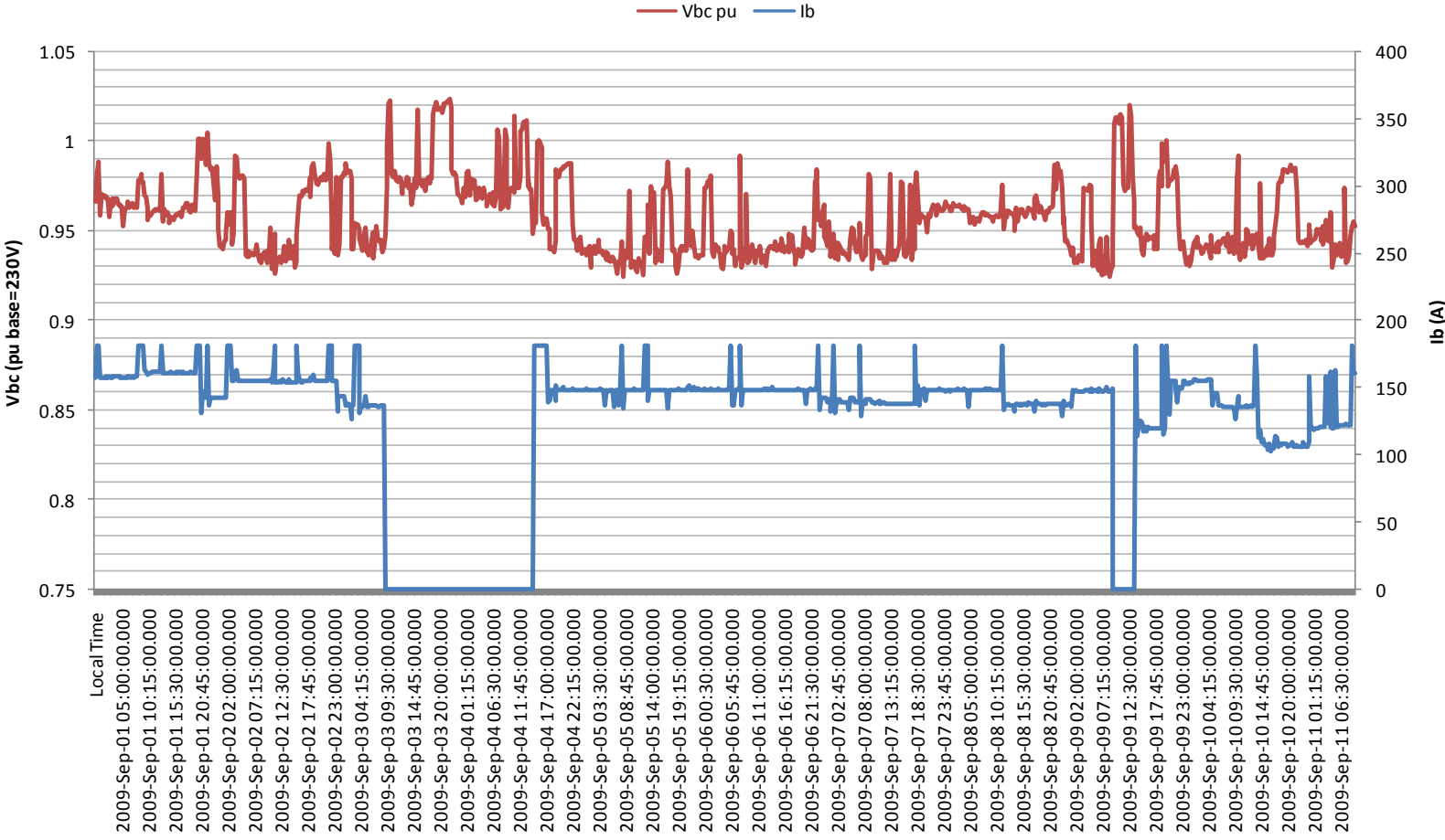
Anexo A. 51: Historial de Vca obtenido por ION 11-31/Agosto

Laminación 230V 01-11/Sept/09

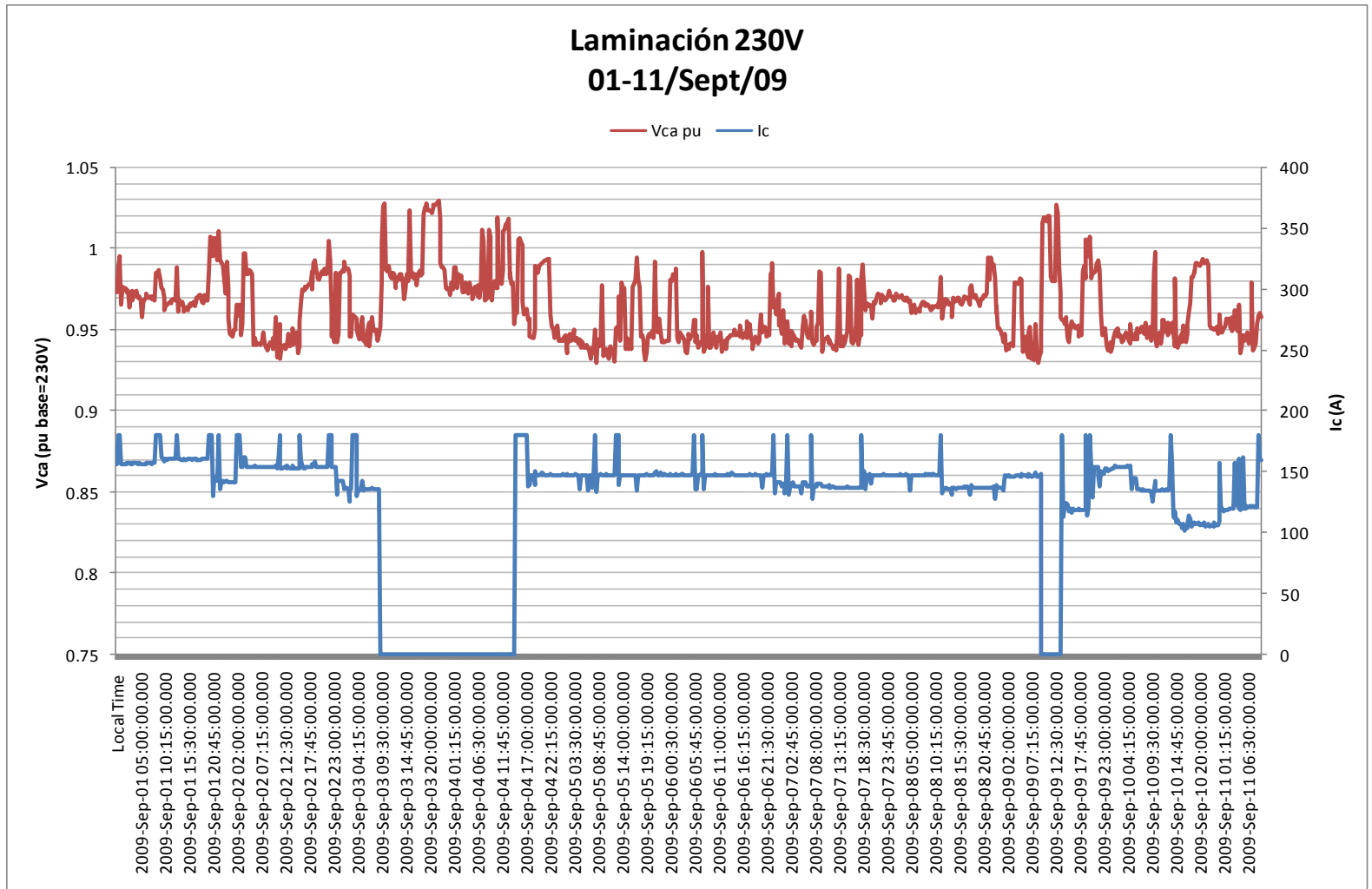


Anexo A. 52: Historial de Vab obtenido por ION 01-11/Sept

Laminación 230V 01-11/Sept/09

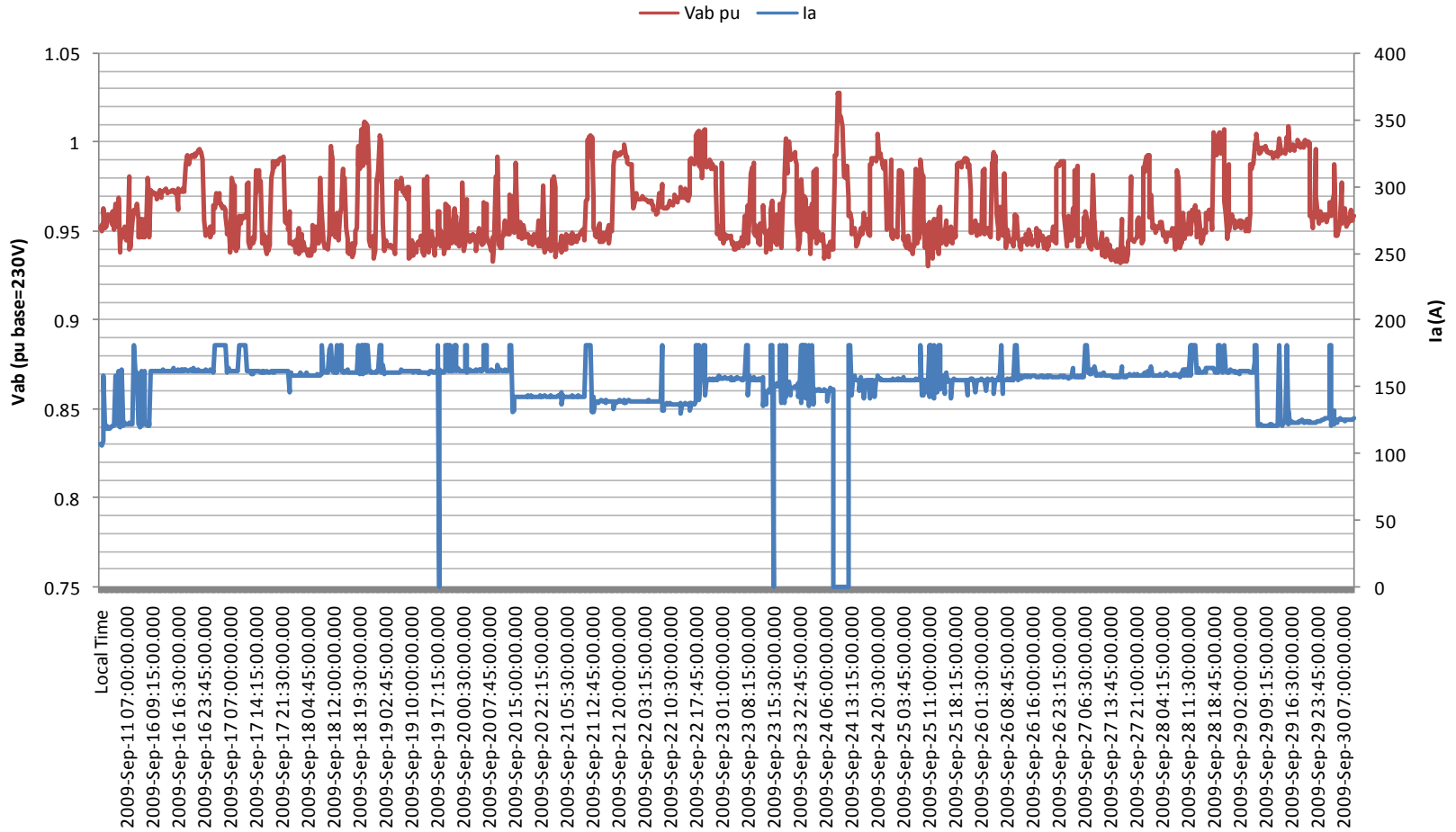


Anexo A. 53: Historial de Vbc obtenido por ION 01-11/Sept



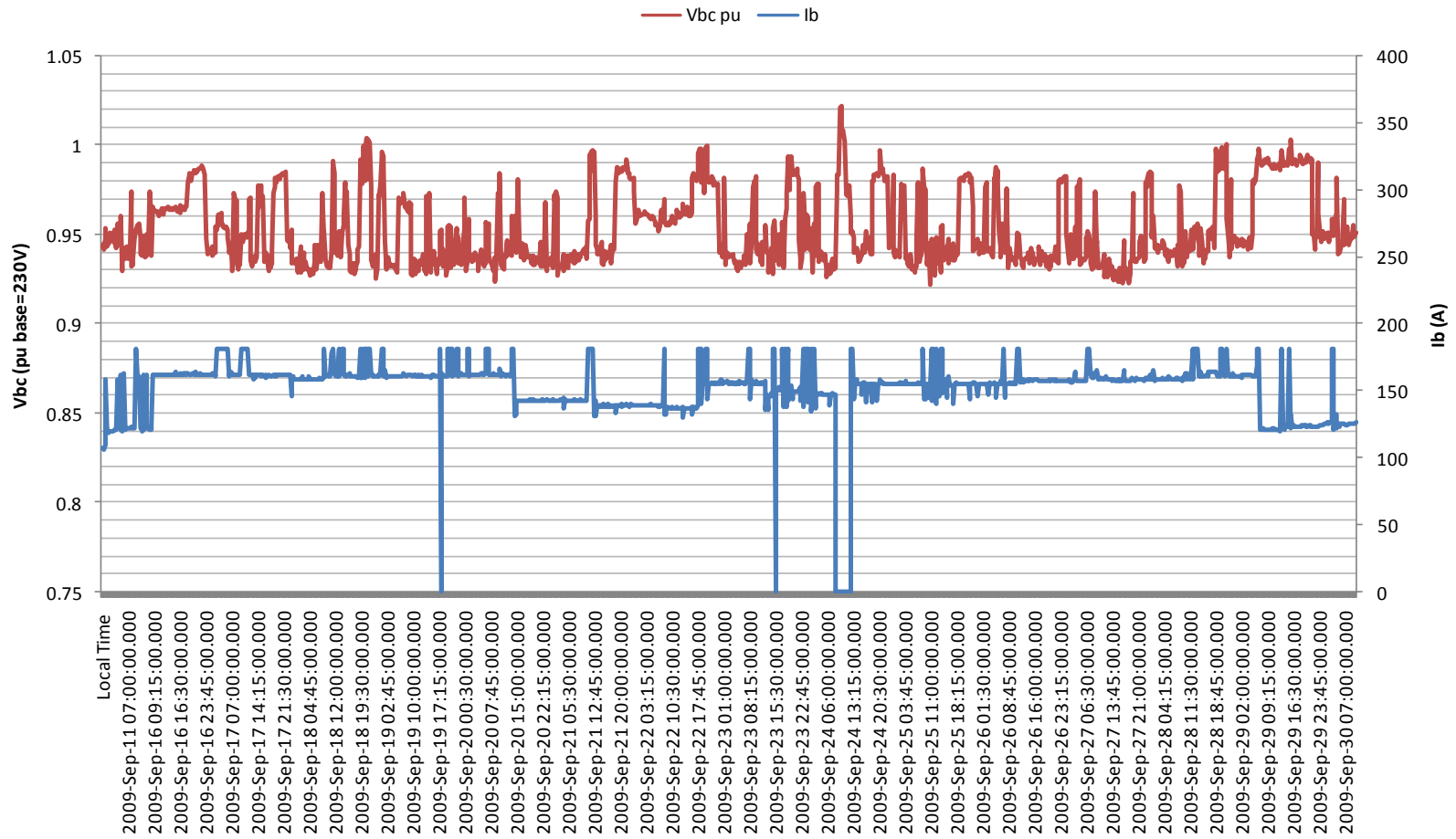
Anexo A. 54: Historial de Vca obtenido por ION 01-11/Sept

Laminación 230V 11-30/Septiembre/09



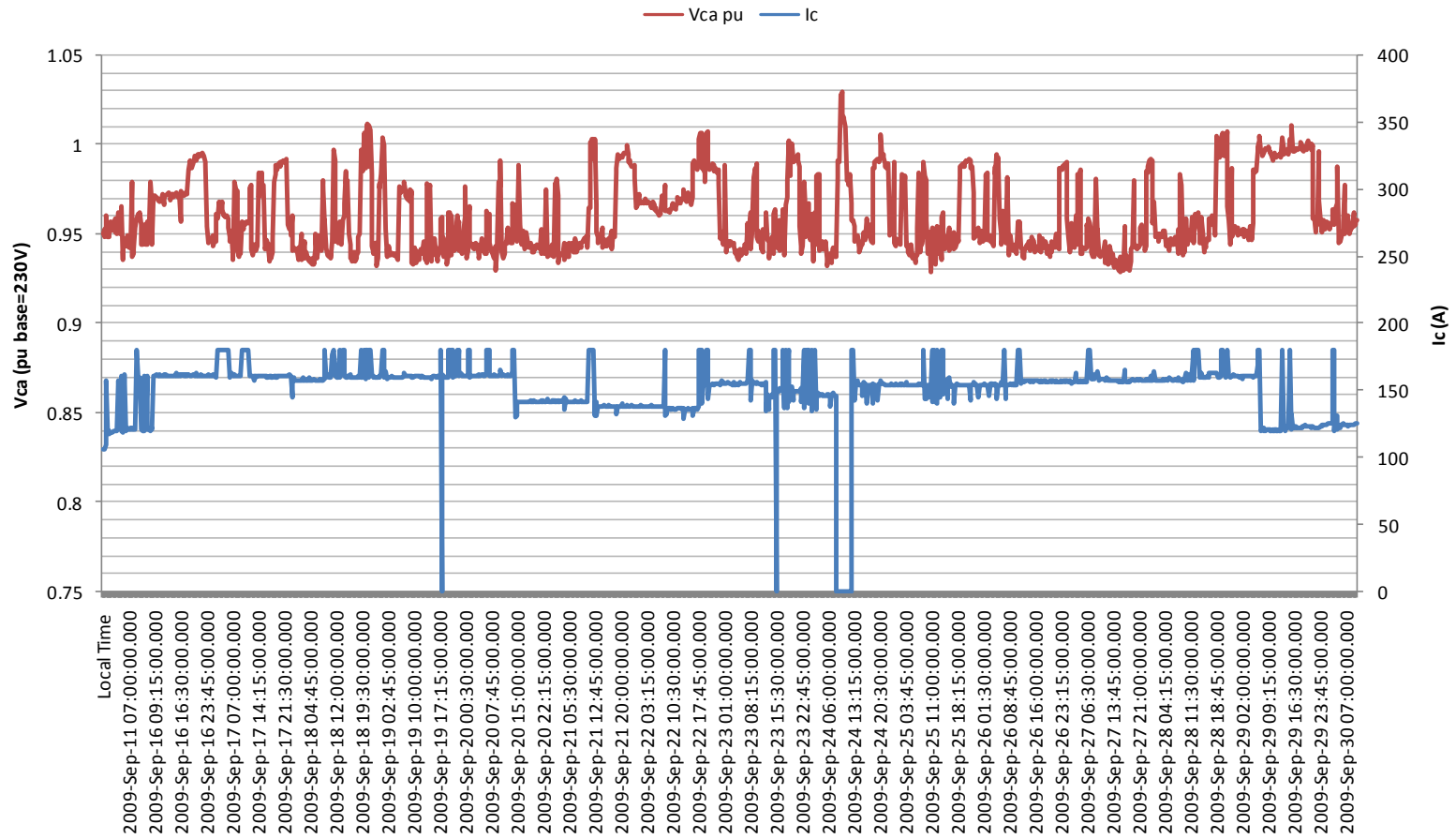
Anexo A. 55: Historial de Vab obtenido por ION 11-30/Sept

Laminación 230V 11-30/Septiembre/09



Anexo A. 56: Historial de Vbc obtenido por ION 11-30/Sept

Laminación 230V 11-30/Septiembre/09



Anexo A. 57: Historial de Vca obtenido por ION 11-30/Sep

Referencias

- [1] Linders, J. R. Electric Wave Distortions: Their Hidden Costs and Containment. *IEEE Transactions on Industry Applications*. Sept/Oct 1979, Vols. IA-15, 5, pp. 458-471.
- [2] IEEE Standards Coordinating Committee 22 on Power Quality. *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*. 1995. IEEE Std 1159-1995.
- [3] Bollen, Math H. J. Categorization and Analysis of Power System Transients. *IEEE Transactions on Power Delivery*. July de 2005, Vol. 20, 3, págs. 2298-2306.
- [4] Llamas, Armando, y otros. *Armónicas en Sistemas Eléctricos Industriales*. Monterrey : Editorial Lagares, 2004. 968-5785-83-X.
- [5] Vedam, R. Sastry y Sarma, Mulukutla S. *Power Quality, VAR Compensation in Power Systems*. s.l. : CRC Press, 2009.
- [6] IEEE. *IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment*. 1999. IEEE Std 1100.
- [7] Dranetz BMI Homepage. [En línea] [Http://www.dranetz-bmi.com/products](http://www.dranetz-bmi.com/products).
- [8] Energy Vortex. [En línea] <http://www.energyvortex.com/pages>.
- [9] Test Equipment Depot. [En línea] <http://www.testequipmentdepot.com/newequipment>.
- [10] Djokic, Sasa Z. y Milanovic, Jovica V. A New Method for Classification and Presentation of Voltage Reduction Events. *IEEE Transaction on Power Delivery*. October de 2005, Vol. 20, 4, págs. 2576-2584.
- [11] Bingham, Richard P. *Sags and SWELLS*. s.l. : Dranetz-BMI, 1994.
- [12] *Voltage Sags in Industrial Systems*. s.l. : IEEE Transactions on Industry Applications, 1993.
- [13] Milanovic, Jovia V. The Influence of Induction Motors on Voltage Sag Propagation-- Part II: Accounting for the Change in Sag Performance at LV Buses. *IEEE Transactions on Power Delivery*. April de 2008, Vol. 23, 2, págs. 1072-1078.
- [14] Milanovic, Jovica V. The Influence of Induction Motors on Voltage Sag Propagation-- Part I: Accounting for the Change in Sag Characteristics. *IEEE Transactions on Power Delivery*. April de 2008, Vol. 23, 2, págs. 1063-1071.
- [15] McGranaghan, Mark F., Mueller, David R. y Samotyj, Marek J. Voltage Sags in Industrial Systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*. March/April de 1993, Vol. 29, 2, págs. 397-403.
- [16] Czarnecki, Leszek S. Powers in Nonsinusoidal Networks: Their Interpretation, Analysis, and Measurement. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. April de 1990, Vol. 39, 2, págs. 340-345.
- [17] Rizy, D. T., Gunther, E. W. y McGranaghan, M. F. Transients and Harmonic Voltages associated with Automated Capacitors switching on Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*. August de 1987, Vols. PWRS-2, 3, págs. 713-723.
- [18] Kaprielian, S. R., y otros. Predicting Voltage Distortion in a System with Multiple Random Harmonic Sources. *IEEE Transactions on Power Delivery*. July de 1994, Vol. 9, 3, págs. 1632-1638.

- [19] Phipps, James K., Nelson, John P. y Sen, Pankaj K. Power Quality and Harmonic Distortion on Distribution Systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*. March/April de 1994, Vol. 30, 2, págs. 476-484.
- [20] Rice, David E. A Detailed Analysis of Six-Pulse Converter Harmonic Currents. *IEEE Transactions on Industry Applications*. March/April de 1994, Vol. 30, 2, págs. 294-304.
- [21] Lemieux, Guy. Power System Harmonic Resonance-- A Documented Case. *IEEE Transactions on Industry Applications*. May/June de 1990, Vol. 26, 3, págs. 483-488.
- [22] *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*. s.l. : ANSI/IEEE, 1992. IEEE Std 519.
- [23] Tang, Le, Kolluri, Sharma y McGranaghram, Mark F. Voltage Flicker prediction for two simultaneously operated AC Arc Furnaces. *IEEE Transactions on Power Delivery*. April de 1997, Vol. 12, 2, págs. 985-992.
- [24] Tang, L., y otros. Voltage Notching Interaction Caused by Large Adjustable Speed Drives on Distribution Systems with Low Short Circuit Capacities. *IEEE Transactions on Power Delivery*. July de 1996, Vol. 11, 3, págs. 1444-1453.
- [25] Power Quality Working Group WG2. *Guide to Quality of Electrical Supply for Industrial Installations, Part 5 Flicker and Voltage Fluctuations*. s.l. : UIE, 1999. págs. 41-52.
- [26] *Electric Arc Furnace Modelling from a "Power Quality" Point of View*. Vervenne, I., Reusel, K. Van y Belmans, R. Barcelona : Department of Electrical Engineering ESAT, Research Group ELECTA Katholieke Universiteit Leuven, 2007.
- [27] Systems Engineering. *Electric Power System Harmonics design guide*. Franksville, WI : Cooper Power Systems, 1990. págs. 1530-1534.
- [28] O'Neill-Carrillo, E., y otros. Nonlinear Deterministic modelling of highly varying loads. *IEEE Transactions on Power Delivery*. April de 1999, Vol. 14, 2, págs. 537-542.
- [29] Stratford, R. P. y Steeper, D. E. Reactive Compensation and Harmonic Suppression for Industrial Power Systems using Thyristor Converters. *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*. May-June de 1979, Vols. IA-12, 3, págs. 232-254.
- [30] Ortmeyer, Thomas H., Chakravarthi, K. R. y Mahmoud, Aly A. The Effects of Power System Harmonics on Power System Equipment and Loads. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. September de 1985, Vols. PAS-104, 9, págs. 2555-2563.
- [31] Mathur, Mohan y Varma, Rajiv K. *Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems*. s.l. : Wiley Inter-Science, 2002. 0-471-20643-1.
- [32] Phadke, A. G. y Harlow, J. H. Generation of abnormal Harmonics in High-Voltage ACDC Power Systems. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. Mar de 1968, Vols. PAS-87, págs. 873-882.
- [33] Henderson, Robert D. y Rose, Patrick J. Harmonics: The Effects on Power Quality and Transformers. *IEEE Transactions on Industry Applications*. May/June de 1994, Vol. 30, 3, págs. 528-532.
- [34] *The Effect of Voltage Waveshape on the Performance of a 3-Phase Induction Motor*. Jain, G. C. New York, N. Y. : IEEE Winter Power Meeting, 1964.
- [35] Cummings, Paul G. Estimating Effect of System Harmonics on Losses and Temperature Rise of Squirrel-Cage Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*. November/December de 1986, Vols. IA-22, 6, págs. 1121-1125.

- [36] Klingshirn, Eugene A. y Jordan, Howard E. Polyphase Induction Motor Performance and Losses on Nonsinusoidal Voltage Sources. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. March de 1968, Vols. PAS-87, 3, págs. 624-631.
- [37] *Control of DFIG under Unsymmetrical Voltage Dip*. Zhou, Y., y otros. s.l. : Energy Research Center of Netherlands, 2007, págs. 933-938.
- [38] *IEEE Guide for Harmonic Control and Reactive Compensation of Static Power Converters*. 1981. IEEE-Std. 519.
- [39] Kimbark, E. W. Direct Current Transmission. *Wiley Interscience*. 1971, Vol. 1.
- [40] Mahmoud, A. A. y Shultz, R. D. A Method for Analyzing Harmonic Distribution in A.C. Power Systems. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. June de 1982, Vols. PAS-101, 6, págs. 1815-1824.
- [41] Xia, D. y Heydt, G. T. Harmonic Power Flow Studies, Part I and Part II. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. June de 1982, Vols. PAS-101, 6, págs. 1257-1270.
- [42] *Study of Distribution System Surge and Harmonic Characteristics*. s.l. : EPRI, 1980. EPRI Report EL-1627.
- [43] Currence, Evan J., Plizga, John E. y Nelson, Howard N. Harmonic Resonance at a Medium-Sized Industrial Plant. *IEEE Transactions on Industry Applications*. July/August de 1995, Vol. 31, 4, págs. 682-690.
- [44] Lembo, F. y D'Onofrio, V. H. Distribution Harmonics Cause Breaker Problems. *Electrical World*. September de 1981, págs. 121-122.
- [45] Jost, F. A., Menzies, D. F. y Sachdev, M. S. Effect of System Harmonics on Power System Relays. *CEA, System Planning and Operation Section, Power System Protection Comittee Spring Meeting*. March de 1974.
- [46] Goldberg, G. Behavior of Apparatus Under the Influence of Voltage and Current Harmonics. *Bull. Soc. R. Belge Electr.* Oct- Dec de 1975, Vol. 91, 4, págs. 225-235.
- [47] Faucett, M. A. y Keener, C. A. Effects of Harmonics on Watthour Meter Accuracy. *Electrical World*. Oct de 1945, págs. 82-84.
- [48] Baggot, A. J. The Effects of Waveshape Distortion on the Measurement of Energy by Tariff Meters. *Int. Conf. on Sources and Effects of Power System Disturbances*. 22-24 de April de 1974, págs. 261-267.
- [49] Downing, A. G. Watthour Meter Accuracy on SCR Controlled Resistance Loads. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. 1974.
- [50] Emmanuel, A. E., Levitsky, F. J. y Gulachenski, E. N. Induction Watthour Meter Performance on Rectifier/Inverter Circuits. *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*. Nov de 1981, Vols. PAS-100, 11, págs. 4422-4427.
- [51] Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks. Part I: Concepts, Models and Simulation Techniques. *IEEE Transactions on Power Delivery*. January de 1996, Vol. 11, 1, págs. 452-465.
- [52] Sen, Pankaj K. y Landa, Hector A. Derating of Induction Motors Due to Waveform Distortion. *IEEE Transactions on Industry Applications*. November/December de 1990, Vol. 26, 6, págs. 1102-1107.
- [53] Bendre, Ashish, y otros. Equipment Failures Caused by Power Quality Disturbances. *IAS*. 2004, págs. 482-489.

- [54] Warder, S. B., Friedlander, E. y Arman, A. N. The Influence of Rectifier Harmonics in a Railway System on the Dielectric Stability of 33kV Cables. *Proc. IEE*. 1951, Vol. 98, págs. 399-421.
- [55] Lee, San-Yi, Wu, Chi-Jui y Chang, Wei-Nan. A compact control algorithm for reactive power compensation and load balancing with static Var compensator. *Electric Power Systems Research*. 2001, Vol. 58, págs. 63-70.
- [56] Czarnecki, L. S. y Hsu, S. M. Thyristor controlled susceptances for balancing compensators operated under nonsinusoidal conditions. *IEE Proc. Electr. Power Appl.* 1994, Vol. 141, págs. 177-185.
- [57] El-Saady, Gaber. Adaptive static VAR controller for simultaneous elimination of voltage flickers and phase current imbalances due to arc furnaces loads. *Electric Power System Research*. 2001, Vol. 58, págs. 133-140.
- [58] Woodley, N., Morgan, L. y Sundaram, A. Experience with an inverter-based dynamic voltage restorer. *IEEE. Trans. Power Delivery*. Jul de 1999, Vol. 14, 3, págs. 1181-1184.
- [59] Bongiorno, Massimo y Svensson, Jan. Voltage Dip Mitigation Using Shunt-Connected Voltage Source Converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*. September de 2007, Vol. 22, 5, págs. 1867-1874.
- [60] Newman, M. y Holmes, D. An Integrated approach for the protection of series injection inverters. *IEEE Trans. Ind. Appl.* May/Jun de 2002, Vol. 38, 3, págs. 679-687.
- [61] K., Sedraoui, y otros. A new approach for the Dynamic Control of Unified Power Flow Controller (UPFC). *Proceeding, PES*. 2001.
- [62] Sedraoui, K., Al-haddad, K. y Olivier, G. Flicker Compensation in Arc Furnace Power Systems Using the UPFC. *IEEE ISIE*. 9-12 de July de 2006.
- [63] Zhou, X. X. y Liang, J. Nonlinear adaptive control of STATCOM to improve the performance of power systems. *IEE proceedings-Pt. Generat. Transm. Distrib.* 1999, Vol. 146, 3, págs. 301-305.
- [64] Mori, S. Development of a Large Static Var Generator using Self-Commutated Inverters for Improving Power Systems Stability. *IEEE Trans. on Power Delivery*. Feb de 1998, Vol. 8, 1, págs. 371-377.
- [65] Shaheen, H. I., Rashed, G. I. y Cheng, S. J. Nonlinear Optimal Predictive Controller for Static Synchronous Compensator (STATCOM). págs. 1-7.
- [66] Brumsickle, William E., y otros. Dynamic Sag Correctors: Cost-Effective Industrial Power Line Conditioning. *IEEE Transactions on Industry Applications*. January/February de 2001, Vol. 37, 1, págs. 212-217.
- [67] Divan, D., y otros. Dynamic Sag Corrector: A New Concept in Power Conditioning. *Power Quality Assurance Magazine*. September/October de 1998.
- [68] Liu, Liew Zhan, y otros. Dynamic Voltage Restorer (DVR) Using Three Dimensional Space Vector PWM Control Algorithm. *Electrical Power Quality and Utilisation*. 9-11 de October de 2007.
- [69] McGranaghan, Mark F. y Mueller, David R. Designing Harmonic Filters for Adjustable-Speed Drives to Comply with IEEE-519 Harmonic Limits. *IEEE Transactions on Industry Application*. March/April de 1999, Vol. 35, 2, págs. 312-318.

- [70] Redl, Richard. Power Factor Correction in Single-Phase Switching-mode power supplies-an overview. *Int. J. Electronics*. 1994, Vol. 77, 5, págs. 555-582.
- [71] Mitsubishi Electric Corp. Active Filters: Technical Document, 2100/1100. 1989, págs. 1-36.
- [72] ABB Power Systems. Harmonic Currents, static VAR systems. Sept de 1988, págs. 1-13.
- [73] Kikuchi, A. H. Active Power Filters. *Toshiba GTR Module (IGBT) Application Notes*. 1992, págs. 44-45.
- [74] Moran, S. A. y Brennen, M. B. *Active Power Line Conditioner with fundamental negative sequence compensation*. U. S. Patent 5384696 January de 1995.
- [75] Bhattacharya, S. y Divan, D. M. *Hybrid Series active/parallel passive power line conditioner with controlled harmonic injection*. U. S. Patent 5465203 November de 1995.
- [76] Singh, Bhim, Al-Haddad, Kamal y Chandra, Ambrish. A Review of Active Filters for Power Quality Improvement. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. October de 1999, Vol. 46, 5, págs. 960-971.
- [77] Peeran, Syed M. y Cascadden, Creg W. P. Application, Design, and Specification of Harmonic Filters for Variable Frequency Drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*. July/August de 1995, Vol. 31, 4, págs. 841-847.
- [78] *Increased EAF Productivity Through Improved Operating Efficiency*. Jones, J. A. T. s.l. : Electric Furnace Conference Proceedings, 1993, pág. 97.
- [79] *Evaluation of Supplementary Series Reactors to Optimize Electric Arc Furnace Operations*. Mendis, S. R., y otros. s.l. : IEEE Transactions, 1995, págs. 2154-2161.
- [80] *Transformer Design and Application Considerations for Nonsinusoidal Loads Currents*. Pierce, Linden W. 3, s.l. : IEEE Transactions on Industry Applications, May/June de 1996, Vol. 32, págs. 633-645.
- [81] Wang, T. X., Choi, S. S. y Sng, E. K. K. Series compensation method to mitigate harmonics and voltage Sags and Swells. *IET Gener. Transm. Distrib.* January de 2007, Vol. 1, 1, págs. 96-103.
- [82] *Caracterización de la Calidad de la Potencia para un Sistema de Transmisión Interconectado*. E., Eugenio Betancur, C., Mario Alberto Suarez y F., Luz Albany Betancourt.
- [83] IEEE. *IEEE Recommended Practice for Evaluating Electric Power System Compatibility with Electronic Process Equipment (IEEE Std 1346)*. 1998.
- [84] Electric Power Research Institute. SEMI F47-0706. [En línea] September de 1999. [Citado el: 20 de Noviembre de 2009.] www.f47testing.epri.com.
- [85] Liao, Yong, Putrus, Ghanim A. y Smith, Kenneth S. Evaluation of the Effects of Rotor Harmonics in a Doubly-Fed Induction Generator with Harmonic Induced Speed Ripple. *IEEE Transactions on Energy conversion*. December de 2003, Vol. 18, 4, págs. 508-515.
- [86] Impacts, Report of the IEEE Task Force on Harmonic. *Effects of Harmonics on Equipment*. s.l. : IEEE Transactions on Power Delivery, 1993. págs. 672-680.
- [87] Klingshirn, E. A. y Jordan, H. E. Polyphase Induction Motor Performance and Losses on Nonsinusoidal Voltage Sources. *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*. March de 1968, Vols. PAS-87, págs. 624-631.

- [88] Venkatesan, K. y Lindsay, J. F. Comparative Study in the Losses in Voltage and Current Source Inverter Fed Induction Motors. *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*. May-June de 1982, Vols. IAS-18, 3, págs. 240-246.