



## ESTUDO DE CASO: AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE ENERGIA E PROPOSTA DE CORREÇÃO EM UMA INDÚSTRIA AFETADA POR HARMÔNICAS E ENERGIA REATIVA

*Rafael Dos Santos Ferreira<sup>1</sup>, Thiago Schumacher Barcelos<sup>2</sup>*

### Resumo

Este estudo apresenta uma análise da qualidade da energia elétrica em uma empresa industrial, com foco nos impactos das harmônicas e da energia reativa. A pesquisa foi baseada em medições realizadas no circuito do transformador 380V de uma empresa de médio porte, localizada em Poá-SP. Foram avaliadas a flutuação de tensão, corrente, fator de potência e distorção harmônica. Os resultados demonstraram níveis elevados de harmônicas de 5ª e 7ª ordem, além de um fator de potência inferior a 0,92, o que resulta em multas pela concessionária de energia. Com base nos dados obtidos, foram propostas medidas corretivas, incluindo o uso de filtros harmônicos e a reconfiguração de cargas poluentes.

**Palavras-chave:** qualidade de energia, harmônicas, energia reativa, fator de potência, poluição harmônica.

### 1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica fornecida aos consumidores pode apresentar distorções em sua forma de onda, conhecidas como distorções harmônicas. Essas distorções ocorrem quando frequências múltiplas da fundamental (50 ou 60 Hz) aparecem no sistema, resultando na deformação da onda original. Esse fenômeno compromete a qualidade da energia e pode impactar a operação de equipamentos industriais (Arrillaga, Bradley e Bodger, 1989).

Diferentes tipos de cargas elétricas estão conectadas à rede elétrica, sendo que os maiores responsáveis pela introdução de harmônicas são as cargas não lineares (Pomilio e Deckmann, 2006).

Esses dispositivos, ao não consumirem corrente de maneira proporcional à tensão aplicada, geram componentes harmônicas que podem causar superaquecimento, mau funcionamento e redução da vida útil dos equipamentos.

A qualidade da energia elétrica é um fator crítico para a eficiência e segurança de sistemas industriais. Problemas como baixa qualidade de tensão, fator de potência reduzido e presença de distorções harmônicas podem resultar em multas da concessionária e danos a equipamentos.

As harmônicas trazem vários problemas para a eficiência energética da rede, como por exemplo, sobreaquecimento de transformadores, corrente elevada no condutor neutro ou explosões em capacitores (Antunes et al., 2014).



Este estudo tem como objetivo analisar os impactos da energia reativa e das harmônicas em uma instalação industrial, com base em medições reais realizadas em uma empresa de médio porte localizadas na em POÁ/BR.

## 2. METODOLOGIA DA PESQUISA

Para entender melhor sobre problemas que afetam a QEE, são explorados os conceitos de distorção harmônica total (DHT), distorção harmônica individual (DHI) e fator de potência (FP) nas instalações elétricas.

Conforme descrito por Antunes et al. (2014), as distorções harmônicas correspondem a alterações nas formas de onda da tensão e da corrente em comparação à onda senoidal da frequência fundamental. Para avaliar essas distorções, são utilizados indicadores harmônicos, que analisam o grau de conformidade da tensão e da corrente com a senóide ideal, além de refletirem o desempenho da instalação. Os dois principais indicadores utilizados neste trabalho são a distorção harmônica total (DHT) e a distorção harmônica individual (DHI).

Apresentado em IEEE (1993), o DHT é expresso como uma porcentagem da componente fundamental e definido como:

$$DHT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} X_h^2}}{X_1} * 100 \quad (1)$$

Onde  $X_h$  é o valor RMS tensão ou corrente harmônica de ordem  $h$  e  $X_1$  é o valor RMS da tensão ou corrente fundamental. Conforme apresentado em Antunes et al. (2014), o DHI é o desvio total de uma onda distorcida em relação à sua componente fundamental e é definido como:

$$DHI_h \% = \frac{X_h}{X_1} * 100 \quad (2)$$

Quanto menor for a DTH de uma forma de onda, mais ela se aproxima de uma forma de onda senoidal e menor é o seu conteúdo harmônico, o que é altamente desejável para a rede.

Outro indicador importante utilizado nesse trabalho é o fator de potência FP



O cálculo do FP é obtido em função da equação (3), como apresentado em (ON Semiconductor, 2014).

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T v(t) \cdot i(t) \cdot dt}{V_{rms} \cdot I_{rms}} \quad (3)$$

Onde:

$P$  – Potência ativa ou útil.

$S$  – Potência aparente ou complexa.

$v(t)$  – Tensão instantânea.

$i(t)$  – Corrente instantânea.

$V_{rms}$  – Valor eficaz da forma de onda da tensão.

$I_{rms}$  – Valor eficaz da forma de onda da corrente.

$T$  – Período.

### **Distorção harmônica**

As distorções harmônicas são fenômenos elétricos que ocorrem quando a forma de onda da tensão e da corrente se desvia do padrão senoidal ideal da frequência fundamental do sistema (50 ou 60 Hz). Essas distorções surgem devido à presença de componentes harmônicas, que são múltiplos inteiros da frequência fundamental e resultam da operação de cargas não lineares, como inversores, motores controlados por eletrônica de potência, fontes chaveadas e outros dispositivos industriais.

A presença dessas harmônicas pode causar efeitos adversos, incluindo perdas excessivas em transformadores, aquecimento de cabos, mau funcionamento de equipamentos eletrônicos e aumento da corrente no condutor neutro. Para avaliar a gravidade dessas distorções, utilizam-se indicadores como a Distorção Harmônica Total (THD), que quantifica a influência das componentes harmônicas em relação à tensão fundamental.

O gerenciamento de harmônicos em sistemas de energia é uma responsabilidade compartilhada entre usuários e operadores, com limites estabelecidos tanto para tensões quanto para correntes harmônicas, visando manter a distorção de tensão dentro de níveis aceitáveis (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2022, p. 16).



Os limites estabelecidos na norma IEEE Std 519-2022 aplicam-se apenas no Ponto de Acoplamento Comum (PAC), que é o ponto de conexão entre a instalação do usuário e a rede elétrica da concessionária. Dentro da instalação, as tensões e correntes harmônicas podem ser maiores que no PCC devido à ausência de diversidade e cancelamento (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2022, p. 25).

A Institute of Electrical and Electronics Engineers (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2022) estabelece limites para a distorção harmônica de tensão e corrente, garantindo a qualidade da energia elétrica nos sistemas de potência. Esses limites variam conforme a tensão nominal no Ponto de Acoplamento Comum (PAC) e são apresentados na Tabela 1

TABELA 1: LIMITES DE DISTORÇÃO DE TENSÃO

Faixa de tensão	Distorção por harmônica de tensão (%)	Distorção total de tensão THDv (%)
$v \leq 69 \text{ KV}$	3,0	5,0
$69 \text{ KV} < v < 161 \text{ KV}$	1,5	2,0
$v \geq 161 \text{ KV}$	1,0	1,5

Fonte: INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (2022)

A tabela 1 apresenta os limites de distorção harmônica de corrente para sistemas elétricos com tensão de até 69 kV, conforme estabelecido pelo Institute of Electrical and Electronics Engineers (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2022). Os valores são definidos com base na relação entre a corrente de curto-circuito ( $I_{cc}$ ) e a corrente de carga ( $I_{carga}$ ), garantindo que a qualidade da energia seja mantida.

A tabela estabelece limites para diferentes faixas de frequência harmônica (h), indicando a porcentagem máxima permitida da corrente de carga para cada intervalo. À medida que a relação  $I_{cc}/I_{carga}$  aumenta, os limites de distorção também se tornam mais flexíveis. Além disso, a última coluna (TDD – Total Demand Distortion) define o limite global de distorção permitido para o sistema.

TABELA 2: LIMITES DE DISTORÇÃO DE CORRENTE PARA SISTEMAS ATÉ 69 KV



lcc/lcarga	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$	TDD
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20<50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50<100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100<1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	12,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Fonte: INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (2022)

Esses valores são fundamentais para evitar impactos negativos, como aquecimento excessivo de equipamentos e interferências na rede elétrica, garantindo a estabilidade do sistema elétrico e a conformidade com as regulamentações técnicas (IEEE, 2022).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, descreve os materiais, técnicas e abordagens utilizados durante a realização da pesquisa.

As medições foram realizadas diretamente na subestação de energia localizada na entrada da empresa. Esse ponto foi escolhido por ser o Ponto de Acoplamento Comum (PAC) entre a rede da concessionária e a instalação elétrica interna, garantindo uma análise precisa da qualidade da energia fornecida e dos impactos das cargas conectadas.

#### Equipamentos Utilizados

Para a realização das medições, foi utilizado um analisador de qualidade de energia elétrica PowerNET PQ-600 G4, da marca IMS. Esse equipamento permite a detecção e análise de diversos fenômenos relacionados à qualidade da energia, incluindo variações de tensão (SAG e SWELL) e oscilações de frequência (FLICKER), atendendo aos requisitos estabelecidos no PRODIST Módulo 8, na IEC 61000-4-30 (Classe A) – que define critérios para a medição da qualidade da energia elétrica, garantindo precisão e confiabilidade dos dados – e na IEC 61000-4-7, que especifica os métodos para a medição de harmônicas e interharmônicas em sistemas elétricos.

O analisador possui memória interna de 512 MB, suporte para cartão de memória externa de até 16 GB e comunicação via USB, Bluetooth e modem GPRS, possibilitando o monitoramento remoto dos dados. Além disso, utiliza sensores flexíveis do tipo EXTENDED, que permitem medições de corrente em uma faixa ampliada. Para o processamento e análise dos dados coletados, foi utilizado o software PowerMANAGER



Desktop, responsável pela parametrização do equipamento e pela geração de gráficos e relatórios.

Figura 1: Analisador e qualidade de energia



Fonte: Autor

## Procedimento de Medição

As medições foram realizadas diretamente na subestação de energia localizada na entrada da empresa. Esse ponto foi escolhido por ser o Ponto de Acoplamento Comum (PAC) entre a rede da concessionária e a instalação elétrica interna, garantindo uma análise precisa da qualidade da energia fornecida e dos impactos das cargas conectadas.

O analisador foi instalado seguindo as recomendações do fabricante e os protocolos de segurança elétrica. As medições foram registradas ao longo de um período determinado, considerando variações na demanda da instalação. Os dados obtidos foram posteriormente analisados para verificar a conformidade com os limites de distorção harmônica estabelecidos na IEEE Std 519-2022.

## 4. Resultados e Discussão

As medições foram realizadas durante o período do dia 28 a 31 de agosto em um intervalo de 5 minutos de cada leitura o que permitiram avaliar a qualidade da energia elétrica na instalação industrial, com foco na análise da distorção harmônica de tensão e corrente, bem como do fator de potência. Os resultados obtidos são discutidos a seguir.

A média do THD da corrente apresentou valores dentro dos limites aceitáveis na maior parte do tempo. No entanto, em determinados momentos, foram identificados



níveis elevados de harmônicas de corrente, indicando a presença de fontes não lineares na instalação elétrica.

A análise do THD da tensão revelou valores inferiores a 8%, o que indica baixa distorção harmônica na tensão, conforme os critérios estabelecidos pela IEEE std 519-2022. Por outro lado, o THD da corrente apresentou picos superiores a 50%, o que caracteriza níveis elevados de poluição harmônica no sistema. De acordo com a norma IEEE, valores de THD-i superiores a 50% indicam uma significativa presença de harmônicas, podendo causar efeitos adversos, como aquecimento excessivo de transformadores e cabos, além de impacto no desempenho dos equipamentos eletrônicos.

Os gráficos apresentados na tabela 3 representa medições com níveis mínimos, máximos e média de THD de corrente e tensão.

Enquanto o THD de tensão manteve média de **~1,65%** (dentro do limite de 5% da IEEE 519), o THD de corrente apresentou média de **~18,32%**, com picos acima de **70%** — indicando uma distorção grave gerada pelas cargas.

Tabela 3: leituras de harmônicas para tensão e corrente

Média THD da Tensão Va [%]			Média THD da Tensão Vb [%]			Média THD da Tensão Vc [%]		
Mínimos	0,75	30/08/2018 06:55:00	Mínimos	0,65	28/08/2018 17:40:00	Mínimos	0,49	31/08/2018 05:35:00
	0,82	28/08/2018 17:40:00		0,73	30/08/2018 06:55:00		0,51	30/08/2018 00:25:00
	0,83	30/08/2018 01:00:00		0,82	29/08/2018 06:30:00		0,51	29/08/2018 19:35:00
Máximos	5,24	28/08/2018 17:40:00	Máximos	5,22	28/08/2018 17:40:00	Máximos	5,68	28/08/2018 17:40:00
	4,38	31/08/2018 08:25:00		3,18	31/08/2018 08:25:00		3,16	31/08/2018 08:25:00
	3,21	29/08/2018 11:25:00		3,17	29/08/2018 11:25:00		3,05	30/08/2018 15:30:00
Média	1,64		Média	1,67		Média	1,43	
Média THD da Corrente Ia [%]			Média THD da Corrente Ib [%]			Média THD da Corrente Ic [%]		
Mínimos	0,77	31/08/2018 12:35:00	Mínimos	0,92	31/08/2018 12:35:00	Mínimos	0,88	31/08/2018 12:35:00
	1,06	29/08/2018 12:35:00		1,19	29/08/2018 12:35:00		1,14	29/08/2018 12:35:00
	1,19	30/08/2018 09:55:00		1,27	30/08/2018 07:35:00		1,28	30/08/2018 09:55:00
Máximos	71,56	29/08/2018 13:00:00	Máximos	68,40	31/08/2018 13:40:00	Máximos	72,94	28/08/2018 15:55:00
	69,92	31/08/2018 13:40:00		68,32	28/08/2018 15:55:00		71,27	29/08/2018 13:00:00
	68,91	29/08/2018 14:00:00		66,90	29/08/2018 13:00:00		69,33	31/08/2018 13:40:00
Média	18,32		Média	17,40		Média	19,32	

Fonte: Autor

A tabela 4 ilustram as leituras de harmônicas para tensão e corrente ao longo do período analisado com intervalo de 5 minutos.

Tabela 4: níveis de tensão e corrente durante período de ocorrência de harmônica na rede



time	P [W]	Q [VAR]	S [VA]	LC	PF	Ia max [A]	Ib max [A]	Ic max [A]	Van max [V]	Vbn max [V]	Vcn max [V]
2018-08-31 11:10:00.000	736,23	-14365,46	14384,31	CAP	0,05	21,79	21,84	21,99	221,78	220,66	221,80
2018-08-31 11:15:00.000	2212,61	-14231,74	14402,71	CAP	0,15	22,03	21,80	21,97	221,17	219,97	221,32
2018-08-31 11:20:00.000	24989,64	-926,93	25006,82	CAP	1,00	180,79	180,75	176,85	220,65	219,70	220,77
2018-08-31 11:25:00.000	34459,53	2776,61	34571,21	IND	1,00	92,18	91,19	90,32	220,19	219,27	220,30
2018-08-31 11:30:00.000	36643,05	2968,12	36763,06	IND	1,00	98,26	98,93	100,44	219,93	219,08	220,08
2018-08-31 11:35:00.000	211,55	-15272,05	15273,51	CAP	0,01	57,63	57,27	55,69	222,24	221,55	222,44
2018-08-31 11:40:00.000	199,41	-15273,41	15274,71	CAP	0,01	22,85	23,40	22,93	222,23	221,54	222,39
2018-08-31 11:45:00.000	198,75	-15207,48	15208,78	CAP	0,01	22,83	23,38	22,94	222,48	221,93	222,78
2018-08-31 11:50:00.000	210,13	-15282,34	15283,78	CAP	0,01	22,87	23,38	22,93	222,42	221,72	222,74
2018-08-31 11:55:00.000	185,59	-15287,83	15288,96	CAP	0,01	22,96	23,43	22,98	222,96	222,33	223,39
2018-08-31 12:00:00.000	187,70	-15752,88	15753,99	CAP	0,01	23,28	23,64	23,19	225,48	224,77	225,68
2018-08-31 12:05:00.000	187,59	-15310,17	15311,32	CAP	0,01	23,31	23,65	23,17	225,82	225,10	225,98
2018-08-31 12:10:00.000	193,42	-15300,76	15301,98	CAP	0,01	22,97	23,46	22,90	223,08	222,52	222,46
2018-08-31 12:15:00.000	217,87	-15260,61	15262,17	CAP	0,01	22,86	23,50	22,94	223,15	222,59	222,32
2018-08-31 12:20:00.000	186,18	-15353,95	15355,08	CAP	0,01	22,91	23,52	22,90	223,34	222,80	222,49
2018-08-31 12:25:00.000	195,89	-15371,49	15372,73	CAP	0,01	22,96	23,51	23,00	223,69	223,33	222,99
2018-08-31 12:30:00.000	194,19	-15444,34	15445,56	CAP	0,01	22,97	23,61	23,06	224,01	223,40	223,16
2018-08-31 12:35:00.000	34712,25	2556,86	34806,29	IND	1,00	281,53	285,34	276,09	223,71	223,01	222,86
2018-08-31 12:40:00.000	34709,27	2577,18	34804,81	IND	1,00	94,37	97,36	95,99	223,01	222,40	222,05
2018-08-31 12:45:00.000	1381,92	-14660,56	14725,54	CAP	0,09	91,09	93,63	88,61	224,68	223,86	223,53
2018-08-31 12:50:00.000	567,70	-15381,60	15392,07	CAP	0,04	23,50	23,36	23,35	224,67	224,03	223,68
2018-08-31 12:55:00.000	28257,09	2161,98	28339,68	IND	1,00	150,28	151,52	146,06	224,49	223,85	223,64
2018-08-31 13:00:00.000	26665,09	1093,28	26687,49	IND	1,00	85,77	87,20	86,24	222,62	222,09	221,90
2018-08-31 13:05:00.000	35407,38	2726,92	35512,24	IND	1,00	95,07	100,75	95,78	222,51	221,88	221,77
2018-08-31 13:10:00.000	34665,50	2673,38	34768,43	IND	1,00	94,82	95,81	93,85	220,92	220,41	220,23
2018-08-31 13:15:00.000	590,24	-14896,10	14907,79	CAP	0,04	79,67	82,54	76,94	221,09	220,47	220,55
2018-08-31 13:20:00.000	1020,18	-14867,62	14902,58	CAP	0,07	23,23	23,03	22,94	221,02	220,35	220,29
2018-08-31 13:25:00.000	1088,81	-12750,55	12796,95	CAP	0,09	23,15	22,94	22,79	220,29	219,39	219,43
2018-08-31 13:30:00.000	1073,90	-12787,34	12832,36	CAP	0,08	19,51	19,66	19,68	220,01	219,04	219,13
2018-08-31 13:35:00.000	1048,26	-12705,59	12748,76	CAP	0,08	19,55	19,70	19,71	219,93	219,09	219,20
2018-08-31 13:40:00.000	4797,26	-14100,42	14894,15	CAP	0,32	42,22	49,34	52,17	220,17	219,34	219,41

Fonte: Autor

O fator de potência médio registrado foi inferior a 0,92, o que pode resultar em multas aplicadas pela concessionária de energia devido ao consumo excessivo de potência reativa. Os valores médios medidos foram:

Potência ativa: 4.797,9 W

Potência reativa: 14.100,42 VAR

Potência aparente: 14.894,15 VA

A presença de harmônicas elevadas pode impactar diretamente o fator de potência, reduzindo sua eficiência e aumentando as perdas no sistema.

A IEEE Std 519-2022 estabelece limites para distorções harmônicas individuais e globais, sendo necessário avaliar tantos componentes específicos (CHb) quanto a distorção total (THD-I).

A análise dos níveis de CHb 5ª e 7ª ajuda a identificar a origem da poluição harmônica, enquanto o THD da corrente Ib mostra o impacto geral no sistema.

As medições permitem comparar os valores obtidos com os limites da IEEE 519-2022, possibilitando recomendar ações corretivas como instalação de filtros, ajuste de fator de potência ou reconfiguração de cargas não lineares.



Tabela 5: níveis de tensão e corrente durante período de ocorrência de harmônica na rede

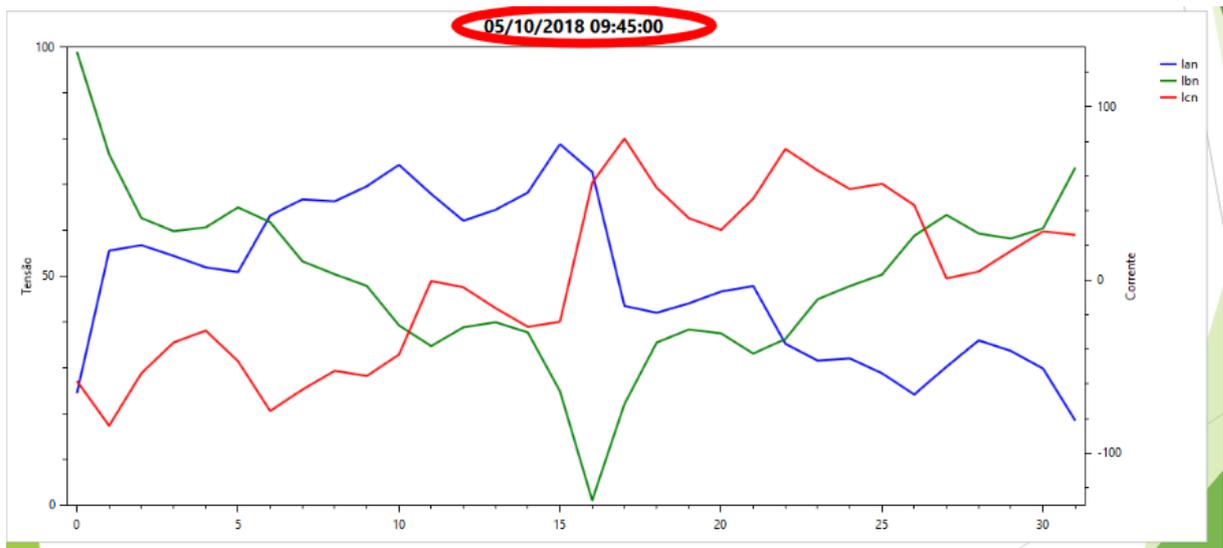
* Média de Harmônico de Corrente ChB 1ª Ordem [%]			* Média de Harmônico de Corrente ChB 5ª Ordem [%]			* Média de Harmônico de Corrente ChB 7ª Ordem [%]		
Mínimos	9,13	31/08/2018 07:15:00	Mínimos	0,59	31/08/2018 07:15:00	Mínimos	0,57	31/08/2018 07:15:00
	26,93	29/08/2018 06:50:00		2,48	29/08/2018 06:50:00		1,64	31/08/2018 11:40:00
	43,87	29/08/2018 06:30:00		2,72	29/08/2018 06:30:00		1,70	30/08/2018 16:15:00
Máximos	100,00	31/08/2018 13:40:00	Máximos	21,90	30/08/2018 17:00:00	Máximos	21,01	28/08/2018 17:00:00
	100,00	31/08/2018 13:35:00		21,34	28/08/2018 17:00:00		13,62	28/08/2018 16:50:00
	100,00	31/08/2018 13:30:00		17,87	30/08/2018 14:45:00		13,34	28/08/2018 17:05:00
Média	99,26		Média	10,56		Média	7,54	

* Média de Harmônico de Corrente ChB 11ª Ordem [%]			* Média de Harmônico de Corrente ChB 13ª Ordem [%]			* Média de Harmônico de Corrente ChB 17ª Ordem [%]		
Mínimos	0,18	31/08/2018 07:15:00	Mínimos	0,41	31/08/2018 07:15:00	Mínimos	0,71	31/08/2018 07:15:00
	1,12	29/08/2018 08:10:00		1,04	29/08/2018 06:50:00		1,66	31/08/2018 12:40:00
	1,22	30/08/2018 12:05:00		1,22	30/08/2018 16:40:00		1,69	29/08/2018 12:40:00
Máximos	10,79	28/08/2018 16:50:00	Máximos	12,88	28/08/2018 17:00:00	Máximos	15,12	28/08/2018 17:00:00
	9,65	30/08/2018 09:25:00		11,73	28/08/2018 16:50:00		13,51	28/08/2018 17:05:00
	8,68	30/08/2018 09:30:00		11,61	30/08/2018 09:25:00		12,06	28/08/2018 16:55:00
Média	4,12		Média	4,58		Média	5,59	

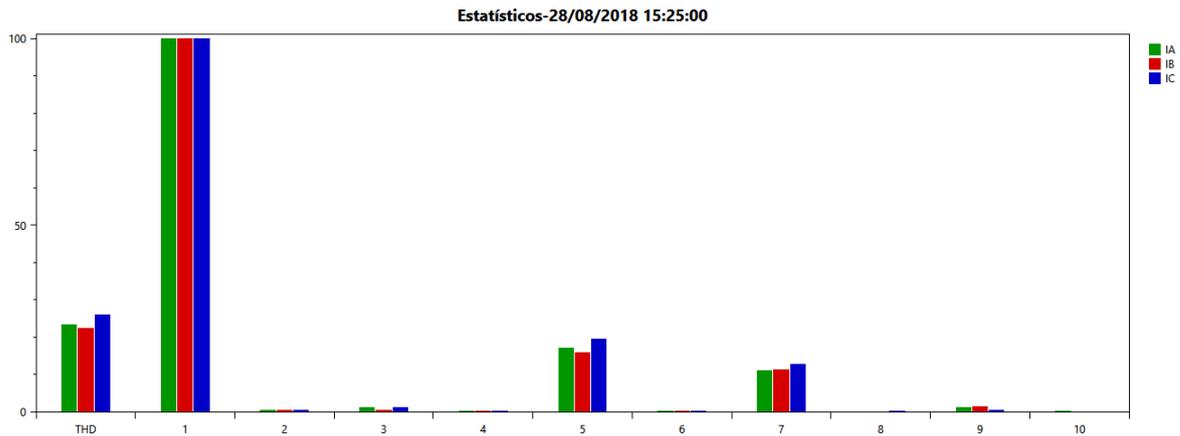
A análise da forma de onda revelou distorções significativas associadas às harmônicas de 5ª e 7ª ordem, que são comumente introduzidas por cargas não lineares, como inversores de frequência e fontes chaveadas. A Figura 2 ilustra a deformação da senoide durante a ocorrência das harmônicas.

Figura 2: senoide durante efeitos de harmônicas



Fonte: Autor

Figura 3: Gráfico com percentual de harmônica em cada fase



Fonte: Autor

O aumento do THD da corrente pode comprometer a integridade de equipamentos elétricos, reduzindo sua vida útil e aumentando os custos operacionais. Portanto, estratégias de mitigação, como filtros harmônicos ativos ou passivos, podem ser recomendadas para reduzir os impactos das distorções harmônicas no sistema.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após análise dos dados obtidos por meio do medidor de energia, concluiu-se que os níveis de corrente e tensão estão dentro dos intervalos aceitáveis. Entretanto, as harmônicas de 5ª e 7ª ordens apresentam níveis acima do normal, ocasionando um aumento no THD da corrente, com valores superiores a 50% e picos de 100%. Segundo a norma IEEE Std 519-2022, THD acima de 50% indica poluição harmônica significativa, podendo causar danos a equipamentos eletroeletrônicos, como inversores, conversores, fontes chaveadas e reatores.

Os elevados níveis de THD de corrente (atingindo picos superiores a 70%) identificados neste estudo evidenciam a necessidade urgente de medidas corretivas para garantir a qualidade da energia e a conformidade com a IEEE Std 519-2022. A análise demonstrou que as harmônicas são predominantemente geradas por cargas não lineares, exigindo intervenções como a instalação de filtros ativos para compensação dinâmica, a implementação de filtros passivos sintonizados em frequências críticas, o balanceamento adequado das cargas entre as fases e a otimização do sistema de aterramento. Adicionalmente, recomenda-se o monitoramento contínuo da distorção harmônica para validar a eficácia das soluções implementadas e assegurar a estabilidade do sistema a longo prazo. A aplicação dessas estratégias não apenas reduzirá o THD para níveis



aceitáveis (<8%), como também minimizará perdas energéticas, prolongará a vida útil dos equipamentos e aumentará a confiabilidade da rede, contribuindo para um sistema elétrico mais eficiente e resiliente.

## **6. REFERÊNCIAS**

### **Livro**

ARRILAGA, J.; BRADLEY, D. A.; BODGER, P. S. Power System Harmonics. Nova Jersey: John Wiley & Sons, 1989.

ANTUNES, F.; LEÃO, R.; SAMPAIO, R. Harmônicos em Sistemas Elétricos. Brasil: Elsevier, 2014.

### **Capítulo de Livro**

ABRAHAMSSON, P.; BOSCH, J.; BRINKKEMPER, S.; MÄDCHE, A. Software business, platforms, and ecosystems: Fundamentals of software research. 2018. DOI: 10.4230/DagRep.8.4.164.

### **Artigo**

PHIPPS, K. J.; NELSON, J. P.; SEM, P. K. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 30, p. 476, 1994.

POMILIO, L. A.; DECKMANN, S. M. Eletrônica de Potência, v. 11, p. 9, 2006.

ALAHYARI, H.; BERNTSSON SVENSSON, R.; GORSCHER, T. A study of value in agile software development organizations. Journal of Systems and Software, v. 125, p. 271-288, mar. 2017.

### **Norma Técnica**

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems. IEEE Std 519-2022. New York: IEEE, 2022.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems. IEEE Std 519-1992, p. 1-112, 1993. doi: 10.1109/IEEESTD.1993.114370.

### **Documento Eletrônico**

ON SEMICONDUCTOR. Power Factor Correction (PFC) Handbook - Choosing the



Right Power Factor Controller Solution. Reference Manuals, Doc. ID: HBD853/D, 2014. Disponível em: [www.onsemi.com](http://www.onsemi.com). Acesso em: [01-07-2025].

### **Internet**

AGILE ALLIANCE. Agile Manifesto Principles. 2020. Disponível em: <https://www.agilealliance.org/agile101/12-principles-behind-the-agile-manifesto/>. Acesso em: [01-07-2025].