



**Universidad Autónoma de San Luis Potosí**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Centro de Investigación y Estudios de Posgrado**

# **Análisis de los fenómenos electromagnéticos en el desempeño de equipo sensible de la planta Grundfos MXP**

## **T E S I S**

Que para obtener el grado de:

*Maestro en Sistemas Eléctricos de Potencia*

Presenta:

*Hugo Iván Salazar Flores*

Asesor:

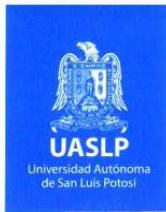
*Ciro Alberto Núñez Gutiérrez*

San Luis Potosí, S. L. P.

Mayo de 2022







19 de mayo de 2022

**ING. HUGO IVÁN SALAZAR FLORES  
P R E S E N T E**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por el **Dr. Ciro Alberto Núñez Gutiérrez**, Asesor de la Tesis que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestro en Sistemas Eléctricos de Potencia**, me es grato comunicarle que en la sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 19 de mayo del presente año, fue aprobado el Temario propuesto:

**TEMARIO:**

**“Análisis de los fenómenos electromagnéticos en el desempeño de equipo sensible de la planta Grundfos MXP”**

1. ANTECEDENTES DEL PROYECTO
2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA Y SU IMPACTO ECONÓMICO EN GRUNDFOS MÉXICO
3. ESTUDIOS PREVIOS DE COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA EN GRUNDFOS MÉXICO
4. ESTUDIOS Y MEDICIONES DE COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA EN 2021 EN GRUNDFOS MÉXICO
5. TIERRAS FÍSICAS DESACOPLADAS PARA CARGAS CRÍTICAS Y SUS RESULTADOS
6. CONCLUSIONES  
ANEXOS  
BIBLIOGRAFÍA

**“MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO”**

**A T E N T A M E N T E**

  
**DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN**  
DIRECTOR  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIRECCION

[www.uaslp.mx](http://www.uaslp.mx)

Av. Manuel Nava 8  
Zona Universitaria - CP 78290  
San Luis Potosí, S.L.P.  
tel. (444) 826 2330 al 39  
fax (444) 826 2336

Copia. Archivo  
\*etn.

“Rumbo al centenario de la autonomía universitaria”



# RESUMEN

En el presente trabajo se aborda el análisis de interferencias electromagnéticas que ha experimentado la empresa Grundfos México desde el arranque de sus operaciones en 2008 hasta el presente. Se presenta una introducción al concepto y la teoría de la compatibilidad electromagnética, haciendo énfasis en los riesgos a la salud de las personas que puede representar el tener problemas de interferencia electromagnéticas en maquinaria y equipo crítico, también se enlistan las principales normativas aplicables a la compatibilidad electromagnética. Se hace un resumen de la historia de la compañía a nivel global y se proporciona una explicación del contexto actual de la empresa a nivel nacional y del por qué es relevante atender la problemática.

Se presentan los resultados y conclusiones de los estudios previos realizados en la empresa por parte de proveedores externos y profesores investigadores de la UASLP anteriores a 2020, se explica la implementación y resultados de la solución propuesta para mitigar los efectos de las perturbaciones electromagnéticas a través del uso de tierras desacopladas instaladas en equipos críticos. Finalmente se da una perspectiva de otras posibles alternativas que pueden ayudar a reducir el impacto de este fenómeno en la empresa.



## Índice general

1.	ANTECEDENTES DEL PROYECTO .....	1
1.1	INTRODUCCIÓN A LA EMC.....	1
1.2	PROBLEMAS DE EMC QUE CAUSARON DAÑOS A LA SALUD DE LAS PERSONAS.....	13
1.3	NORMATIVAS EMC .....	15
1.4	CONTEXTO GLOBAL DE LA COMPAÑÍA GRUNDFOS .....	17
1.5	GRUNDFOS EN MÉXICO .....	33
2.	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA Y SU IMPACTO ECONÓMICO EN GRUNDFOS MÉXICO .....	35
3.	ESTUDIOS PREVIOS DE COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA EN GRUNDFOS MÉXICO ...	41
4.	ESTUDIOS Y MEDICIONES DE COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA EN 2021 EN GRUNDFOS MÉXICO .....	55
5.	TIERRAS FÍSICAS DESACOPLADAS PARA CARGAS CRÍTICAS Y SUS RESULTADOS .....	59
6.	CONCLUSIONES .....	67
	ANEXOS.....	71
	ESTUDIOS REALIZADOS A CONVERTIDOR DE 60 HZ A 50 HZ.....	71
	BIBLIOGRAFÍA: .....	77





## Índice de tablas y figuras

Figura 1.1 Espectro electromagnético [3].	2
Figura 1.2 Onda electromagnética [4].	3
Figura 1.3 Estudio de la EMC.	4
Figura 1.4 Fuentes EMI [5].	4
Figura 1.5 Ejemplo de interferencia (perturbación) conducida [7].	5
Figura 1.6 Interferencias conducidas en modo diferencial [7].	6
Figura 1.7 Interferencias conducidas en modo común [7].	6
Figura 1.8 Ejemplo de interferencia (perturbación) radiada [7].	7
Figura 1.9 Tipos de acoplamientos generadores de interferencias electromagnéticas [5].	8
Figura 1.10 Representación física del acoplamiento capacitivo [5].	9
Figura 1.11 Acoplamiento inductivo –Representación física y circuito equivalente [5].	10
Figura 1.12 Acoplamientos a través de impedancia común (puesta a tierra) [7].	11
Figura 1.13 Distribución espectral de las perturbaciones [7].	12
Figura 1.14 Categorización de normas EMC según su campo de aplicación.	16
Figura 1.15 Línea del tiempo de la historia de la empresa Grundfos [12].	31
Figura 2.1 Distribución de tierras físicas en la planta Grundfos México.	37
Tabla 2.1 Lista de equipos dañados en el área de Sleeves SQ durante 2019.	38
Tabla 2.2 Lista de equipos dañados en el área de Rotores MS durante 2020	38
Figura 2.2 Localización de áreas relevantes (marcadas en amarillo) para el estudio EMC en Grundfos México.	39
Figura 3.1 Medición de la distribución de armónicos en conductor NEUTRO del lado de 60 Hz.	42
Figura 3.2 Medición de la distribución de armónicos en conductor NEUTRO del lado de 50 Hz.	43
Figura 3.3 Conductores neutros de diferentes convertidores sin interconexión según Norma NEC 250-26 [16].	44
Figura 3.4 Interconexión de conductores neutros de los sistemas de 50 y 60 Hz presentes en la planta Grundfos México.	45
Figura 3.5 Voltaje RMS en la salida del convertidor de 50 Hz.	46
Figura 3.6 Consumo de corriente (RMS) a la salida de convertidor 50Hz.	47
Figura 3.7 Magnitud de corriente (RMS) del armónico 17 a la salida del convertidor de 50Hz.	47
Figura 3.8 Magnitud de corriente (RMS) del armónico 17 a la salida del convertidor de 50Hz.	48
Tabla 3.1 Componente armónico individual máximo de corriente para armónicas.	48

impares según norma L000045 de la CFE.....	48
Figura 3.9 Factor de potencia a la salida del convertidor de frecuencia de 50 Hz.....	49
Figura 3.10 Mediciones en estado estacionario de máquina soldadora.....	50
Figura 3.11 Mediciones en estado transitorio de máquina soldadora. ....	51
Figura 3.12 Mediciones durante un ciclo operativo de máquina soldadora.....	52
Figura 3.13 Sondas de prueba utilizadas para medición de voltaje y corriente en conductor de tierra de máquina de soldar. ....	52
Figura 3.14 Mediciones de voltaje y corriente en conductor de tierra física.....	53
Figura 4.1 Transitorio capturado el 27/08/2021, sobretensión 48.4V pico a pico, a 55kHz. ....	56
Figura 4.2 Transitorio capturado el 31/08/2021, sobretensión mayor a 96.4V pico a pico, a 26.3 kHz. ....	57
Figura 5.1 Concepto de tierras desacopladas utilizado en la propuesta para mitigar efectos de EMC en Grundfos México.....	60
Tabla 5.1 Valores de resistencia medidos a cada uno de los electrodos instalados en el área de soldadoras MS402 .....	61
Figura 5.2 Medición de resistencia a uno de los electrodos de tierra instalados en el área de soldadoras. ....	61
Figura 5.3 Tierras físicas instaladas a pie de máquina en área de SOLDADORAS. ....	62
Figura 5.3 Transitorio capturado el 14/10/2021, sobretensión mayor a 248 V pico a pico. ....	63
Figura 5.4 Transitorio capturado el 14/10/2021, sobretensión mayor a 27 kHz. ....	63
Figura 5.5 Transitorio capturado el 15/10/2021, perturbación en voltajes de fase a neutro (amarillo), neutro a tierra (azul) y corriente en conductor de tierra (magenta).....	64
Figura 5.6 Transitorio capturado el 24/10/2021, perturbación en voltajes de fase a neutro, neutro a tierra y corriente en conductor de tierra.....	65
Figura 5.7 Transitorio capturado el 24/10/2021, ampliación de la señal de voltaje entre neutro y tierra. ....	65
Figura 5.8 Transitorio capturado el 02/11/2021, 368 V pico a pico.....	66
Figura 6.1 Conductor Neutro conduciendo perturbaciones electromagnéticas a la maquinaria. ....	68
Figura 6.2 Ejemplo de accesorios diseñados para disipar EMC en conjunto con el uso de cable apantallado [15]. ....	69

# 1. ANTECEDENTES DEL PROYECTO

## 1.1 INTRODUCCIÓN A LA EMC

Compatibilidad Electromagnética (EMC, por sus siglas en inglés) es la rama de la tecnología electrónica y de telecomunicaciones que se encarga de estudiar las interferencias entre equipos eléctricos y electrónicos. De acuerdo con la norma internacional IEC 61000-1, se define como: "La habilidad de cualquier dispositivo, aparato, equipo o sistema que funciona con energía eléctrica de forma satisfactoria en su entorno (ambiente) electromagnético y sin producir perturbaciones electromagnéticas (emisiones) intolerables". Por ejemplo, la mayoría de la población posee aparatos electrónicos en casa y en muchas ocasiones se usan de manera simultánea; si estos son capaces de funcionar correctamente sin provocar interferencias entre ellos quiere decir que estos son electromagnéticamente compatibles [1].

Antes de entrar al estudio de la EMC, es importante definir y entender qué es el **ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO**. Así se le denomina a la distribución de energías de las radiaciones electromagnéticas. Se puede expresar en términos de energía, aunque es más común hacerlo en términos de la longitud de onda y frecuencias de las radiaciones. El espectro electromagnético se extiende desde las radiaciones con longitud de onda más corta (los rayos gamma) hasta de onda de longitud más larga (las ondas de radio) [2].

Se compone de diversos subrangos o porciones, cuyos límites no son del todo definidos y tienden a superponerse. En la **Figura 1.1** se puede observar cómo cada franja del espectro se puede distinguir de las otras en el comportamiento de sus ondas durante la emisión, transmisión y absorción, así como por sus aplicaciones prácticas. Las ondas electromagnéticas son vibraciones de los campos eléctricos y magnéticos que transportan energía. Estas ondas se propagan en el vacío a velocidad de la luz.

Al hablar del espectro electromagnético de un objeto, esto hace referencia a las distintas longitudes de onda que emite o absorbe, generando así una distribución de energía en forma de un conjunto de ondas electromagnéticas. Las características de dicha

distribución dependen de la frecuencia o la longitud de onda de las oscilaciones, así como de su energía. Las 3 cantidades están asociadas entre sí: a una longitud de onda dada le corresponde una frecuencia y una energía determinadas [2].

El espectro electromagnético se descubrió a raíz de los experimentos del científico James Maxwell, quien descubrió la presencia de las ondas electromagnéticas y formalizó las ecuaciones de su estudio, conocidas como las ecuaciones de Maxwell.

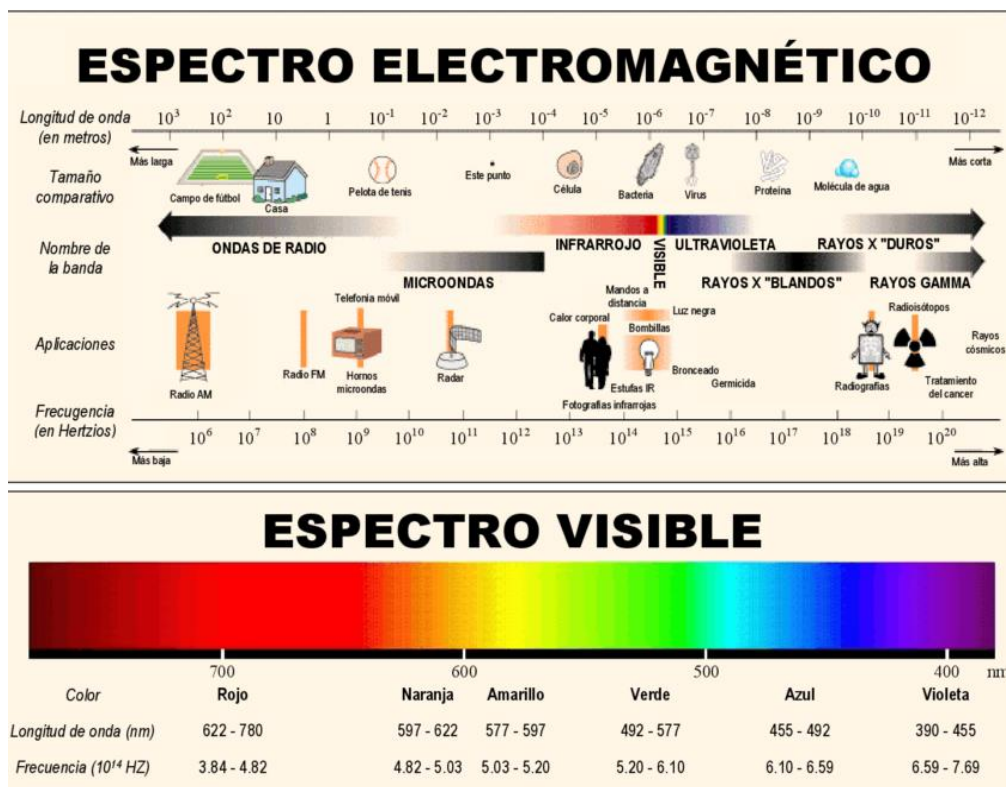
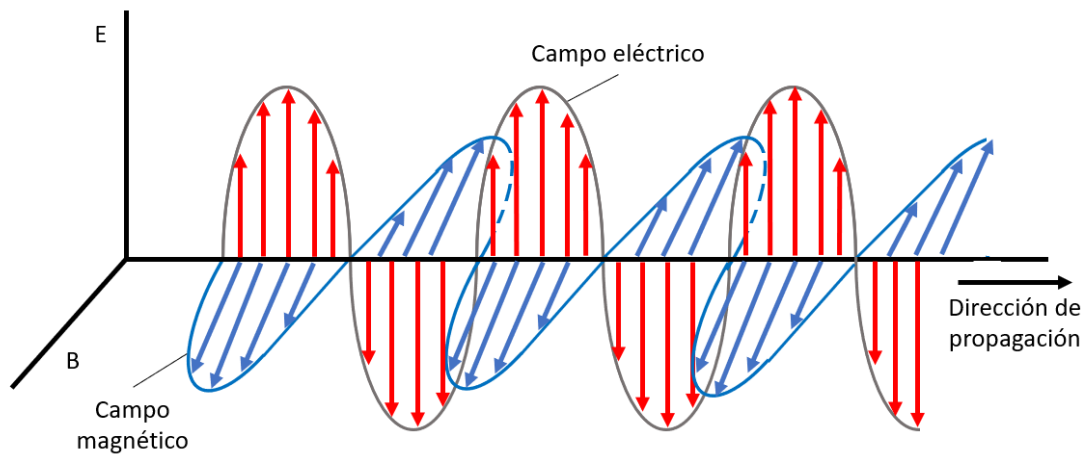


Figura 1.1 Espectro electromagnético [3].

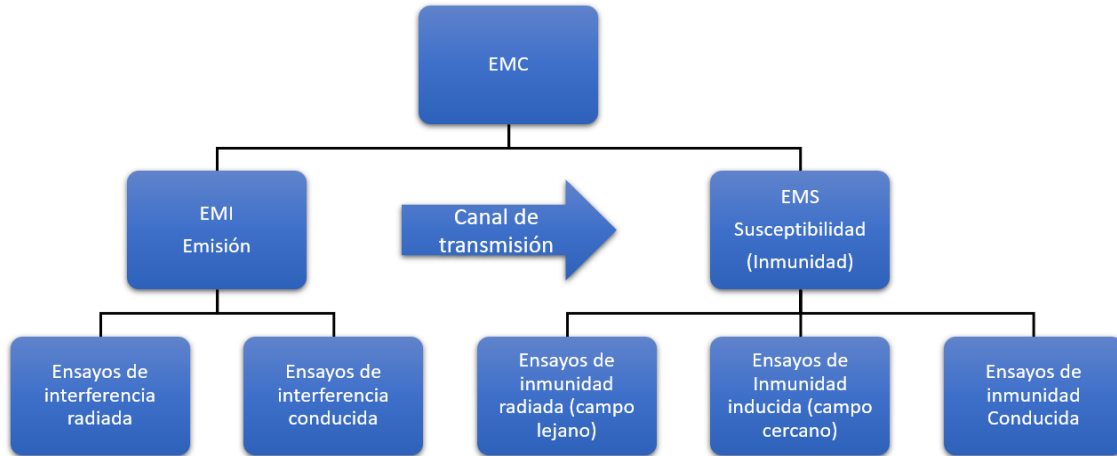
Una onda electromagnética es la combinación de un campo eléctrico y un campo magnético que se propagan en la misma dirección, pero en planos ortogonales, como se puede observar en la **Figura 1.2**. La variación en el campo magnético induce un campo eléctrico y viceversa. Por lo tanto, el campo magnético de una onda electromagnética es generada por el campo magnético que, a su vez, es generado por el campo eléctrico, ambos nutriéndose en un arreglo perfecto.



**Figura 1.2** Onda electromagnética [4].

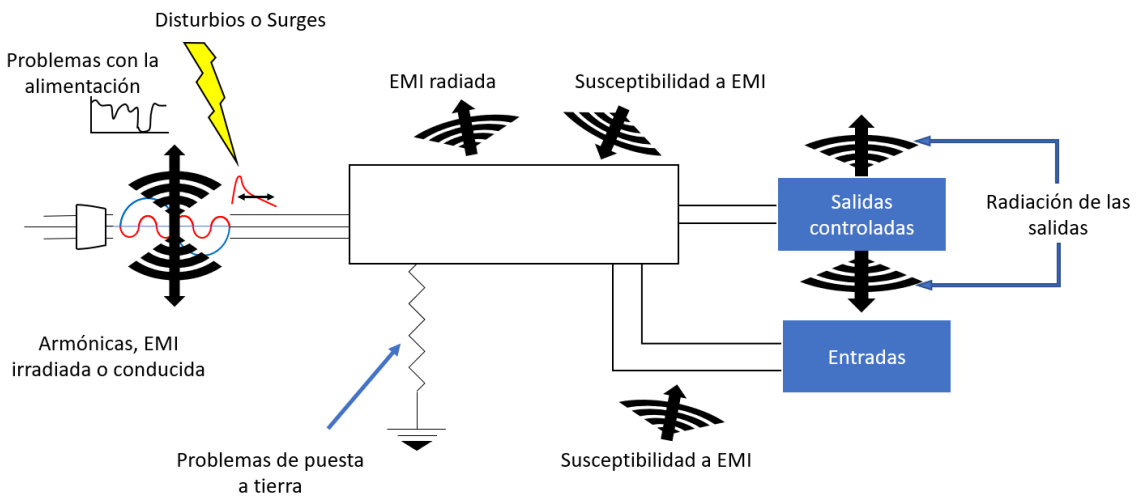
Con base en la EMC, se han desarrollado diversos equipos de medición de señales y campos electromagnéticos tanto en modo conducido como radiado, para la realización de pruebas o ensayos aplicados a los aparatos eléctrico-electrónicos que se fabrican en la industria. El objetivo de estas pruebas es determinar el nivel de las emisiones electromagnéticas, así como la susceptibilidad o inmunidad a ciertas señales de los aparatos eléctrico-electrónicos en conformidad con normas internacionales. De esta manera se determina si los productos pueden ser introducidos al mercado nacional e internacional, o si estos deben mejorarse. Con estas actividades se preserva el ambiente de emisiones electromagnéticas, cuidando la salud de las personas y demás seres vivos [1].

El estudio formal de la **EMC** puede hacerse a partir de comprensión de las dos principales ramas de la compatibilidad electromagnética, estas son la interferencia electromagnética **EMI** y la susceptibilidad electromagnética **EMS**. A continuación, se explican estos conceptos y otros que también son relevantes para efecto de comprender el presente documento (tales como canal de transmisión, interferencia conducida y radiada), de acuerdo con la norma internacional IEC 61000-1. La manera en que se relacionan estos conceptos puede observarse en la **Figura 1.3**.



**Figura 1.3** Estudio de la EMC.

**Interferencia electromagnética [EMI Electromagnetic Interference]:** “es la degradación de las funciones de un equipo, canal de transmisión o sistema, provocada por una perturbación. Aunque son conceptos distintos las palabras interferencia y perturbación son a menudo utilizadas indistintamente”. En la **Figura 1.4** se muestran ejemplos de algunas fuentes EMI [6].



**Figura 1.4** Fuentes EMI [5].

**Susceptibilidad Electromagnética [EMS Electromagnetic Susceptibility]:** “es la incapacidad de un dispositivo, aparato o sistema de funcionar sin degradar la calidad en presencia de una perturbación electromagnética. Entonces, se define como **inmunidad** (electromagnética) como lo contrario a susceptibilidad, es decir, se trata de la capacidad de un dispositivo, equipo o sistema de funcionar sin degradación en presencia de una perturbación electromagnética” [6].

Otros conceptos importantes para entender la EMC son las interferencias conducidas e interferencias radiadas:

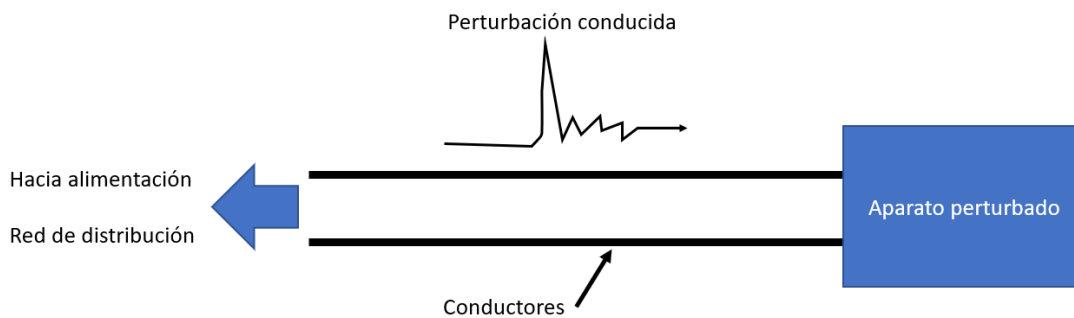
**Origen:** la fuente de las perturbaciones.

**Receptor de perturbaciones:** equipo afectado por éstas.

**Canal de transmisión:** medios de propagación o caminos de acoplamiento.

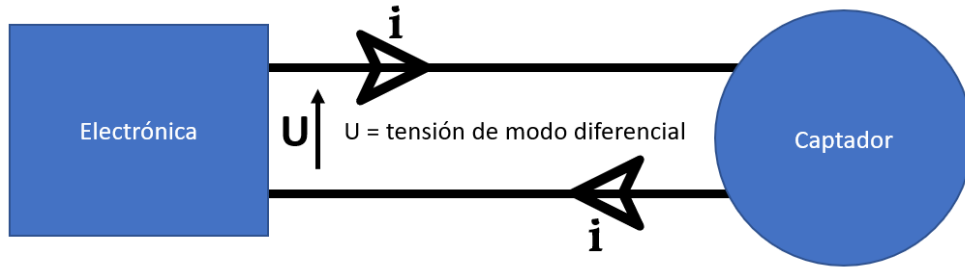
**Interferencias conducidas:** Son las señales no deseadas que se superponen a las esperadas, cuando el medio de propagación es un conductor eléctrico que une la fuente de interferencias con el receptor (cables de alimentación o señal, pantallas o chasis metálicos, capacitancias parásitas, cables de tierra, red de distribución, cables de datos etc.) [7].

En la **Figura 1.5** se representa esquemáticamente una interferencia conducida.



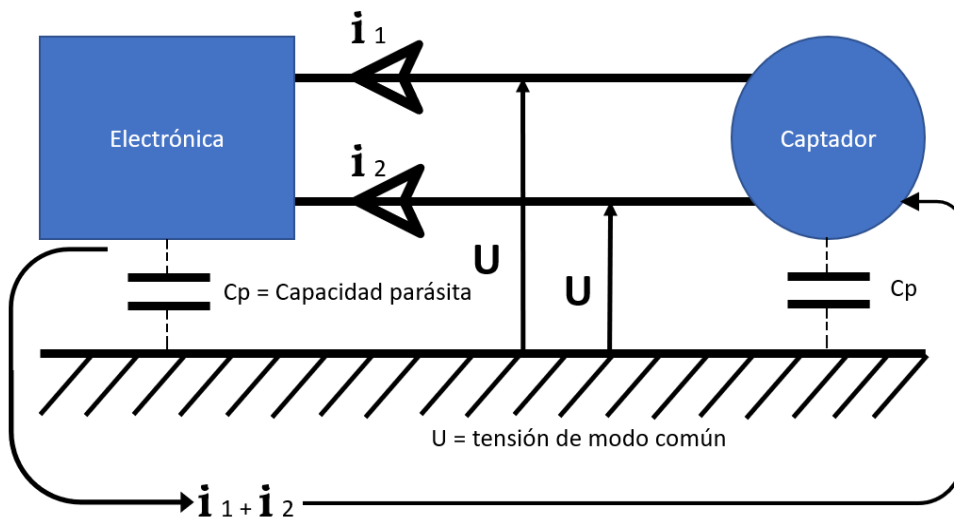
**Figura 1.5** Ejemplo de interferencia (perturbación) conducida [7].

Las interferencias conducidas, se pueden clasificar en **modo diferencial** y **modo común**. Las señales no deseadas de modo diferencial (o modo serie) se propagan por uno de los conductores, pasa a través del aparato “víctima” provocando, o no, un fallo en su funcionamiento y regresa por otro conductor tal como se muestra en la **Figura 1.6** [7].



**Figura 1.6** Interferencias conducidas en modo diferencial [7].

Las interferencias en modo común se propagan por todos los conductores en el mismo sentido y regresan a través de las capacitancias parásitas. Ver **Figura 1.7**.



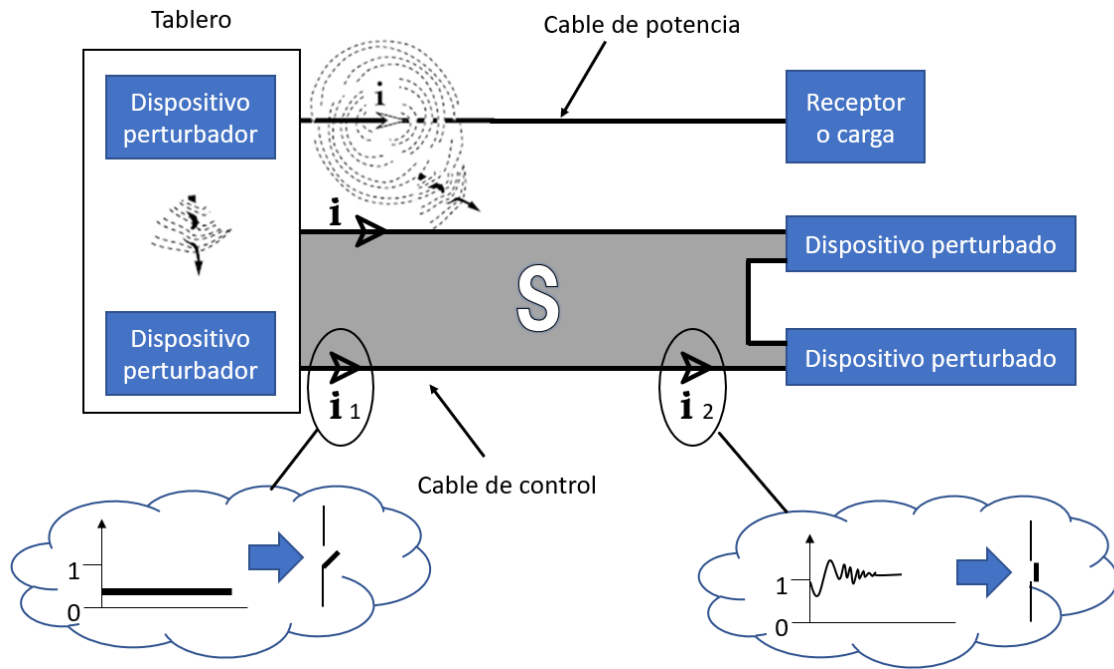
**Figura 1.7** Interferencias conducidas en modo común [7].

**Interferencias radiadas:** “Son las señales no deseadas que se superponen a las esperadas, cuando la propagación se realiza mediante el campo electromagnético de



radiación, esto es, cuando la distancia de propagación es mayor que la longitud de onda dividida por  $2\pi$  [7].

En la **Figura 1.8** se muestra un ejemplo de interferencia radiada y sus consecuencias en una salida digital de control.

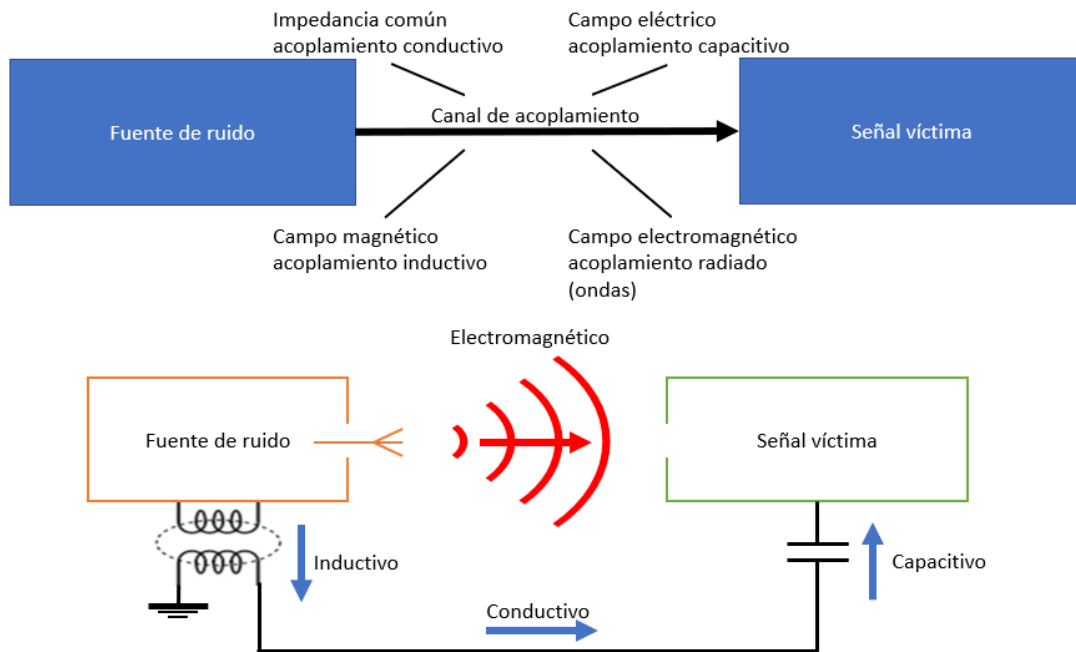


**Figura 1.8** Ejemplo de interferencia (perturbación) radiada [7].

Estas interferencias, ya sea radiadas o conducidas pueden generar mal funcionamiento de dispositivos susceptibles tales como:

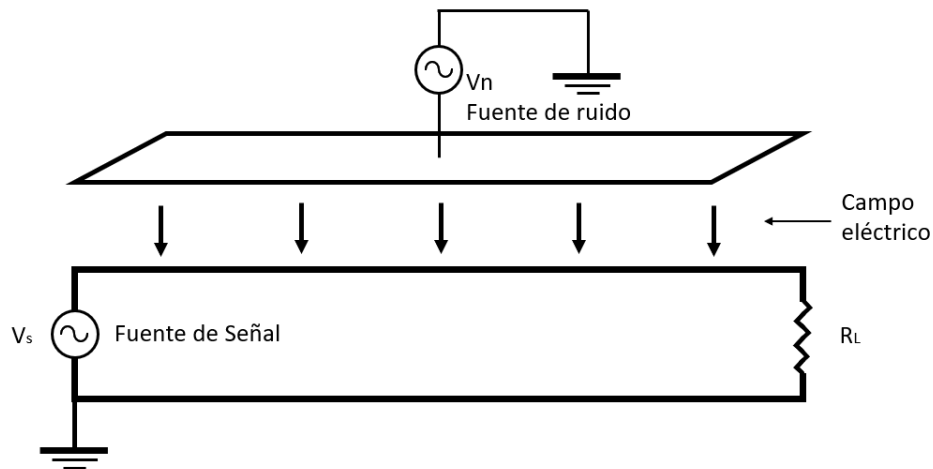
- Flotación de tensión;
- Armónicos de corriente
- Radiofrecuencias
- Transitorios
- Campos Electrostáticos
- Campos Magnéticos
- Parpadeos (flicker)
- Caídas de voltaje
- Sobretensiones

En la **Figura 1.9** se muestran los diferentes tipos de acoplamientos a través de los cuales se puede propagar la EMC, posteriormente se explican a detalle las características de cada uno de estos:



**Figura 1.9** Tipos de acoplamientos generadores de interferencias electromagnéticas [5].

**Acoplamiento capacitivo:** Es la interacción de campos eléctricos entre conductores. Un conductor que pasa cerca de la fuente de ruido (emisor), capta este ruido y lo transporta a otra parte del circuito (susceptible). Es el efecto de capacitancia entre dos cuerpos con cargas eléctricas separadas por un dieléctrico, lo que llamamos de efecto de capacitancia mutua. En la **Figura 1.10** se muestra la representación gráfica de este tipo de acoplamiento.



**Figura 1.10** Representación física del acoplamiento capacitivo [5].

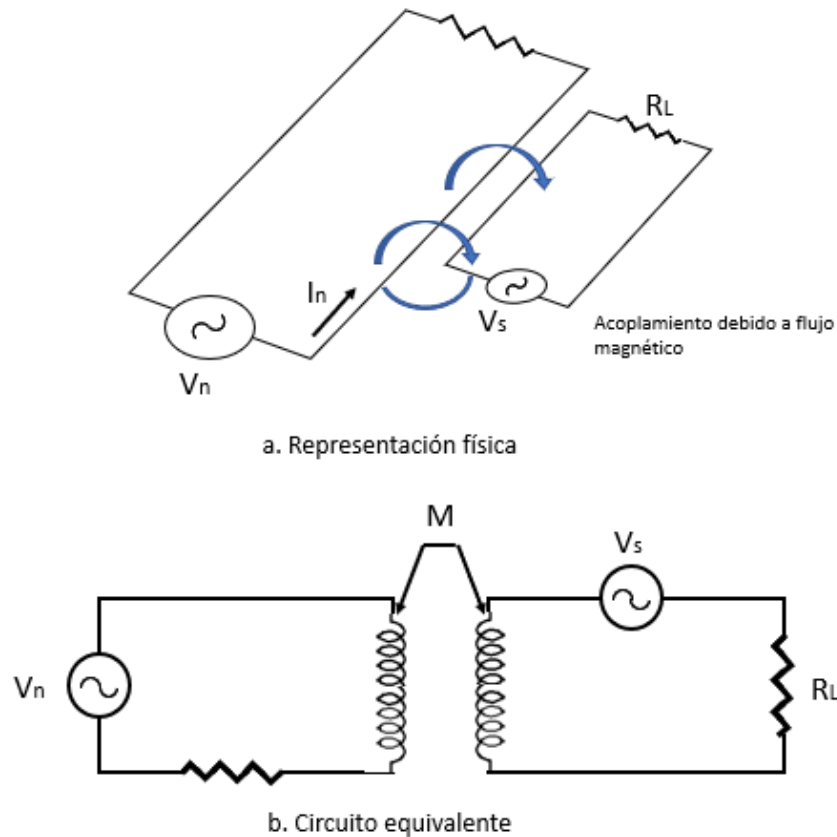
La capacitancia equivalente resultante, es directamente proporcional al área de acción del campo eléctrico e inversamente proporcional a la distancia entre los dos circuitos. Así, aumentando la separación o minimizando el área, la influencia de la capacitancia equivalente será minimizada y consecuentemente, el acoplamiento capacitivo afectará menos la señal. Al efecto de capacitancia entre dos cuerpos con cargas eléctricas, separadas por un dieléctrico, la llamamos efecto de capacitancia mutua.

El efecto del campo eléctrico es proporcional a la frecuencia e inversamente proporcional a la distancia.

El nivel de perturbación depende de las variaciones de tensión con respecto al tiempo ( $dv/dt$ ) y del valor de la capacitancia de acoplamiento entre el “cable emisor” y el “cable susceptible”.

**Acoplamiento inductivo:** “También se llama diafonía inductiva”, es una interferencia de origen magnético, asociada a los conductores por los que circula corriente. El paso de una corriente por un conductor crea un campo magnético y dependiendo de su magnitud y la proximidad a otros conductores, el campo magnético creado puede afectarlos en mayor o menor medida. En la **Figura 1.11** se muestra la representación gráfica de este acoplamiento, así como su circuito eléctrico equivalente. Si la corriente varía, entonces el campo magnético varía. Por otro lado, si la corriente es fija crea un campo magnético

fijo. En ambos casos se genera un flujo magnético no deseado que causa la aparición de corrientes inducidas en los circuitos próximos según la ley de Faraday-Lenz. Este tipo de interferencias aparecen cuando existe un flujo magnético variable y unas frecuencias superiores a 3 kHz. [11].



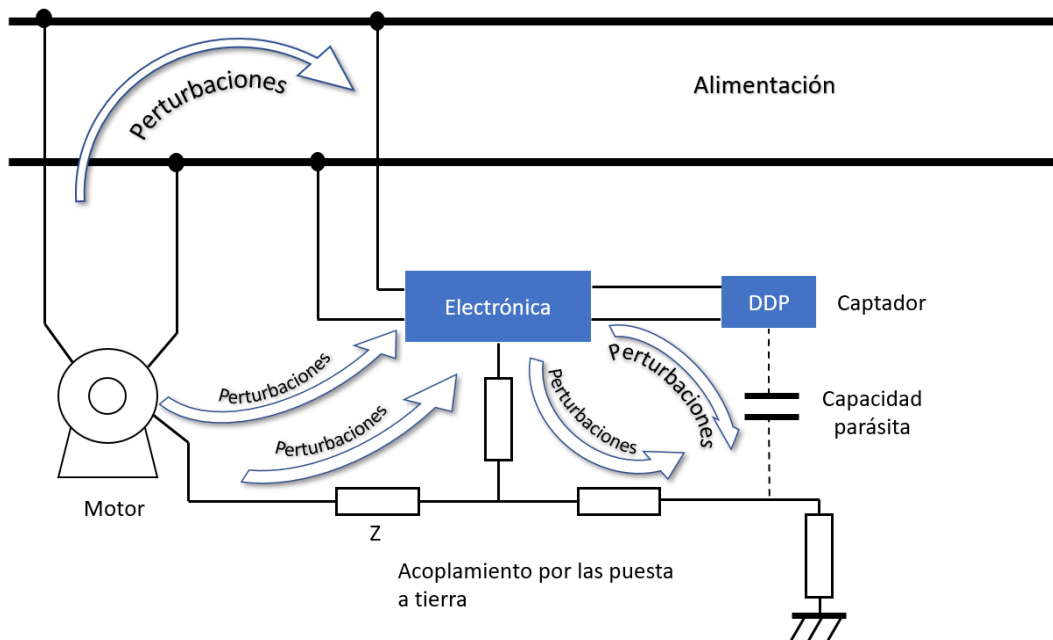
**Figura 1.11** Acoplamiento inductivo –Representación física y circuito equivalente [5].

**Conducción a través de una impedancia común (puesta a tierra):** ocurre cuando las corrientes de dos áreas distintas pasan por la misma impedancia. Por ejemplo, el camino de puesta a tierra común de dos sistemas.

En efecto, todas las conexiones a tierra de un dispositivo electrónico, por ejemplo, están conectados a la tierra física de una instalación a través de conductores eléctricos de impedancia  $Z$  no nula [7].

Como consecuencia, se produce una diferencia de potencial entre la tierra física y la tierra del dispositivo electrónico y otros dispositivos o máquinas.

Estas diferencias de potencial provocan la circulación de corrientes perturbadoras por los diferentes circuitos eléctricos. Este caso se muestra en la **Figura 1.12** en donde se observa que las perturbaciones pasan a través de las diferentes trayectorias formadas por las puestas a tierra.



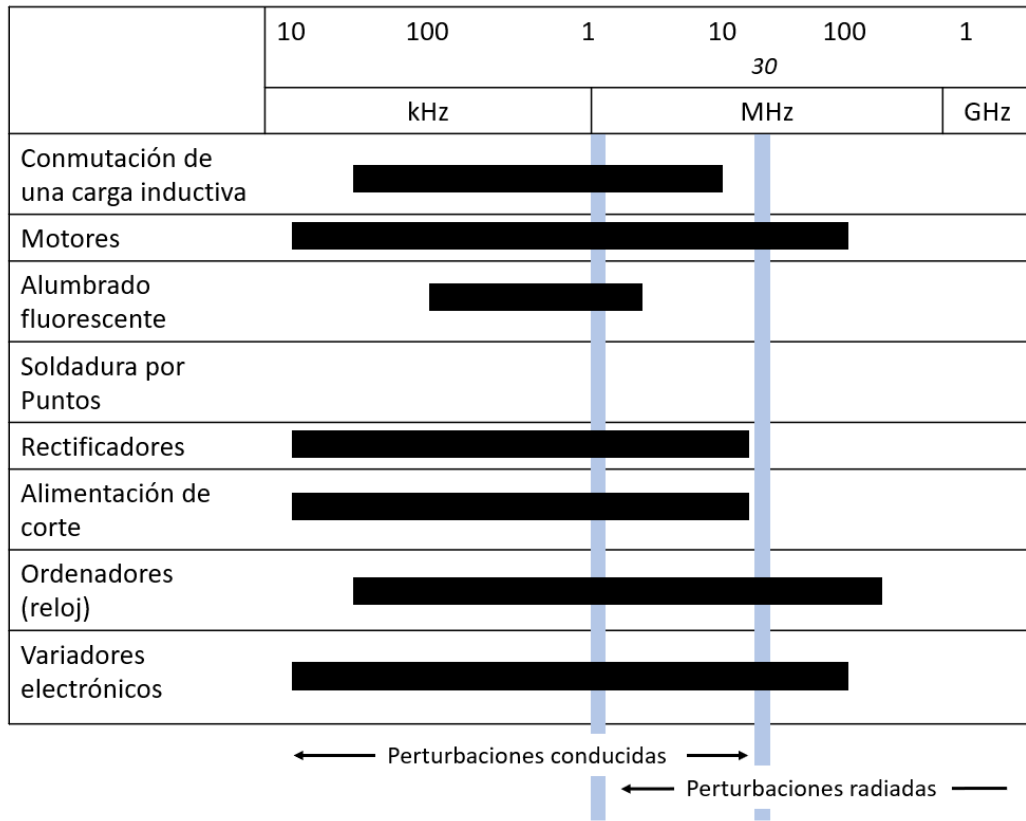
**Figura 1.12** Acoplamientos a través de impedancia común (puesta a tierra) [7].

Otra manera de clasificar el tipo de interferencias o perturbaciones es por su frecuencia (Hz). Se pueden identificar perturbaciones de baja frecuencia y perturbaciones de alta frecuencia.

**Perturbaciones de baja frecuencia:** Se consideran así a las perturbaciones cuya frecuencia se encuentra entre 0 y 5 MHz, se producen en las instalaciones eléctricas principalmente por conducción (a través de los cables). Generalmente su duración se encuentra en el orden de decenas de milisegundos y la energía conducida puede ser elevada, dando como resultado mal funcionamiento o averías en los aparatos interconectados.

**Perturbaciones de alta frecuencia:** Las perturbaciones de este tipo se consideran de alta frecuencia cuando están por encima de los 30 MHz y son producidas principalmente por radiación (a través del aire). Los impulsos de alta frecuencia tienen duraciones menores a 10 nanosegundos y su efecto puede ser permanente, Generalmente la energía radiada es baja y como resultado los dispositivos en el entorno tienen mal funcionamiento.

En la **Figura 1.13** se ilustran ejemplos de perturbaciones conducidas y radiadas, así como las frecuencias en las cuales se pueden presentar en las instalaciones eléctricas:



**Figura 1.13** Distribución espectral de las perturbaciones [7].

## 1.2 PROBLEMAS DE EMC QUE CAUSARON DAÑOS A LA SALUD DE LAS PERSONAS

Para ilustrar la importancia de tener en cuenta los fenómenos de compatibilidad electromagnética al nivel de su interacción con la integridad del ser humano, a continuación, se presentan un ejemplo.

### **Muerte de una persona por interferencia de radiofrecuencias en una ambulancia.**

Los técnicos médicos llevaban a una víctima de un infarto al hospital en 1992, la conectaron a un monitor/desfibrilador. Desafortunadamente, la máquina se apagaba cada vez que los técnicos encendían su transmisor de radio para pedir ayuda, y como resultado la mujer murió. El análisis mostró que la unidad del monitor había sido expuesta a campos excepcionalmente altos porque el techo de la ambulancia había sido cambiado de metal a fibra de vidrio y equipado con una antena de radio de largo alcance. El blindaje reducido del vehículo combinado con la fuerte señal radiada resultó ser demasiado para el equipo desfibrilador. [8]

Como se puede comprender, los efectos de la EMC pueden tener efectos negativos en la salud de las personas e incluso puede llegar a provocar la muerte. En las referencias [9] y [10] se describen otros casos en los cuales la falta de precaución, diseños deficientes u omisión derivaron en daños a la salud de seres humanos.





### 1.3 NORMATIVAS EMC

En esta sección se citan las normativas más relevantes en el ámbito industrial consideradas para el estudio de la compatibilidad electromagnética, en la **Figura 1.14** se muestra su distribución de acuerdo con el campo de aplicación de cada una de ellas.

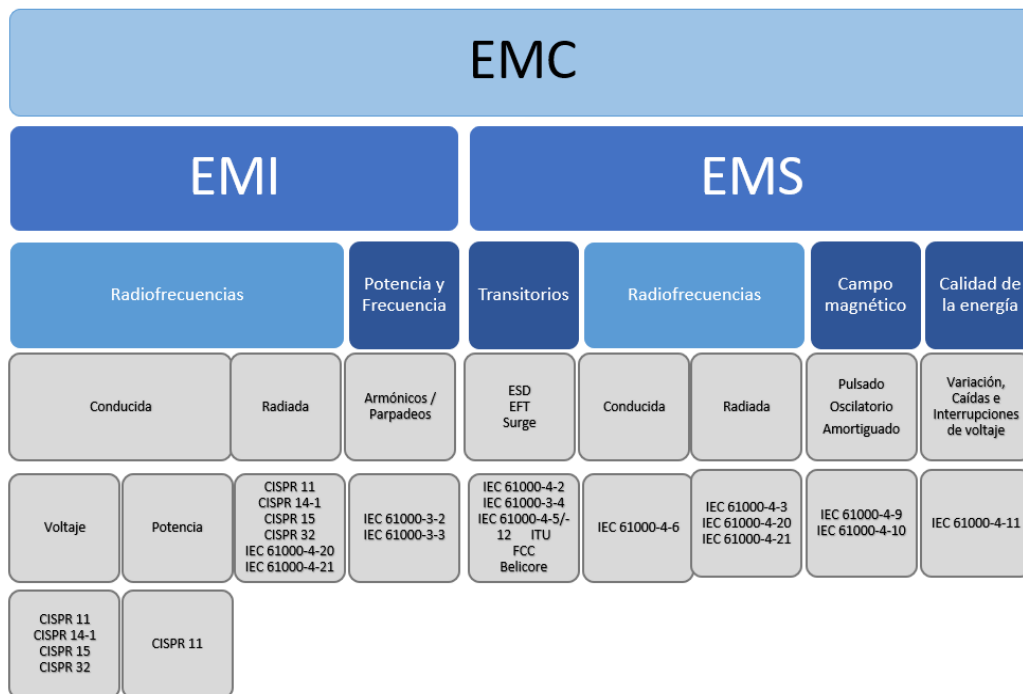
#### **Interferencia electromagnética [EMI Electromagnetic Interference]:**

- **CISPR 11** - Industrial, scientific, and medical equipment - Radio-frequency disturbance characteristics - Limits and methods of measurement.
- **CISPR 14-1** - Electromagnetic compatibility - Requirements for household appliances, electric tools, and similar apparatus - Part 1: Emission.
- **CISPR 15** - Limits and methods of measurement of radio disturbance characteristics of electrical lighting and similar equipment.
- **CISPR 32** - Electromagnetic compatibility of multimedia equipment - Emission requirements.
- **IEC 61000-4-20** - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-20: Testing and measurement techniques - Emission and immunity testing in transverse electromagnetic (TEM) waveguides.
- **IEC 61000-4-21** - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-21: Testing and measurement techniques - Reverberation chamber test methods.
- **IEC 61000-3-2** - Amendment 1 - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits - Limits for harmonic current emissions (equipment input current  $\leq 16$  A per phase).
- **IEC 61000-3-3** - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-3: Limits - Limitation of voltage changes, voltage fluctuations and flicker in public low-voltage supply systems, for equipment with rated current  $\leq 16$  A per phase and not subject to conditional connection.

#### **Susceptibilidad Electromagnética [EMS Electromagnetic Susceptibility]:**

- **IEC 61000-4-2** - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-2: Testing and measurement techniques - Electrostatic discharge immunity test.
- **IEC 61000-4-4** - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-4: Testing and measurement techniques - Electrical fast transient/burst immunity test.
- **IEC 61000-4-5** - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-5: Testing and measurement techniques - Surge immunity test.
- **IEC 61000-4-12** - Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4-12: Testing and measurement techniques - Ring wave immunity test.

- **ITU** - The International Telecommunication Union.
- **FCC** - Food Chemicals Codex
- **IEC 61000-4-6** - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-6: Testing and measurement techniques - Immunity to conducted disturbances, induced by radio-frequency fields.
- **IEC 61000-4-3** - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-3: Testing and measurement techniques - Radiated, radiofrequency, electromagnetic field immunity test.
- **IEC 61000-4-20** - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-20: Testing and measurement techniques - Emission and immunity testing in transverse electromagnetic (TEM) waveguides.
- **IEC 61000-4-21** - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-21: Testing and measurement techniques - Reverberation chamber test methods.
- **IEC 61000-4-9** - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-9: Testing and measurement techniques - Impulse magnetic field immunity test.
- **IEC 61000-4-10** - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-10: Testing and measurement techniques - Damped oscillatory magnetic field immunity test.
- **IEC 61000-4-11** - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-11: Testing and measurement techniques - Voltage dips, short interruptions, and voltage variations immunity tests for equipment with input current up to 16 A per phase



**Figura 1.14** Categorización de normas EMC según su campo de aplicación.

## 1.4 CONTEXTO GLOBAL DE LA COMPAÑÍA GRUNDFOS

Grundfos es el líder mundial en el diseño y fabricación de bombas para el manejo, extracción, presurización, circulación, suministro y tratamiento de agua. Es el principal fabricante de bombas para agua y su gran variedad de líneas de equipos de bombeo sumergibles y de superficie, satisfacen necesidades domésticas, comerciales e industriales.

Los productos Grundfos son de calidad premium, de larga vida útil y de fácil acceso ya que están disponibles a través de su extensa red de distribuidores en México. Entre sus principales productos, destacan las bombas sumergibles Grundfos modelos SP y SQE para pozos profundos.

Se utilizan entre otras cosas para el abastecimiento de agua, aumento de presión, sistemas de refrigeración industrial, irrigación, sistemas de aire acondicionado, alimentación de calderas, manejo de lodos y efluentes.

A continuación, se mencionan algunos de los momentos históricos más relevantes para la compañía nivel mundial:

**1944:** Poul Due Jensen fundó una pequeña empresa en Bjerringbro en el sótano de su villa privada. El nombre Grundfoss fue originalmente un nombre de producto, pero se convirtió en sinónimo de la empresa durante la década de 1960. En 1967 se eliminó una “s” y el nombre Grundfos que se conoce hoy fue una realidad.

**1945:** Poul Due Jensen y sus pocos empleados se comprometieron con los servicios de una herrería y calefacción y saneamiento en 1944. Pero Poul Due Jensen recibió un pedido en 1945 para una pequeña planta automática de agua y cuando no pudo encontrar una bomba eléctrica de calidad satisfactoria, decidió desarrollar uno él mismo. El año 1945 marca el comienzo de las actividades de bombas de la empresa y, por lo tanto, es el año de celebración de los aniversarios de Grundfos.

**1946:** Poul Due Jensen recibió un pedido de una pequeña instalación automática de agua para una granja de la zona. En ese momento no pudo obtener una bomba de calidad

satisfactoria, lo que le llevó a desarrollar su primera bomba Foss 1, apodada "el cerdo" por su diseño. Foss era una bomba de pistón de agua subterránea poco profunda, diseñada para bombear agua de pozos de hasta 7 metros de profundidad. Era una bomba de doble acción, lo que significaba que bombeaba agua tanto hacia adelante como hacia atrás del pistón. Se produjeron y vendieron un total de 26 bombas de este modelo.

**1947:** La primera bomba Dybfoss se fabricó en 1947 y era una bomba de pistón de agua subterránea profunda, diseñada para bombear agua de pozos de más de siete metros de profundidad.

**1949:** Desde sus inicios, la compañía vendió sus bombas a gran parte de Dinamarca y durante la década de 1940 comenzó a mirar más allá de las fronteras del país. La primera exportación fue una realidad en 1949 y el país importador fue Noruega. Pronto siguieron otros países, la primera exposición extranjera fue en Suecia en 1953.

**1952:** La producción de la bomba centrífuga CP comenzó en 1952 y fue la primera bomba Grundfos en utilizar la tecnología de bomba centrífuga. Las bombas de pistón Grundfos tenían una capacidad muy alta, pero eran pesadas y consumían mucho material. Las bombas centrífugas eran mucho más pequeñas y estaban compuestas principalmente de componentes redondos y cilíndricos que permitieron racionalizar la producción. Las bombas de pistón pronto fueron reemplazadas por bombas centrífugas.

**1953:** La Dybfoss BP (bomba de pozo) fue la primera bomba centrífuga para pozos de más de 7 metros de profundidad. Hasta ese momento, solo había sido posible que la bomba de pistón de aguas profundas de Dybfoss bombeara agua de pozos con una profundidad de no más de 7 metros, pero en cooperación con un ingeniero Poul Due Jensen logró diseñar y construir una vertical bomba de pozo. La BP era una variante de la bomba centrífuga, CP.

**1955:** El primer logotipo de Grundfos se introdujo en 1953 y era una abreviatura del nombre de la empresa Bjerringbro Pressestøberi con las letras B y P. El logotipo se utilizó los años siguientes cuando el nombre de la empresa cambió a Bjerringbro Pumpefabrik, Sin embargo, en 1955 un empleado le presentó a Poul Due Jensen una

ilustración del tornillo de agua de Arquímedes que tenía un parecido notable con el interior de la bomba centrífuga CP. Desde entonces, el tornillo de agua ha sido el símbolo de Grundfos y durante años ha visto varios diseños.

**1959:** La bomba circuladora VP 32 se lanzó como bomba para la circulación de la calefacción central, así como para la circulación de agua caliente sanitaria. La bomba tenía un alojamiento de rotor de acero inoxidable y cojinetes de metal duro que no podían desgastarse por los procesos que ocurren normalmente en un sistema de calefacción. El sistema de cojinetes era extremadamente confiable y algunas bombas de este tipo todavía están en uso.

**1960:** La primera filial se fundó en la pequeña ciudad de Wahlstedt en Alemania. La empresa era tanto una empresa de producción como de ventas.

**1962:** Se decidió establecer una escuela nocturna para los empleados a medida que la expansión y el comercio global se volvían cada vez más relevantes. La primera educación fueron cursos en diferentes idiomas y matemáticas.

**1965:** El VP 35 era básicamente el mismo que el VP 32, pero el diseño se había cambiado por completo y se había reducido el peso. La innovación fue la función de ajuste hidráulico, que hizo posible "apagar la bomba" mediante un baipás interno. Esto ofrecía varias ventajas, como que la resistencia del sistema no tenía que calcularse con mucha precisión, y el sistema podía cambiarse y ampliarse sin problemas.

**1967:** Las bombas SP (bombas sumergibles) supusieron un gran avance ya que estaban hechas completamente de acero inoxidable. Se utiliza para bombear agua sin filtrar para suministro de agua, riego y descenso de aguas subterráneas. El acero inoxidable significaba que las bombas tenían una vida útil mucho más larga, incluso en aguas agresivas. Las bombas SP llenaron un nicho con una demanda significativa, ya que las bombas de pistón estaban obsoletas hace mucho tiempo.

**1968:** Grundfos fue la primera empresa privada en Dinamarca en abrir un taller protegido para empleados con necesidades especiales. La iniciativa fue tomada en 1964 y fue una colaboración entre Grundfos, el consejo parroquial y el sistema nacional de bienestar.

**1969:** Debido a que no se pudo encontrar maquinaria de producción estándar para producir en masa los circuladores Grundfos, Grundfos comenzó a diseñar y construir sus propias máquinas de producción para las bombas circuladoras. La máquina se denominó "carrusel" y procesó las piezas para las bombas de circulación, lo que supuso un importante ahorro de tiempo.

**1971:** La CR30 fue la primera bomba centrífuga multietapa en línea jamás fabricada. El aspecto más revolucionario fue que la entrada y la salida se colocaron al mismo nivel, alineadas entre sí. Por tanto, la bomba podía instalarse en cualquier lugar de un sistema sin necesidad de realizar cambios en las tuberías, lo que suponía una gran ventaja para la instalación. Como muchos otros diseños de Grundfos, ahora es un estándar industrial.

**1973:** La primera filial de Grundfos en el extranjero se estableció en 1973 en EE. UU. Sin embargo, la inauguración oficial no tuvo lugar antes de 1976, cuando la empresa tuvo una mejor presencia en el nuevo mercado.

**1974:** Grundfos inició el desarrollo de sus propios motores sumergibles a finales de la década de 1960 y la producción se inició en 1974. Los motores sumergibles estaban hechos de lámina fina de acero inoxidable para evitar la corrosión. Esto significaba que los motores eran rentables ya que las reparaciones y los reemplazos eran poco frecuentes.

**1975:** En 1975, Poul Due Jensen estableció la Fundación Poul Due Jensen, a la que se le otorgó la mayoría de las acciones de Grundfos. La Fundación se convirtió en la nueva propietaria de Grundfos y podría asegurar nuevas inversiones y crecimiento en la empresa.

**1976:** Grundfos inició la producción de motores estándar propios. El primer motor estándar recibió el premio danés de diseño industrial.

**1977:** Antes de la introducción de la Jet Pump, las bombas solían instalarse en un lugar fijo desde donde operaban. La Jet Pump fue una bomba centrífuga portátil desarrollada y diseñada para aplicaciones universales, como suministro de agua a pequeña escala, impulso, lavado de automóviles, piscinas, granjas, transporte de líquidos y plantas industriales. Una instalación fácil y sencilla, un funcionamiento fiable y silencioso y una

larga vida fueron algunas de las ventajas. La Jet Pump estaba equipada con un eyector incorporado, que la hacía autocebante y era una bomba muy práctica, eficiente e innovadora que también le valió a Grundfos su tercer premio ID (premio danés de diseño industrial) por su diseño innovador.

**1978:** En noviembre de 1977, Poul Due Jensen falleció a la temprana edad de 65 años. Su hijo Niels Due Jensen, que en ese momento tenía 34 años, fue puesto a cargo de la empresa.

**1980:** La producción de productos electrónicos en Grundfos existía desde la década de 1970, pero con el enfoque mundial en el ahorro de energía y el clima, un nuevo proyecto comenzó a desarrollarse en 1980; el desarrollo de un convertidor de frecuencia controlado por un micro1982:

**1982:** Durante la década de 1980, comenzó a manifestarse en todo el mundo un amplio interés por el cambio climático y la sostenibilidad. Grundfos comenzó a investigar las posibilidades de una bomba impulsada por energía solar alrededor de 1980 y cuando el UNDP lanzó un concurso de sistemas de bombas solares en 1980, el trabajo realmente despegó. Grundfos presentó al mundo su sistema de bombeo impulsado por energía solar en 1982 y ganó el concurso UNDP.

**1984:** Con la introducción de la pequeña y práctica bomba de drenaje KP, Grundfos entró en el mercado de las aguas residuales. El estator de la bomba estaba incrustado en material compuesto y el resto de la bomba estaba hecho completamente de acero inoxidable. La bomba era adecuada para una gran variedad de propósitos que incluían agua de drenaje o aguas residuales grises y era muy fácil de limpiar con herramientas manuales simples. La bomba de drenaje KP fue la primera de una amplia gama de bombas para aguas residuales fiables y de alta calidad que Grundfos introdujo en los años siguientes.

**1984:** Grundfos inventó CAPS, el primer programa de cálculo de bombas para uso comercial en el mundo, para su uso en una computadora “Apple 2”.

**1989:** Grundfos A / S, como primer fabricante de bombas del mundo, fue certificado según la norma de calidad ISO 9001.

**1989:** Utilizando la denominada “tecnología de fusión de núcleos”, Grundfos fue el primer fabricante de bombas que pudo producir formas complicadas en materiales compuestos, como carcasas de bombas especiales para clientes OEM. Grundfos ahora pudo producir bombas a la medida de una manera mucho más eficiente y precisa.

**1990:** El Centro Tecnológico fue creado para continuar el trabajo de desarrollo masivo en tecnología de producción, optimización de procesos de producción e investigación de nuevos materiales y diseños.

**1991:** El desarrollo de un micro convertidor de frecuencia comenzó a mediados de la década de 1980. La extensa investigación y desarrollo dio como resultado el lanzamiento de X99 en 1991. X99 se presentó en la bomba circuladora UPE, lo que la convirtió en la primera bomba inteligente del mundo. El X99 resultó en un enorme ahorro de energía y, posteriormente, fue una parte integral de muchas bombas Grundfos.

**1992:** La introducción de JetSub en 1992 fue revolucionaria, ya que fue la primera bomba sumergible con componentes electrónicos integrados encapsulados en el motor. Gracias al micro convertidor de frecuencia X99, la bomba podría alcanzar una velocidad de rotación más alta y por lo tanto las dimensiones de la bomba podrían reducirse para coincidir con un pozo de 3” sin dejar de ofrecer el mismo rendimiento que una bomba convencional.

**1993:** Grundfos fue el único fabricante de bombas que produjo sus propios motores eléctricos y electrónicos. Con el motor eléctrico MGE, se incorporó por primera vez un micro convertidor de frecuencia en un motor eléctrico estándar como una unidad integrada. Debido a esto, las bombas con una necesidad variable de flujo y presión, ventiladores y otros aparatos pueden ser controlados por velocidad, haciendo posible un gran ahorro de energía.

**1994:** El JetpaQ fue revolucionario con convertidor de frecuencia, bomba, sensor de presión y tanque, todo construido en una unidad integrada. La presión y el flujo de agua



se regulaban automáticamente a través de la electrónica integrada y, combinado con su pequeño tamaño, era posible instalarlo prácticamente en todas partes.

**1995:** Grundfos presentó su primera bomba para aguas residuales de acero inoxidable: la bomba AP.

**1995:** Una vez más, Grundfos tomó la delantera en tecnología al introducir un motor estándar trifásico con un convertidor de frecuencia incorporado que también se podía ajustar mediante un control remoto.

**1995:** Grundfos introdujo el control remoto R100 en 1995, que permitía configurar, diagnosticar y reparar bombas electrónicas mediante un dispositivo de mano remoto. El dispositivo se comunicó con una pequeña impresora que imprimió estadísticas vitales de la bomba. Esto hizo que el R100 fuera completamente único en el mundo de la tecnología de bombas.

**1996:** Grundfos recibió la certificación medioambiental internacional ISO 14001.

**2000:** Grundfos presentó sus primeras bombas dosificadoras digitales. Basadas en el revolucionario principio patentado del motor paso a paso, las bombas dosificadoras digitales pueden suministrar cantidades muy exactas de fluido dosificador.

**2000:** Hasta que Grundfos introdujo la dosificación digital, era un proceso lento y difícil alcanzar la dosis exacta necesaria para que los sistemas de dosificación fueran económicos y seguros. La dosificación digital Grundfos de introdujo principios de accionamiento completamente nuevos en bombas dosificadoras de diafragma, complementados con control digital electrónico directo desde paneles de control con botones.

**2001:** La educación de los empleados de Grundfos comenzó en 1962 con la introducción de una escuela nocturna y se ha desarrollado a lo largo de los años. Con la inauguración de la Academia Poul Due Jensen, toda la educación y el aprendizaje se reunieron en un solo lugar con todas las nuevas instalaciones educativas.

**2001:** El proyecto de marca se inició para comunicar la esencia de los valores fundamentales a los clientes, empleados y otros socios.

El objetivo era que los clientes actuales y futuros prefirieran tratar con Grundfos porque conocían y apreciaban los valores de la empresa. Un objetivo adicional era que los empleados eligieran Grundfos como su lugar de trabajo porque estaban de acuerdo con los valores y la filosofía, y querían participar en su mantenimiento y consolidación. “Be Think Innovate” se convirtió en la nueva recompensa empresarial.

Al mismo tiempo, se fundó el departamento de eBusiness de Grundfos con el objetivo de fortalecer las asociaciones existentes agregando servicios electrónicos a nuestras actividades existentes. Grundfos Extranet y WebCAPS son ejemplos de proyectos que se han desarrollado. El departamento de eBusiness actual se concentra en la Innovación “electrónica”, especialmente en Ventas y Marketing.

**2001:** Antes de su introducción, los grupos de discusión de usuarios contribuyeron con una lista de cosas que les gustaría ver en una bomba circuladora nueva y aprobada. Esto resultó en una bomba con adaptación automática a las características del sistema, reducción del tiempo nocturno, panel de operación fácil de usar y otras características requeridas por los clientes. El Grundfos Magna también estaba equipado con un motor de imán permanente, lo que garantiza un importante ahorro de energía. Además, el concepto de control automático de velocidad se desarrolló aún más en Grundfos Magna, que supuso un gran avance en las bombas de circulación de última generación en 2001, al igual que la bomba VP a finales de la década de 1950.

**2002:** El SQFlex es flexible en su fuente de alimentación y, por lo tanto, es ideal para áreas remotas donde no hay fuente de alimentación o donde la fuente no es confiable. La bomba puede funcionar, por ejemplo, con energía solar o eólica o con un generador o baterías. Al igual que los sistemas de bombas solares desarrollados por Grundfos en la década de 1980, el SQFlex prácticamente no necesita mantenimiento.

**2002:** Grundfos presentó WebCAPS, el primer programa de cálculo de bombas en línea basado en la web.

**2003:** Niels Due Jensen (hijo del fundador Poul Due Jensen) dejó la responsabilidad al primer CEO sin el nombre Due Jensen: Jens Jørgen Madsen, quien tuvo toda su carrera de 30 años en Grundfos. Durante su carrera, fue presidente / miembro del consejo de administración de más de 25 empresas de Grundfos y se convirtió en miembro de la dirección del grupo en 1991. Jens Jørgen Madsen dimitió como presidente del grupo el 30 de noviembre de 2006.

**2003:** Grundfos presentó las bombas para aguas residuales SE1 y SEV, que también recibieron el premio ID por su diseño.

**2005:** La ALPHA Pro fue la primera bomba de bajo consumo de energía basada en un rotor de imán permanente y un micro convertidor de frecuencia incorporado. El estator estaba segmentado, el control del convertidor de frecuencia se basaba en sensores de pasillo y la capacidad de producción era limitada. El control automático aseguró que la presión y el flujo de la bomba se ajustaran constantemente a las necesidades actuales. La bomba se ajusta automáticamente al verano o al invierno, de noche o de día. El ALPHA Pro abrió el camino para las bombas de bajo consumo a nivel mundial.

**2006:** Entre los 27 finalistas, Grundfos A / S ganó el premio EFQM a la excelencia - ganador del premio y el premio EFQM a la excelencia - ganador del premio a la responsabilidad social corporativa y el premio a la excelencia EFQM - ganador del premio al desarrollo y participación de las personas.

La organización detrás de los premios es EFQM (The European Foundation of Quality Management). Su razón de ser es inspirar y ayudar a las empresas de toda Europa a la Fundación de la Gestión de la Calidad). Su misión es inspirar y ayudar a las empresas de toda Europa a participar en actividades de mejora que, en última instancia, conduzcan a la excelencia en la satisfacción del cliente, la satisfacción de los empleados, el impacto en la sociedad y los resultados comerciales.

**2006:** En 2002, Grundfos NoNOx A / S inició el desarrollo de una bomba dosificadora para SCR (reducción catalítica selectiva), para motores diésel de servicio pesado. El proceso SCR elimina los óxidos de nitrógeno venenosos (NOx) de los gases de escape al

dosificar una cantidad precisa de un agente reductor, urea. El sistema NoNOx representó el primer paso para Grundfos en el segmento de la automoción y se lanzó en Europa en 2006 para las aplicaciones Cummins Euro 4.

**2007:** Carsten Bjerg asumió el cargo de presidente del grupo después de Jens Jørgen Madsen. Se incorporó a Grundfos en 1997 como director de producción internacional. En 2000 Carsten Bjerg se convirtió en miembro de la dirección del grupo que supervisa la producción y la logística, la investigación y la tecnología, el comercio electrónico y la calidad. En 2004 fue nombrado vicepresidente del grupo antes de convertirse en director ejecutivo y presidente del grupo en 2007.

**2007:** Grundfos Biobooster se introdujo en 2007 como un sistema de tratamiento de aguas residuales descentralizado. La tecnología permite a los fabricantes industriales tratar las aguas residuales en sitio. Esto reduce la carga en las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales y minimiza la necesidad de grandes inversiones en infraestructura. El sistema es compacto, tiene una huella de carbono mínima y es inodoro, por lo que puede ubicarse en áreas residenciales.

**2008:** Grundfos introdujo el Innovation Intent, que se centra en los esfuerzos de innovación a largo plazo. El denominador común de la intención de innovación es poner la sostenibilidad en primer lugar, estar allí para un mundo en crecimiento y ser pioneros en nuevas tecnologías, en resumen: preocupación, cuidado, creación.

**2009:** Grundfos LIFELINK es una unidad de negocio con un propósito social, que se estableció con el propósito de desarrollar sistemas de agua sostenibles, principalmente para áreas rurales en países en desarrollo. El arreglo es posible gracias a que varias organizaciones donaron el sistema a una aldea. Luego, los aldeanos pagan el agua por teléfono móvil, y estos pagos cubren el mantenimiento del sistema. El primer sistema se estableció en Kenia en 2009.

**2010:** Grundfos presentó su primera bomba con motor de imán permanente, lo que garantiza un ahorro energético significativo de hasta un 70 % en comparación con otras bombas de tamaño similar.

**2012:** ALPHA2 y MAGNA3 llegan al mercado. El nuevo ALPHA2 ofreció la mayor eficiencia para cualquier circulador doméstico en la industria con un EEI de 0.15 - 20 % de nivel de referencia de EuP. Diseñado por dentro y por fuera, sus nuevas características hacen que la instalación, el control y la optimización sean más fáciles que nunca.

El MAGNA3 es más que una bomba. Es una gama completa de circuladores inteligentes de alta eficiencia para calefacción, refrigeración, sistemas de bombas de calor geotérmicas y aplicaciones de agua caliente sanitaria.

**2013:** Grundfos inaugura nuevas instalaciones en Székesfehérvár. La instalación de última generación alberga producción, pruebas y D&E y es el cuarto sitio de producción en el país.

**2014:** Después de una larga y exitosa carrera en Lego, Mads Nipper se une a Grundfos como nuevo presidente y director ejecutivo del grupo.

**2015:** 1,200 empleados de Grundfos de 55 países se reunieron para los Juegos Olímpicos de Grundfos, que se celebraron en Bjerringbro y sus alrededores bajo el lema "Teambuilding and Friendship".

**2015:** Grundfos ganó el prestigioso premio Momentum for Change Lighthouse Activity de las Naciones Unidas en la categoría de TIC. El premio se otorgó por la solución de agua Lifelink que proporciona un suministro de agua confiable y sostenible en países en desarrollo.

**2016:** Grundfos estuvo entre los expositores cuando la tecnología danesa mostró a los estadounidenses cómo conservar el agua.

**2017:** La bomba SP celebra su 50 aniversario y, aunque se han agregado mejoras avanzadas y nuevas opciones de aplicación, el principio de construcción original está intacto.

**2017:** El desarrollo sostenible fue una parte clave de la agenda de la Asamblea General de la ONU en Nueva York. Grundfos participó en los debates y las acciones. El énfasis de la empresa estaba en hacer que el agua y el saneamiento estuvieran disponibles para todos.



Poul Due Jensen funda Grundfos. Inicia la producción de bombas. Se desarrolla la bomba "Foss 1". Se desarrolla la bomba "Dybfoss". Se inicia la exportación. Se produce la bomba centrífuga. Se produce la "Dybfoss BP".



Taller empleados con necesidades especiales. Se produce la bomba sumergible SP. Bomba "VP 35" con ajuste hidráulico. Se crea escuela para empleados. Abre primera filial en Alemania. 1ra Bomba circuladora "VP 32". Se diseña el primer logotipo.



Se desarrolla el "carrusel". "CR30" 1ra bomba centrífuga multietapa. Abre 1ra filial internacional (EUA). Se producen motores propios sumergibles. Se crea la fundación Poul Due Jensen. Inicia producción de motores estándar. Jet Pump, bomba portátil.



"Tecnología de fusión de núcleos". certificación en norma de calidad ISO 9001. CAPS, programa de cálculo de bombas. Se crea la bomba KP para aguas residuales. Sistema de bombeo impulsado por energía solar. Convertidor de frecuencia controlado por microprocesador. Fallece Poul Due Jensen



Poul Due Jensen funda Grundfos. Inicia la producción de bombas. Se desarrolla la bomba "Foss 1". Se desarrolla la bomba "Dybfoos". Se inicia la exportación. Se produce 1ra bomba centrífuga. Se produce la "Dybfoos BP".



Taller empleados con necesidades especiales. Se produce la bomba sumergible SP. Bomba "VP 35" con ajuste hidráulico. Se crea escuela para empleados. Abre primera filial en Alemania. 1ra Bomba circuladora "VP 32". Se diseña el primer logotipo.



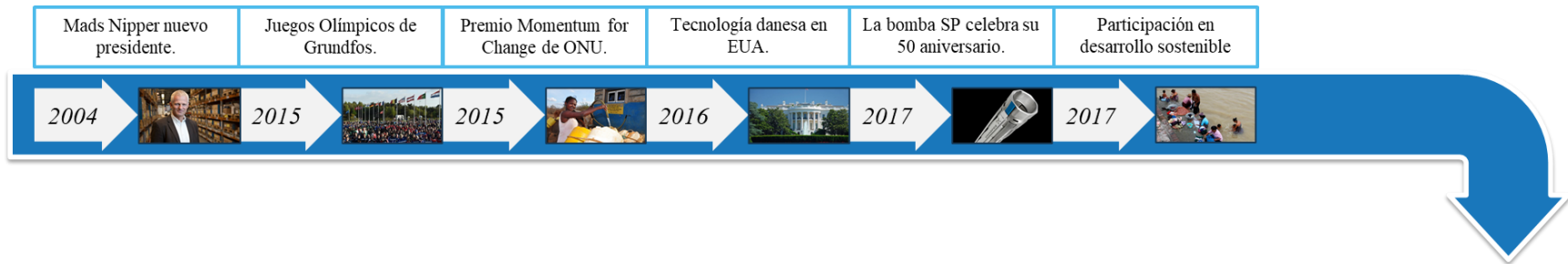
Se desarrolla el "carrusel". "CR30" 1ra bomba centrífuga multietapa. Abre 1ra filial internacional (EUA). Se producen motores propios sumergibles. Se crea la fundación Poul Due Jensen. Inicia producción de motores estándar. Jet Pump, bomba portátil.



"Tecnología de fusión de núcleos". certificación en norma de calidad ISO 9001. CAPS, programa de cálculo de bombas. Se crea la bomba KP para aguas residuales. Sistema de bombeo impulsado por energía solar. Convertidor de frecuencia controlado por microprocesador. Fallece Poul Due Jensen.







**Figura 1.15** *Línea del tiempo de la historia de la empresa Grundfos [12].*



## 1.5 GRUNDFOS EN MÉXICO

Grundfos es una empresa de capital danés, está posicionada en más de 53 países, cuenta con más de 89 plantas a nivel mundial y en México tienen una única ubicación, en San Luis Potosí.

En la compañía Grundfos México hay alrededor de 260 empleados, de los cuales 180 componen el área de mano de obra y el restante es administrativo.

La compañía está dedicada a la fabricación de bombas, exporta desde la capital potosina motores eléctricos sumergibles de hasta 4 pulgadas y bombas sumergibles de hasta 3 pulgadas.

El principal mercado de la compañía es EE. UU. aunque se envía el producto a todas partes del mundo abarcando Asia y Europa, pero la parte estratégica de la empresa Grundfos en México es poder cubrir la demanda de EE. UU.

La planta que inició operaciones en San Luis en el 2008 se encuentra trabajando en la “Estrategia 2020-2025”, en la cual tienen proyectado traer entre 2 o 3 nuevas líneas de producción que se distingan por su proceso tecnológico.

“La disposición y la cultura de trabajo de la gente en San Luis Potosí, en el estado y sus alrededores es muy buena, la cercanía entre las fronteras y el fácil manejo de material hizo muy atractivo el poder posicionarnos en esta zona. El plan de Grundfos en México es crecer y para eso estamos adecuando nuestra cultura de trabajo, compromiso, disciplina, enfoque a los métodos y a las tareas”, externó Héctor González director general de Grundfos en México.

El 80 % de las materias primas proviene de Dinamarca, y dentro del plan de reestructuración se están buscando más proveedores internos, que estén en México, con la finalidad de que puedan hacer la cadena de suministro más accesible y fácil para la planta.

La compañía trabaja en el giro industrial y doméstico; estamos fabricando alrededor de 500,000 productos por año, la idea es crecer al doble al menos al 2025 en la planta de San Luis Potosí.

El terreno de la planta es de 100,000 metros cuadrados, del cual están ocupando el 40 %, por lo que en la “Estrategia 2020-2025” y de la mano de la instalación de las nuevas líneas de producción, se tiene proyectado un crecimiento en infraestructura.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA Y SU IMPACTO ECONÓMICO EN GRUNDFOS MÉXICO

Las fallas que son objeto de este estudio por lo general se han presentado al arranque de las máquinas, inicios de turno, inicio de semana o después de un paro prolongado. Dichas fallas se han caracterizado por presentarse de manera que no dejaban rastros de ningún daño identificable a simple vista y sin ser precedido por algún evento significativo como un apagón o un corto circuito en algún circuito cercano al de la falla. Los dispositivos dañados dejaron de funcionar súbitamente sin dejar rastros fáciles de identificar como lo son áreas quemadas en tarjetas electrónicas, capacitores o inductores dañados (identificables a simple vista) o partes con indicios de sobrecalentamiento. A diferencia, por ejemplo, de fallas en donde se pueden identificar capacitores que explotaron, inductores con el esmalte aislante derretido en sus bobinas u otros componentes con señas visibles de chispas o incluso fuego. Las fallas que se han experimentado en Grundfos México, en las tarjetas electrónicas, de control, PLC, servomotores, pantallas táctiles (HMI), etcétera, se han presentado sin dejar rastro evidente de algún corto circuito, sobretensión o sobrecorriente, como los que se describieron anteriormente.

Dos puntos relevantes para considerar durante el estudio del problema de EMC en la planta Grundfos México son los siguientes: primero, la maquinaria relacionada al 100 % de los procesos de ensamble y manufactura de las bombas y motores sumergibles son automatizados y se cuenta con una gran cantidad de máquinas que utilizan electrónica de potencia tales como soldadoras de plasma, soldadoras láser, robots, centros de maquinados con control numérico por computadora, marcadoras laser, controladores de torque, variadores de frecuencia, entre otros. Segundo, debido a que más de un 90 % de la maquinaria instalada en la planta Grundfos México proviene de fabricantes europeos, esta maquinaria opera a 50 Hz. Esto hace que hacia adentro de la fábrica interactúen en un mismo plano de tierras ambas frecuencias (50 y 60 Hz) dado que sólo existe un plano de tierras ubicado en la subestación eléctrica, en la **Figura 2.1** se muestra la distribución de

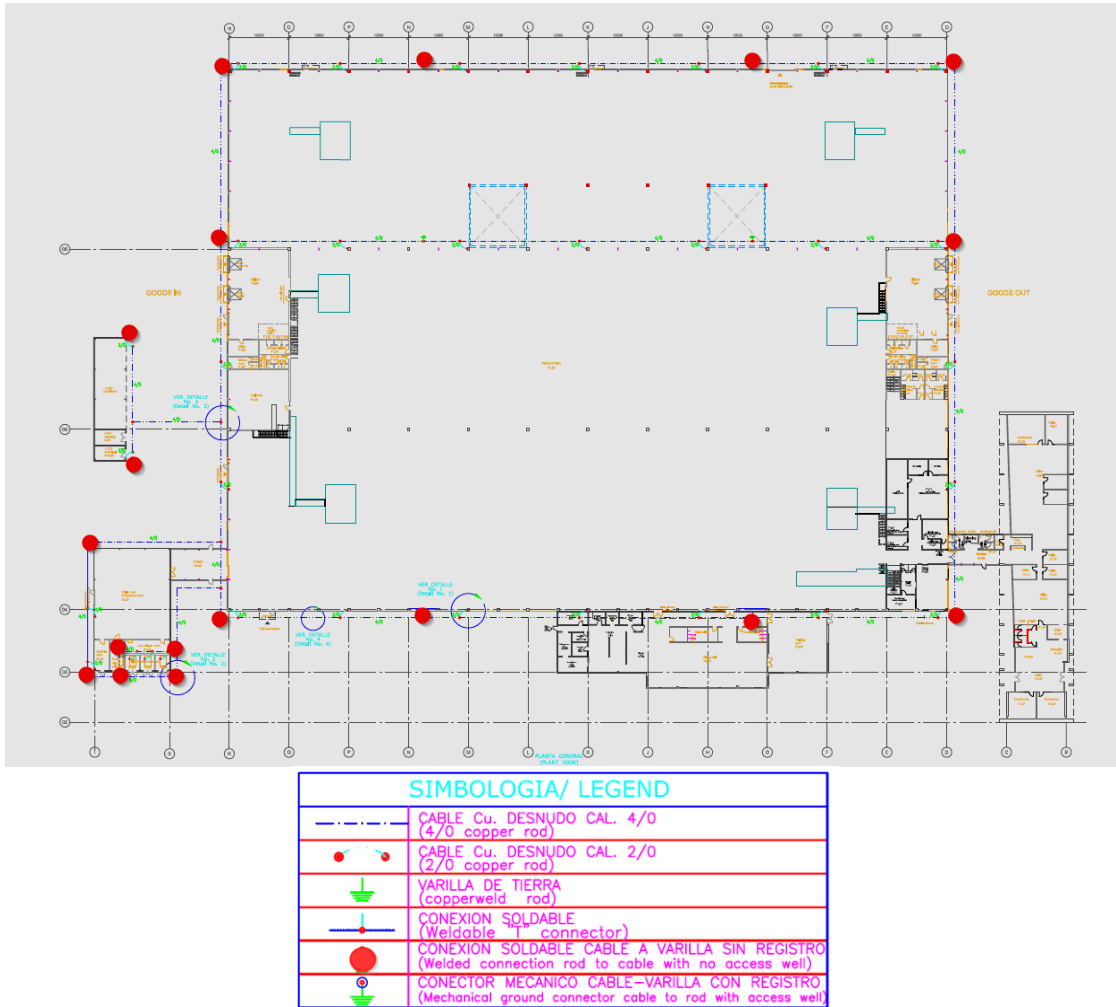
tierras físicas al interior de la nave industrial de Grundfos México. Y en el **Capítulo 3** se abordan las consecuencias de esta condición particular.

Una vez presentadas las fallas descritas, se han realizado inspecciones básicas (mediciones de voltaje, resistencia y continuidad) y se han reemplazado los componentes dañados, sin encontrar causas claras o contundentes de dichas fallas.

Hasta ahora se reemplazan componentes dañados y se continua con las operaciones rutinarias, sin existir un historial de reincidencias previas a 2018. Fue hasta principios de ese mismo año que se comenzó a documentar en la base de datos SAP, los eventos relacionados a fallas críticas de máquinas en las áreas productivas de Grundfos México. Sin embargo, este registro se ha limitado únicamente a identificar el equipo/máquina que falló, un diagnóstico sencillo de las fallas y el costo asociado. En las **Tablas 2.1 y 2.2** se muestran las áreas más afectadas (en costos y paros de producción) debido a este tipo de fallas anteriormente descritas. Las máquinas que fueron objeto de estas fallas tienen en común que son alimentadas por la UPS (convertidor de frecuencia) de 60 a 50 Hz, cuyo tablero principal es de 400 V y que sus derivaciones internas son de 230 V. Adicionalmente, las fallas listadas en estas tablas fueron relevantes dado que su impacto en las líneas de producción fue elevado, esto al considerar que los paros de línea asociados a esas fallas duraron un promedio de 3 días. Lo que tuvo consecuencias como: retraso en las entregas con clientes, costos por tiempo muerto de las líneas (estimado en \$2,500 USD por día/por evento), acumulación de materias primas y subcomponentes no usados debido a los paros, reprogramación de turnos a operadores, supervisores y equipos de soporte, etcétera. Como se ha mencionado anteriormente, el plano de tierras que se utiliza en el sistema de 50 y 60 Hz es el mismo, como se ilustra en la **Figura 2.1**, en ella se muestra la distribución de tierras físicas en la planta Grundfos México (puntos marcados en color rojo).

El estudio se centra en tres áreas específicas dentro de las áreas productivas de la fábrica, las cuales han presentado más frecuentemente los efectos del problema descrito.

A lo largo de los 14 años de operación de la planta Grundfos MXP, en el piso de producción se han experimentado los diversos daños “inexplicables” mencionados anteriormente, en dispositivos electrónicos como: PLC, tarjetas electrónicas en diversas máquinas y robots, pantallas táctiles, procesadores y HMI entre otros.



**Figura 2.1** Distribución de tierras físicas en la planta Grundfos México.

En las **Tablas 2.1** y **2.2** se presenta una lista de las fallas más relevantes de los años 2019 y 2020, respectivamente. Cabe aclarar que en el año 2019 las fallas más relevantes se presentaron en el área denominada como “**Sleeves SQ**”. Mientras que en el año 2020 las fallas se concentraron mayormente en el área denominada como “**Rotores MS**”. Los costos están expresados en pesos mexicanos.

**Tabla 2.1** Lista de equipos dañados en el área de Sleeves SQ durante 2019

FECHA	ORDEN DE MANTENIMIENTO	NOMBRE DEL EQUIPO	DESCRIPCIÓN DEL FALLO	COSTO
jul-19	7253233	Robot cell for SQ pump sleeve	Daño en microprocesador de control	\$99,080.88
may-19	7323085	Winding & inserting machine SQ stator	Daño de servomotores Mitsubishi.	\$64,012.38
sep-19	7310324	Sleeve press line	Daño en PLC Siemens 6AV6 643-0CB01	\$103,657.32

**Tabla 2.2** Lista de equipos dañados en el área de Rotores MS durante 2020

FECHA	ORDEN DE MANTENIMIENTO	NOMBRE DEL EQUIPO	DESCRIPCIÓN TÉCNICA DE FALLO	COSTO
dic-20	7415932	Press for shaft in rotor MS402	Daño en servomotor para Akea	\$92,470.49
dic-20	7415986	Lathe, automatic - Mori-Seiki - ZL-203S	Control dañado en Torno automático Mori Seiki ZL-203S	\$9,784.93
nov-20	7419334	Press for shaft in rotor MS402	Daño en servomotor en prensa Akea	\$35,670.07
sep-20	7433980	Lathe, automatic - Okuma LVT300	Daño en controlador de LVT300	\$59,676.15

Si bien los costos de reparación expresados en las **Tablas 2.1** y **2.2** se muestran en pesos mexicanos, a esto falta añadir los costos por paros de producción, mano de obra y en la mayoría de los casos costos por utilizar un “*hand-carrier*”, sin embargo, todos estos costos periféricos derivados de las fallas no son reportados de manera formal en el sistema SAP de la compañía.

Para el año 2021 se decidió que el enfoque de retomar este estudio estuviera en el área de “**Soldadoras MS**” debido a los constantes problemas de calidad generados por los módulos electrónicos de soldadura y sus fallas intermitentes. Otras razones para abordar el problema desde esta área fueron: la alta accesibilidad a los tableros principales de alimentación y los estudios previos existentes en esta misma área.







### **3. ESTUDIOS PREVIOS DE COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA EN GRUNDFOS MÉXICO**

Desde el inicio de operaciones de la planta Grundfos México en 2008, se comenzaron a presentar fallas en equipos electrónicos sensibles como los descritos en el **Capítulo 2**. Derivado de estas fallas los ingenieros responsables del mantenimiento de la planta decidieron contratar a proveedores externos para realizar estudios de calidad de la energía y regulación de voltaje a la salida de los convertidores de frecuencia de 50 Hz instalados en la planta en el año 2012. Los resultados de estos estudios no arrojaron indicios de problemas relevantes en la red eléctrica. Las formas de onda de voltaje observadas en las mediciones son senoidales, estaban balanceadas y no presentaban distorsión armónica. Los datos de las corrientes mostraban contenidos armónicos, sin embargo, la distorsión armónica total no rebasaba el 3 % tal y como lo recomienda la norma IEEE 519-1992. Asimismo, se identificó que el transformador que alimentaba al convertidor de frecuencia sólo estaba usado al 14.2 % de su capacidad y que el factor de potencia era 0.9 lo cual estaba permitido por la Comisión Federal de Electricidad en el año en que se realizó el estudio. El reporte completo se puede consultar en el **ANEXO 1**.

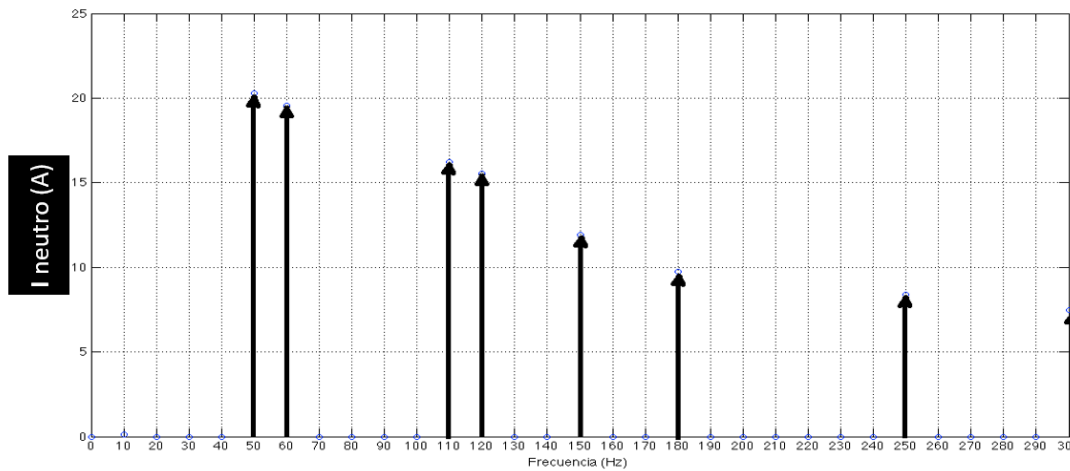
Con los resultados de las mediciones, conclusiones y recomendaciones mostrados en este reporte, no se pueden identificar indicios de la presencia de compatibilidad electromagnética en el sistema. La razón es que los estudios estuvieron enfocados a analizar el estado estacionario de la salida de los convertidores de frecuencia, su regulación de voltaje y armónicos de baja frecuencia.

Es relevante destacar que en años posteriores se realizaron estudios similares por parte de diferentes proveedores y académicos de la UASLP, obteniendo resultados y conclusiones similares. En resumen, no se encontró ningún problema de calidad de la energía en ese punto de conexión. Por lo que este tipo de estudios no aportaron información que indicara la presencia de compatibilidad electromagnética en la planta Grundfos México.

En 2013, Grundfos México contactó a un grupo académico de investigadores en la UASLP, reportando que se tenían problemas de daños de equipos como los descritos en el **Capítulo 2**.

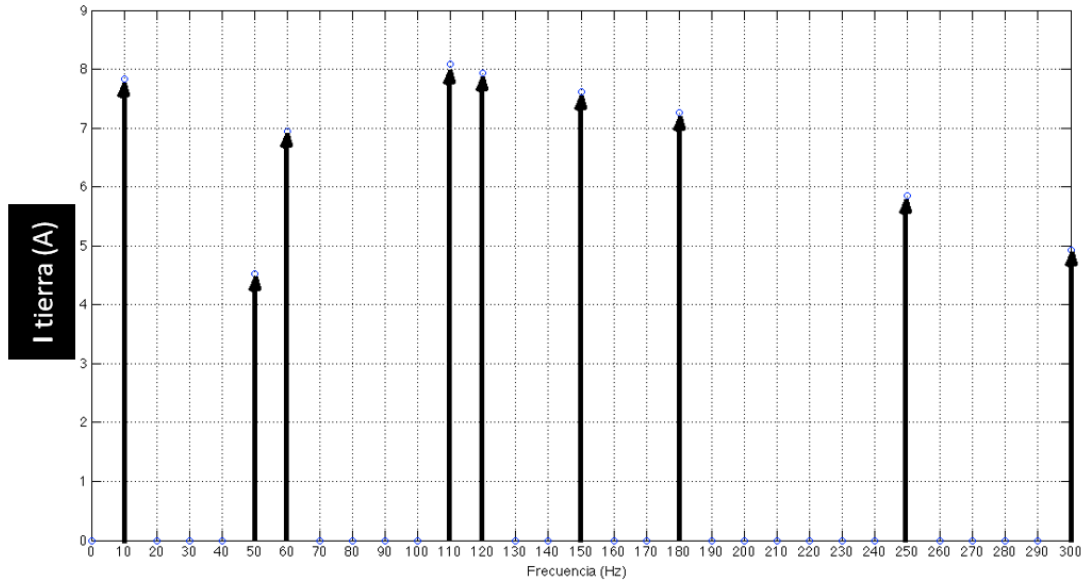
Después de hacer una evaluación preliminar en sitio, surgieron las primeras dos hipótesis. La primera apuntaba a que el problema se debía a la convivencia de dos frecuencias fundamentales diferentes en el sistema de tierras de la compañía. Y la segunda apuntaba a que a través del sistema de tierras se conducían fenómenos electromagnéticos de tipo transitorio que afectaban, en determinadas circunstancias a las cargas más sensibles.

Haciendo una medición de la corriente en el conductor del neutro de la UPS del lado de 60 Hz, se encontraron componentes armónicas de frecuencias diversas como 50, 60, 110, 120, 150, 250 y 300 Hz. En la **Figura 3.1** se muestra el análisis armónico hecho durante la toma de estas mediciones.



**Figura 3.1** *Medición de la distribución de armónicos en conductor NEUTRO del lado de 60 Hz.*

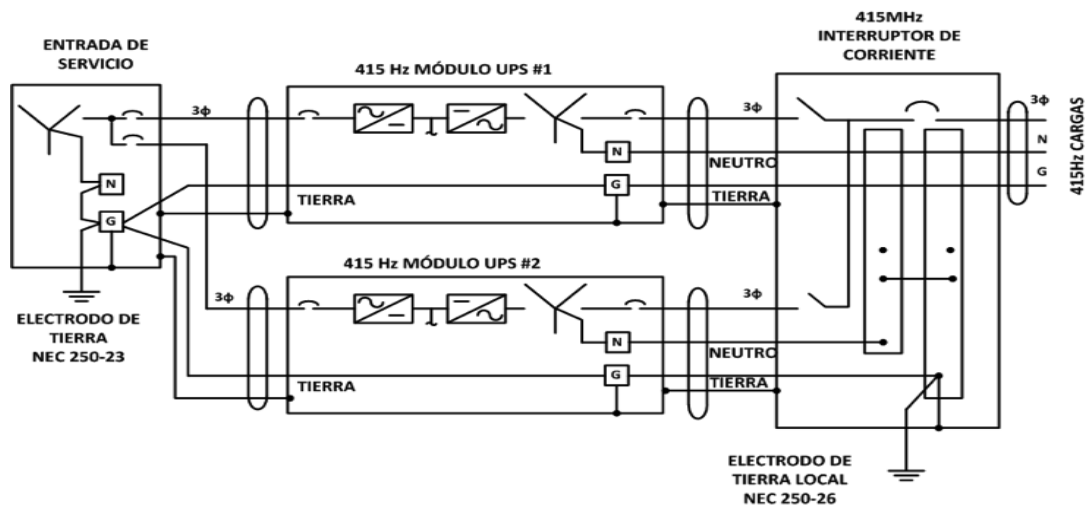
Se realizó el mismo ejercicio a la salida de la UPS (lado de 50Hz), encontrando resultados similares, pero con magnitudes menores. En la **Figura 3.2** se puede observar la distribución armónica en la cual existen frecuencias de 10, 50, 60, 110, 120, 150, 180, 250 y Hz.



**Figura 3.2** *Medición de la distribución de armónicos en conductor NEUTRO del lado de 50 Hz.*

Finalmente, las conclusiones y recomendaciones de este primer estudio fueron:

- A. Identificar los niveles de compatibilidad electromagnética.
- B. Separar las cargas, por una parte, las de mayor sensibilidad, por otra parte, las de mayor contaminación.
- C. Aislar las aquellas cargas que sean más sensibles mediante aislamiento galvánico.
- D. Aislar en cada salida del convertidor de frecuencia (UPS) y en el lado de 60 Hz usando la estrategia anterior. Una razón de peso para hacerlo así es que el transformador de aislamiento puede ser de tamaño reducido y con ello menos costoso.
- E. Usar la configuración de entrada y salida del convertidor con diferente frecuencia, conductores neutros sin interconexión, conexiones neutro-tierra específicas como se muestra en la **Figura 3.3**.

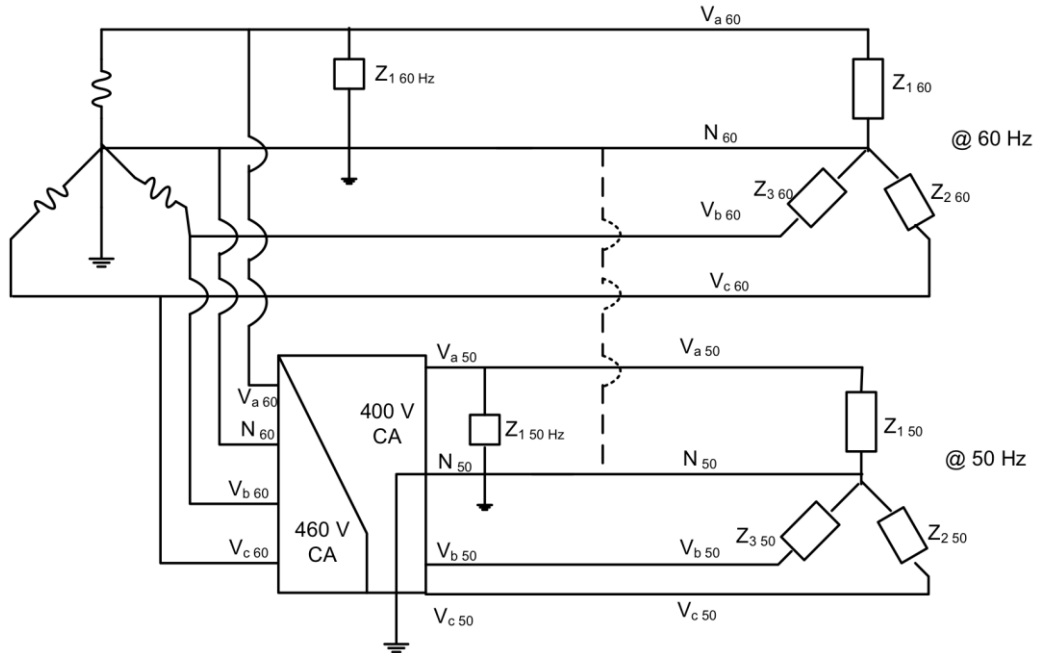


**Figura 3.3** Conductores neutros de diferentes convertidores sin interconexión según Norma NEC 250-26 [16].

F. Analizar la factibilidad económica y operativa de una malla de tierras en la nave de producción (existe una en la subestación eléctrica).

Una vez entregados estos resultados y conclusiones, Grundfos México implementó un programa de revisión a todos los equipos y maquinaria conectados a alguna tierra física, asegurándose así de que no hubiera conexiones de conductores de NEUTRO a TIERRA como el que se muestra en la **Figura 3.4**. En esta figura se representa de manera esquemática las interconexiones encontradas entre los conductores neutros de los sistemas de 400 V a 50 Hz y 460 V a 60 Hz.

La implementación tuvo un éxito parcial, dado que, durante aproximadamente 4 meses, no se presentaron los efectos de la compatibilidad electromagnética en las áreas productivas, es decir, no hubo daño de equipos de manera tan frecuente como se había visto hasta ese momento. Sin embargo, después de transcurrido estos 4 meses, se volvieron a presentar estos daños a equipos críticos presentando los modos de falla descritos en el **Capítulo 2**.



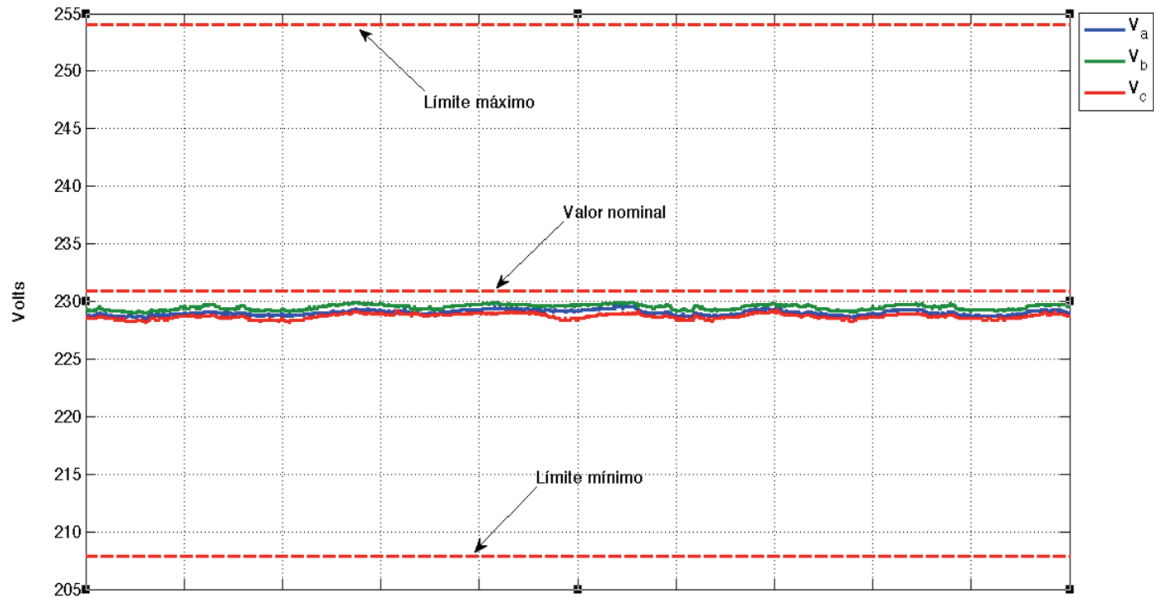
**Figura 3.4** *Interconexión de conductores neutros de los sistemas de 50 y 60 Hz presentes en la planta Grundfos México.*

Durante 2015, se solicitó nuevamente el apoyo de los profesores investigadores de la UASLP para continuar con el análisis de este problema. Esta vez se planteó una tercera hipótesis que afirmaba que la causa la originaban las cargas en colaboración con “algo” de la red eléctrica hacia el interior de la planta.

Con base en esta tercera hipótesis, esta vez, tomando mediciones a la salida del convertidor de frecuencia (lado de 50 Hz), se realizaron estudios de regulación en el voltaje de alimentación, consumo de corriente en las cargas y factor de potencia en las mismas.

Dichos estudios fueron realizados entre el 2 y el 9 de mayo del 2015. A continuación, se muestran los gráficos obtenidos de las señales de corriente y voltaje a la salida del convertidor de 50 HZ.

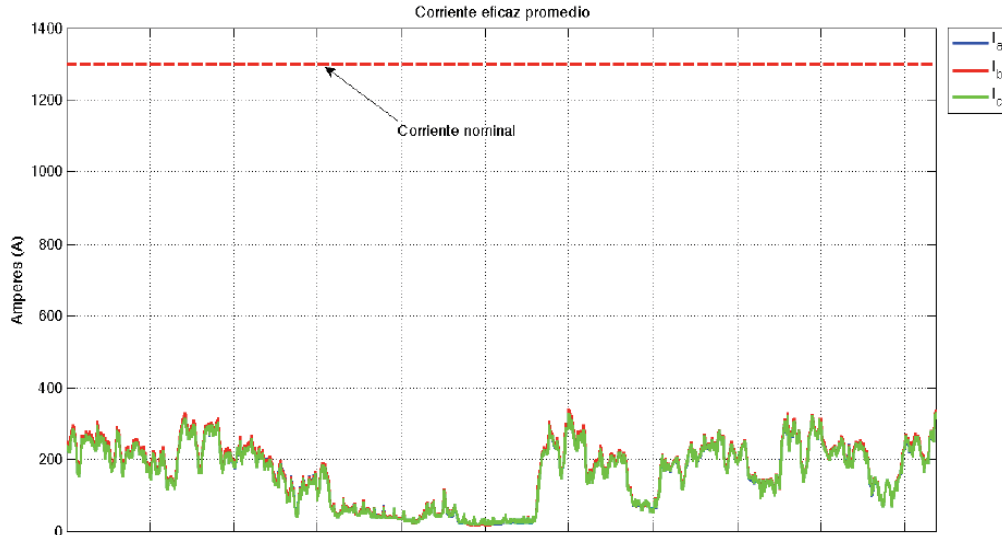
En la **Figura 3.5** se puede observar que el voltaje RMS medido de fase a neutro (para las fases A, B y C) es estable, muy cercano al valor nominal (230 V entre línea y neutro) a lo largo del periodo de medición y además dentro de los límites permisibles de variación.



**Figura 3.5** Voltaje RMS en la salida del convertidor de 50 Hz.

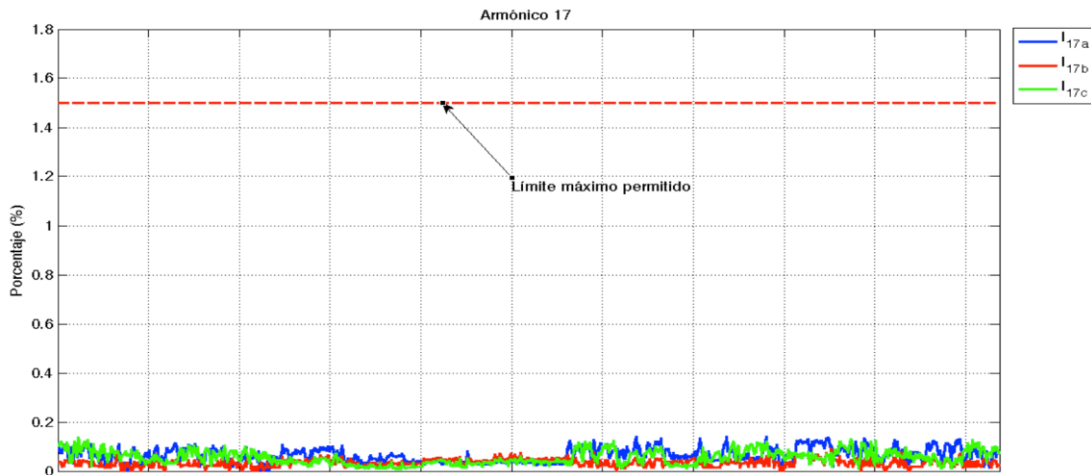
En la **Figura 3.6** se observa el perfil de consumo por las cargas durante el mismo periodo durante el que se evaluó el voltaje, como se puede apreciar para ese entonces la demanda de corriente se encontraba muy por debajo de la corriente nominal que el convertidor a 50 Hz puede entregar (1300 A).



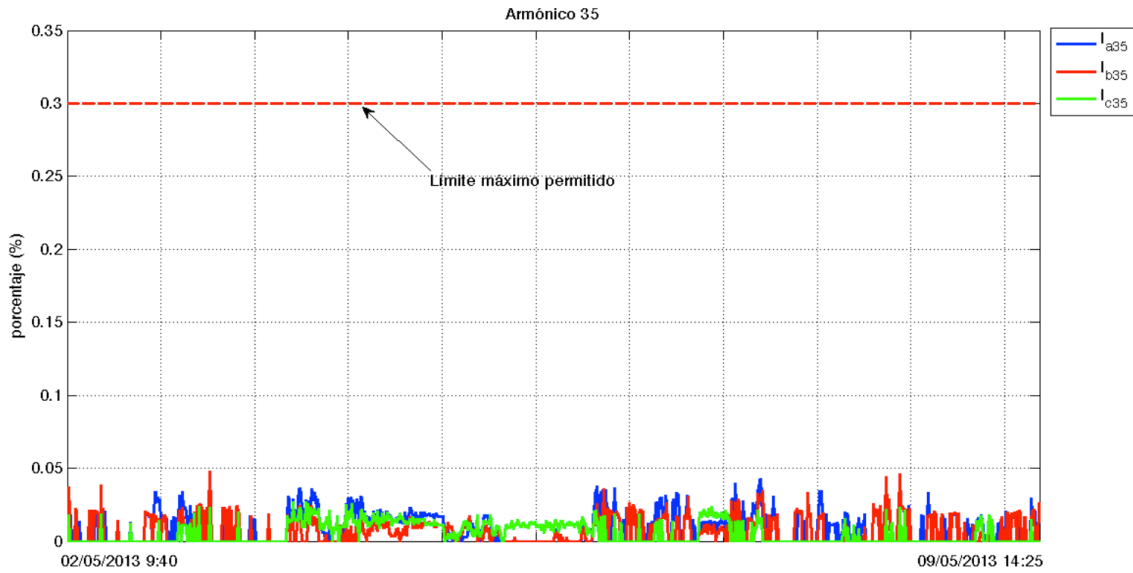


**Figura 3.6** Consumo de corriente (RMS) a la salida de convertidor 50Hz.

Al mismo tiempo que se analizaron los voltajes y corrientes de fase eficaces y se tomaron mediciones del contenido armónico también a la salida del convertidor. Adicionalmente se registraron los armónicos de mayor amplitud, que fueron el 17 y 35, los que se muestran en las **Figuras 3.7** y **3.8**. Como puede observarse en ambos casos, los valores obtenidos se encuentran por debajo de los límites permitidos por la Norma **L000045** de la CFE y la Norma **IEEE 519**.



**Figura 3.7** Magnitud de corriente (RMS) del armónico 17 a la salida del convertidor de 50Hz.



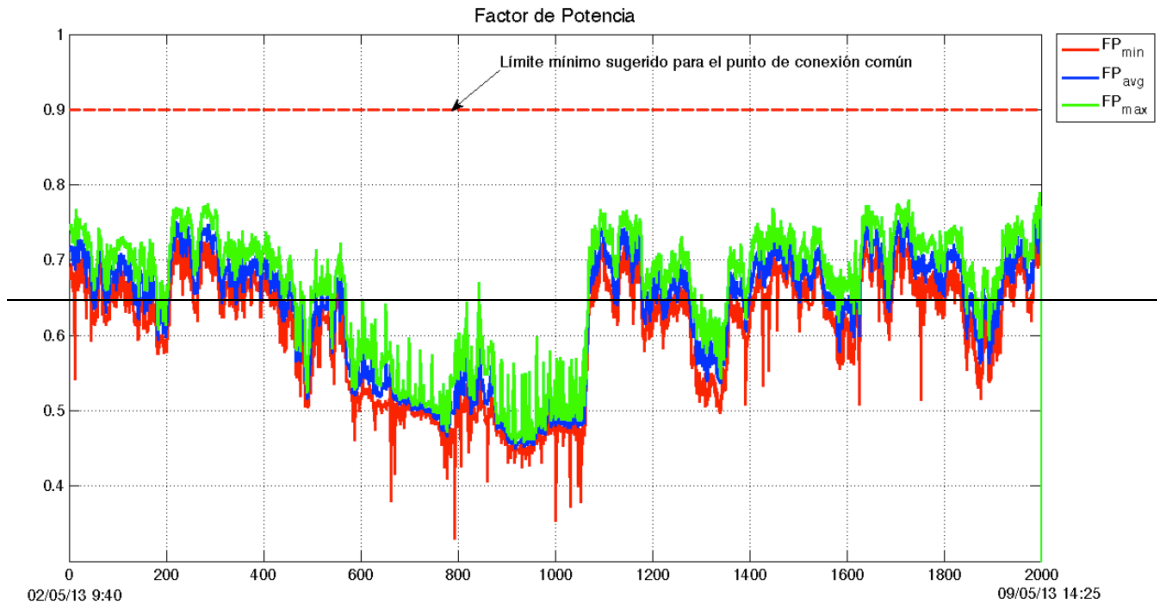
**Figura 3.8** Magnitud de corriente (RMS) del armónico 17 a la salida del convertidor de 50Hz.

Las magnitudes de las corrientes de los armónicos analizados no resultaron ser significativas, su valor se encontraba dentro de los límites permisibles por la **norma L000045** de la **CFE**. Ver **Tabla 3.1**. [13],[14].

**Tabla 3.1** Componente armónico individual máximo de corriente para armónicas impares según norma L000045 de la CFE.

Impedancia relativa ( $I_{cc}/I_L$ )	Componente armónico individual máximo de corriente para armónicas impares considerando una tensión de hasta 69 kV			Distorsión armónica total de la demanda máxima
	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$	
$I_{cc}/I_L < 20$	1.50%	0.60%	0.30%	5%

A su vez, se estuvo evaluando el desempeño del factor de potencia en las cargas, durante el periodo mencionado anteriormente. En la **Figura 3.9** se muestra el comportamiento del factor de potencia en los días de muestreo.



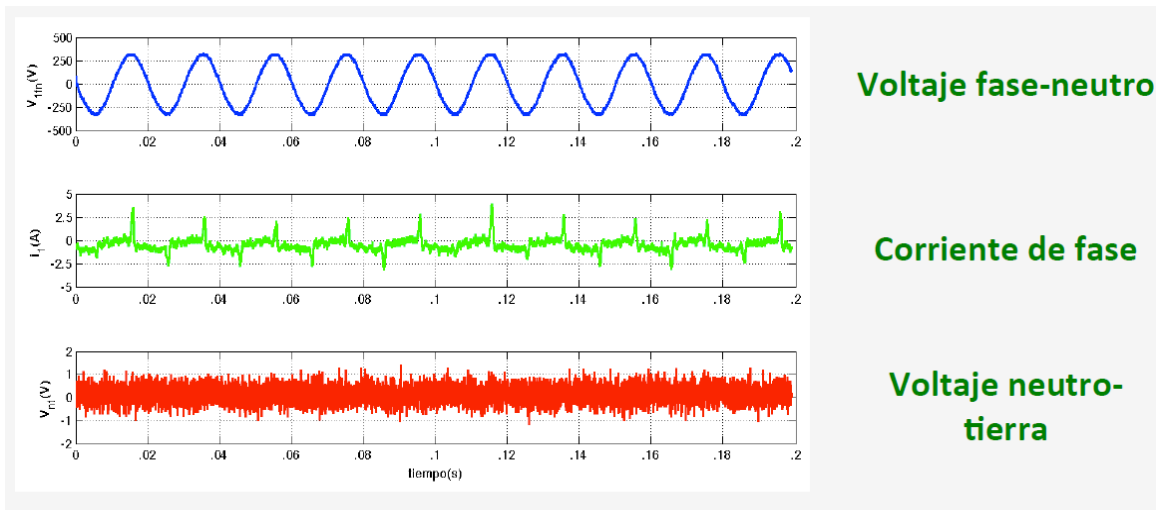
**Figura 3.9** Factor de potencia a la salida del convertidor de frecuencia de 50 Hz.

En resumen, hasta este punto los resultados obtenidos no mostraban indicios de la presencia de compatibilidad electromagnética. Al menos no en el espectro de baja frecuencia, por lo que se comenzó a analizar la posibilidad de realizar mediciones en alta frecuencia.

Para comenzar a tomar mediciones en alta frecuencia, se determinó hacerlo en una máquina soldadora la cual estaba identificada como carga sensible (debido a la electrónica de potencia con la que cuenta su módulo de control) por fallas recurrentes similares a las que se describieron en el **Capítulo 2**. Inclusive se tenía la sospecha de que la misma máquina de soldar pudiera comportarse como un equipo susceptible y emisor de EMC simultáneamente debido al entorno en que se encontraba trabajando y algunos paros en las secuencias de los robots cercanos a la estación.

La primera toma de mediciones se realizó durante el estado estable de la máquina soldadora, es decir, durante el periodo de tiempo en el cual se encuentra en espera de comenzar un ciclo de soldadura en el motor. Durante estas mediciones no se encontró

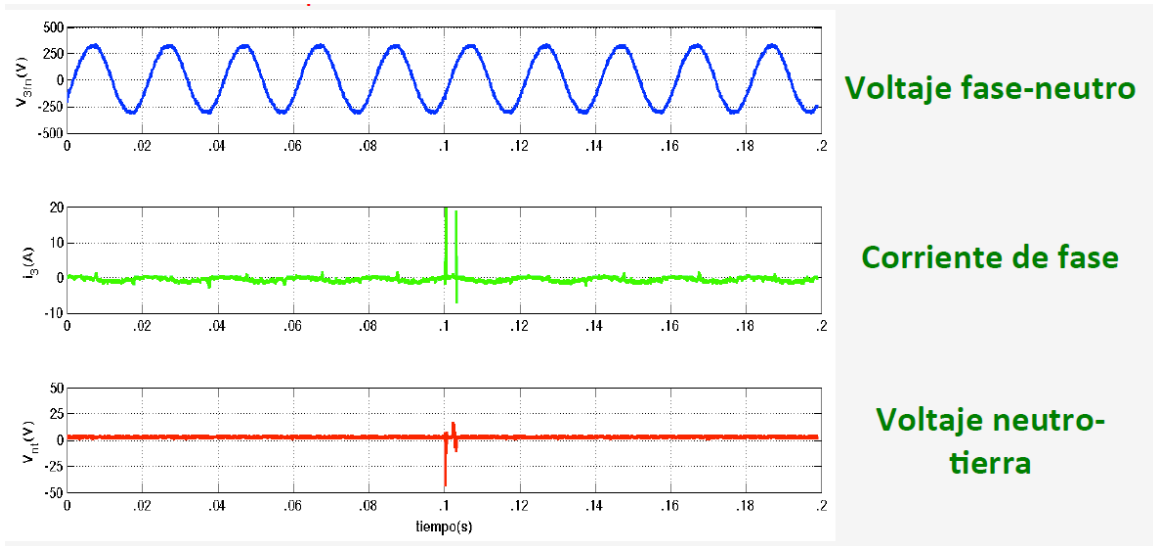
nada anormal, en la **Figura 3.10** se muestran las formas de onda encontradas para los voltajes de fase a neutro, de neutro a tierra y de la corriente en la fase.



**Figura 3.10** Mediciones en estado estacionario de máquina soldadora.

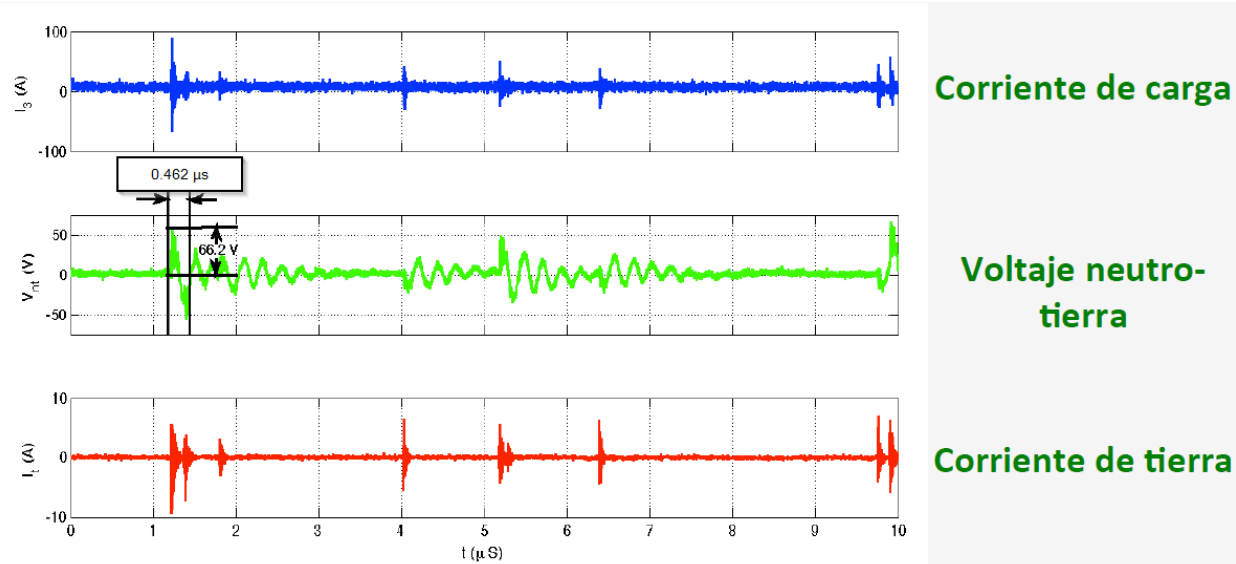
Durante la toma de mediciones realizadas en alta frecuencia, se pudo observar que había presencia de eventos transitorios en los cuales el voltaje y la corriente en el conductor de tierra tenían valores significativamente altos, considerando que tanto como voltaje y corriente idealmente se deberían mantener en un valor cercano a cero.

Posteriormente se analizó el comportamiento de las mismas variables, pero ahora durante un evento transitorio que se pudo capturar con el osciloscopio. Durante este evento, se observó que la corriente de fase presentaba picos de hasta 20 A, por su parte el voltaje de fase no se vio afectado ni en magnitud ni en forma de onda. Y el voltaje entre conductores neutro y tierra tuvo un pico de 43 V, esto resultó extraño ya que, como se mencionó anteriormente, este voltaje idealmente debe permanecer cercano a 0 V de manera constante. En la **Figura 3.11** se muestran las mediciones bajo las condiciones anteriormente mencionadas.



**Figura 3.11** Mediciones en estado transitorio de máquina soldadora.

Derivado de la última medición, se decidieron analizar los transitorios que ocurrían durante un ciclo de operación normal de la máquina soldadora. En la **Figura 3.12** se presenta una medición transitoria capturada durante las mediciones, en ella se puede observar cómo el voltaje entre el conductor de tierra y neutro se eleva hasta un valor pico de 66.2 V a una frecuencia de 2.164 MHz (obtenida del inverso del tiempo de duración del primer ciclo, el cual es de 0.462  $\mu$ s). Asimismo, la corriente que pasó a través del conductor de tierra llegó a un valor pico de 10 A. La corriente en la carga se eleva hasta picos de 90 A lo cual es de esperarse en esta aplicación. Sin embargo, las perturbaciones acontecidas en los conductores de tierra y neutro no lo son.



**Figura 3.12** Mediciones durante un ciclo operativo de máquina soldadora.

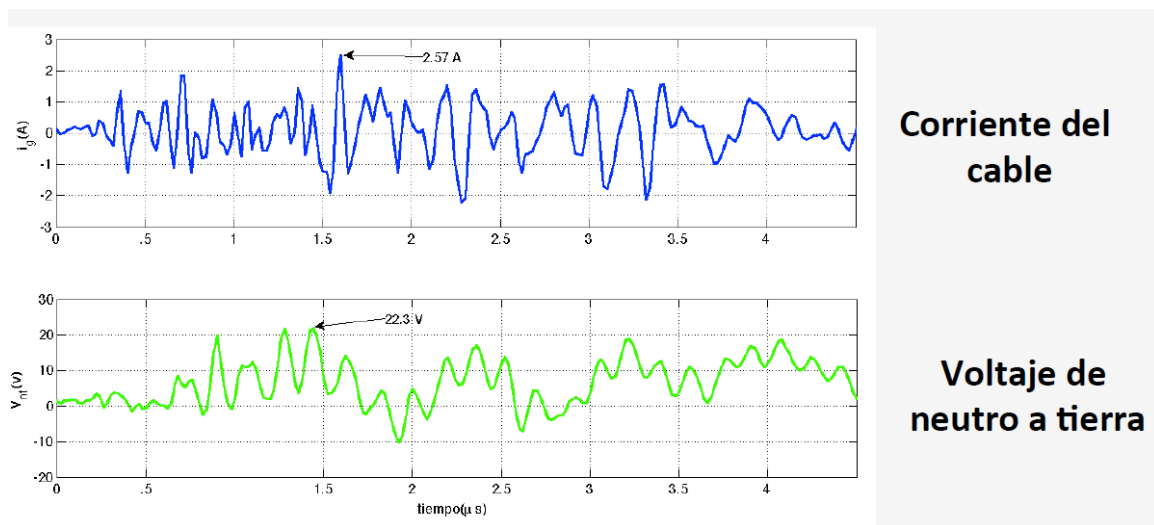
Finalmente, durante esta etapa de pruebas se tomaron mediciones de corriente y voltaje en uno de los conductores conectados a tierra física en uno de los gabinetes de control y fuerza que alimenta a una de las máquinas de soldar de la línea de producción MS.

En la **Figura 3.13** se observa la manera en que se dispusieron las sondas de prueba del osciloscopio usado para dichas mediciones.



**Figura 3.13** Sondas de prueba utilizadas para medición de voltaje y corriente en conductor de tierra de máquina de soldar.

En la **Figura 3.14**, se muestran los valores de voltaje y corriente medidos durante un transitorio en el conductor de tierra del gabinete anteriormente mencionado. En ella se puede observar que existieron picos de hasta 2.57 A y 22.3V. Nuevamente, estos valores deberían estar cercanos a un valor de cero. Con estas mediciones fue posible determinar que efectivamente el problema de compatibilidad electromagnética se encontraba presente en esta estación de trabajo y en las máquinas soldadoras.



**Figura 3.14** Mediciones de voltaje y corriente en conductor de tierra física.

Derivado de este segundo estudio, los profesores investigadores de la UASLP emitieron las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- A. Los parámetros eléctricos de entrada al convertidor cumplen con la regulación en la tensión lo que garantiza el buen funcionamiento de éste.
- B. Los parámetros eléctricos en la salida del convertidor cumplen con las normas de calidad, tal como debe garantizar una UPS (sistema de alimentación ininterrumpible, por sus siglas en inglés) por lo que desde el punto de vista del convertidor de frecuencia no se detecta ninguna anomalía.

- C. Existe **EMC** (compatibilidad electromagnética) a través del circuito neutro tierra, generados por lazos de tierra. Estos lazos deben ser detectados y cancelados sin desconectar los chasis de las tierras.
- D. Se debe tener una verificación garantizada de la resistividad del plano de tierras con resistividad muy baja.

Debido a la complejidad del problema y de las soluciones propuestas por los profesores investigadores, combinada con la falta de seguimiento y rotación del personal involucrado en la planta Grundfos México en años posteriores no hubo más avances, mediciones ni soluciones implementadas relacionadas a este problema en la fábrica.



## 4. ESTUDIOS Y MEDICIONES DE COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA EN 2021 EN GRUNDFOS MÉXICO

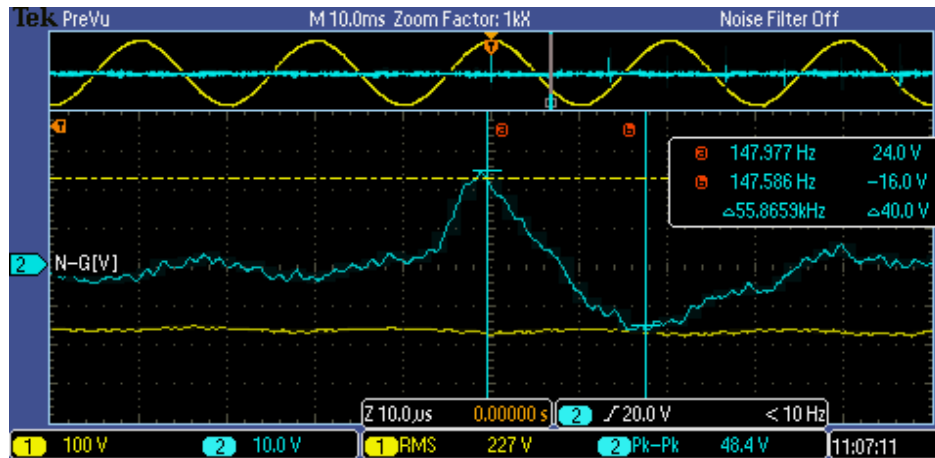
Una vez que fue implementado y alimentado con información confiable el sistema SAP en 2018, fue posible llevar un registro de las fallas acontecidas relacionadas al fenómeno de la compatibilidad electromagnética. Al menos, fue posible identificar fallas con patrones similares a los descritos en el **Capítulo 2**.

Fue hasta finales de 2020 que la planta Grundfos México se interesó nuevamente analizar la problemática de la EMC en sus instalaciones, para ello se adquirieron un osciloscopio y sondas de prueba adecuadas para poder capturar transitorios de hasta 200 MHz. Nuevamente se solicitó ayuda de los profesores investigadores de la UASLP, en este caso para proveer la capacitación necesaria para operar correctamente dichos instrumentos, así como para realizar algunas mediciones preliminares en el área de interés. Dado que los estudios previos concluían la presencia de compatibilidad electromagnética a través del plano de tierras y los conductores neutros, se optó por enfocarse en medir voltajes y corrientes entre estos dos conductores principalmente.

Las mediciones que se presentan en este capítulo fueron realizadas entre febrero y noviembre de 2021 en el área denominada como “SOLDADORAS” de la línea de producción “MS”. En la **Figura 2.2** del **Capítulo 2** se muestra la ubicación de esta área en la planta Grundfos México. Las razones para seleccionar esta área de la planta fueron: el fácil acceso al tablero principal de alimentación de 400 V a 50 Hz, el antecedente del segundo estudio realizado por la UASLP en 2016 en donde se observaron eventos transitorios en los conductores de tierra, lo relevante de las máquinas de soldar para el proceso de manufactura de los motores sumergibles MS y su alto impacto en el desperdicio de materiales cuando dichas máquinas generan algún defecto.

El primer evento transitorio que se va a describir sucedió el 27 de agosto del 2021 en el área antes mencionada. En el transitorio mostrado en el **Figura 4.1**, se puede apreciar una sobretensión de 48.4 V entre los conductores de tierra y neutro, a una frecuencia de 55

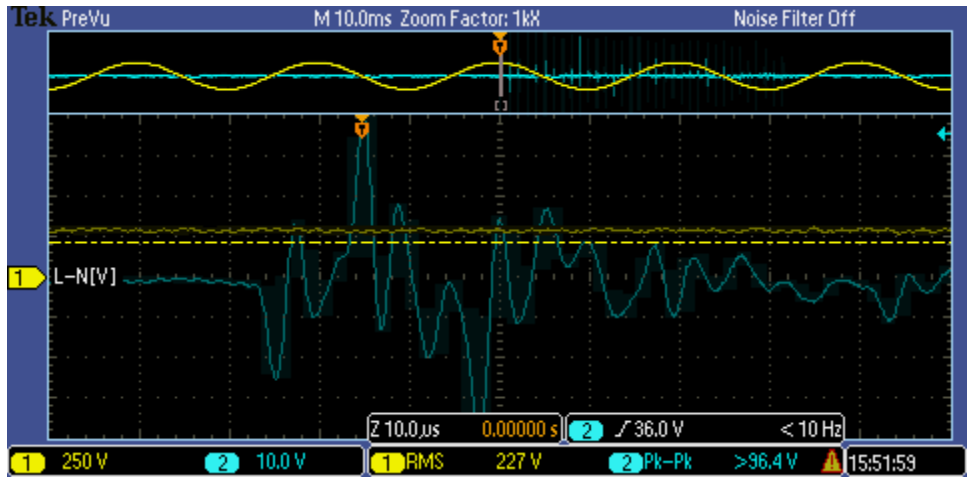
kHz. En este transitorio se puede observar que una vez que se presentó el valor pico, se tuvieron sobretensiones de menor magnitud (pico a pico). Otro aspecto relevante para mencionar es que el voltaje de alimentación a las máquinas soldadoras (voltaje fase a neutro) no se vio impactado en su magnitud ni en su forma de onda.



**Figura 4.1** Transitorio capturado el 27/08/2021, sobretensión 48.4V pico a pico, a 55kHz.

Cabe mencionar que no se registraron eventos relevantes en el sistema eléctrico de potencia de la planta momentos previos o posteriores a este transitorio. Tampoco se vieron afectados los procesos productivos periféricos a esta estación, es decir, no hubo caídas de tensión, fallas de máquinas, generación de defectos o paros de máquinas por causas desconocidas.

El día 31 de agosto del 2021 se registró un nuevo transitorio, el mostrado en el **Figura 4.2**, donde se observan múltiples picos de voltaje que sobrepasan los 96.4 V a los cuales la sonda de medición de voltaje se saturó debido a la escala en la que estaba siendo utilizada. Estos picos de voltaje se presentaron a una frecuencia de 26.3 KHz.



**Figura 4.2** *Transitorio capturado el 31/08/2021, sobretensión mayor a 96.4V pico a pico, a 26.3 kHz.*

Nuevamente, no se identificó ninguna otra afectación en los procesos previos o posteriores a esta estación, ni tampoco se registró algún evento en el sistema eléctrico de la planta que pudiera relacionarse a este transitorio.

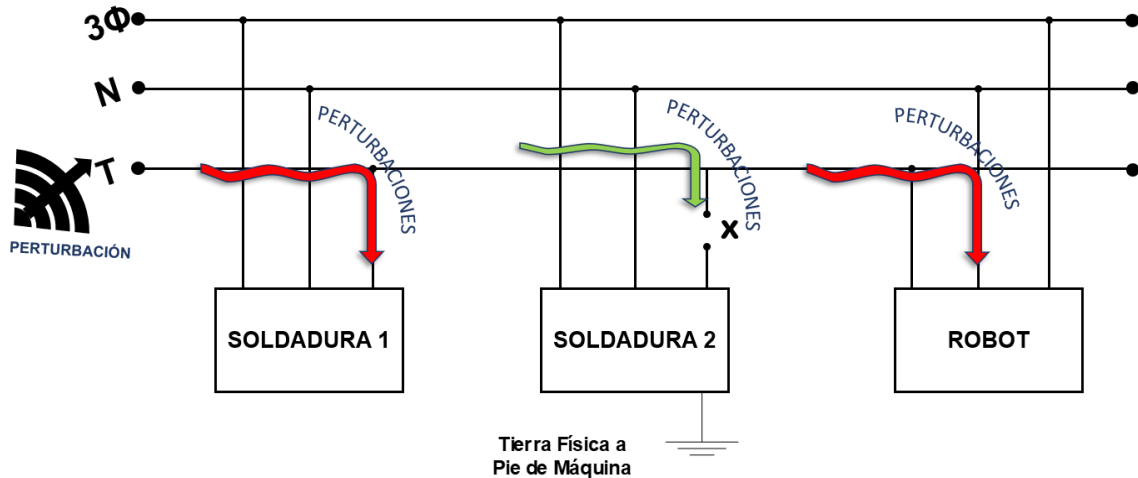


## **5. TIERRAS FÍSICAS DESACOPLADAS PARA CARGAS CRÍTICAS Y SUS RESULTADOS**

Como se explicó en los **Capítulo 1** y **4**, los fenómenos electromagnéticos y sus efectos requieren de un medio de propagación, en el caso del presente estudio se ha identificado que el medio por el cual se propagan dichos efectos es a través del sistema de tierras de la planta Grundfos México. De aquí surge la hipótesis de desacoplar la tierra física del tablero de alimentación principal en el área de soldadoras para poder mitigar los transitorios electromagnéticos descritos en el capítulo anterior. En la **Figura 1.1.12** del **Capítulo 1** se describe como se pueden conducir las perturbaciones del sistema eléctrico y sus componentes a través del conductor de tierra.

Con base en lo anterior se propuso desconectar el conductor de tierra que viene del bus de 50 Hz y que es común para todas las cargas que se alimentan a dicha frecuencia. En su lugar, se sugirió realizar la instalación de tierras físicas locales (a pie de máquina). De manera que las cargas (las máquinas soldadoras) seguirían teniendo una conexión a tierra, pero de manera independiente al resto de las máquinas que se alimentan del mismo bus. Ver **Figura 5.1**.

En la **Figura 5.1**, se representa gráficamente la idea de cómo desacoplar las máquinas soldadoras del plano de tierras utilizado por toda la maquinaria de la planta y usar un punto de conexión a tierra a pie de máquina.



**Figura 5.1** Concepto de tierras desacopladas utilizado en la propuesta para mitigar efectos de EMC en Grundfos México

Para la instalación de estas tierras físicas a pie de máquina, Grundfos México contrató a un proveedor externo el cual utilizó los siguientes materiales para la implementación de las tierras físicas:

- 2 electrodos de cobre de 16 mm de diámetro y 3 m de longitud.
- Cable de cobre desnudo calibre 2/0 AWG.
- Conectores para varilla modelo GAR2426.
- Zapata para cable GB26.
- Tubo Conduit galvanizado de 21 mm
- Sellador de juntas de acuerdo con la norma ANSI A118.1.

El cálculo de la resistencia de los electrodos se realiza de la siguiente manera:

$$L = 3m$$

$$r = 0.008m$$

$$d = 10m$$

$$\rho = 60\Omega \cdot m$$

$$R = \frac{\rho}{4\pi \cdot L} \cdot \left( \left( \ln 4 \cdot \frac{L}{r} \right) - 1 \right) + \frac{\rho}{4\pi \cdot d} \left( 1 - \frac{L^2}{3 \cdot d^2} + \frac{2 \cdot L^4}{5 \cdot d^4} \right) = 10.512 \Omega$$

Mientras que las mediciones del sistema de tierras completo se muestran en la **Tabla 5.1**:

**Tabla 5.1** Valores de resistencia medidos a cada uno de los electrodos instalados en el área de soldadoras MS402

Máquina	Electrodo	Resistencia ( $\Omega$ )	Resistencia equivalente ( $\Omega$ )	Cumple con NOM-001-SEDE-2012
1	A	32.58	18.66	Sí
	B	43.7		
2	A	56.63	23.76	Sí
	B	40.93		

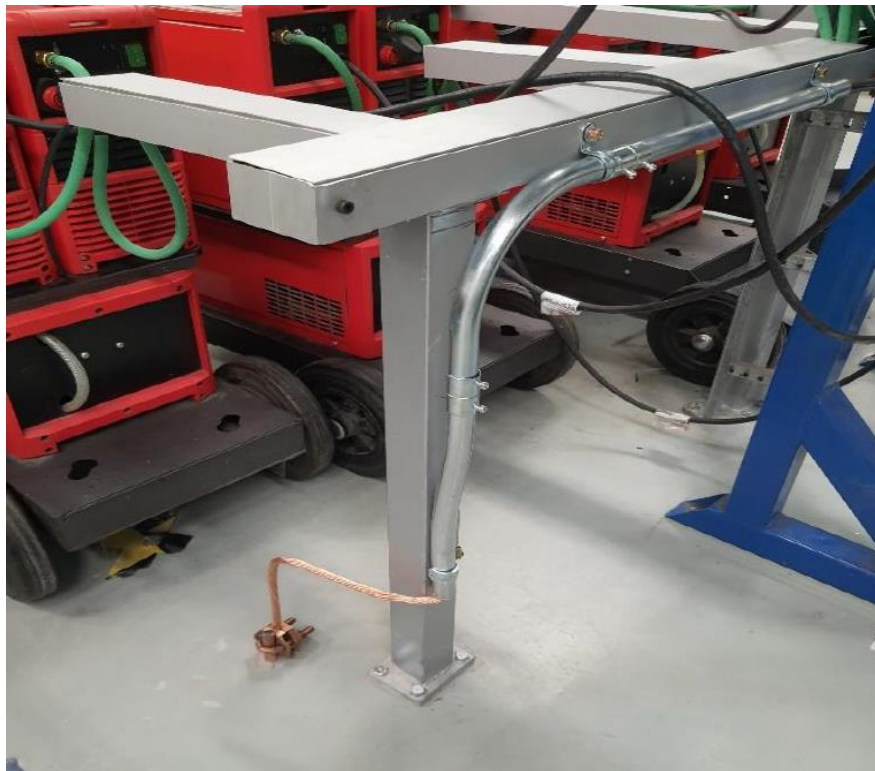
En la **Figura 5.2**, se muestra el método de medición utilizado para obtener los valores de resistencia mostrados en la tabla anterior.



**Figura 5.2** Medición de resistencia a uno de los electrodos de tierra instalados en el área de soldadoras.

Estos resultados de las mediciones en las tierras físicas cumplen con la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012, artículo 250.50.

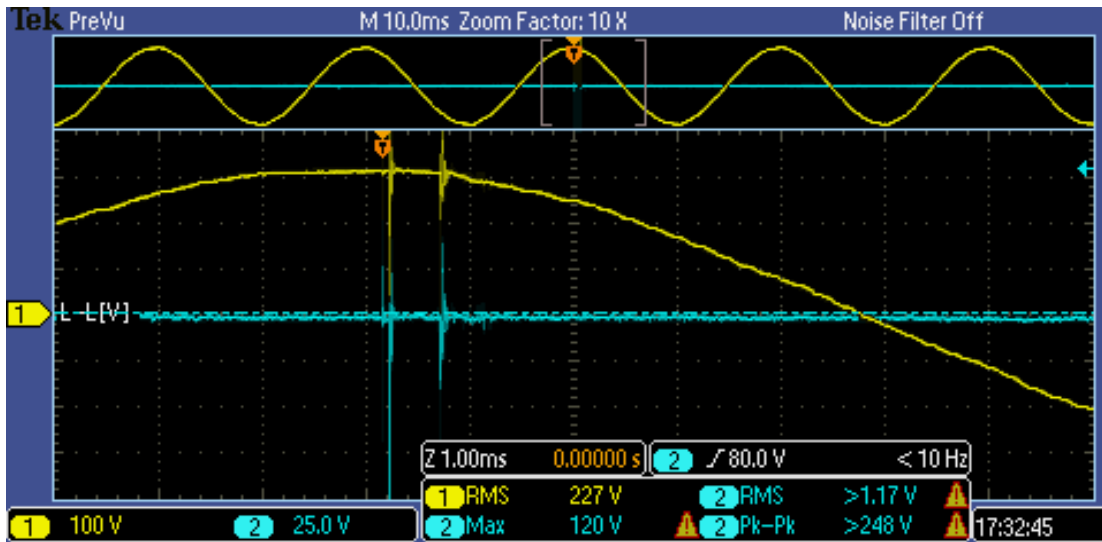
El 10 de octubre de 2021 se concluyó la instalación de las tierras físicas en el área de SOLDADORAS (ver **Figura 5.3**), posterior a esta fecha se volvieron a tomar mediciones de voltaje entre los conductores neutro y tierra de esta estación. Durante estas nuevas mediciones se adicionó también una sonda de corriente para monitorear la corriente a través del conductor de tierra, de la misma manera como se presentó en la **Figura 3.1** durante los estudios previos.



**Figura 5.3** *Tierras físicas instaladas a pie de máquina en área de SOLDADORAS.*

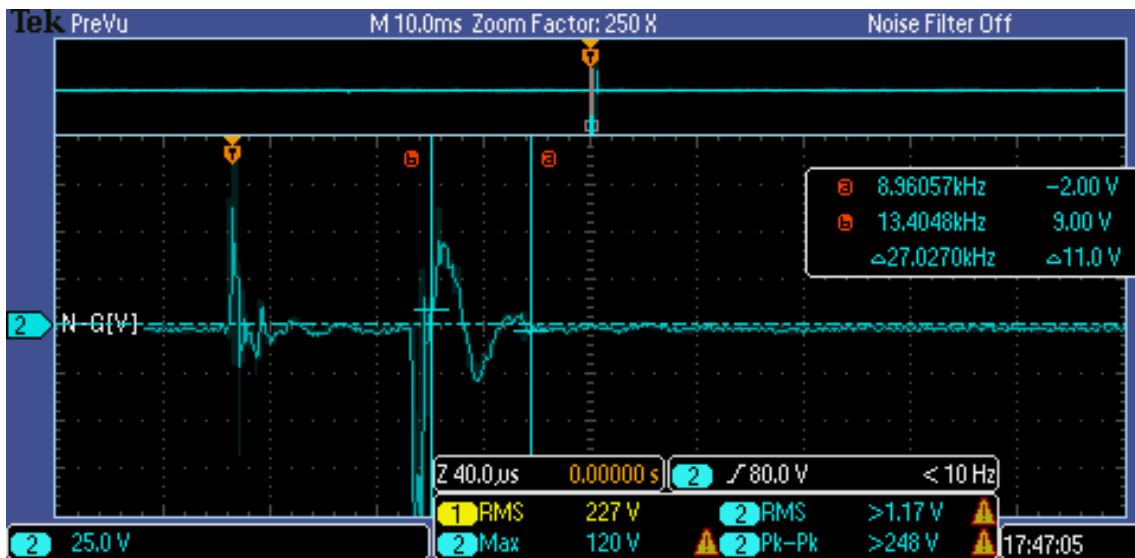
Una vez implementadas las tierras físicas, un nuevo evento transitorio fue capturado por el osciloscopio el día 14 de octubre del 2021. En la **Figura 5.3** se muestra el evento registrado, en él se puede apreciar cómo el voltaje entre los conductores neutro y tierra alcanzó los 248 V pico a pico. Cabe mencionar que la sonda de voltaje se saturó y no fue posible registrar el voltaje máximo que alcanzó este transitorio debido a la escala en la cual estaba programada la sonda.





**Figura 5.3** Transitorio capturado el 14/10/2021, sobretensión mayor a 248 V pico a pico.

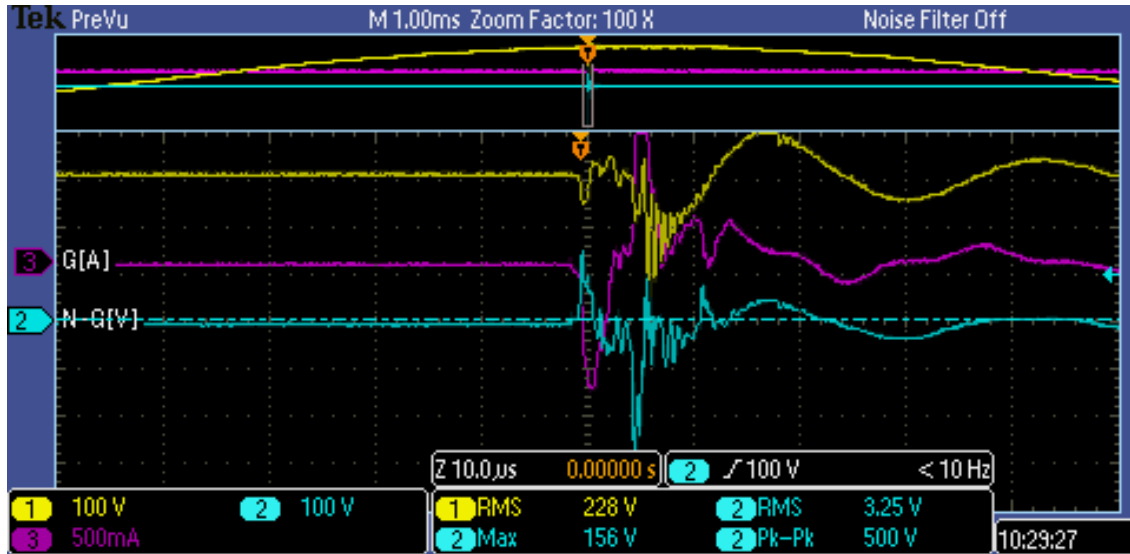
En el **Figura 5.4**, se presenta la medición de la frecuencia a la cual ocurrió el transitorio descrito anteriormente. En esta ocasión se registró una frecuencia de 27 kHz.



**Figura 5.4** Transitorio capturado el 14/10/2021, sobretensión mayor a 27 kHz.

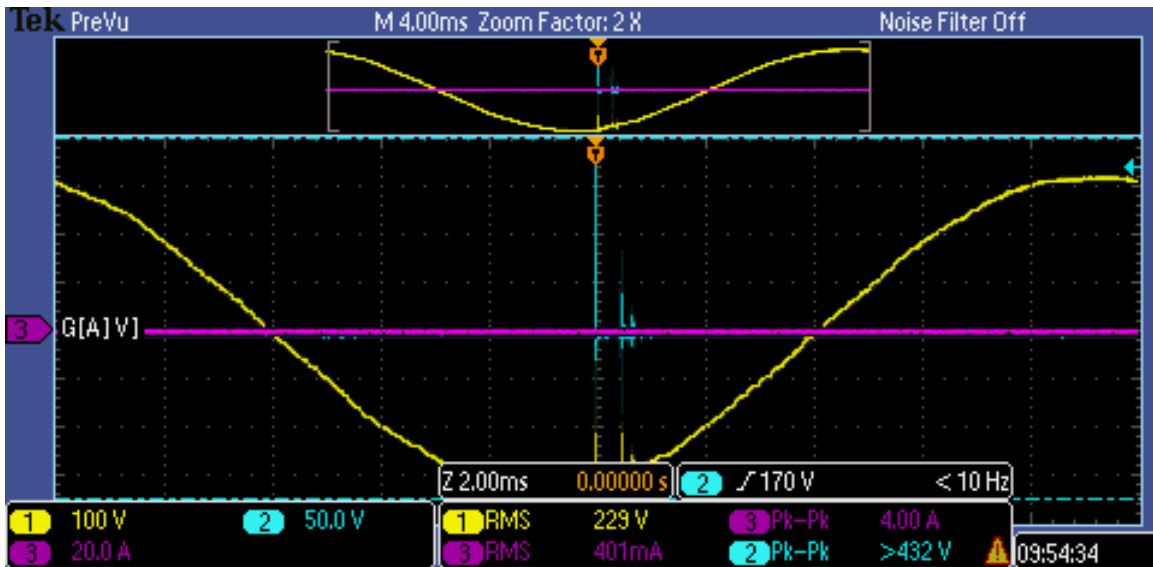
Posteriormente, el día 15 de octubre de 2021 se registró una nueva perturbación en las mediciones de la estación de trabajo. En esta ocasión el voltaje pico a pico con el cual se disparó el grabador de eventos del osciloscopio fue de 500 V (señal en color azul). Adicional a la sobretensión entre los conductores neutro y tierra, se registró una

sobrecorriente de 1.7 A pico a pico (señal en color magenta) y la forma de onda del voltaje entre fase y neutro se vio perturbada también (señal en color amarillo). Lo descrito anteriormente se puede observar en la **Figura 5.5**.



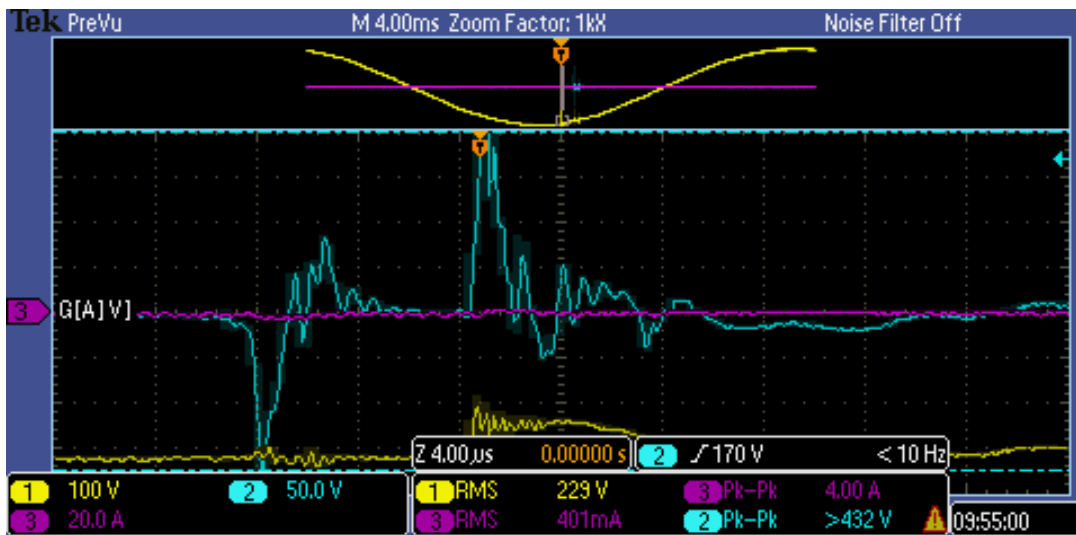
**Figura 5.5** Transitorio capturado el 15/10/2021, perturbación en voltajes de fase a neutro (amarillo), neutro a tierra (azul) y corriente en conductor de tierra (magenta).

Se continuó el monitoreo de la estación y el día 26 de octubre de 2021 se registró un nuevo evento. Para este transitorio la sonda de voltaje se saturó a los 432 V pico a pico, la sonda de corriente en el conductor de tierra registro un máximo de 4 A pico a pico y la forma de onda entre conductores de fase y neutro nuevamente se vio afectada. En el **Figura 5.6** se aprecia lo anteriormente descrito.



**Figura 5.6** Transitorio capturado el 24/10/2021, perturbación en voltajes de fase a neutro, neutro a tierra y corriente en conductor de tierra.

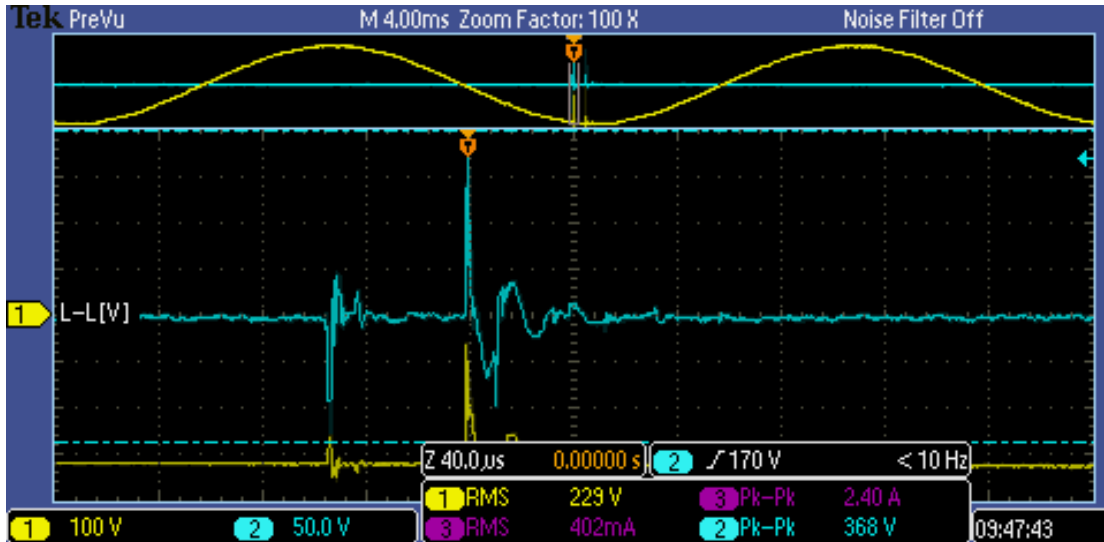
En el **Figura 5.7**, se presenta una ampliación en la señal de voltaje entre los conductores de neutro y tierra de este transitorio ocurrido el 24 de octubre. Se puede observar que la forma de onda de la señal es similar a las presentadas anteriormente en el **Capítulo 4 y 5**.



**Figura 5.7** Transitorio capturado el 24/10/2021, ampliación de la señal de voltaje entre neutro y tierra.

Finalmente, el último evento que se registró durante 2021 sucedió el 02 de noviembre. Durante este disturbio, el voltaje entre neutro y tierra alcanzó un valor de 368 V pico a

pico y nuevamente la forma de onda del voltaje entre la fase y el neutro sufrió una deformación como se puede apreciar en el **Figura 5.8**.



**Figura 5.8** Transitorio capturado el 02/11/2021, 368 V pico a pico.

En resumen, las tierras físicas instaladas a pie de la maquinaria no representaron una ayuda en el objetivo de mitigar las perturbaciones observadas a causa de la compatibilidad electromagnética en el área de SOLDADORAS. Las perturbaciones electromagnéticas persistieron en su magnitud y frecuencia. Por lo que mantener conectados ambos conductores de tierra (el proveniente del bus de 50 Hz y el de reciente instalación) representaba lo mismo en términos de perturbaciones electromagnéticas que desconectar alguno de ellos.

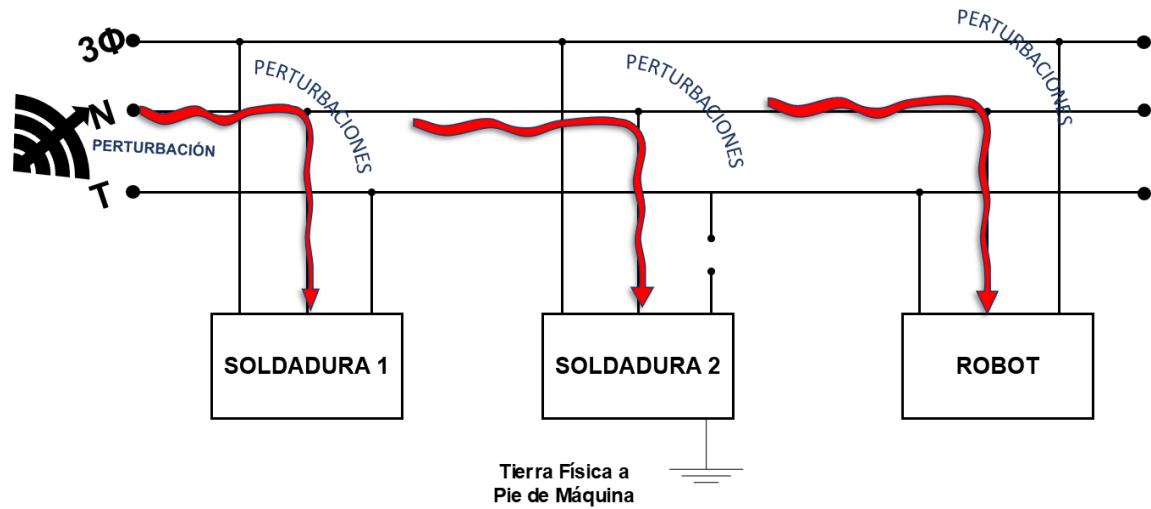
## 6. CONCLUSIONES

Abordar el estudio de la problemática descrita en el presente documento, requirió de diversos estudios previos, así como el aplicar los conocimientos adquiridos a través del curso de la maestría en Sistemas Eléctricos de Potencia en materias como Calidad la Energía, Transitorios Electromagnéticos y Electrónica de Potencia.

Dada la complejidad de la problemática expuesta, así como la cantidad de cargas sensibles existentes en la compañía Grundfos México que, principalmente usa electrónica de potencia, fue necesario aplicar los conocimientos teóricos adquiridos durante la maestría, así como la experiencia de diferentes proveedores en el campo de aplicación para realizar una caracterización adecuada del problema.

Derivado de las mediciones hechas después de la instalación de las tierras físicas que se presentaron en el **Capítulo 5**, se pudo concluir que su implementación no fue efectiva en la tarea de llevar a niveles aceptables los efectos de la compatibilidad electromagnética. Esto debido a que las sobretensiones entre los conductores de tierra y neutro siguieron presentándose. Además, se pudieron observar transitorios de corriente en el conductor de tierra utilizado para conectar el tablero de alimentación a la tierra física.

Si bien fue posible aislar el plano de tierras local (a pie de máquinas), del plano de tierras general usado en la instalación de la planta, el conductor neutro siguió siendo el mismo y a través de él se siguieron conduciendo las perturbaciones electromagnéticas como se ilustra en la **Figura 6.1**, las cuales ocasionan los efectos descritos en el **Capítulo 4 y 5**.



**Figura 6.1** Conductor Neutro conduciendo perturbaciones electromagnéticas a la maquinaria.

Al compartir toda la maquinaria conectada a 50 Hz dicho conductor neutro, las perturbaciones se siguieron propagando en el sistema analizado. Al no ser posible aislar o desconectar directamente este conductor en los tableros de alimentación estudiados, se tendrá que explorar la factibilidad de implementar otras soluciones como lo podrán ser filtros conectados a la alimentación de cada máquina, cables apantallados y aterrizados en la acometida de los tableros eléctricos como se muestra en la **Figura 6.2**.



**Figura 6.2** *Ejemplo de accesorios diseñados para disipar EMC en conjunto con el uso de cable apantallado [15].*





# ANEXOS

## ESTUDIOS REALIZADOS A CONVERTIDOR DE 60 HZ A 50 HZ

**Empresa**  
BOMBAS GRUNDFOS S.A. DE C.V.  
**Lugar**  
Cuarto maquinas.  
**Equipo**  
Convertidor de Voltaje 460-400 V., 50 hz.

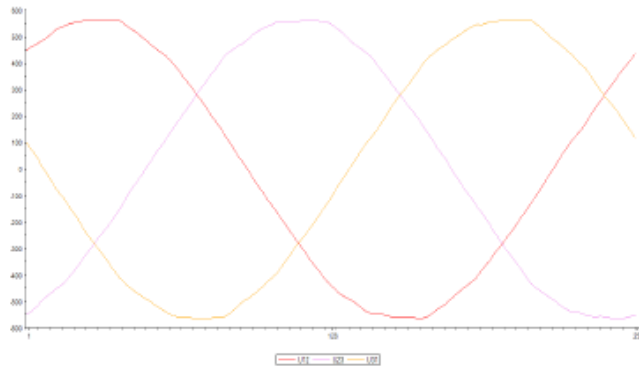


Fig. 1.1 Forma de onda de tensión del circuito.

**Comentarios**  
Se observa un forma de onda de tensión típica de un sistema trifásico balanceado.

**Observaciones y Recomendaciones**  
No se detectan anomalías en la forma de onda de tensión.



Fig. 1.2 Componamiento de la tensión (valores promedio rms).

**Comentarios**  
La tensión mantiene una magnitud dentro del  $\pm 10\%$  de la nominal. No se presentan anomalías en la señal de tensión.

**Observaciones y Recomendaciones**  
Se observan picos o huecos de tensión.

MONITOREO

**Empresa**  
**BOMBAS GRUNDFOS S.A. DE C.V.**  
**Lugar**  
**Cuarto maquinas.**  
**Equipo**  
**Convertidor de Voltaje 460-400 V., 50 hz.**

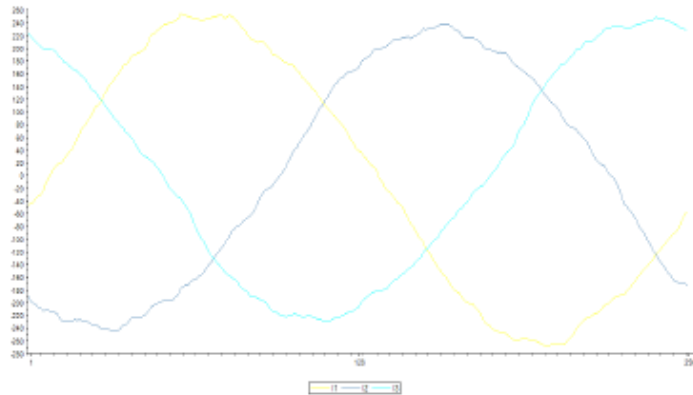


Fig. 1.3 Forma de onda de corriente del circuito.

**Comentarios**  
 Se observa un forma de onda de corriente balanceada, con distorsión armónica.

**Observaciones y Recomendaciones**  
 La forma de onda de corriente presenta anomalías.

MONITOREO

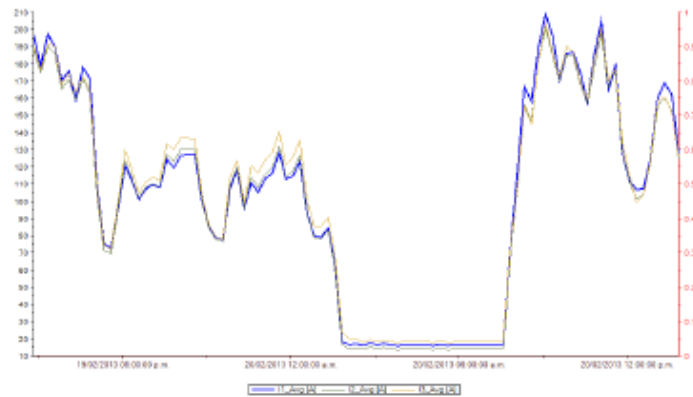


Fig. 1.4 Comportamiento de la corriente (valores promedio rms).

**Comentarios**  
 La magnitud de corriente está dentro de la capacidad del circuito.

**Observaciones y Recomendaciones**  
 La corriente máxima registrada es de 209.3 A.

**Empresa**  
**BOMBAS GRUNDFOS S.A. DE C.V.**  
**Lugar**  
 Cuarto maquinas.  
**Equipo**  
 Convertidor de Voltaje 460-400 V., 50 hz.

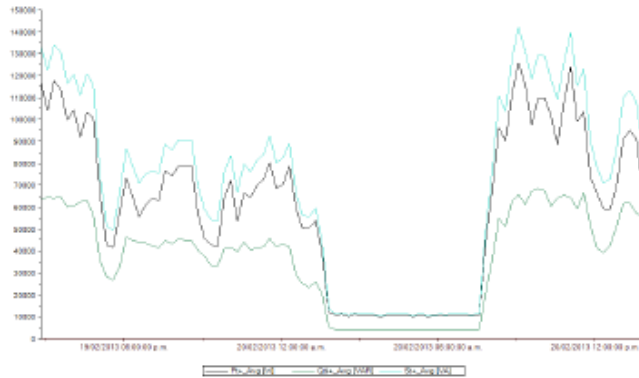


Fig. 1.5 Comportamiento de las potencias demandadas por la carga instalada

**Comentarios**

La demanda se encuentra dentro de la capacidad del circuito.

**Observaciones y Recomendaciones**

La demanda máxima de este circuito es de 142 kVA que corresponde al 14.2% de la capacidad del transformador de 1000kVA. De donde se alimenta el convertidor. El consumo promedio de reactivos es de 36.519 kVAR.

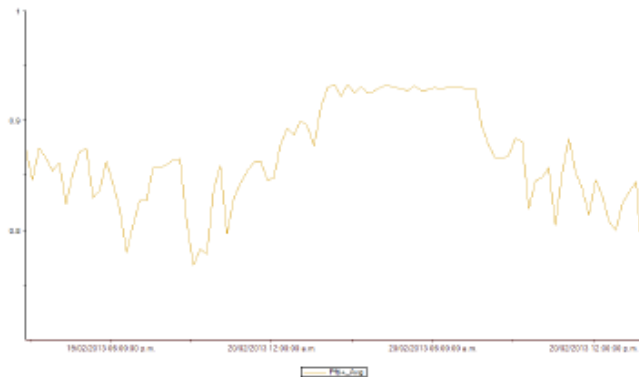


Fig. 1.6 Comportamiento del factor de potencia.

**Comentarios**

Se encontró un factor de potencia promedio de 0.9, el cual se encuentra dentro del límite permitido por CFE.

**Observaciones y Recomendaciones.**

El equipo se conecta en las salidas del transformador convertidor de voltaje de 460 a 400 volts.

MONITOREO

**Empresa**  
BOMBAS GRUNDFOS S.A. DE C.V.  
**Lugar**  
Cuarto maquinas.  
**Equipo**  
Convertidor de Voltaje 460-400 V., 50 hz.

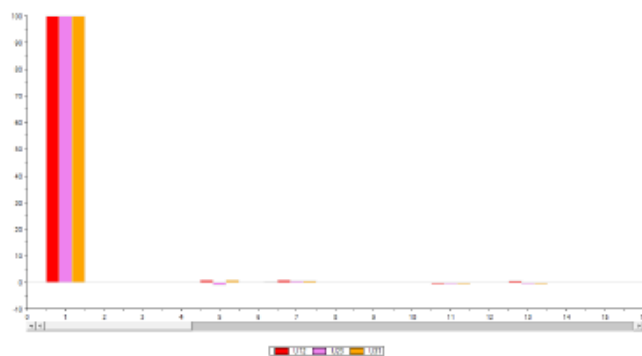


Fig. 1.7 Espectro armónico de la forma de onda de tensión.

**Comentarios**  
No se observan anomalías en la magnitud de tensión armónica.

**Observaciones y Recomendaciones**  
La magnitud individual de las armónicas de tensión se mantienen en el límite de la especificación IEEE 519-1992. ( $H_n < 3.0\%$ )

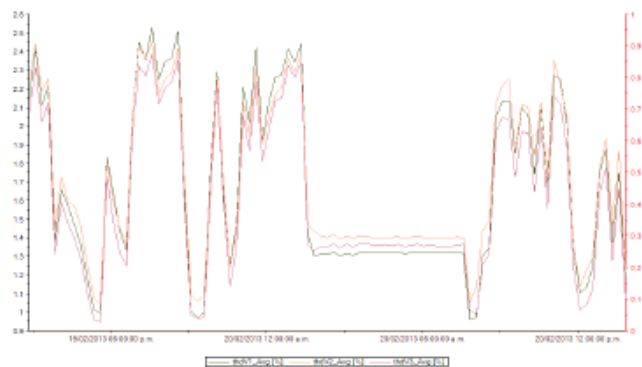


Fig. 1.8 Comportamiento de la distorsión armónica de tensión, THD (V).

**Comentarios**  
No se detectan anomalías en la magnitud de la distorsión armónica total de tensión.

**Observaciones y Recomendaciones**  
La magnitud de THD V se mantiene dentro de los límites de la especificación IEEE 519-1992. ( $THD < 5.0\%$ )

MONITOREO

**Empresa**  
BOMBAS GRUNDFOS S.A. DE C.V.  
**Lugar**  
Cuarto maquinas.  
**Equipo**  
Convertidor de Voltaje 460-400 V., 50 hz.

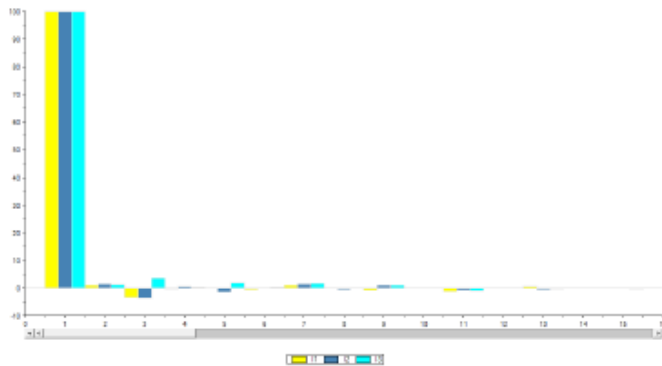


Fig. 1.9 Espectro armónico de la forma de onda de corriente.

**Comentarios**

No se observan anomalías en la magnitud de las corrientes armónicas.

**Observaciones y Recomendaciones**

La magnitud individual de las armónicas de corriente se mantienen dentro del límite de la especificación IEEE 519-1992. (Hn < 10.0%)

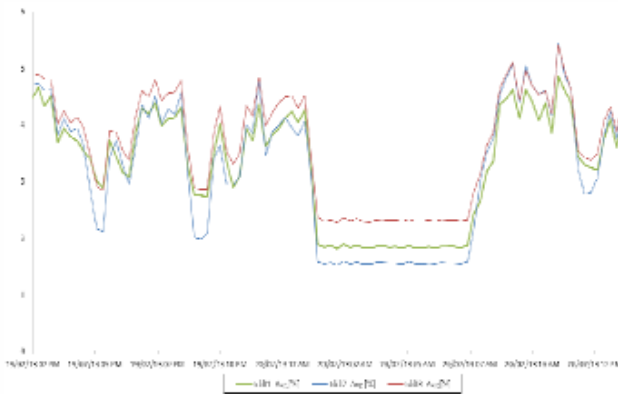


Fig. 1.10 Comportamiento de la distorsión armónica de corriente, TDD (I).

**Comentarios**

No se detectan anomalías en la magnitud de la distorsión demandada total de corriente.

**Observaciones y Recomendaciones**

La magnitud de TDD I se mantiene dentro de los límites de la especificación IEEE 519-1992. (TDD < 12.0%)

MONITOREO



# BIBLIOGRAFÍA:

1. Centro Nacional de Metrología, “¿Sabes qué es la Compatibilidad Electromagnética? | Centro Nacional de Metrología | Gobierno | gob.mx,” Aug. 13, 2018. <https://www.gob.mx/cenam/articulos/sabes-que-es-la-compatibilidad-electromagnetica?idiom=es> (accessed Jul. 10, 2022).
2. E. Leskow Coluccio. “Espectro Electromagnético - Concepto, regiones, usos e importancia,” Jul. 15, 2021. <https://concepto.de/espectro-electromagnetico/> (accessed Jul. 10, 2022).
3. “El Espectro Electromagnético,” Oct. 22, 2020. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cont\\_emspec2-es.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cont_emspec2-es.png) (accessed Jul. 10, 2022).
4. P. Á. Vázquez González. “GIA Maxwell onda plana,” May 09, 2011. [http://laplace.us.es/wiki/index.php?title=Archivo:F2\\_GIA\\_Maxwell\\_onda\\_plana.jpg](http://laplace.us.es/wiki/index.php?title=Archivo:F2_GIA_Maxwell_onda_plana.jpg) (accessed Jul. 10, 2022).
5. SMAR Technology Company. (2022). EMI - Interferencia Electromagnética en instalaciones industriales y mucho más. <https://www.smar.com/es/articulo-tecnico/emi-interferencia-electromagnetica-en-instalaciones-industriales-y-mucho-mas>. (Accessed Ago 08, 2022).
6. L. Rodríguez Quiroz, E. Páez, C. Tremola, and M. Azpurua, “Creación del laboratorio de Compatibilidad Electromagnética (EMC) y Determinación de Parámetros de Antena (APM) para el Instituto de Ingeniería (FII),” *Revista Espacios*, vol. 29, no. 3, pp. 1–4, 2009, Accessed: Jul. 10, 2022. [Online]. Available: <https://www.revistaespacios.com/a08v29n03/08290331.html#pres>
7. Schneider Electric, Compatibilidad electromagnética «CEM» Manual didáctico. Telemecanique. 2000. Accessed: Jul. 10, 2022. [Online]. Available: <https://1library.co/document/z34nrd7y-compatibilidad-electromagn%C3%A9tica-cem-manual-did%C3%A1ctico-telemecanique.html>
8. “La interferencia de RF en ambulancia causa la muerte,” *Compliance Engineering*, Sep. 1994. <https://incompliancemag.com/article/38708/> (accessed Jul. 18, 2022).
9. D. Mckean. “Licensed TV transmissions interfere with intensive care, kills babies,” Jul. 29, 1998. <https://incompliancemag.com/article/banana-skins-february-2018/> (accessed Jul. 18, 2022).
10. C. Clough. “Interference, EMI, RFI, EMC, Safety and EMC for Functional Safety & Reliability World-Wide,” 2010. <https://www.cherryclough.com/home> (accessed Jul. 10, 2022).

11. L.J. Ferrer Arnau. "Introducción a la compatibilidad electromagnética," Conference report, 2002, Accessed: Jul. 10, 2022. [Online]. Available: [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/13082/Ferrer\\_Arnau\\_emc\\_jcee02.pdf?sequence=1](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/13082/Ferrer_Arnau_emc_jcee02.pdf?sequence=1)
12. Grundfos. (2022). History. <https://www.grundfos.com/about-us/our-company/history?tab=1940-1949>. (Accessed Ago 08, 2022).
13. Comisión Federal de Electricidad, "Desviaciones permisibles en las formas de onda de tensión y corriente en el suministro y consumo de energía eléctrica," 2005. [https://lapem.cfe.gob.mx/normas/carga\\_pagina.asp?pag=L0000-45.pdf](https://lapem.cfe.gob.mx/normas/carga_pagina.asp?pag=L0000-45.pdf) (accessed Jul. 10, 2022).
14. IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems," in IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992) , vol., no., pp.1-29, 11 June 2014, doi: 10.1109/IEEESTD.2014.6826459.
15. Icotek, "The economic alternative to expensive EMC cable glands | icotek," (s.f). <https://www.icotek.com/en/products/emc-cable-entry-systems> (accessed Jul. 10, 2022).
16. National Institute of Standards and Technology. (2017). National Electrical Code (pp. 1–1470). NIST.