



Avaliação do impacto que as estações de carregamento de veículos elétricos têm na qualidade da energia elétrica

Por

José Augusto Sampaio da Costa

Orientador: Professor Doutor José Manuel Ribeiro Baptista

Dissertação submetida à

UNIVERSIDADE DE TRÁS-OS-MONTES E ALTO DOURO

para obtenção do grau de

MESTRE

em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, de acordo com o disposto no

DR – I série–A, Decreto-Lei n.º 74/2006 de 24 de Março e no

Regulamento Geral dos Ciclos de Estudos Conducentes ao Grau de Mestre na UTAD

DR, 2.ª série - N.º133- Regulamento n.º 658/2016 de 13 de julho de 2016

**Avaliação do impacto que as estações de
carregamento de veículos elétricos têm na
qualidade da energia elétrica**

Por

José Augusto Sampaio da Costa

Orientador: Professor Doutor José Manuel Ribeiro Baptista

Dissertação submetida à
UNIVERSIDADE DE TRÁS-OS-MONTES E ALTO DOURO
para obtenção do grau de
MESTRE
em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, de acordo com o disposto no
DR – I série–A, Decreto-Lei n.º 74/2006 de 24 de Março e no
Regulamento de Estudos Pós-Graduados da UTAD
DR, 2.ª série – Deliberação n.º 2391/2007

Orientação Científica :

Professor Doutor José Manuel Ribeiro Baptista

Professor Associado com Agregação do
Departamento de Engenharias
Escola de Ciências e Tecnologia
da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

"The important thing is not to stop questioning." | "O importante é não parar de questionar."

Einstein (1879 – 1955)

"However bad life may seem, there is always something you can do and succeed at. Where there's life, there's hope." | "Não importa quanto a vida possa ser ruim, sempre existe algo que você pode fazer, e triunfar. Enquanto há vida, há esperança."

Stephen Hawking (1942 – 2018)

Avaliação do impacto que as estações de carregamento de veículos elétricos têm na qualidade da energia elétrica

José Costa

Submetido na Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro
para o preenchimento dos requisitos parciais para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Resumo — Os veículos elétricos (VE's) estão a crescer em popularidade como uma alternativa credível aos veículos a combustão, e para que tal crescimento continue é necessário que o investimento de recursos seja continuamente crescente também. Esta dissertação tem o intuito de estudar quais os impactos e posteriores alterações que as estações de carregamento de veículos elétricos (ECVE) geram numa rede elétrica, pois atualmente os veículos elétricos têm ganho um relevo fundamental no que diz respeito à circulação automóvel, e se tal continuar a suceder-se será necessária a construção de mais estações de carregamento nas redes elétricas, sendo preciso saber quais as alterações a serem esperadas para uma melhor compreensão e até mesmo para a resolução de problemas que poderão surgir. Com o intuito de contextualizar os objetos de estudo desta dissertação, começa-se por fazer uma introdução teórica onde primeiramente é feita uma análise à mobilidade elétrica, sendo na mesma referidas as vendas de veículos elétricos ultimamente, comparando a sua variação entre BEV com PHEV. A qualidade de energia é um parâmetro onde estão implícitas várias distorções como por exemplo a distorção harmónica que é influenciada pelas ECVE, sendo nesta dissertação estudado quais os seus indicadores e as suas consequências, na qualidade de energia estão inseridas também as medidas mitigadoras onde nesta dissertação são evidenciados os filtros, sendo estes ativos ou passivos. A parte prática da dissertação ou seja, os casos de estudo são baseados na implementação de conversores estáticos em redes elétricas. Será estudado os impactos destes conversores com a ajuda do MatLab, para uma melhor compreensão do impacto das estações de carregamento nas redes elétricas.

Palavras Chave: Veículos elétricos, distorção, harmónicos, filtros.

Avaliação do impacto que as estações de carregamento de veículos elétricos têm na qualidade da energia elétrica

José Costa

Submitted to the University of Trás-os-Montes and Alto Douro
in partial fulfillment of the requirements for the degree of
Master of Science-Philosophiae Doctor in Electrical Engineering and Computers

Abstract — Electric vehicles (EV's) are growing in popularity as a credible alternative to combustion vehicles, and for such growth to continue, resource investment needs to be continuously increasing as well. This dissertation aims to study the impacts and changes that electric vehicle chargers generate in an electric grid, because in recent years there has been a very large increase in electric vehicles circulating and if this continues to happen, it will be necessary to build more charging stations on the grids, and it is necessary to know what changes to expect for a better understanding and even for solving problems that may arise. In order to contextualize the objects of study of this dissertation, beginning by making a theoretical introduction where firstly an analysis is made of electric mobility, in which the sales of electric vehicles are referred to lately, comparing its variation between BEV and PHEV. The power quality is an essential parameter because it includes the harmonic distortion that is what makes charging stations viable or not, in this dissertation mitigating measures and the filters are evidenced, being these active or passive, the filters used in the case studies were the passive filters. The practical part of the dissertation, that is, the case studies are based on the implementation of static converters in electrical grids, the impacts of these converters will be studied with the help of MatLab, for a better understanding of the impact of charging stations on electrical grids.

Key Words: Electric Vehicles, distortion, harmonics, filters

Agradecimentos

Desejo exprimir os meus agradecimentos a todos aqueles que, de alguma forma, permitiram que esta tese se concretizasse.

Em primeiro lugar quero agradecer ao Professor Doutor José Manuel Ribeiro Baptista, do Departamento de Engenharias Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, o ter-me permitido a sua orientação, ter acreditado em mim e nas minhas capacidades. Agradeço ainda o trato simples, correto e científico, com que sempre abordou as nossas reuniões de trabalho, sem nunca ter permitido que o desalento se instalasse, mesmo quando as coisas não corriam bem. Agradeço-lhe ainda o tema do trabalho, que sempre me aliciou, o que fez, a maioria das vezes, conseguir ultrapassar dificuldades surgidas, ainda por cima por estarmos a passar por uma fase diferente das nossas vidas devido à pandemia. Aos meus colegas de turma e curso, quero agradecer-lhes os momentos magníficos que passámos. Agradeço o bom convívio, as boas discussões e, a alegria que por vezes se instalava, agradeço-lhes a irreverência e a amizade pois sem vocês esta jornada não teria sido a mesma: Carlos Teixeira, Filipe Lima, Diogo Mota, Guilherme Sequeira.

Os meus amigos Carlos Barbosa e Carlos Sampaio, agradeço a paciência e a ajuda nos momentos mais delicados, as alegrias e incentivo nos meus objetivos, pois nem sempre a vida é um mar de rosas.

E, finalmente agradeço, à minha família:

Aos meus pais, que decerto teriam ficado felizes por este momento, visto o “interminável” tempo de execução da dissertação. Aos meus avós, que foram sempre um pilar na minha vida. Às minhas irmãs, Tânia Costa e Tatiana Costa, por simplesmente serem minhas irmãs para mim é mais que o suficiente.

A todos o meu muito obrigado por acreditarem em mim!

UTAD,

José Costa

Vila Real, 02 de Fevereiro de 2022

Índice geral

Resumo	ix
<i>Abstract</i>	xi
Agradecimentos	xiii
Índice de tabelas	xix
Índice de figuras	xix
Acrónimos e abreviaturas	xxiii
1 Introdução	3
1.1 Enquadramento	3
1.2 Motivação	4
1.3 Objetivos	5
1.4 Estrutura da dissertação	5
2 Fundamentos sobre mobilidade elétrica	7
2.1 Impacto das estações de carregamento nas redes elétricas	10
2.1.1 Impacto na produção	11
2.1.2 Impacto na transmissão	11
2.1.3 Impacto na distribuição	11
2.2 Gestão do carregamento de VE's	12
2.3 Modos de carregamento de VE's	16

2.4	Normas e requisitos para os carregadores de VE's	19
3	Qualidade de energia	23
3.1	Distorção harmónica	24
3.2	Indicadores de distorção harmónica	27
3.3	Consequências da distorção harmónica	29
3.4	Valor eficaz da corrente e conceito de valor RMS	30
3.5	Espectro harmónico	32
3.6	Taxa de distorção harmónica (THD)	33
3.7	Fator de potência	34
3.8	Relação entre fator de potência e THD	35
3.9	Medidas mitigadoras	36
3.9.1	Filtros Ativos	37
3.9.2	Filtros Passivos	39
4	Conversores Estáticos	43
4.1	Tipos de conversores	44
4.1.1	Conversores CC/CA	44
4.1.2	Conversores CC/CC	45
4.1.3	Conversores CA/CA	45
4.1.4	Conversores CA/CC	45
4.2	Retificadores não controlados	46
4.2.1	Com entrada monofásica	46
4.2.2	Com entrada trifásica	48
4.3	Retificadores controlados	50
4.3.1	Com entrada monofásica	50
4.3.2	Com entrada trifásica	51
5	Casos de Estudo	53
5.1	Redes elétricas	53
5.2	Retificadores	55
5.3	Rede de 13 Barramentos	64
5.3.1	Melhor Opção - 1º Caso de estudo	66
5.3.2	Pior Opção - 2º Caso de estudo	68
5.4	Rede de 33 Barramentos	70
5.4.1	Melhor opção - 3º Caso de estudo	72
5.4.2	Pior opção - 4º Caso de estudo	76
5.5	Medidas mitigadoras de distorção harmónica	79
5.5.1	Dimensionamento dos Filtros	80
5.5.2	2º Caso de Estudo	85
5.5.3	4º Caso de Estudo	88

6	Conclusão	95
7	Referências bibliográficas	97

Índice de figuras

2.1	Comparação de vendas BEV e PHEV entre 2019-2020-2021 [11]	8
2.2	Variação das vendas de veículos em Portugal 2020/2021 Elétricos vs Combustão [11]	10
2.3	Carregamento de um VE	13
2.4	Gestão de carregamento de um VE	14
2.5	Funcionamento do V2G	15
3.1	Relação entre tensão e corrente num circuito formado por elementos lineares	25
3.2	Forma de onda da corrente distorcida num circuito formado por ele- mentos não lineares	26
3.3	Circuito equivalente de uma carga não linear	26
3.4	Decomposição em Série de Fourier de um sinal distorcido	28
3.5	Exemplo do espectro harmónico de um sinal	32
3.6	Variação da taxa de distorção da corrente (THDi) em função do fator de potência, considerando $THD_v = 0$	36
3.7	Conversores (inversores)	38
4.1	Ligação do Conversor	44

4.2	Retificador em ponte monofásico	47
4.3	Formas de onda do retificador em ponte monofásico com corrente de carga perfeitamente filtrada	47
4.4	Harmónicos injetados pelo retificador em ponte monofásico	48
4.5	Retificador Não Controlado Trifásico	48
4.6	Formas de onda no lado CA para retificador trifásico ao alimentar diferentes tipos de carga	49
4.7	a) Semicontrolada assimétrica; b) Semicontrolada simétrica; c) To- talmente controlada	50
4.8	Retificador em ponte trifásico	51
4.9	Formas de onda da corrente de entrada	52
5.1	Rede de destruição radial de barramentos IEEE 13	54
5.2	Rede de destruição radial IEEE de 33 barramentos	55
5.3	Comportamento da corrente durante um carregamento de um VE	56
5.4	Modelo do Retificador monofásico em Simulink	56
5.5	Forma de onda com $I_{RMS}=46,28\text{ A}$	57
5.6	Espectro harmónico com THD=38,82%	57
5.7	Forma de onda com $I_{RMS}=37,7\text{ A}$	57
5.8	Espectro harmónico com THD=50,38%	57
5.9	Forma de onda com $I_{RMS}=29,3\text{ A}$	58
5.10	Espectro harmónico com THD=65,87%	58
5.11	Forma de onda com $I_{RMS}=22\text{ A}$	58
5.12	Espectro harmónico com THD=81,26%	58
5.13	Forma de onda com $I_{RMS}=14,7\text{ A}$	59
5.14	Espectro harmónico com THD=96,38%	59
5.15	Modelo do Retificador Trifásico em Simulink	60
5.16	Forma de onda com $I_{RMS}=104,9\text{ A}$	60
5.17	Espectro harmónico com THD=34,72%	61
5.18	Forma de onda com $I_{RMS}=91,23\text{ A}$	61
5.19	Espectro harmónico com THD=47,17%	61
5.20	Forma de onda com $I_{RMS}=71,6\text{ A}$	62

5.21	Espectro harmónico com THD=65,91%	62
5.22	Forma de onda com $I_{RMS}=65,25$ A	62
5.23	Espectro harmónico com THD=79,01%	63
5.24	Forma de onda com $I_{RMS}=56$ A	63
5.25	Espectro harmónico com THD=97,93%	63
5.26	Modelo IEEE 13 em Simulink	64
5.27	Bloco medidor projetado em Simulink	65
5.28	I_{RMS} com ECVE no nó 634	67
5.29	THD da Corrente com ECVE no nó 634	67
5.30	V_{RMS} com ECVE no nó 634	67
5.31	THD da Tensão com ECVE no nó 634	68
5.32	I_{RMS} com ECVE no nó 671	69
5.33	THD da Corrente com ECVE no nó 671	69
5.34	V_{RMS} com ECVE no nó 671	69
5.35	THD da Tensão com ECVE no nó 671	70
5.36	Modelo da Rede IEEE 33 em Simulink	71
5.37	Bloco Medidor projetado em Simulink	71
5.38	I_{RMS} com ECVE no nó 1 e 16	73
5.39	THD da Corrente com ECVE no nó 1 e 16	73
5.40	V_{RMS} com ECVE no nó 1 e 16	73
5.41	THD da Tensão com ECVE no nó 1 e 16	74
5.42	I_{RMS} com ECVE no nó 1 e 16 em simultâneo	74
5.43	THD da Corrente com ECVE no nó 1 e 16 em simultâneo	75
5.44	V_{RMS} com ECVE no nó 1 e 16 em simultâneo	75
5.45	THD da Tensão com ECVE no nó 1 e 16 em simultâneo	75
5.46	I_{RMS} com ECVE no nó 22 e 25	76
5.47	THD da Corrente com ECVE no nó 22 e 25	76
5.48	V_{RMS} com ECVE no nó 22 e 25	77
5.49	THD da Tensão com ECVE no nó 22 e 25	77
5.50	I_{RMS} com ECVE no nó 22 e 25 em simultâneo	78
5.51	THD da Corrente com ECVE no nó 22 e 25 em simultâneo	78

5.52	V_{RMS} com ECVE no nó 22 e 25 em simultâneo	78
5.53	THD da Tensão com ECVE no nó 22 e 25 em simultâneo	79
5.54	ECVE (Retificador Trifásico) com filtro	83
5.55	I_{RMS} da ECVE sem filtro=104,9A	83
5.56	I_{RMS} da ECVE com filtro=60,3A	84
5.57	ECVE sem filtro de THD=36,55%	84
5.58	ECVE com filtro de THD=22,81%	84
5.59	I_{RMS} com ECVE no nó 671	85
5.60	THD do I_{RMS} com ECVE no nó 671	86
5.61	V_{RMS} com ECVE no nó 671	86
5.62	THD do V_{RMS} no nó 671	87
5.63	I_{RMS} com ECVE no nó 22 e 25	88
5.64	THD do I_{RMS} com ECVE no nó 22 e 25	89
5.65	V_{RMS} com ECVE no nó 22 e 25	90
5.66	THD% do V_{RMS} com ECVE no nó 22 e 25	91
5.67	I_{RMS} com ECVE no nó 22 e 25 em simultâneo	92
5.68	THD% do I_{RMS} com ECVE no nó 22 e 25 em simultâneo	92

Acrónimos e abreviaturas

Lista de acrónimos

Sigla	Expansão
ECVE	<i>Estações de Carregamento de Veículos elétricos</i>
VE	<i>Veículo Elétrico</i>
VCI	<i>Veículos de Combustão Interna</i>
BEV	<i>Battery Electric Vehicles</i>
PHEV	<i>Plug-in Hybrid Electric Vehicles</i>
CA	<i>Corrente Alternada</i>
CC	<i>Corrente Contínua</i>
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>



Introdução

1.1 Enquadramento

A crescente procura por eletricidade e a dependência de um combustível fóssil finito não renovável, acompanhado pelo impacto da poluição no aquecimento global e mudanças climáticas drásticas, são as principais preocupações dos investigadores ambientais desta era. No setor dos transportes, hoje, grande parte dos veículos emitem CO_2 , que é considerado a principal causa de aquecimento global e das mudanças climáticas [1], [2]. Muitos investigadores estão empenhados na pesquisa dos impactos positivos de evitar os veículos movidos a motor de combustão interna (VCI) e substituí-los por veículos elétricos (VEs) para minimizar a emissão de carbono e proteger as mudanças climáticas e o aquecimento global. Na verdade, é uma boa ideia mudar de veículos convencionais para VEs, pois tem muitos aspetos ambientais e vantagens económicas [3]. Por este motivo, os VEs estão se a tornar mais popular no mercado. No entanto, o número crescente de VEs está a criar um aumento na demanda de carregamento. Por exemplo, nos EUA, o *National Program Charging Point América* construiu cerca de 5000 estações de carregamento de VEs em nove regiões do país [4]. De acordo com as vendas de veículos híbridos de plug-in (PHEVs) em 2020 na Europa, foi notado um aumento de 210% em comparação

com 2019. Não houve efeito negativo potencial no aumento de implantação de VEs devido ao COVID-19 [5]. Pode ser facilmente perceptível que o mundo está mais ciente do aquecimento global e das mudanças climáticas, mas não sobre o impacto do carregamento de VEs nas estações já construídas. A instalação de estações de carregamento de VEs torna-se uma carga adicional nas redes elétricas. O carregamento de VEs com potências altas, especialmente por estações de carregamento rápido, irão diminuir a qualidade dos parâmetros operacionais do sistema de energia nas redes de distribuição de energia. A qualidade do perfil de tensão diminuirá com um aumento na carga de pico, equipamentos de potência do sistema, como transformadores, podem ser sobrecarregados durante os horários de pico, o que levará ao seu desgaste, e a distorção harmônica é uma consequência do carregamento descoordenado de VEs. Alguns investigadores lidaram com o impacto das cargas de carregamento de EV em diferentes parâmetros das redes do sistema de energia como perfil de tensão [6], harmônicos [7] e carga de pico [8].

1.2 Motivação

Perante um panorama internacional marcado por uma grave crise financeira e crescentes preocupações ambientais, particularmente com o setor dos transportes, as atenções viram-se para alternativas aos ineficientes e poluentes veículos de combustão interna (VCI). Neste âmbito, os VE's, ao permitirem uma circulação limpa e económica, afiguram-se como uma solução interessante a ter em conta. A ideia centra-se em transferir parte do consumo de energia dos veículos em circulação para a rede elétrica, de tal modo que a energia fornecida a estes, pela rede, tenha origem em fontes de energia renovável e nuclear e seja fornecida durante as horas de vazio de forma a minimizar investimentos em transmissão, distribuição e geração adicional. Visando então com este projeto facilitar a compreensão e ajudar a entender como será possível a carga dos VE's sem a sobrecarga da rede, bem como diminuindo os seus harmónicos.

1.3 Objetivos

O principal objetivo desta dissertação visa o estudo do impacto das estações de carregamento de veículos elétricos nas redes elétricas, bem como os seus tipos de carregamento sendo então essencial o conhecimento dos conversores elétricos, que também irão ser tratados nesta dissertação, pois estes fazem parte do carregador de VE's.

Um outro objetivo para este projeto, é a análise de vários casos de estudo para que assim se possa estudar devidamente o que acontece nas redes elétricas quando são adicionadas uma ou mais estações de carregamento, onde a rede tem parte monofásica e trifásica ou apenas trifásica.

1.4 Estrutura da dissertação

O primeiro capítulo, Capítulo 1, é a introdução, que como o nome indica tem objetivo introdutório, onde é feito o enquadramento do tema e explicada a motivação bem como os objetivos da presente dissertação.

No Capítulo 2 é feita uma observação das vendas tanto de veículos elétricos como híbridos e a combustão, contando também com a abordagem da gestão de carregamento de VEs e o modo de carregamento dos mesmos, terminando esse capítulo com normas e requisitos para os carregadores de VEs.

O Capítulo 3 aborda a qualidade de energia, passando pela distorção harmónica e os seus indicadores, bem como as suas consequências, ainda o mesmo capítulo aborda o valor eficaz da corrente e conceito de valor RMS, passando para o espectro harmónico e a taxa de distorção harmónica (THD), terminando assim com o fator de potência e a sua comparação à distorção total.

De seguida, o Capítulo 4, Conversores Estáticos, trata de quais são os seus tipos, abordados os retificadores, sendo estes os que foram utilizados nos casos de estudo,

dividindo-se em não controlados e controlados.

No Capítulo 5 são abordados os Casos de Estudo, em que objetivo do mesmo é o estudo do comportamento das redes elétricas (sendo estas a IEEE 13 e a IEEE 33), quando lhes são colocadas as ECVE. Utilizando para tal o MatLab, onde foram obtidos todos os valores e gráficos contidos neste capítulo.

Esta dissertação será finalizada com o Capítulo 6, Conclusão e trabalho futuro, onde serão referenciados os resultados e tiradas as conclusões finais de todos os casos de estudo apresentados.



Fundamentos sobre mobilidade elétrica

A mobilidade elétrica tem vindo a ser fortemente impulsionada pelos governos de vários países, beneficiando do desenvolvimento económico, tecnológico e industrial, resultando numa dinâmica bastante positiva no mercado de veículos elétricos dos últimos anos, com grandes expectativas de expansão futura[9]. Com o crescimento do mercado de veículos elétricos, cresce também a necessidade da instalação de infraestruturas de carregamento, dada a relação de interdependência existente entre ambos. Em Portugal, o mercado apresentou uma evolução significativa nos últimos 3 anos, estimando-se um crescimento de até 34 mil veículos elétricos em 2020 e de até 179 mil veículos até 2030. Lisboa é o território nacional mais interessante para análise deste tema, pois concentra 23% dos registos de veículos elétricos ligeiros até junho de 2018 e 33% dos postos de carregamento instalados do país. Mês após mês, a mobilidade elétrica continua a ser uma opção para milhares de pessoas[10]. Em outubro de 2021, a quantia mensal continuou a aumentar e já se aproxima dos 30%, tendo sido registado o valor de 27,6%. Foi o melhor mês de sempre para as vendas de veículos 100% elétricos com 1715 unidades vendidas. O total de veículos elétricos vendidos desde janeiro de 2021 – 22722 – já ultrapassou o valor total do ano 2020, que ficou em 20004. Ou seja, dois meses antes do ano 2021 terminar estabeleceu-se um novo record!

Tabela 2.1-Vendas de Veículos Elétricos em 2021

Mês	2021 Vendas BEV	2021 Vendas PHEV	2021 Vendas BEV+PHEV
Janeiro	424	1000	1424
Fevereiro	490	991	1481
Março	713	1415	2128
Abril	941	1410	2351
Maiο	890	1471	2361
Junho	1360	1580	2940
Julho	889	1295	2284
Agosto	834	1122	1956
Setembro	1551	1197	2748
Outubro	1715	1334	3049
TOTAL	9807	12915	22722

Na tabela 2.1 estão representadas as vendas de veículos elétricos efetuadas em 2021 sendo nela demonstrados os BEV -Battery Electric Vehicles e os PHEV- plug-in hybrid electric vehicles (veículos elétricos híbridos de plug-in).

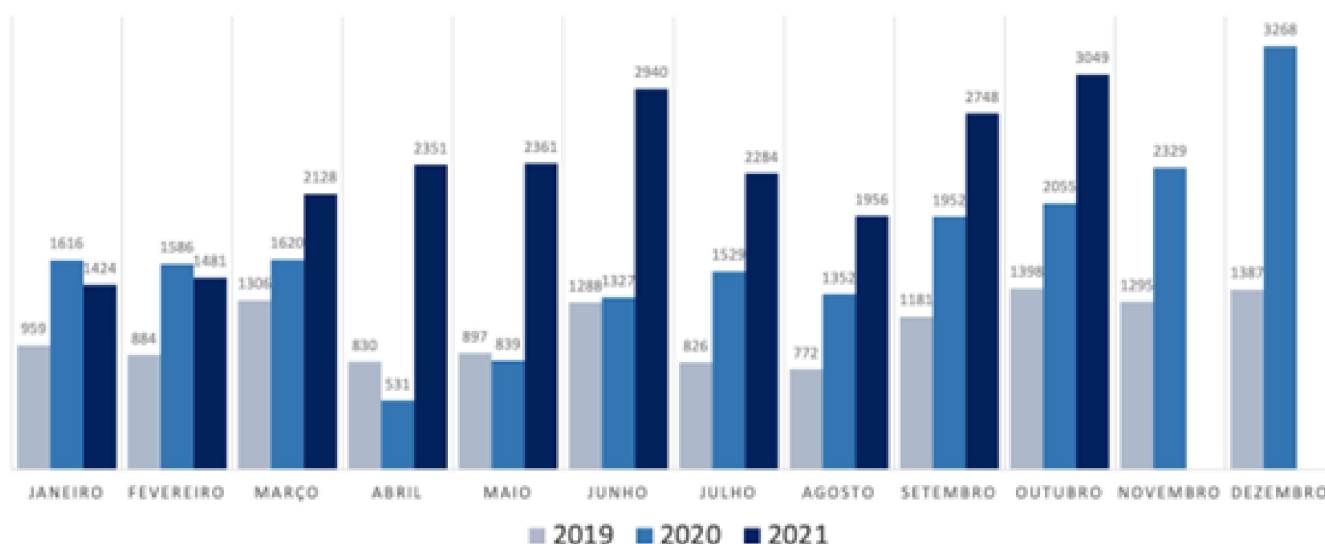


Figura 2.1 – Comparação de vendas BEV e PHEV entre 2019-2020-2021 [11]

Comparativamente com o mês homólogo de 2020, em outubro de 2021 como se pode observar pela figura 2.1, venderam-se aproximadamente três vezes mais que em outubro do ano passado e é importante notar que os incentivos do Fundo Ambiental já foram todos atribuídos nesta altura do ano, o que leva a crer que mesmo sem os 3000€ do incentivo (para veículos ligeiros de passageiros) a opção pela aquisição é tomada e as famílias avançam, realmente, para a compra de veículos 100% elétricos [11]. Nesta altura do ano, vão já seis meses de variação negativa nas vendas de veículos movidos por motores a combustão interna, contra quatro meses de variação positiva. No momento, a diminuição global das vendas de veículos a combustão interna encontra-se próxima dos 4% comparativamente a 2020. Em outubro de 2021 venderam-se menos 3970 veículos a combustível fóssil que em outubro de 2020 (considerando apenas veículos ligeiros de passageiros).

Tabela 2.2-Comparação de vendas de VCI entre 2020/21

Mês	2020	2021	Variação
Janeiro	12805	8593	-32,9%
Fevereiro	18670	6821	-63,5%
Março	8962	10573	18%
Abril	2219	12447	460,9%
Mai	4898	14301	192%
Junho	9737	16011	64,4%
Julho	13684	10060	-26,5%
Agosto	11089	6048	-45,5%
Setembro	11249	8091	-28,1%
Outubro	11613	7643	-34,2%
TOTAL	104926	100588	-4,1%

A análise das vendas de 2021 continua a confirmar uma tendência negativa de quatro meses consecutivos a venderem-se menos veículos ligeiros a combustível fóssil que nos meses homólogos de 2020. Por seu turno, a variação das vendas de veículos

elétricos mantém-se estável comparativamente com o ano anterior. Tudo bons sinais para a eletrificação da sociedade. A figura 2.2 faz a comparação das vendas de veículos em Portugal entre 2020 e 2021 comparando veículos elétricos com veículos a combustão para uma melhor compreensão.

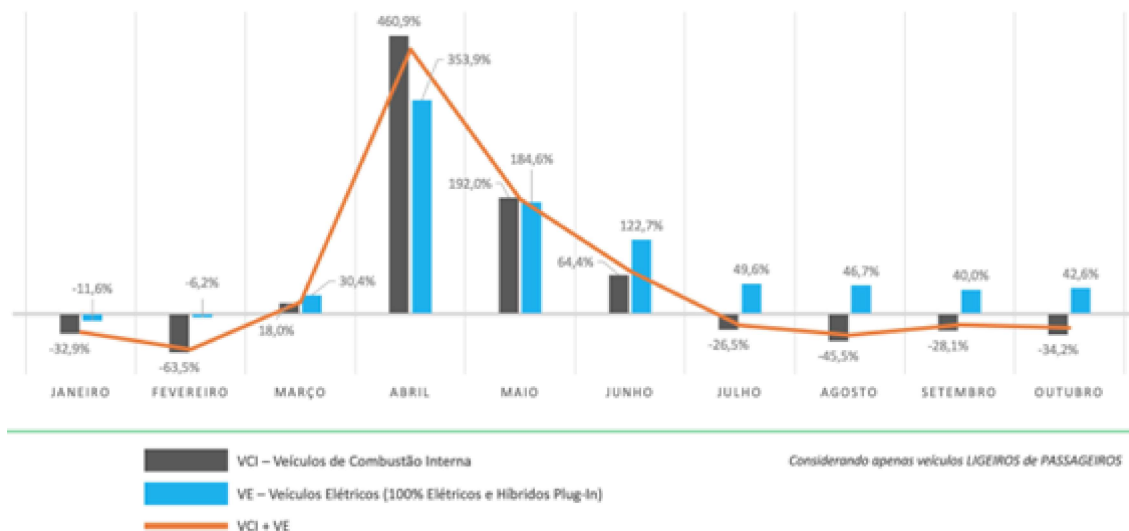


Figura 2.2 – Variação das vendas de veículos em Portugal 2020/2021 Elétricos vs Combustão [11]

2.1 Impacto das estações de carregamento nas redes elétricas

Uma rede elétrica consiste em sistemas de produção, transmissão e distribuição. O sistema de produção composto por estações que produzem eletricidade a partir de uma variedade de fontes como carvão, gás, energia solar, eólica, etc. O sistema de transmissão consiste em linhas de transmissão que transfere eletricidade entre os sistemas de geração e distribuição, e também inclui transformadores para aumentar a tensão. O sistema de distribuição principalmente consiste em subestações e transformadores para reduzir a eletricidade a um nível usado pelos clientes, geralmente

230/400 V para clientes residenciais e níveis de tensão maiores para alguns clientes comerciais e industriais. O impacto do carregamento de VEs na rede elétrica como um todo é principalmente influenciado por dois aspetos; quantidade de VEs e a duração do carregamento de VEs [12].

2.1.1 Impacto na produção

Um aumento significativo no que diz respeito aos VEs resultaria imediatamente na necessidade de energia a ser produzida. Dada a pouca disponibilidade de armazenamento numa rede elétrica, isso resultaria num desafio tanto imediato como contínuo que iria oscilar entre necessidade e produção. Além disso, o carregamento de VEs não coordenado em termos de tempo e duração pode introduzir novos picos para o sistema, o que por sua vez pode resultar no aumento do tempo durante o qual as estações podem ter que trabalhar em máxima potência e, portanto, aumenta os custos e reduz a confiabilidade do sistema.

2.1.2 Impacto na transmissão

Com o aumento de VEs, haverá uma maior necessidade de aumentar a capacidade de transmissão sendo esta necessária para atender ao quesito de energia adicional para o carregamento dos VEs. Portanto, sem carregamento coordenado, os transformadores podem ser sobrecarregados por longos períodos o que resultaria na redução da vida útil dos transformadores, bem como restrições de confiabilidade.

2.1.3 Impacto na distribuição

É provável que os VEs tenham mais impacto no sistema de distribuição do que no de produção e nos sistemas de transmissão. Um sistema de distribuição pode ser afetado pelo carregamento de VEs pelos mesmos dois elementos explicados acima. É importante saber a relação entre a quantidade de VEs e os componentes de um

sistema de distribuição, como alimentadores, subestações e transformadores. A sobrecarga do transformador não resulta imediatamente em falha do dispositivo, mas reduz a sua vida útil. Uma rede de baixa tensão não é capaz de lidar com situações em que todos estão a carregar simultaneamente. Perfis de procura local mudarão significativamente por causa de tais carregamentos simultâneos ou não coordenados. Se muitos proprietários de VEs carregarem os seus veículos simultaneamente num distrito, terá um grande impacto na infraestrutura local e no pico de procura local. Vários estudos concluíram que os VEs influenciarão a rede de distribuição com certeza. A extensão do impacto depende da quantidade de VEs e o seu comportamento de carregamento.

2.2 Gestão do carregamento de VE's

O carregamento de um VE evidenciado na figura 2.3, consiste no processo de reposição de energia química na(s) bateria(s) do próprio veículo para um nível máximo, ou pelo menos, superior. Os VE's estão dotados de um carregador interno que transforma a energia recebida (através de um cabo) em corrente alternada (CA) para corrente contínua (CC), sendo dessa forma absorvida pela bateria. Para tal, o VE deve ser conectado à Rede Elétrica de Energia através de um posto de carregamento próprio ou simplesmente através de uma tomada doméstica normal[13].

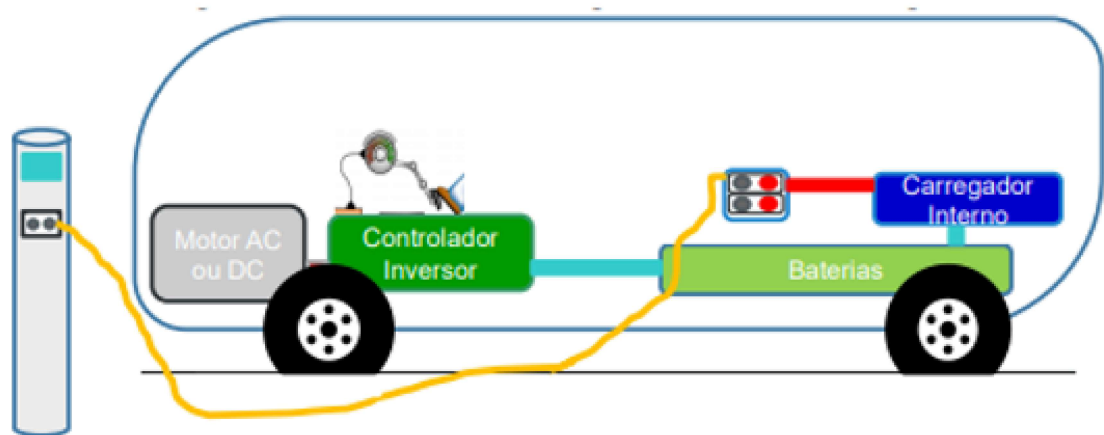


Figura 2.3 – Carregamento de um VE

No entanto, o carregamento de um VE, distingue-se das demais aplicações elétricas que podem ser ligadas a uma vulgar tomada doméstica (uma torradeira, por exemplo) pelas suas características. Por um lado, um VE pode solicitar uma corrente elevada (equivalente a uma pequena habitação) durante um período prolongado, o que representa um desafio à tomada e à instalação elétrica em si. Por outro lado, devido à sua maior dimensão, em caso de falha na instalação elétrica do VE, é também maior o risco de eletrocussão por contatos indireto, fator que aumenta a responsabilidade e a preocupação com a segurança da instalação elétrica.

Tal como existem métodos de carregamento de Veículos Elétrico, existem também quatro tipos de gestão do carregamento de VE's como mostra a figura 2.4. Essas estratégias podem ser coordenadas (ou não), conforme seja permitido (ou não) o controlo de uma entidade externa ao utilizador, sobre o carregamento da bateria.

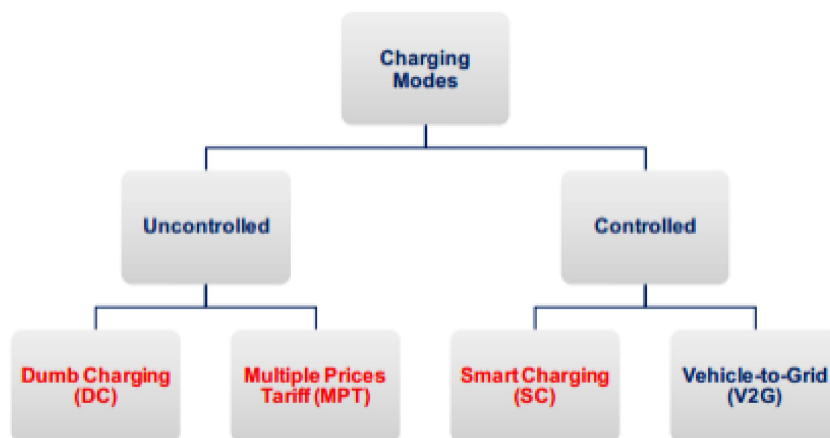


Figura 2.4 – Gestão de carregamento de um VE

Dumb Charging: *Dumb Charging* (ou carregamento não inteligente) é equivalente ao carregamento da bateria de VE's como uma qualquer carga convencional, o carregamento da bateria começa no momento em que os VE's são ligados à rede, e continua a uma taxa constante de carga até que ela atinja o seu estado final de carga ou que o utilizador decida interromper o processo [14].

Multitask: Esta estratégia procura fazer com que os utilizadores se sintam motivados a carregar os seus VE's em horas de vazio, através da aplicação de tarifas mais baixas para essas horas. A ideia é mover a carga adicional associada ao carregamento dos VE's para as horas de vazio onde obviamente, há menor consumo, sendo assim mais propícias ao sistema. O sucesso desta estratégia está dependente da atitude dos utilizadores de VE's, pelo que a melhoria para o sistema não pode ser garantida [15].

Smart Charging: “*Smart Charging*” (ou carregamento inteligente) consiste na possibilidade de controlo por parte de uma entidade externa do carregamento das taxas de carregamento das baterias. Para que isso seja possível, os utilizadores devem-se manter ligados pelo tempo que comunicam no início do carregamento. Esta comunicação bidirecional está dependente da aplicação dos conceitos de *Smart Grid* às redes onde se proceda ao carregamento de VE's. A aplicação destas estratégias a um conjunto de VE's pode permitir à entidade que as gere, alcançar os

seus objetivos, sejam eles a minimização do impacto negativos na rede ou então, a minimização dos custos no carregamento desse conjunto, tanto para a entidade, como para os próprios utilizadores [14].

Smart Charging com V2G: *V2G* é a possibilidade do VE fornecer a energia armazenada nas suas baterias para a rede de distribuição. O modelo *Smart Charging com V2G* junta os conceitos de *Smart Charging* com *V2G*, para além da gestão das taxas de carregamento das baterias, acrescenta-se também a oportunidade do VE injetar potência na rede para benefício da mesma [16].

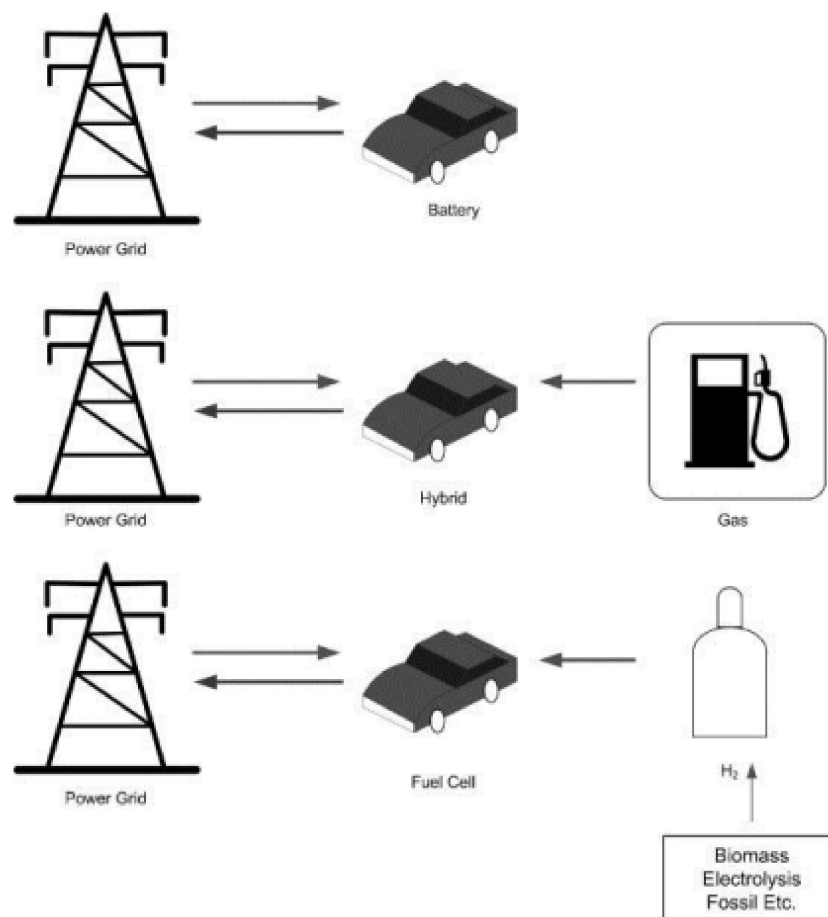


Figura 2.5 – Funcionamento do V2G

O funcionamento do V2G é mostrado pela figura 2.5 e por um lado, esta abordagem pode permitir uma melhor gestão por parte da entidade, quer ao disponibilizar energia com origem barata (horas de vazio) nas horas onde ela é mais cara, quer ao oferecer mais uma fonte de reserva, seja a subir ou a descer. Por outro, tal uso da bateria provoca-lhe maior desgaste, pelo que o utilizador deve ser ressarcido de forma adequada. Dessa forma, dependendo da evolução das baterias, a implementação desta abordagem estará para um futuro menos próximo que as anteriores.

2.3 Modos de carregamento de VE's

Muitos carregamentos de VE's têm lugar em casa, durante a noite, na garagem, é um exemplo, onde o veículo é ligado a uma tomada convencional para o Modo 1 de carregamento, o modo lento. O Modo 2 é, tipicamente, descrito como método primário que pode ser utilizado tanto em estruturas públicas ou privadas. Este modo de carregamento tem sido o mais focado em termos de desenvolvimento, por não ser tão lento e ser implementável em quase todos os ambientes. Na generalidade, são utilizadas soluções de uma fase para os referidos modos de carregamento, no entanto, também podem ser utilizadas soluções a regime trifásico. No terceiro modo, o Modo 3, este difere dos anteriores porque requer valores de corrente muito altos. Isto permite um carregamento mais rápido que os anteriores e está a ser desenvolvido para que possa ser utilizado para aplicações tanto comerciais como também públicas, operando como uma estação de abastecimento. Neste modo, são aplicadas soluções apenas trifásicas. Estações para uso público são construídas para fazer uso dos modos de carregamento 2 e 3 e podem ser instalados em parques de estacionamento, centros comerciais, hotéis, estações de serviço, teatros, restaurantes, entre outros estabelecimentos públicos. Existe ainda um quarto modo, o Modo 4, que implica a utilização de CC para o carregamento dos veículos. Este modo, apenas poderá ser implementado em estações de carregamento dedicadas[17].

A IEC (Comissão Eletrotécnica Internacional) é a entidade responsável pela normalização do conjunto de conectores eléctricos necessários aos VE's, cuja norma principal é IEC 62196[45], e dos sistemas de carregamento, os quais se regem pela norma IEC 61851[46]. A segunda contempla as definições para os sinais de pino e os respectivos modos de carregamento. Os modos que esta norma define incluem:

MODO 1

Ligação do VE à rede de alimentação utilizando tomadas normalizadas de corrente atribuída até 16A, no lado da rede de alimentação, monofásica ou trifásica, com condutores de fase(s), de neutro e de terra de protecção, (ou seja tomadas domésticas do tipo shüco ou industriais da norma EN60309[47]). A utilização do modo 1 de carga depende da presença de um dispositivo de corrente residual (RCD), também chamado disjuntor diferencial, no lado da rede de alimentação. Onde a presença de um RCD no lado da rede não for exigida pelas normas nacionais, o modo 1 de carga não é permitido. (disjuntor diferencial: Um disjuntor diferencial, ou disjuntor diferencial residual (DR), é um dispositivo de protecção utilizado em instalações eléctricas, permitindo desligar um circuito sempre que seja detectada uma corrente de fuga superior ao valor nominal. A corrente de fuga é avaliada pela soma algébrica dos valores instantâneos das correntes nos condutores monitorados (corrente diferencial).

MODO 3 (o modo 3 será apresentado primeiro pois contém informação para o modo 2)

Segundo a norma EN/NP61851 [48], é um sistema que fornece energia em corrente alternada, desenvolvido especificamente para veículos eléctricos. Este sistema visa aumentar a segurança do processo de carga de um VE e reduzir o risco decorrente de eventuais erros de manipulação por seres humanos e de defeito de isolamento eléctrico do VE, cabo de ligação ou tomada de alimentação. O sistema Modo 3 é

constituído por três componentes fundamentais: (i) Tomadas de alimentação dedicadas para VEs que incluem: condutores de energia, fases e neutro, terra de proteção, condutor do sinal de “piloto de controlo” e sensor de inserção de ficha na tomada. As tomadas têm ainda incluído no seu desenho um mecanismo que segura a ficha na tomada, após lá ser colocada. Numa ligação Modo 3, todos os condutores são passados da tomada de alimentação, à ficha de alimentação do cabo de ligação e, pelo cabo, à ficha de ligação ao veículo, até à tomada de carregamento do veículo; (ii) Interruptor magnético de corte de alimentação controlado pelo sistema eletrónico que permite a alimentação ou o corte da tomada quando o sistema eletrónico o indicar; (iii) Sistema eletrónico associado à tomada de alimentação que, através do condutor de “piloto de controlo”, permite, pelo estabelecimento contínuo de uma pequena corrente, entre a tomada de alimentação e o veículo, monitorizar a manutenção das condições de isolamento das partes em tensão durante uma sessão de carga. Este sistema eletrónico permite ainda, através de uma simples forma de comunicação ao utilizar o condutor de “piloto de controlo”, que seja estabelecido um limite de corrente que é puxado pelo carregador do veículo, em função das condições da tomada de alimentação e das condições da instalação elétrica a montante. Em caso do não cumprimento em cada instante destas condições, poderá existir uma falha em alguma parte do circuito e o sistema eletrónico não energiza a tomada de alimentação, através do comando do interruptor magnético. Um veículo utilizando o sistema Modo 3, não carregará também, na ausência de um sistema Modo 3 a montante, com quem se possa conectar.

MOD0 2

O Modo 2 é então um sistema de carga em que o interruptor eletromagnético e o sistema eletrónico definidos para o Modo 3, bem como um diferencial de In-Cable Control Box (ICCB) ou a Caixa de Controlo do Cabo, que está instalada numa das extremidades do cabo de ligação, e de onde sai uma ligação e a ficha normalizada (doméstica ou industrial) para ligação à rede elétrica. Na outra extremidade do cabo existe uma ficha Modo 3 para ligar ao veículo com este sistema, sendo o circuito

entre o VE e a ICCB percorrido pelo “piloto de controlo”. Praticamente todos os carros Modo 3 à venda neste momento vêm equipados com um cabo Modo 2.

MODO 4

Finalmente, o Modo 4 é definido como a ligação indireta do VE à rede de alimentação utilizando um carregador externo no qual o condutor-piloto de controlo vai até ao equipamento ligando-se de uma forma permanente à rede de alimentação. Um exemplo do Modo 4 são os carregadores rápidos DC que alimentam a bateria do veículo diretamente em DC, fazendo assim o bypass do carregador de bordo.

Tabela 2.3- Relação corrente-potência dos modos de carregamento

Modo	Regime Monofásico CA	Regime Trifásico CA	Regime CC
1	Max 16A-3,7kW	Max 16A-11kW	
2	Max 32A-7,4kW	Max 32A-22kW	
3	Max 63A-14,5kW	Max 63A-43,5kW	
4			Max 125A-50kW

A tabela 2.3 mostra a relação corrente/potência dos modos de carregamento apresentados, mostrando o regime de cada modo bem como a potência e a corrente máxima a que podem ser utilizados.

2.4 Normas e requisitos para os carregadores de VE's

Serão agora apresentadas as principais normas e requisitos para os equipamentos que compõem as ECVE.

Modos, Níveis e Características do Carregamento:

Na parte da infraestrutura de carregamento, estão compreendidas as normas dos equipamentos de carregamento, da infraestrutura de comunicação e da compatibilidade eletromagnética como pode ser observado na tabela 2.4.

Tabela 2.4- Normas referentes as ECVE's e os respectivos territórios de vigência

	Internacional/ Europa	USA/ Canada
Requisitos Gerais	IEC/EN 61851-1	NEC 625 SAE J1772 UL 2231-1 UL 2231-2
Requisitos EV para ECVE	IEC/EN 61851-21	
Estação de Carregamento CA	IEC/EN 61851-22	UL 2594
Estação de Carregamento CC	IEC/EN 61851-23 IEEE Std.2030	UL 2202
Protocolo de Comunicação	IEC/EN 61851-24	SAE J2293-1 SAE J2293-2 SAE J2847-2
Conectores, tomadas e cabos	IEC/EN 62196-1 IEC/EN 62196-2 IEC/EN 62196-3	SAE J1772 UL 2251

Os valores de tensão, corrente e potência são definidos de duas maneiras, de acordo com a origem da norma. A americana SAE J1772 [49] define por níveis de carregamento e a europeia IEC 61851-1[45] por modos de carregamento, conforme apresentadas na tabela 2.5 e 2.6, respectivamente.

Tabela 2.5- Níveis de carregamento de acordo com SAE J1772 2017

	CA		CC	
Nível	1	2	1	2
Fase	1	1	CC	CC
Tensão Max(V)	120	240	600	1000
Corrente Max(A)	16	80	<80	<400
Potência Max(kW)	1,9	19,2	<40	<400

Tabela 2.6- Modos de carregamento de acordo com a IEC 61851-1

	Modo 1 (CA)	Modo 2 (CA)	Modo 3 (CA)	Modo 4 (CC)
Tensão Max(V)	250-1f 480-3f	250-1f 480-3f	250-1f 480-3f	até 500
Corrente Max(A)	13 a 16	até 32	16 a 32	até 200
Potência Max(kW)	1,9	até 19,2	3 a 7,4-1f 19,2-1f 50-3f	até 100

A norma IEC 61851-1 define as possibilidades de carregamento de EV's em 4 modos que já foram descritos anteriormente. Os três primeiros modos de carregamento utilizam os conectores CA de tipos diferentes conforme apresentado por IEC 62196-2[50].

O modo 4 refere-se ao carregamento CC com quatro diferentes tipos de conectores. No modo 4, a bateria do veículo é carregada até 80% da sua capacidade. Embora os conversores de potência possam ser projetados para elevadas cargas, a corrente e a tensão máxima de saída da estação são limitadas pelo conector CC. Por outro lado, o modo 4, com carregador de 100 kW, proporciona recargas de até 15 min. Porém, o uso frequente do modo 4 pode reduzir a vida útil da bateria, devido ao aquecimento durante o processo de carregamento [18].



Qualidade de energia

Qualidade de energia elétrica (QEE), este termo ficou mais conhecido no setor elétrico nos últimos anos, tem sido usado com sentido amplo para expressar as mais variadas características da energia elétrica entregue pelas concessionárias aos consumidores. Uma definição abrangente define QEE como uma medida de quão bem a energia elétrica pode ser utilizada pelos consumidores. Esta medida inclui características de continuidade e de conformidade com certos parâmetros considerados desejáveis para uma operação segura, tanto do sistema que entrega, como das cargas elétricas [19]. Entre os parâmetros a considerar tem-se:

- Distorções harmónicas (que serão um ponto fulcral neste tema);
- Flutuações de tensão;
- Variações de tensão de curta duração;
- Desequilíbrio de sistemas trifásicos;

A preocupação com a QEE é devida, em parte, da reformulação que vem acontecendo no setor elétrico, para viabilizar a implantação de um mercado consumidor, no qual o produto comercializado passa a ser a própria energia elétrica. Parece

evidente que o consumidor prefere adquirir a energia que apresenta parâmetros adequados de qualidade ao custo mais baixo possível. Nesse contexto, as operadoras de sistemas elétricos são estimuladas, tanto pelas agências reguladoras como pelo próprio mercado, a prestar informações sobre as condições de operação ou fornecer detalhes acerca de eventos ocorridos e que afetaram os consumidores. Esse é um dos papéis da monitorização e da análise da qualidade de energia elétrica[20].

3.1 Distorção harmónica

Uma distorção de forma de onda é dita harmónica quando a deformação se apresenta de forma similar em cada ciclo da frequência fundamental. Neste caso, o espectro contém apenas frequências múltiplas inteiras da fundamental. Esse tipo de deformação geralmente é imposta por dispositivos que apresentam relação não linear entre tensão e corrente como, por exemplo, transformadores e motores, cujos núcleos ferromagnéticos são sujeitos à saturação [21]. Outros elementos não lineares são as cargas eletrónicas que produzem descontinuidades na corrente devido à comutação dos conversores. Num sistema de potência idealmente “limpo”, tanto a forma de onda da corrente como a da tensão são puramente sinusoidais. Na prática, correntes não-sinusoidais resultam de correntes que atravessam cargas que não se relacionam linearmente com a tensão aplicada sobre elas. Num circuito simples, que possui apenas elementos lineares (resistências, indutâncias e condensadores) a corrente que flui é proporcional à tensão aplicada para uma dada frequência [22]. Portanto, se uma tensão sinusoidal for aplicada, uma corrente sinusoidal irá fluir, como ilustrado na figura 3.1. A reta de carga é a relação entre a tensão aplicada e a corrente resultante na carga. Note-se que para um elemento reativo (condensador ou indutância) haverá um desfasamento entre a tensão e a corrente; o fator de potência também irá diminuir, mas no entanto o circuito ainda será linear.

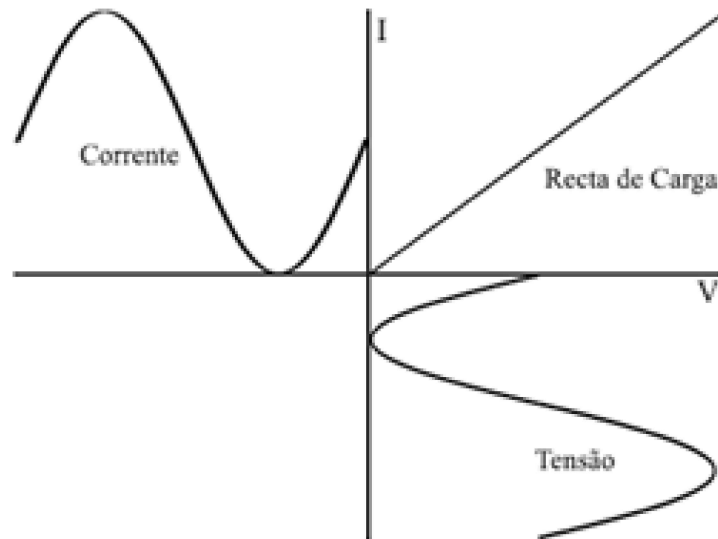


Figura 3.1 – Relação entre tensão e corrente num circuito formado por elementos lineares

A figura 3.2 mostra uma situação onde a carga é uma ponte retificadora de onda completa com condensador, como no estágio de entrada de uma típica fonte comutada. Neste caso, a corrente flui somente quando a tensão de alimentação ultrapassa a tensão armazenada no condensador, isto é, próximo ao valor de pico da tensão sinusoidal, como ilustrado pela forma da reta de carga. Na prática, a reta de carga e consequentemente a forma de onda da corrente vem a ser muitas vezes mais complexa do que a analisada neste exemplo, pois podem existir alguns pontos de assimetria e histerese. Sendo assim, os pontos de variação e as inclinações podem variar com a mudança da corrente de carga. Dentro das cargas não lineares, destacam-se como geradores de harmónicos os conversores estáticos presentes na maioria dos equipamentos eletrónicos, equipamentos de soldadura e os fornos de arco [23]. Na figura 3.3 é mostrado o circuito equivalente para uma carga não linear, que pode ser modelado como uma carga linear em paralelo com um certo número de fontes de corrente, sendo cada fonte correspondente a uma frequência harmónica.

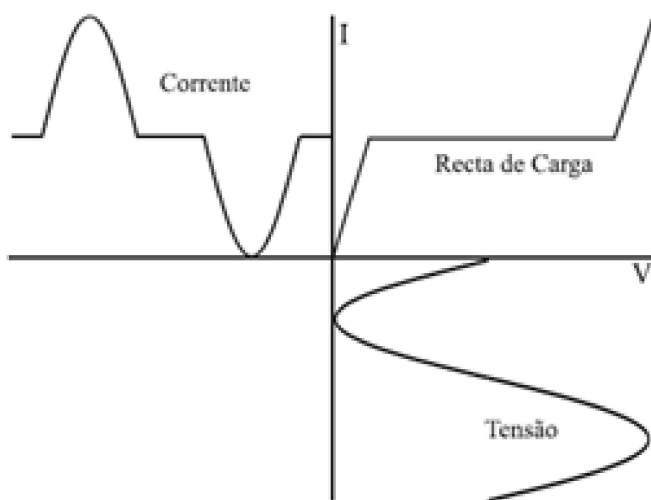


Figura 3.2 – Forma de onda da corrente distorcida num circuito formado por elementos não lineares

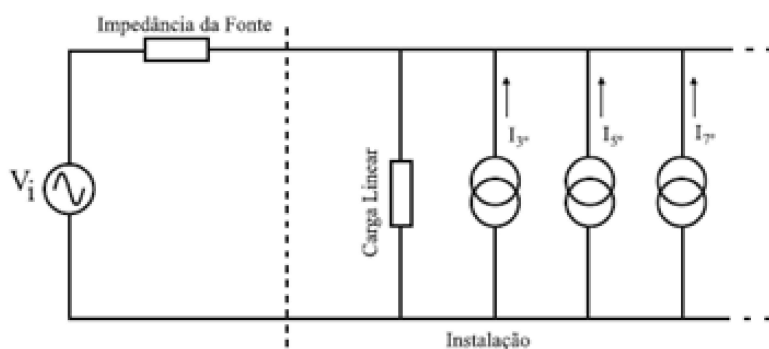


Figura 3.3 – Circuito equivalente de uma carga não linear

As correntes harmónicas geradas pela carga têm que passar através do circuito pela impedância da fonte e por todos os outros caminhos em paralelo tome-se como

exemplo a figura 3.3. Como resultado, aparecem tensões harmónicas através da impedância da fonte ficando presentes ao longo da instalação. As impedâncias de fonte geralmente são muito pequenas, logo a distorção harmónica da tensão resultante de uma corrente harmónica é normalmente baixa e ainda menor no final da rede. Isto pode no entanto, ser uma suposição errada porque é dada uma impressão de que não parece ser um problema de harmónicos quando na verdade elevadas correntes harmónicas podem estar presentes, mesmo com taxas de distorção de tensão relativamente baixas [24].

3.2 Indicadores de distorção harmónica

A presença de harmónicos nas instalações eléctricas começaram a ter relevância a partir da década de 90, onde o nível de consumo por parte dos equipamentos eletrónicos começou a ser comparável ao consumo dos equipamentos elétricos. Equipamentos como computadores, balastros eletrónicos, variadores de velocidade, UPS's e fontes de alimentação são exemplos de equipamentos que baseiam o seu funcionamento em componentes de eletrónica de potência (diodos, transístores, etc.)[25]. Estes equipamentos, são de uma forma geral as principais causas do aparecimento de harmónicos nos sistemas eléctricos. Segundo a norma NP/EN 50160 [52], uma tensão harmónica é uma tensão sinusoidal cuja frequência é um múltiplo inteiro da frequência fundamental da tensão de alimentação. A forma de onda da tensão ou corrente num determinado ponto de uma instalação eléctrica pode ter o aspeto do sinal da figura 3.4. Este sinal quando decomposto nas suas diversas componentes resulta no aparecimento de uma série de ondas sinusoidais (harmónicos) cuja frequência de cada uma delas é um múltiplo inteiro da frequência fundamental como ilustra a figura 3.4.

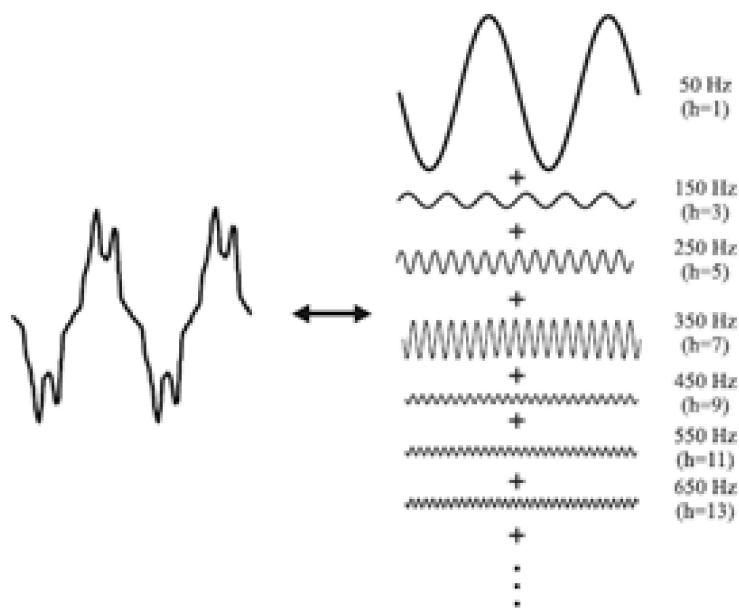


Figura 3.4 – Decomposição em Série de Fourier de um sinal distorcido

Com base no que foi referido anteriormente pode definir-se a ordem do harmónico (n) através da equação (3.1).

$$n = \frac{f_{\text{harmonico}}}{f_{\text{fundamental}}} \quad (3.1)$$

Segundo Joseph Fourier (1768 - 1830), qualquer sinal periódico, pode decompor-se no somatório de sinais sinusoidais cuja frequência é múltipla da fundamental, dando origem ao desenvolvimento da função em Série de Fourier, que pode ser representada pela equação (3.2).

$$y(t) = Y_0 + \sum_{n=1}^{\infty} Y_n \sqrt{2} \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (3.2)$$

Em que, Y_0 - amplitude da componente contínua (normalmente nula em sinais ímpares e com simetria de meia onda)

Y_n - valor eficaz do harmónico de ordem n

ω - frequência angular fundamental

φ_n - desfasamento da componente harmónica para $t = 0$

A utilização da Série de Fourier [26] para representar um sinal distorcido traz grandes vantagens pois torna-se mais fácil obter a resposta do sistema para uma determinada entrada sinusoidal, podem ser utilizadas técnicas de análise em regime permanente e permite ainda a análise separada para cada harmónico.

3.3 Consequências da distorção harmónica

Com o aumento cada vez maior do número de cargas não lineares, tais como no-breaks, televisores, lâmpadas fluorescentes, máquinas de soldar e outros equipamentos que utilizam circuitos eletrónicos, há também o crescimento dos harmónicos de corrente e de tensão presentes na rede eléctrica, prejudicando a qualidade de energia da rede.

Parece paradoxal, mas a busca pelo aumento da eficiência energética conduziu ao uso intensivo da eletrónica de potência e isso aumentou a quantidade de harmónicos injetados na rede eléctrica. Altos níveis de distorção harmónica podem gerar stress e problemas para o sistema de distribuição da concessionária e consequentemente

para os dispositivos elétricos e eletrônicos ligados à rede de distribuição [27]. Estas distorções podem resultar em má operação e, sobretudo, redução da vida útil dos aparelhos. Os harmônicos também trazem consequências negativas para equipamentos típicos encontrados em plantas industriais. É importante ressaltar que a presença de distorção acarreta em baixo fator de potência, exigindo que a instalação seja superprojetada e sujeita a pagamentos de multas mensais constantes à concessionária de energia. Alguns exemplos de problemas causados por harmônicos nas indústrias são:

- Mau funcionamento de computadores e outros aparelhos eletrônicos;
- Sobrecargas nas instalações;
- Sobreaquecimento e queda de tensão em cabos, transformadores, motores;
- Ligação anormal de interruptores;
- Interferência nos sistemas de telecomunicações;

Sendo assim, podem ocorrer perdas de produção por causa de paralisações devido às eventuais falhas de motores, ligações, fontes de alimentação, ou apenas a abertura acidental de disjuntores, causando perdas econômicas na indústria. Uma boa solução para diminuir o nível de distorção é a atualização de Filtros Ativos de Harmônicos para cancelar os harmônicos de frequências indesejadas (tais filtros que serão tratados posteriormente nesta dissertação).

3.4 Valor eficaz da corrente e conceito de valor RMS

Com a finalidade de compreender a importância das perturbações causadas pela contaminação harmônica, é necessário recordar que em redes de alimentação em regime de corrente alternada, à frequência de 50 Hz, as características dos aparelhos de medida, a seleção das proteções e o cálculo das seções dos condutores, baseiam-se na

hipótese de uma corrente perfeitamente sinusoidal. No entanto com a proliferação de cargas não lineares, a corrente não conserva a forma de onda puramente sinusoidal. É, pois, essencial poder medir o valor eficaz[28] de um sinal qualquer que seja a sua forma de onda. Os aparelhos de medida tradicionais que utilizam termopares, baseiam o seu princípio de funcionamento na medida do calor libertado por efeito de Joule, medindo os valores reais eficazes das correntes ou tensões qualquer que seja a forma do sinal. Os aparelhos digitais utilizam tecnologia RMS e determinam o valor eficaz de um aparelho de medida que não utilize tecnologia RMS[29] pode proporcionar medidas erradas e em nenhuma situação poderá dar um valor eficaz exato, pois apenas reflete na medida o valor eficaz da componente fundamental. Dado que um sinal distorcido se decompõe numa soma de sinais harmónicos, múltiplos inteiros da frequência fundamental, o valor eficaz real da corrente também é representativo do efeito de Joule devido ao conjunto destes sinais. Desta forma é tida em conta a soma da componente fundamental e dos harmónicos. O valor eficaz (RMS) de um sinal distorcido, obtém-se calculando a raiz quadrada da soma quadrática das suas componentes harmónicas, de acordo com a equação (3.3):

$$Y = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} Y_n^2} \quad (3.3)$$

No caso concreto da corrente eléctrica, o seu valor eficaz é dado pela equação (3.4):

$$I_{ef} = \sqrt{I_{fund}^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + \dots} \quad (3.4)$$

Onde I_n representa a corrente associada ao harmónico de ordem n . Os harmónicos de ordem mais elevada representam um valor eficaz desprezável face ao valor total, bastando na maioria dos casos uma aproximação a partir dos harmónicos iniciais para quantificar um sinal.

3.5 Espectro harmónico

O espectro harmónico permite decompor um sinal nos seus harmónicos e representá-los graficamente mediante um gráfico de barras, onde cada barra representa um harmónico, com uma frequência, uma amplitude e respetivo desfasamento, como mostra a figura 3.5:

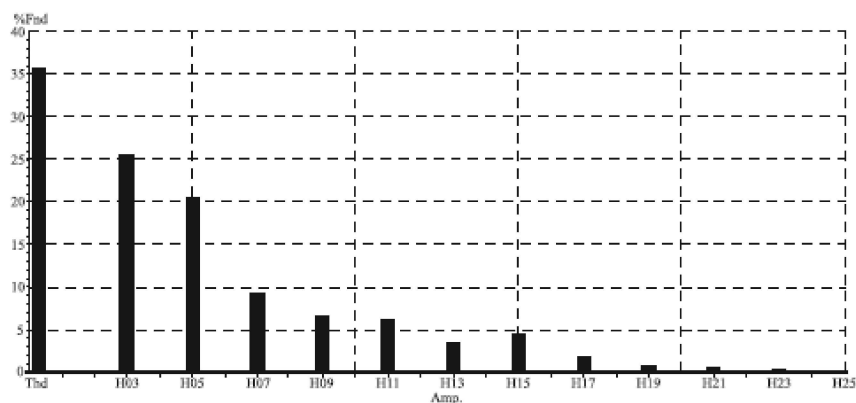


Figura 3.5 – Exemplo do espectro harmónico de um sinal

O espectro harmónico de um sinal distorcido teoricamente vai até ao infinito, no entanto na prática verifica-se que os harmónicos de ordem elevada (acima de 25) são praticamente desprezáveis, não tendo qualquer influência no respeitante à qualidade

da energia.

3.6 Taxa de distorção harmónica (THD)

A taxa de distorção harmónica - THD (Total Harmonic Distortion) definiu-se como consequência da necessidade de poder quantificar numericamente os harmónicos de tensão ou corrente existentes num determinado ponto do sistema elétrico [30]. Segundo a definição dada pelo standard IEEE 519[53] este parâmetro representa a relação entre o valor eficaz dos harmónicos e o valor eficaz da componente fundamental, sendo calculado com base na equação(3.5):

$$THD\% = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} Y_{2n}^2}}{Y_1} * 100 \quad (3.5)$$

Esta expressão é equivalente à apresentada pela equação (3.6), que é mais direta e mais fácil de utilizar quando se conhece o valor eficaz total do sinal.

$$THD = \sqrt{\left(\frac{Y_{ef}}{Y_1}\right)^2 - 1} \quad (3.6)$$

Existe uma segunda definição baseada na norma IEC 60555-1 [51], que representa a taxa de distorção de corrente harmónica por fase em relação à demanda de carga total, sendo calculado com base na equação (3.7):

$$TDD\% = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} Y_{2n}^2}}{\sum_{n=1}^{\infty} Y_{2n}} * 100 \quad (3.7)$$

Na Europa é utilizada a primeira definição, o que significa que quando uma instalação elétrica contém contaminação harmónica é possível que a taxa de distorção harmónica atinja valores superiores a 100%. O que indicaria que nesse ponto da instalação a componente harmónica era superior à componente fundamental. Destas expressões também se pode deduzir que, quando não existe contaminação harmónica THD é nula. Portanto deve sempre procurar-se que a taxa de distorção harmónica seja sempre o mais baixa possível.

3.7 Fator de potência

O fator de potência (FP), por definição é dado pela relação entre a potência ativa (P) e a potência aparente (S) como mostra a equação (3.8):

$$FP = \frac{P}{S} \quad (3.8)$$

Correntemente é comum considerar o fator de potência e o $\cos \varphi$ como sendo a mesma variável e de valores iguais[31]. Esta consideração apenas pode ser feita quando na presença de sinais (tensão e corrente) puramente sinusoidais sem harmónicos. O $\cos \varphi$ é dado pela relação entre as componentes fundamentais da potência ativa e potência aparente, como apresentado pela equação (3.9):

$$\cos \varphi = \frac{Ph1}{Sh1} \quad (3.9)$$

O fator de potência e o $\cos \varphi$ embora diferindo, têm normalmente valores muito próximos. Isto verifica-se devido ao facto de que na grande maioria dos casos embora exista uma grande distorção no sinal de corrente tal não se verifica na taxa de

distorção da tensão que apresenta valores baixos. Levando, assim, a que o produto de uma componente harmónica de corrente pela correspondente da tensão seja praticamente nulo.

3.8 Relação entre fator de potência e THD

Com uma tensão sinusoidal ou quase sinusoidal, pode-se considerar:

$$P = Ph1 = Uh1 * Ih1 * \cos\varphi \quad (3.10)$$

Tendo em conta que o fator de potência é dado pela equação (3.8) e substituindo ambos os membros da fração obtém-se a equação (3.11):

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{Uh1 * Ih1 * \cos\varphi}{Uh1 * Ief} \quad (3.11)$$

Após o manuseamento da equação (3.6) é possível reescrevê-la em termos de correntes, obtendo-se a seguinte igualdade:

$$\frac{Ih1}{Ief} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD^2i}} \quad (3.12)$$

que após substituição na equação (3.11), permite obter uma relação entre o fator de potência e a taxa de distorção harmónica da corrente, que é representada pela equação (3.13).

$$FP = \frac{\cos\varphi}{\sqrt{1 + THD^2i}} \quad (3.13)$$

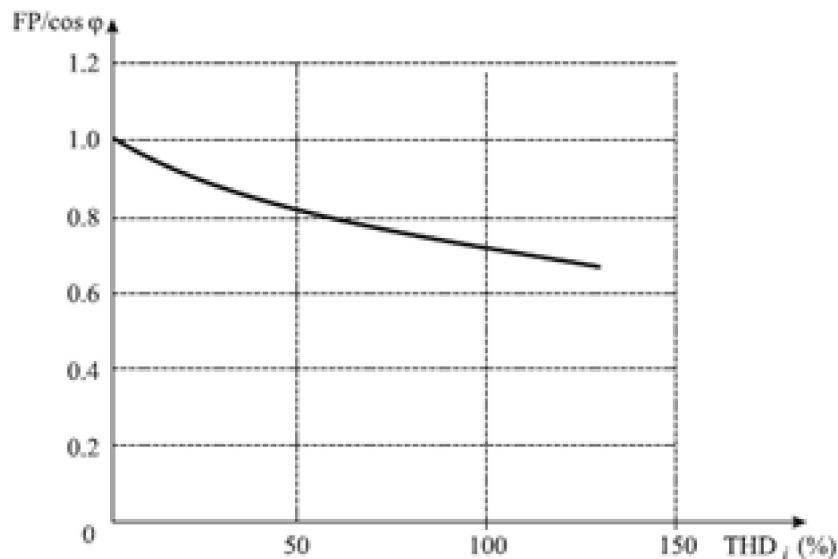


Figura 3.6 – Variação da taxa de distorção da corrente ($THDi$) em função do fator de potência, considerando $THDv = 0$

O resultado gráfico desta relação entre as grandezas está expresso na figura 3.6 que mostra claramente que quanto mais o fator de potência se afasta da unidade maior é a taxa de harmónica da corrente.

3.9 Medidas mitigadoras

A partir da identificação e classificação dos impactos harmónicos potenciais decorrentes da instalação e operação de retificadores (que nos casos de estudo funcionarão como ECVE), foram propostas ações que visam a redução ou eliminação dos impactos negativos (medidas mitigadoras). As medidas mitigadoras/reparadoras propostas foram baseadas na previsão de eventos adversos potenciais sobre os objetos em estudo (sendo nos casos de estudo as redes elétricas), tendo por objetivo a eliminação ou atenuação de tais eventos. Tais medidas mitigadoras apresentam características de conformidade com os objetivos a que se destinam, conforme se segue:

Medida Mitigadora Preventiva

É uma medida que visa diminuir ou até mesmo eliminar acontecimentos adversos que se podem apresentar como uma causa de prejuízos aos objetos em estudo. Este tipo de medida procura antecipar a ocorrência do impacto negativo.

Medida Mitigadora Corretiva

A medida mitigadora corretiva é utilizada quando o efeito negativo já está identificado visando mitigar o mesmo, podendo ser ao reestabelecer a situação anterior à ocorrência do evento que causou o efeito negativo sobre os objetos em estudo, ou fazer com que ocorra uma nova situação de equilíbrio harmónico entre os diversos elementos do objeto em estudo através de ações de controlo para a neutralização do fator que gerou o tal efeito negativo.

Medida Mitigadora Compensatória

Esta medida tem como premissa, repor as estatísticas perdidas na decorrência das ações com efeitos negativos podendo ser diretas ou indiretas [31].

3.9.1 Filtros Ativos

A realização de um filtro ativo de potência utiliza a capacidade de um conversor CC-CA produzir uma tensão ou corrente alternada com qualquer forma de onda. Obviamente tal capacidade de síntese é limitada em termos de frequência a um valor de aproximadamente $1/10$ da frequência de comutação, admitindo-se ainda a existência de um filtro de saída que minimize a penetração de componentes de alta frequência na rede elétrica. A função dos inversores é fazer com que se produza uma corrente ou tensão que siga uma dada referência, a qual está relacionada com as componentes da corrente (ou tensão) que se quer compensar. São possíveis implementações de filtros série ou filtros em derivação. Em geral, os Filtros Ativos (FA's)

são usados para compensar harmônicos de corrente e de tensão, mas existem outros benefícios que podem ser conseguidos com a utilização de um FA [32]. Entre eles, pode-se citar: Compensação de potência reativa; Regulação da tensão de sistemas trifásicos; Balanço de correntes e tensões; Diminuição da corrente de neutro; Eliminação de flickers (é o resultado do impacto da flutuação de tensão em lâmpadas que podem ser percebidas pelo olho humano. Muitas vezes esse termo é usado para designar flutuação de tensão).

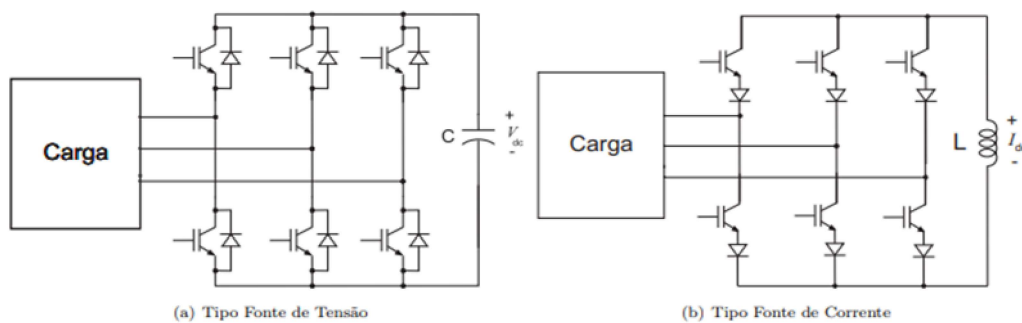


Figura 3.7 – Conversores (inversores)

A ideia de compensar harmônicos utilizando filtros ativos surgiu na década de 70 [33],[34]. No entanto, não existiam métodos suficientemente rápidos que permitissem a sua construção. A primeira implementação de um filtro ativo foi realizada em 1982 utilizando um inversor fonte de corrente com chaves do tipo GTO (Gate Turn-Off Thyristor) para compensar harmônicos de corrente [8]. Os filtros ativos de potência caracterizam-se como uma alternativa eficiente para a eliminação dos harmônicos presentes nas tensões e correntes da rede. Eles podem ser classificados quanto à sua topologia, tipo do conversor e número de fases. Os FA's podem ser construídos utilizando o inversor fonte de tensão (VSI) ou o inversor fonte de corrente (CSI), mostrados respetivamente na Figuras 3.7 (a) e (b). A primeira implementação de um filtro ativo foi realizada utilizando um inversor fonte de corrente. Nos dias atuais o inversor fonte de tensão é amplamente utilizado devido à sua maior eficiência e menor custo quando comparado à fonte de corrente [35],[36].

3.9.2 Filtros Passivos

A solução clássica para a redução da contaminação harmónica de corrente em sistemas elétricos é o uso de filtros sintonizados conectados em derivação no alimentador. A estrutura típica de um filtro passivo de harmónicos de corrente é mostrada pelas várias células LC série e são sintonizadas nas proximidades das frequências que se deseja eliminar, o que, em geral, são os componentes de ordem inferior. Para as frequências mais elevadas é usado, em geral, um simples condensador que funciona como filtro passa-alto. Resistências, condensadores e bobines consomem energia quando uma corrente passa por eles e são incapazes de ganho de energia; portanto, qualquer filtro RLC é um filtro passivo, especialmente com as bobines incluídas. Outra característica importante dos filtros passivos é que os filtros não precisam de uma fonte de alimentação externa para funcionar. A impedância de entrada é baixa e a impedância de saída é alta, permitindo a autorregulação das tensões que acionam as cargas. Normalmente, em filtros passivos, a resistência de carga não é isolada do resto da rede; portanto, a mudança na carga pode afetar as características do circuito e do processo de filtragem. Porém, não há restrições de largura de banda para os filtros passivos, permitindo uma operação satisfatória em frequências muito altas. Em filtros de frequência mais baixa, a bobine usada no circuito tende a ser maior, tornando o circuito mais volumoso. Se maior qualidade e tamanho menor forem necessários, o custo aumenta significativamente. Os filtros passivos também criam um pouco de ruído, devido ao ruído térmico nos elementos. No entanto, com um projeto adequado, essa amplitude de ruído pode ser minimizada. Como não há ganho de sinal, a amplificação do sinal deve ser realizada em um estágio posterior. Às vezes, amplificadores de buffer podem ser necessários para compensar as diferenças no circuito de saída.

Apresentadas agora as fórmulas utilizadas nos casos de estudo que serão apresentados à frente. É inicialmente apresentada a Lei de Ohm em 3.14, que define que a resistência é independente da frequência:

$$R = \frac{V}{I} \quad (3.14)$$

A reatância capacitiva depende da frequência e a sua variação é inversamente proporcional à frequência, conforme a expressão 3.15:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} \quad (3.15)$$

A reatância indutiva depende da frequência e a sua variação é diretamente proporcional à frequência, conforme a expressão 3.16:

$$X_l = 2\pi f L \quad (3.16)$$

Será importante o cálculo da potência ativa para os casos de estudo sendo tal mostrado pela equação 3.17:

$$P = \sqrt{3} * U * I_{rms} * \cos(\varphi_1) \quad (3.17)$$

O conhecimento da potência reativa será também imprescindível:

$$Q = \sqrt{3} * U * I_{rms} * \sin(\varphi_1) \quad (3.18)$$

O cálculo do IL será essencial para a compreensão da corrente no harmônico 1 e assim ser calculada a corrente nos restantes harmônicos dita pela equação 3.19:

$$IL = \frac{P}{\sqrt{3} * U * \cos(\varphi)} \quad (3.19)$$

Para a divisão da potência reativa pelos harmônicos será utilizada a equação 3.20:

$$Q_{f_5} = Q * \frac{I_n}{\sum_{n=2}^{25} I_n} \quad (3.20)$$

A resistência, condensador e bobine são dados pelas equações seguintes respectivamente:

$$X_c = \frac{U^2}{Q_{f_5}} \quad (3.21)$$

$$Cf_5 = \frac{1}{w * Xc} \quad (3.22)$$

$$wL_5 = \frac{1}{wCf_5} \quad (3.23)$$

Estes serão os filtros utilizados nos Casos de Estudo, precisando assim desta base teórica para que o cálculo dos mesmos possa ser efectuado.

4

Conversores Estáticos

As estações de carregamento de veículos elétricos são compostas basicamente por conversores estáticos, sejam estes monofásicos ou trifásicos. O objetivo de um conversor de energia é processar e controlar o fluxo de energia elétrica através do abastecimento de tensões e correntes adaptadas para as cargas do consumidor. Inicialmente a energia era convertida, em conversores eletromecânicos (principalmente máquinas rotativas). Hoje em dia, com o desenvolvimento e produção em massa de semicondutores de potência, os conversores estáticos encontraram aplicações em numerosos domínios, desde Aceleradores de Partículas, até Veículos Elétricos que é o propósito desta dissertação e o principal motivo para serem estudados. À medida que os anos vão passando os conversores estáticos ficam menores e mais leves e o seu desempenho estático e dinâmico está sempre a ser melhorado. Um conversor estático é uma rede de componentes elétricos que atua como um estágio intermediário que faz uma adaptação ou uma transformação entre duas fontes, geralmente entre um gerador e uma carga. São apresentados de seguida alguns equipamentos e fenómenos que produzem contaminação harmónica no sistema elétrico de energia. O controlo do fluxo de energia elétrica entre dois ou mais sistemas diferentes é uma das grandes preocupações dos engenheiros eletrotécnicos. E então para efetuar tal controlo procuraram-se formas e métodos que permitissem maiores rendimentos. O avanço

da Eletrônica de Potência proporcionou com que isso se tornasse possível graças aos conversores estáticos, que são circuitos eletrônicos com a capacidade de tratar a energia elétrica [37]. A constituição destes circuitos passa por um conjunto de resistências e condensadores, pois estes são capazes de converter uma forma de onda de tensão ou corrente em outra e por esse motivo, são então chamados de conversores. Por outro lado, os conversores fazem uma ligação entre a fonte e a carga, como mostrado na figura 4.1, podendo assim adequar os níveis de tensão ou corrente da fonte para a carga.



Figura 4.1 – Ligação do Conversor

4.1 Tipos de conversores

4.1.1 Conversores CC/CA

Estes também denominados por inversores, que conseguem fazer o controle da frequência bem como da amplitude da tensão de saída. Existem vários exemplos para estes conversores serem aplicados, são aplicados em painéis fotovoltaicos diretamente ligados à rede elétrica, e também alimentar uma carga com 120 VAC-60 Hz a partir de uma bateria de 12V [38]. Permitem também no caso dos motores de indução o controle da sua velocidade.

4.1.2 Conversores CC/CC

Num conversor CC/CC, na entrada, a tensão contínua é convertida para uma tensão contínua de saída com amplitude alterada podendo ser maior ou menor, onde pode chegar a ter polaridade negativa e isolamento galvânica entre os pontos de terra de referência da entrada bem como de saída. Há várias aplicações para este tipo de conversor, como é o caso por exemplo as fontes de alimentação encontradas nos telemóveis, que convertem a tensão de saída da bateria para níveis adequados ao funcionamento dos circuitos eletrónicos [39].

4.1.3 Conversores CA/CA

Os ciclo-conversores são também assim chamados os conversores CA/CA, fazem a conversão de uma tensão de entrada CA para então chegar a uma tensão CA de saída com amplitude e frequência controláveis[40]. Pode-se citar como exemplo os circuitos de controlo de velocidade e de controlo de luminosidade de um motor de indução.

4.1.4 Conversores CA/CC

Também chamados de retificadores. O fornecimento de energia elétrica é feito, essencialmente, a partir de uma rede de distribuição em corrente alternada, devido, principalmente, à facilidade de adaptação do nível de tensão através de transformadores em muitas aplicações, no entanto, a carga alimentada exige uma tensão contínua. A conversão CA/CC é realizada por conversores chamados retificadores. Os retificadores podem ser classificados segundo a sua capacidade de ajustar o valor da tensão de saída (controlados ou não controlados); de acordo com o número de fases

da tensão alternada de entrada (monofásico, trifásico, hexafásico, etc.); em função do tipo de conexão dos elementos retificadores. Os retificadores não-controlados são aqueles que utilizam díodos como elementos de retificação, enquanto os controlados utilizam tirístores ou transístores [41]. Usualmente topologias com meia onda não são aplicadas. A principal razão é que, nesta conexão, a corrente média da entrada apresenta um nível médio diferente de zero. Tal nível contínuo pode levar elementos magnéticos presentes no sistema (transformadores) à saturação, o que é prejudicial ao sistema. Topologias com onda completa absorvem uma corrente média nula da rede, o que assim não afeta tais elementos magnéticos.

4.2 Retificadores não controlados

4.2.1 Com entrada monofásica

A figura 4.2 mostra o circuito de potência do popular retificador monofásico com ligação em ponte. Este retificador utiliza quatro díodos e por essa razão não tem capacidade de controlar o fluxo de energia desde a rede até à carga (ou seja, é não controlado). Na figura 4.3 são apresentadas as formas de onda da tensão e das diferentes correntes envolvidas, assumindo que a corrente na carga está perfeitamente filtrada.

As correntes harmónicas injetadas pelo retificador em ponte monofásico com corrente filtrada na carga são dadas pela equação 4.1

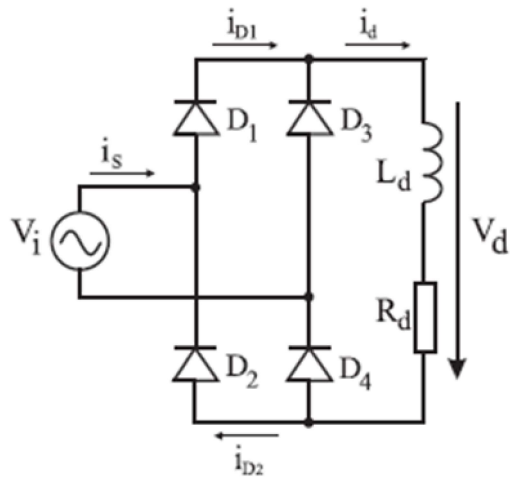


Figura 4.2 – Retificador em ponte monofásico

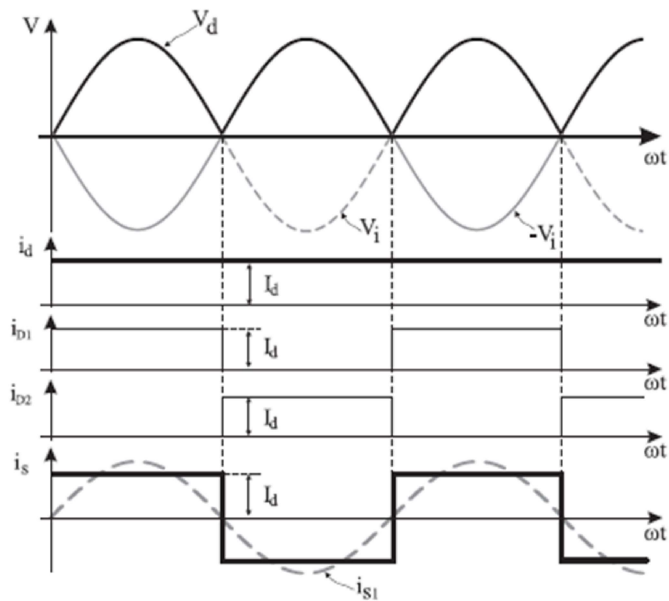


Figura 4.3 – Formas de onda do retificador em ponte monofásico com corrente de carga perfeitamente filtrada

$$y(t) = Y_0 + \sum_{n=1}^{\infty} Y_n \sqrt{2} \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (4.1)$$

Na figura 4.4 é apresentado o espectro de frequências para este retificador numa

escala linear.

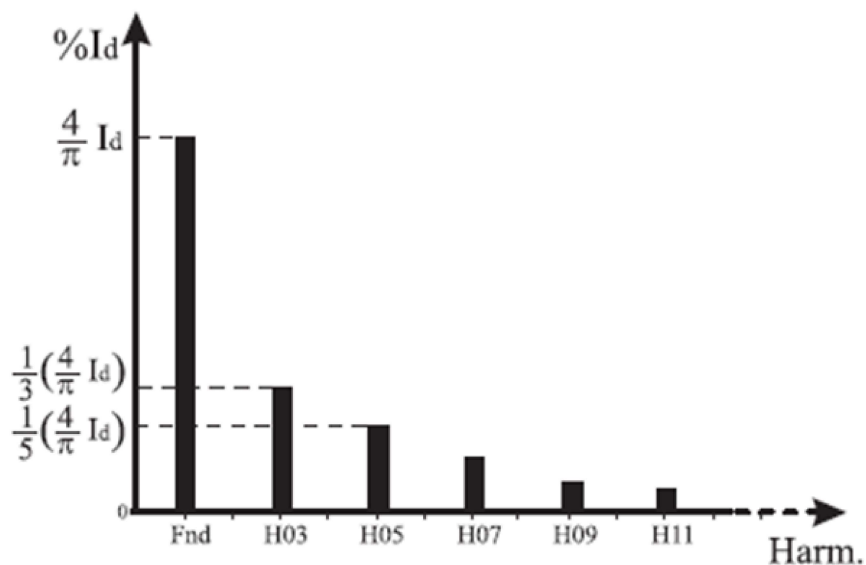


Figura 4.4 – Harmónicos injetados pelo retificador em ponte monofásico

4.2.2 Com entrada trifásica

Quando a potência da carga alimentada começa a aumentar, maioritariamente são utilizados retificadores trifásicos, como mostra a figura 4.5.

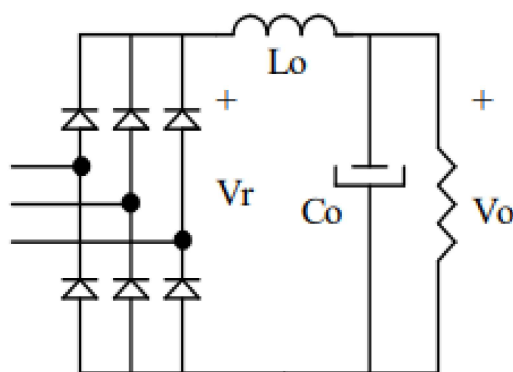


Figura 4.5 – Retificador Não Controlado Trifásico

Com o propósito de, ao distribuir a corrente entre as 3 fases, evitar desequilíbrios

que poderiam ocorrer caso a corrente fosse consumida por apenas 1 ou 2 fases. Neste caso a corrente é fornecida, a cada intervalo de 60 graus, por apenas 2 das 3 fases. Poderão conduzir aquelas fases que tiverem, em módulo, as 2 maiores tensões. Ou seja, a fase que for mais positiva, poderá levar o diodo a ela conectado, na semi-ponte superior, à condução. Na semi-ponte inferior poderá conduzir o diodo conectado às fases com tensão mais negativa. Pela fase com tensão intermedia não haverá corrente. A figura 4.6 mostra formas de onda típicas considerando que o lado CC é composto, predominantemente, por uma carga resistiva, indutiva ou capacitiva.

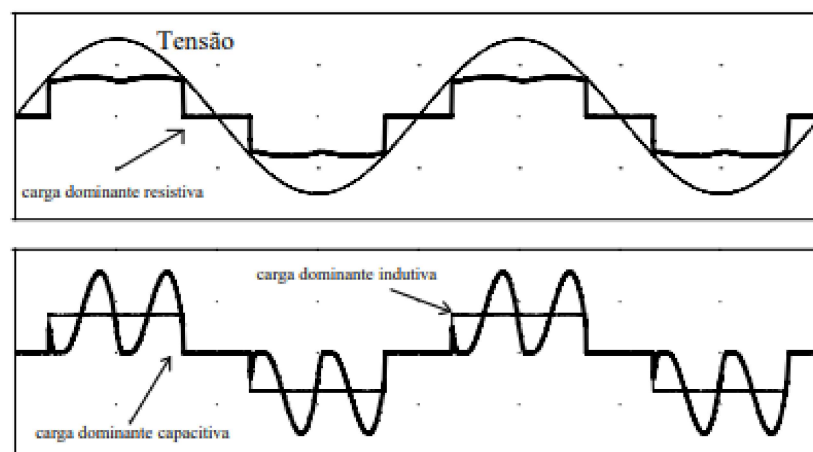


Figura 4.6 – Formas de onda no lado CA para retificador trifásico ao alimentar diferentes tipos de carga

No primeiro caso a corrente segue a mesma forma da tensão sobre a carga, ou seja, uma retificação de 6 pulsos. Quando um filtro indutivo é utilizado, tem-se um alisamento da corrente, de modo que a onda passa a apresentar-se praticamente retangular. Já com um filtro capacitivo (mantendo ainda uma pequena indutância em série), tem-se os picos de corrente. Com o aumento da indutância tem-se uma redução dos picos e, eventualmente, a corrente não chega a ficar nula.

4.3 Retificadores controlados

4.3.1 Com entrada monofásica

Os circuitos retificadores controlados constituem a principal aplicação dos tirístores em conversores estáticos. Possuem uma vasta aplicação industrial, ao acionarem motores de corrente contínua em estações retificadoras para alimentação de redes de transmissão CC, bem como na ignição de locomotivas, etc. Serão analisadas posteriormente pontes retificadoras monofásicas, embora o estudo das pontes trifásicas não seja substancialmente diferente. Para potência superior a alguns kVA geralmente usam-se pontes trifásicas [42]. A Figura 4.7 mostra 3 estruturas de pontes retificadoras monofásicas.

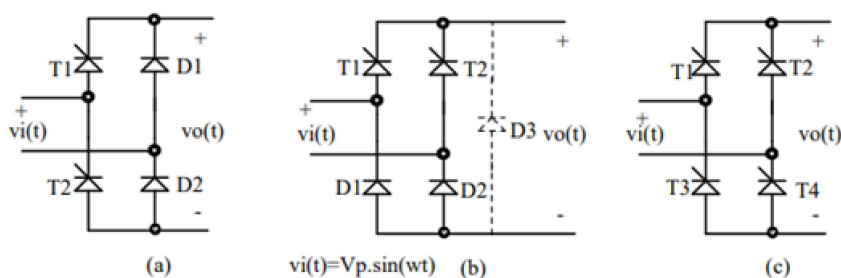


Figura 4.7 – a) Semicontrolada assimétrica; b) Semicontrolada simétrica; c) Totalmente controlada

A principal vantagem das pontes semicontroladas é o uso de apenas 2 tirístores, estas são mais indicadas quando o fluxo de energia é apenas da fonte para a carga. Neste circuito a tensão de saída, $v_o(t)$, pode assumir apenas valores (instantâneos e médios) positivos. Sempre que a tensão de saída tender a inverter haverá um caminho interno que manterá esta tensão em zero, desconectando a carga da rede. Quando a carga for resistiva, a forma de onda da corrente de linha será a mesma da tensão sobre a carga (obviamente sem a retificação). Com carga indutiva, a corrente vai alisando à medida que aumenta a constante de tempo elétrica da carga, tendo, no limite, uma forma plana. No caso da ponte totalmente controlada, o seu principal uso é no acionamento do motor de corrente contínua quando é necessária

uma operação em dois quadrantes do plano tensão x corrente. Nestes circuitos não pode haver inversão de polaridade na corrente, de modo que, mantida a polaridade da tensão, não é possível a travagem da máquina. A tensão sobre a carga pode tornar-se negativa, desde que exista um elemento indutivo que mantenha a circulação de corrente pelos tirístores, mesmo quando inversamente polarizados.

4.3.2 Com entrada trifásica

A figura 4.8 mostra o circuito de potência do retificador em ponte trifásico totalmente controlado, utilizando 6 tirístores. Este conversor também é conhecido como retificador de 6 pulsos, devido à tensão gerada na carga conter 6 pulsos num período da tensão da rede. A figura 4.9 mostra as formas de onda da corrente de entrada num retificador em ponte trifásico para diferentes ângulos de disparo (α).

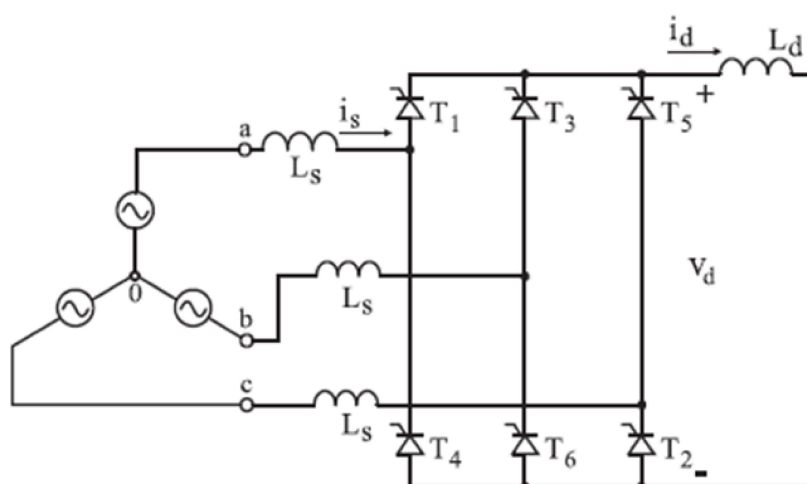


Figura 4.8 – Retificador em ponte trifásico

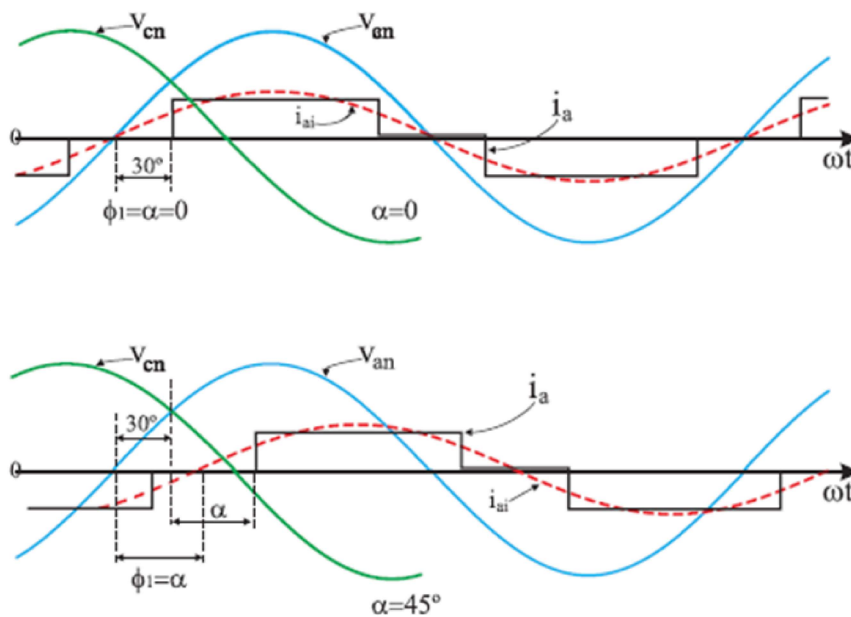


Figura 4.9 – Formas de onda da corrente de entrada

Quando o transformador que alimenta o retificador trifásico tem ligação estrela-estrela, a corrente que circula na rede tem a forma da mostrada na figura 4.9.

Esta corrente contém os seguintes harmónicos dados pela equação 4.2

$$i_a(t) = Id \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \left[\cos(\omega t) - \frac{1}{5} \cos(5\omega t) + \frac{1}{7} \cos(7\omega t) - \frac{1}{11} \cos(11\omega t) + \frac{1}{13} \cos(13\omega t) - \frac{1}{17} \cos(17\omega t) \right] \quad (4.2)$$

Analisando a equação anterior conclui-se que esta corrente contém 20% do harmónico 5 (250 Hz), 14,3% do harmónico 7 (350 Hz), 9,1% do harmónico 11 (550 Hz), etc.



Casos de Estudo

Esta dissertação tem o objetivo de estudar as perturbações que as estações de carregamento dos veículos elétricos geram na rede elétrica, para isso será feita inicialmente uma introdução às redes elétricas, mostrando quais as particularidades das redes utilizadas no projeto sendo estas a rede IEEE 13 nós e a rede IEEE 33 nós, posteriormente terá ênfase a parte dos retificadores (monofásicos e trifásicos) utilizados, pois serão estes retificadores que vão funcionar como ECVE's, para assim serem analisadas as perturbações obtidas neste estudo. Tanto as redes elétricas como os retificadores foram desenvolvidos em MatLab bem como os testes executados e os valores obtidos que serão o objetivo de estudo deste capítulo.

5.1 Redes elétricas

No próprio arquivo de instalação do software MatLab são apresentadas algumas redes para fins de testes, sejam eles acadêmicos ou profissionais relacionados ao MatLab dentre elas, uma das redes de distribuição usadas neste projeto foi a rede de

testes do IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) de 13 barramentos, a IEEE 13 *Node Test Feeder*, por ter um caráter reduzido e apesar disso ser de grande conteúdo para análises de comportamento. A rede, apresentada na figura 5.1, é constituída por dois transformadores trifásicos de distribuição, um regulador de tensão na subestação, linhas monofásicas e trifásicas, bateria de condensadores, cargas, e também um transformador de linha. A rede é composta por barramentos de caráter residencial, onde o barramento 671 é o único com características industriais. O barramento 650 representa o alimentador de toda rede de distribuição e logo em seguida o seu regulador de tensão, transformando os três níveis de tensão em que opera, 115 kV, 4,16 kV e 0,48 kV, para 4,16 kV para todos os barramentos, a não ser o barramento 634 que opera a 0,48 kV.

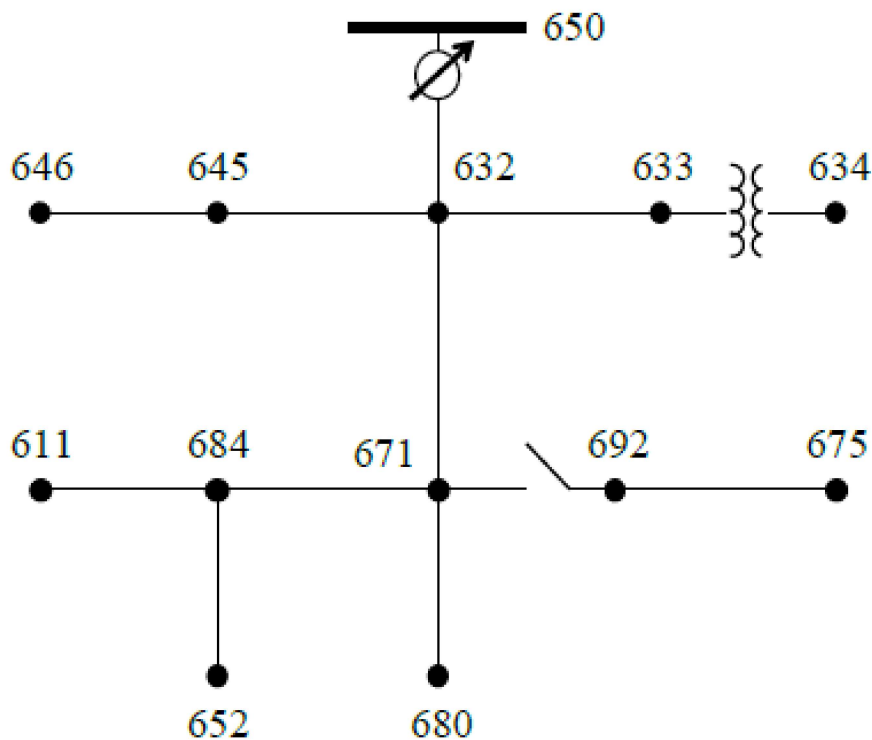


Figura 5.1 – Rede de distribuição radial de barramentos IEEE 13

A rede elétrica IEEE de 33 barramentos (também fornecida pelo próprio arquivo de instalação do software MatLab) é um sistema amplamente utilizado para estudos que envolvem redes de distribuição. É um sistema radial, cuja carga total instalada

é: 3,715MW e 2,29MVar, considerando a tensão base de 13,8kV e potência base de 100MVA. O diagrama unifilar do sistema é representado na Figura 5.2:

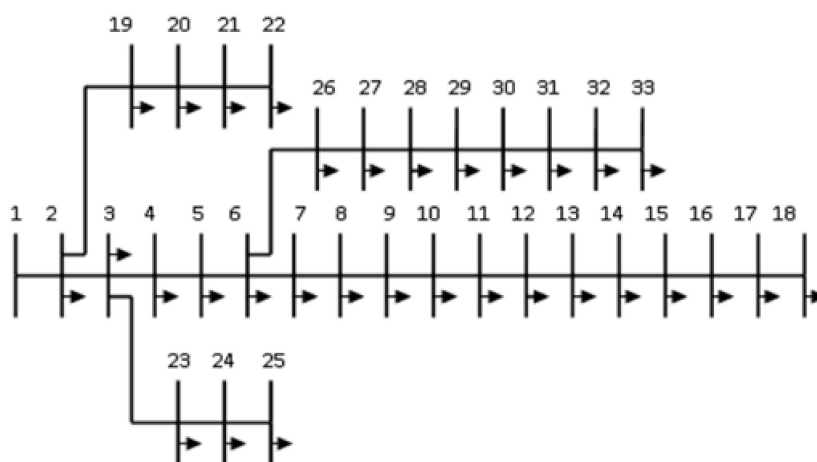


Figura 5.2 – Rede de destruição radial IEEE de 33 barramentos

5.2 Retificadores

De início foram projetados dois conversores estáticos de onda completa CA/CC, um monofásico e outro trifásico, que ao ligar à rede funcionam como estações de carregamento de veículos elétricos. Para recriar um carregamento de um VE é necessário que à medida que o SOC (estado de carga) aumente, a corrente obedeça ao gráfico demonstrado na figura 5.3 para assim haver a preservação da bateria do veículo elétrico pois a mesma não sofrerá danos, para que isto aconteça as bobinas e os condensadores dos conversores estáticos têm valores alternados.

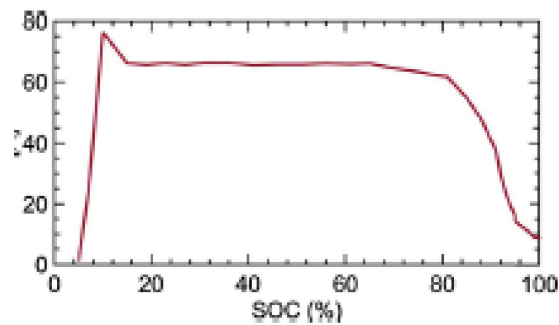


Figura 5.3 – Comportamento da corrente durante um carregamento de um VE

O retificador monofásico elaborado para este projeto, apresentado na figura 5.4, é composto por uma fonte de tensão 325 V com 50Hz de frequência, quatro díodos, uma resistência de 6 Ohms, uma bobina e um condensador com valores distintos ao longo do tempo. Para a obtenção dos valores experimentais, foram necessários dois medidores de tensão e dois medidores de corrente para que assim fosse possível a verificação destes valores.

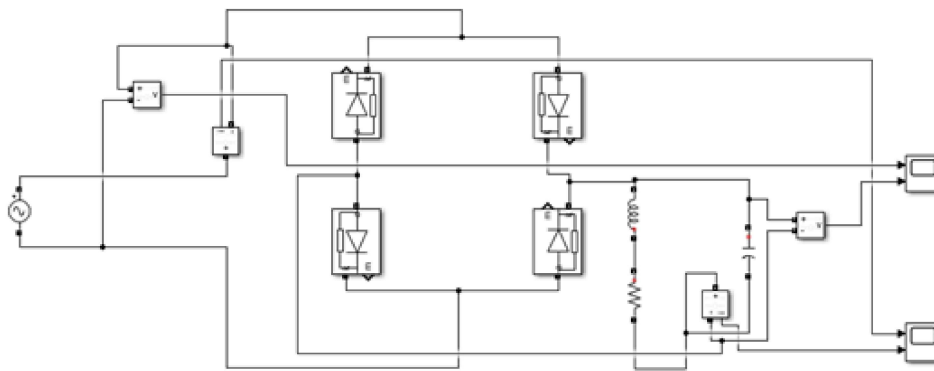


Figura 5.4 – Modelo do Retificador monofásico em Simulink

Posto isto, ao testar o retificador monofásico foram retirados cinco valores de THD% para assim se estudar a variação do mesmo, contando com o gráfico da corrente RMS (root mean square) que é a raiz do valor quadrático médio, ou simplesmente valor eficaz, e contando também com o gráfico do THD, para então este retificador poder ser utilizado na rede IEEE 13, visto que esta é a única rede deste projeto com parte

monofásica.

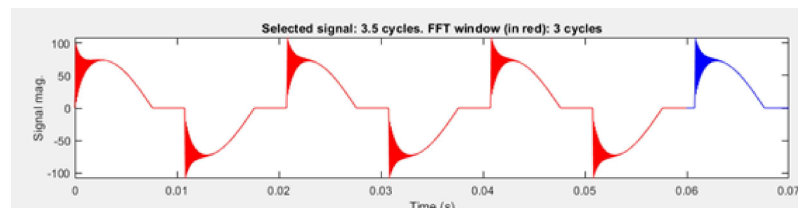


Figura 5.5 – Forma de onda com $I_{RMS}=46,28$ A

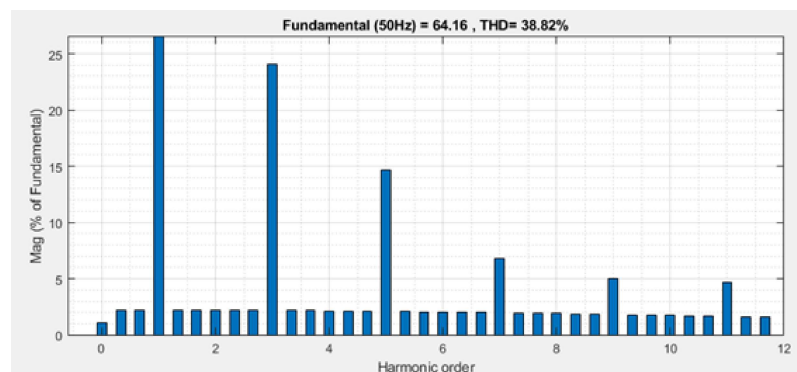


Figura 5.6 – Espectro harmónico com THD=38,82%

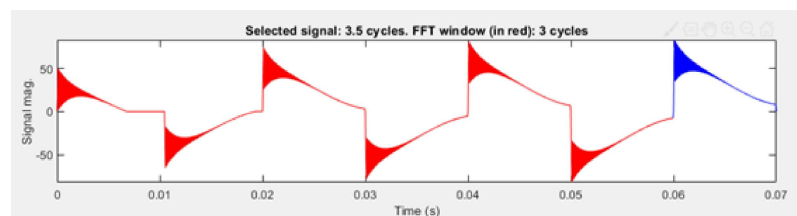


Figura 5.7 – Forma de onda com $I_{RMS}=37,7$ A

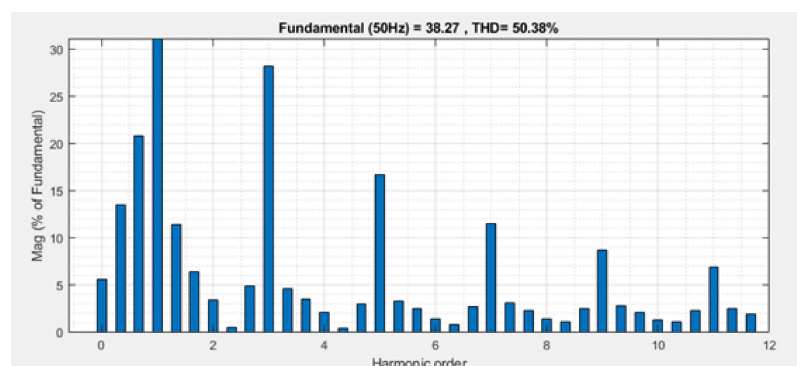


Figura 5.8 – Espectro harmónico com THD=50,38%

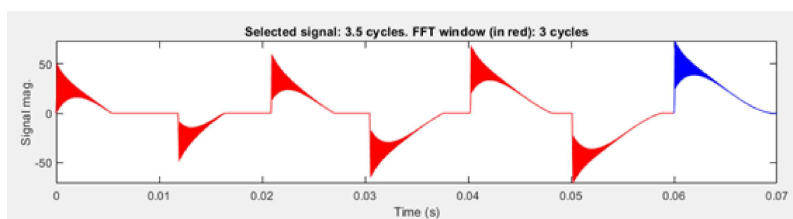


Figura 5.9 – Forma de onda com $I_{RMS}=29,3$ A

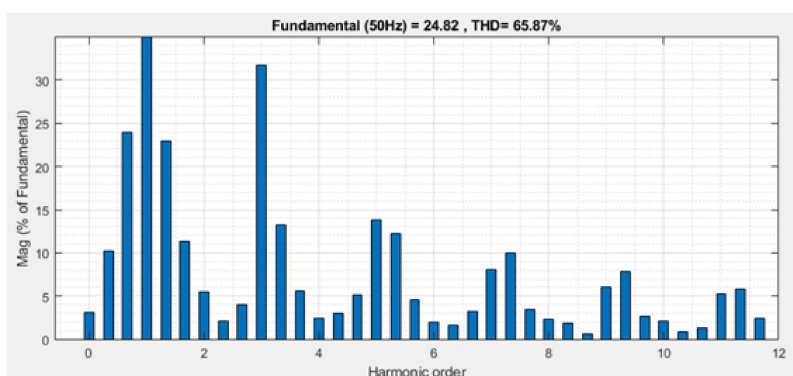


Figura 5.10 – Espectro harmónico com THD=65,87%

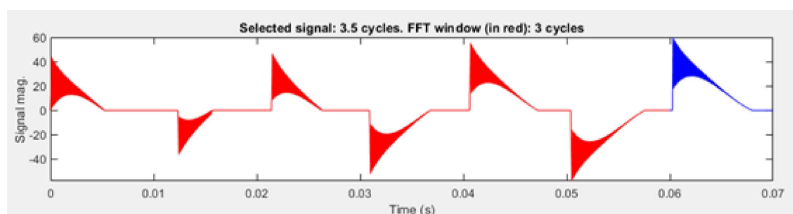


Figura 5.11 – Forma de onda com $I_{RMS}=22$ A

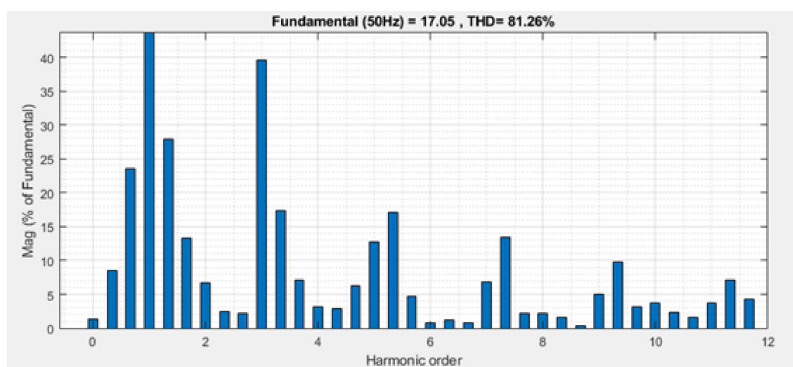


Figura 5.12 – Espectro harmónico com THD=81,26%

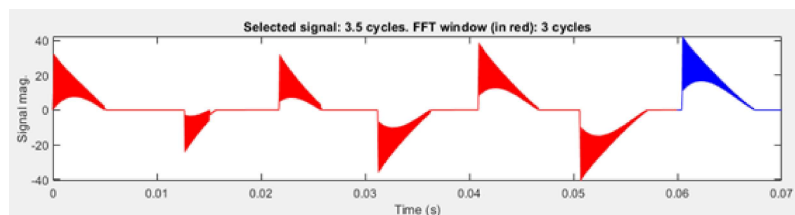


Figura 5.13 – Forma de onda com $I_{RMS}=14,7$ A

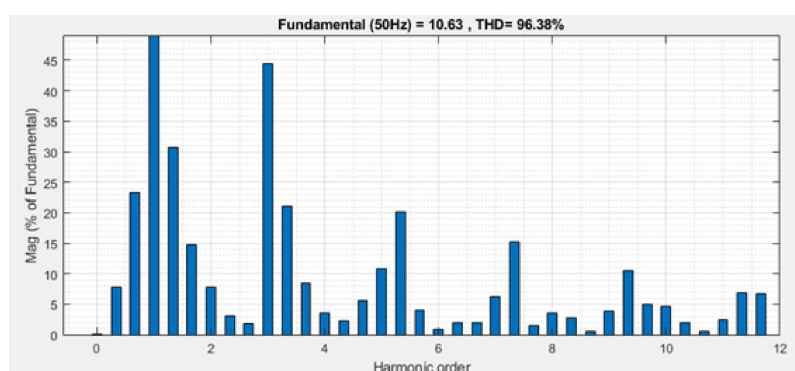


Figura 5.14 – Espectro harmónico com THD=96,38%

Pela análise dos gráficos presentes na figura 5.5 até 5.14 é notável que à medida que o THD aumenta a corrente diminui, tendo então proporcionalidade inversa, no gráfico de I_{RMS} é notório o aumento do ruído. Desprezando os harmônicos iniciais, o harmônico que mais se acentua neste retificador monofásico é o harmônico 3, o que vai de encontro ao esperado bem como as expressões demonstradas no capítulo 3.

Na Figura 5.15 está representado o retificador trifásico elaborado para este projeto, que é composto por uma fonte de tensão 400 V com 50Hz de frequência, seis tiristores, uma resistência de 5 Ohms, uma bobina e um condensador com valores distintos ao longo do tempo, pelo mesmo motivo referido anteriormente, conta também com seis medidores de tensão e dois medidores de corrente para assim poderem ser obtidos os valores necessários para a elaboração dos gráficos presentes nas figuras seguintes.

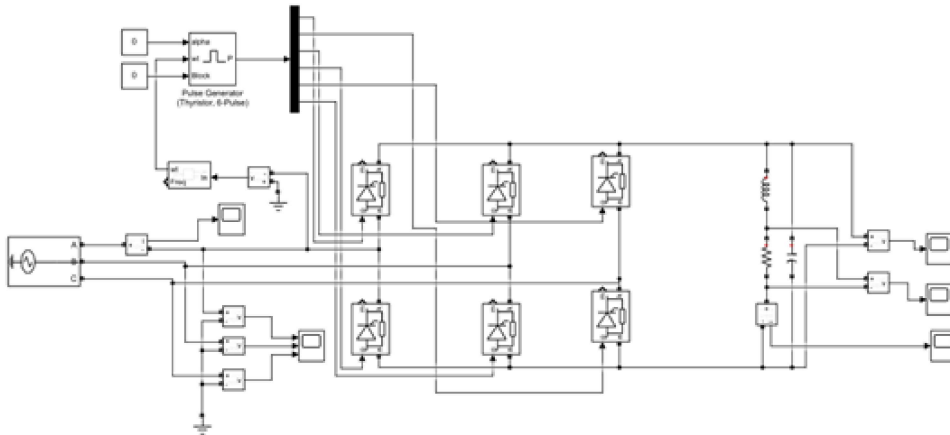


Figura 5.15 – Modelo do Retificador Trifásico em Simulink

Posto isto, ao testar o retificador trifásico foram retirados cinco valores de THD% para assim se estudar a variação do mesmo, contando com o gráfico da corrente RMS, e contando também com o gráfico da distorção harmónica total, exatamente como o retificador monofásico, para então este retificador poder ser utilizado tanto na rede IEEE 13 como na rede IEEE 33, visto terem as duas redes nós trifásicos.

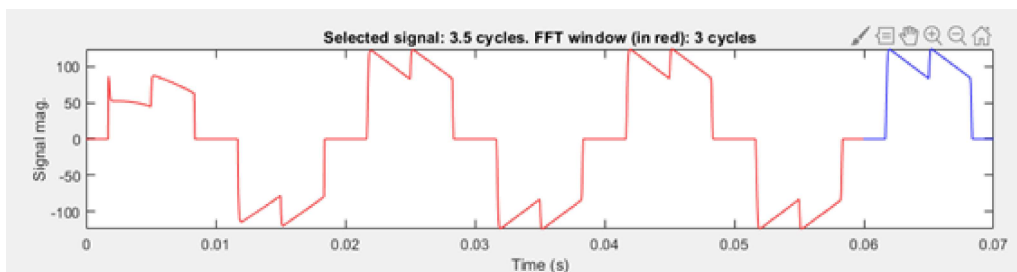


Figura 5.16 – Forma de onda com $I_{RMS}=104,9A$

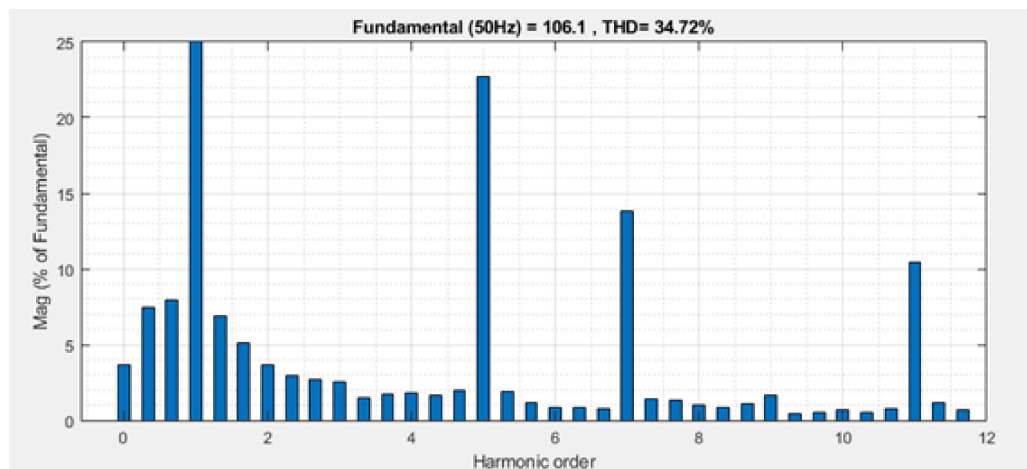


Figura 5.17 – Espectro harmónico com THD=34,72%

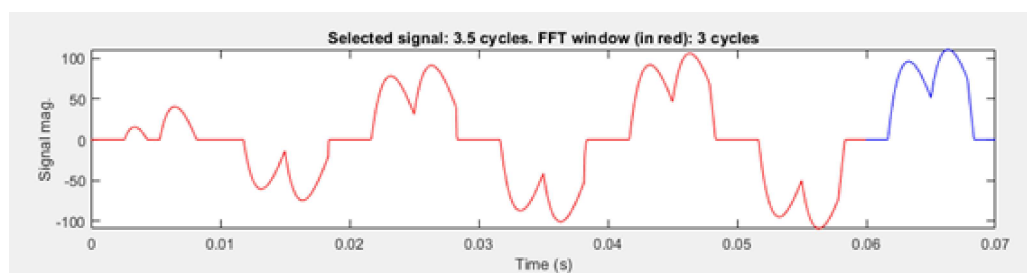


Figura 5.18 – Forma de onda com $I_{RMS}=91,23$ A

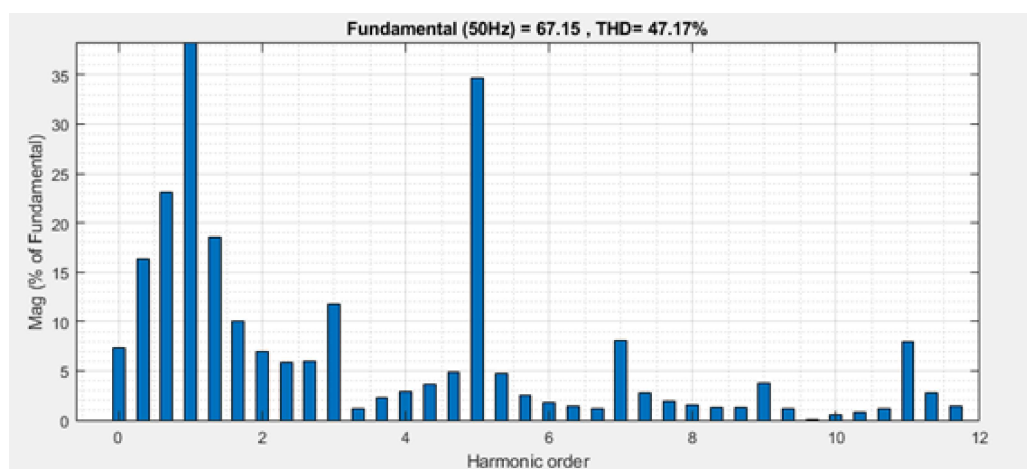


Figura 5.19 – Espectro harmónico com THD=47,17%

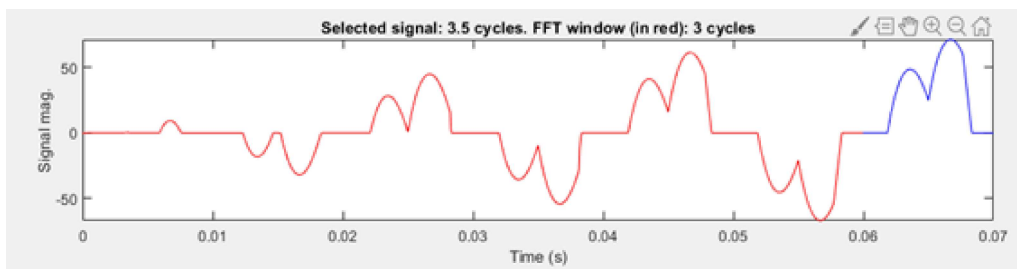


Figura 5.20 – Forma de onda com $I_{RMS}=71,6$ A

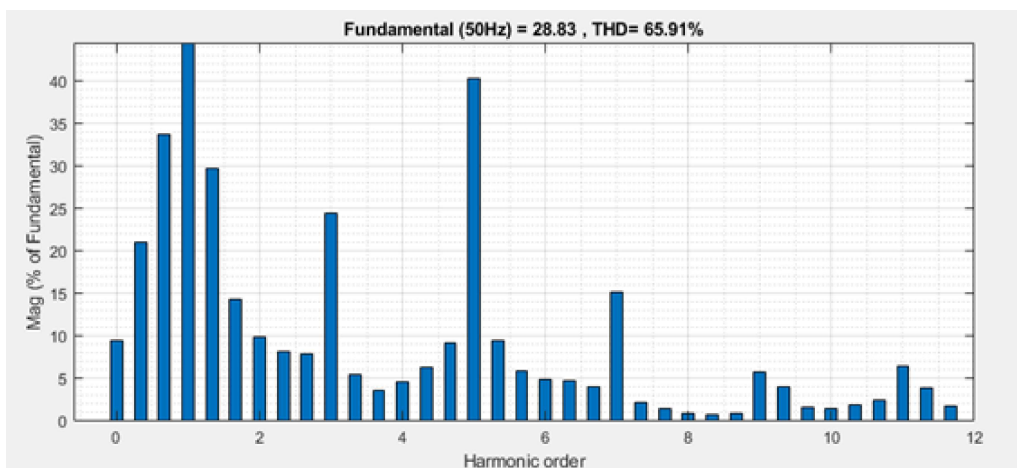


Figura 5.21 – Espectro harmónico com THD=65,91%

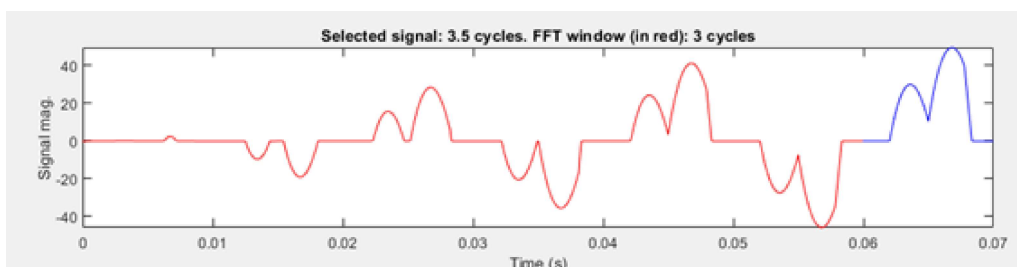


Figura 5.22 – Forma de onda com $I_{RMS}=65,25$ A

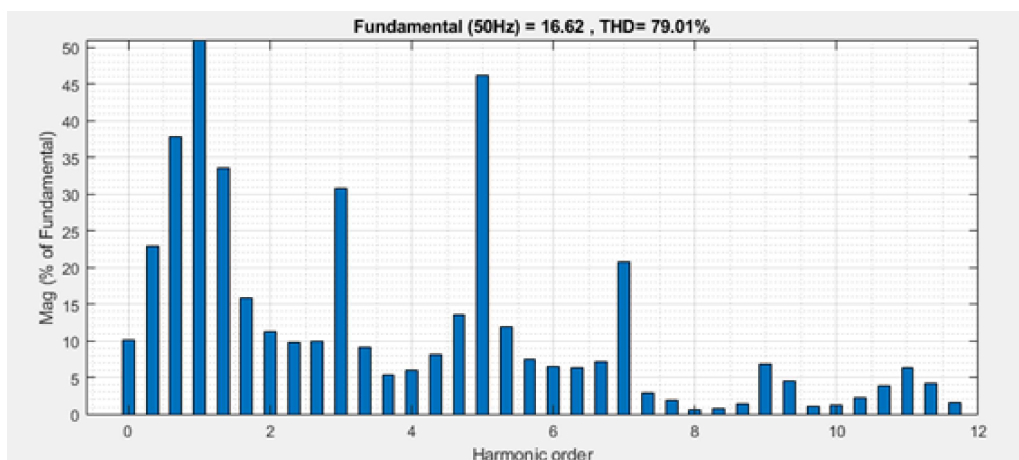


Figura 5.23 – Espectro harmónico com THD=79,01%

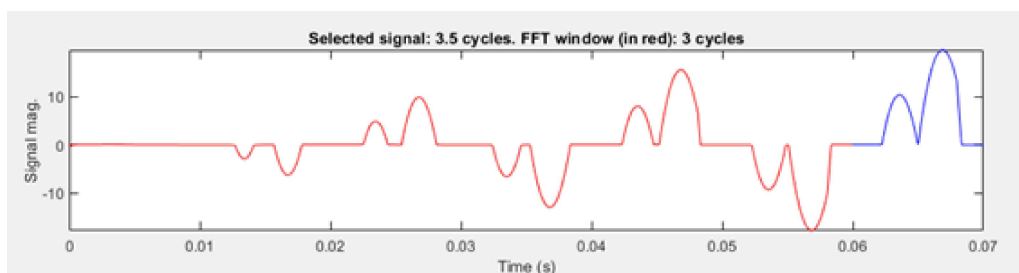


Figura 5.24 – Forma de onda com $I_{RMS}=56$ A

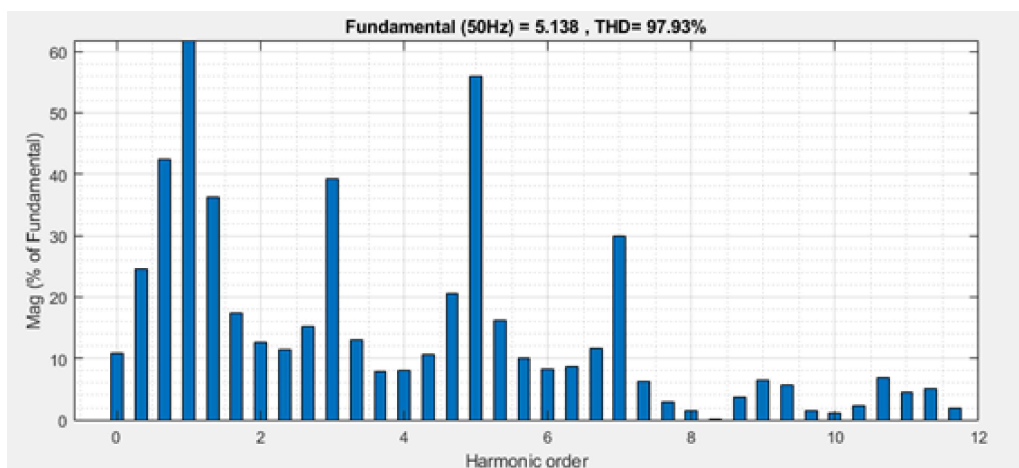


Figura 5.25 – Espectro harmónico com THD=97,93%

Analisando os presentes nas figuras 5.16 até 5.25, à medida que o THD aumenta a corrente diminui o que também foi notado no retificador monofásico. Desprezando

os harmónicos iniciais, o harmónico que mais se acentua no retificador trifásico é o harmónico 5 pois é ímpar e não é múltiplo de 3 o que vai de encontro à parte teórica e expressões referidas no capítulo 3.

5.3 Rede de 13 Barramentos

Com as ECVE (retificadores devidamente projetados anteriormente) e sabendo assim o seu comportamento ligadas a uma fonte de tensão, foram então colocadas nas redes elétricas. A primeira rede a ser testada foi a rede IEEE 13 [43], visto ser uma rede com um número reduzido de nós, proporcionou uma execução menos demorada das experiências executadas, bem como menos complexa do que a rede de 33 nós. A figura 5.26 mostra o modelo da rede IEEE 13 proporcionado pelo MatLab (IEEE 13 Node Test Feeder)

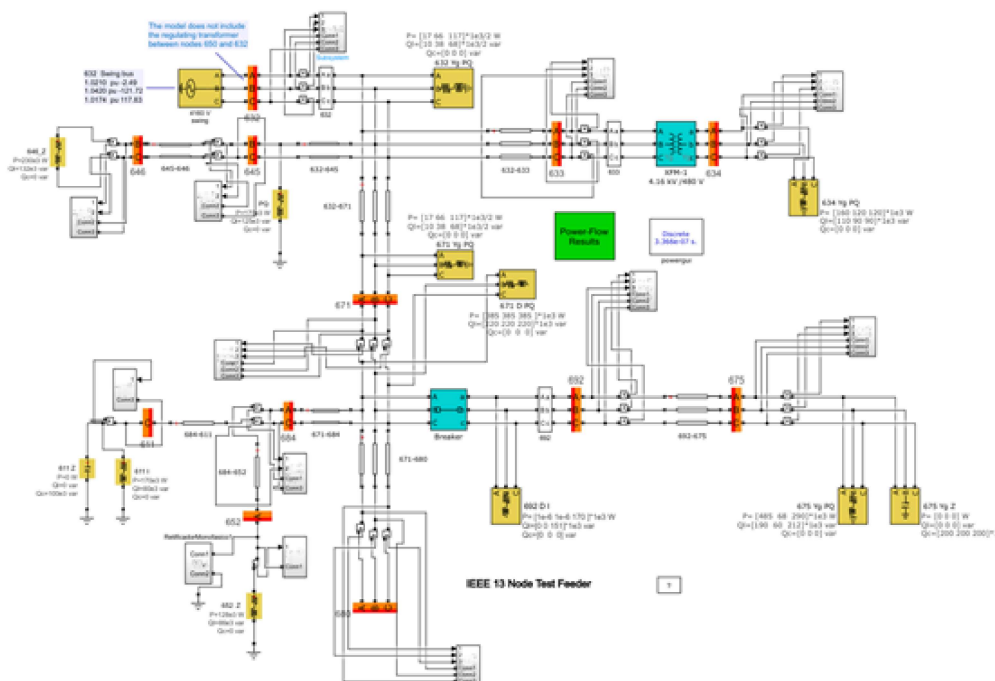


Figura 5.26 – Modelo IEEE 13 em Simulink

Com uma breve análise ao IEEE 13 *Node Test Feeder* pode ser notado que na sequência de cada nó foram colocados blocos medidores, pois estes não fazem parte do modelo original, foram colocados com o intuito de obter os valores de tensão e corrente eficaz, bem como os THD% da tensão e da corrente, a figura 5.27 mostra como os blocos medidores são constituídos:

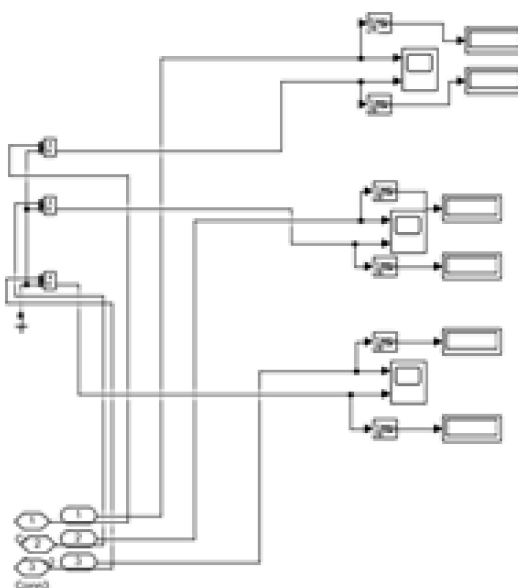


Figura 5.27 – Bloco medidor projetado em Simulink

Com a ajuda deste bloco medidor, as medições foram efetuadas ao colocar os retificadores em cada nó da rede, podendo-se assim saber qual o melhor e o pior nó para que fosse colocada uma ECVE estando assim um dos objetivos do projeto cumpridos. A tabela 5.1 ajuda a assimilar os nós do IEEE 13 *Node Test Feeder* com os nós dos gráficos mostrados de seguida, para uma melhor compreensão dos mesmos.

Tabela 5.1- Nós do Gráfico vs Nós da Rede

Nó do Gráfico	Nó da Rede
1	632
2	633
3	634
4	645
5	646
6	671
7	675
8	692
9	680
10	684
11	611
12	652

5.3.1 Melhor Opção - 1º Caso de estudo

Ao efetuar as medições e analisando os valores dos blocos medidores para cada nó (tendo a ECVE sido colocada em cada nó da rede) foi descoberto que o nó com menores oscilações foi o nó 634 (nó trifásico) (apenas foi colocado uma das fases pois o sistema é equilibrado):

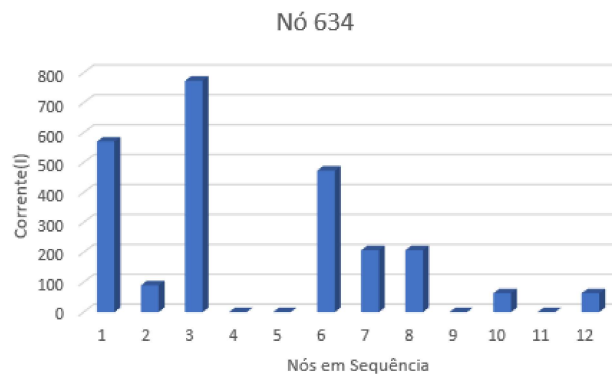


Figura 5.28 – I_{RMS} com ECVE no nó 634

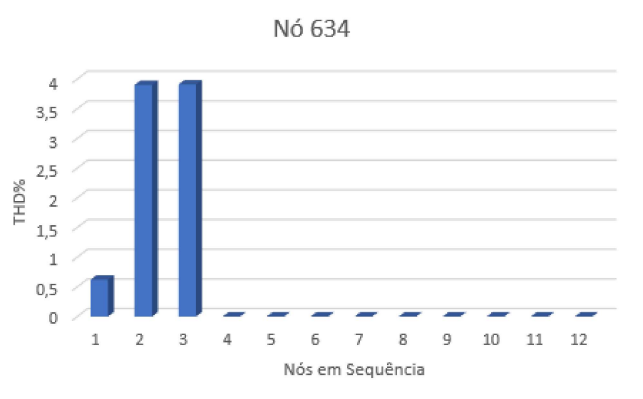


Figura 5.29 – THD da Corrente com ECVE no nó 634

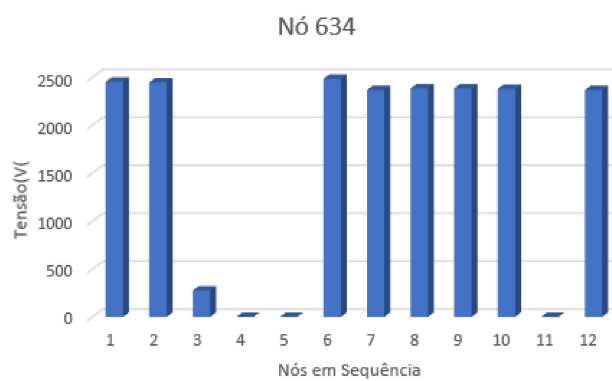


Figura 5.30 – V_{RMS} com ECVE no nó 634

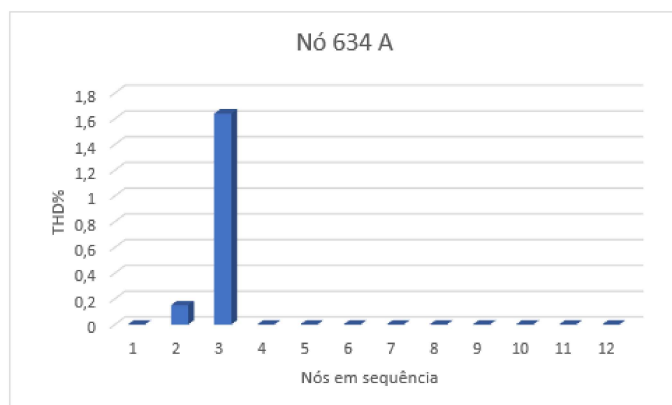


Figura 5.31 – THD da Tensão com ECVE no nó 634

Pela análise dos gráficos presentes na figura 5.28 até 5.31 pode-se constatar que os valores de THD da corrente variam entre 0 e 4% podendo assim afirmar que são valores bastante baixos, no gráfico do THD da tensão apenas o nó 3 que é respectivamente o nó 634 apresenta um valor mais elevado sendo este de apenas 1,6% valores estes que fazem deste nó o mais propício a ter uma ECVE.

5.3.2 Pior Opção - 2º Caso de estudo

Ao efetuar as medições e analisando os valores dos blocos medidores para cada nó (tendo a ECVE sido colocada em cada nó da rede) foi descoberto que o nó com maiores oscilações foi o nó 671 (nó trifásico) (apenas foi colocado uma das fases pois o sistema é equilibrado):

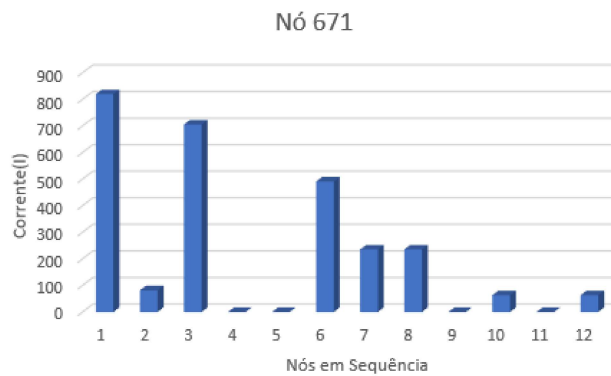


Figura 5.32 – I_{RMS} com ECVE no nó 671

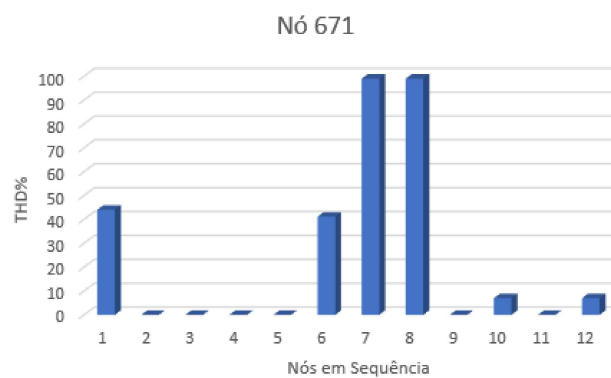


Figura 5.33 – THD da Corrente com ECVE no nó 671

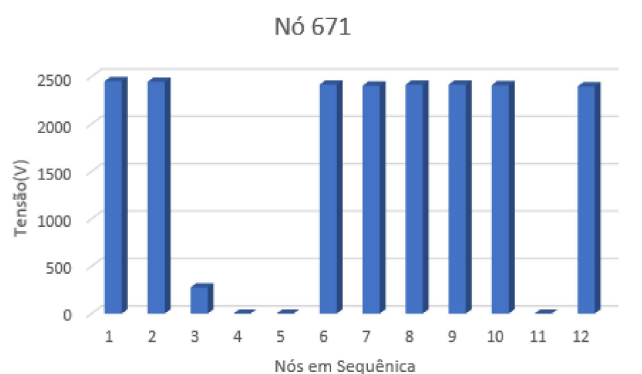


Figura 5.34 – V_{RMS} com ECVE no nó 671



Figura 5.35 – THD da Tensão com ECVE no nó 671

Ao analisar os gráficos presentes nas figuras 5.32 até 5.35, é notório que valores de THD da corrente estão bastante acentuados nos nós 7 e 8 que são respetivamente o nó 675 e o 692 chegando a valores de 98%. olhando para o gráfico do THD da tensão observa-se que todos os valores mais acentuados recaem nas casas entre 25 e 30% sendo estes um total de 6 nós, valores estes que fazem deste nó o menos propício a ter uma ECVE.

5.4 Rede de 33 Barramentos

A próxima rede a ser testada foi a IEEE 33 [44], visto ser uma rede com mais nós à partida era de se esperar uma maior complexidade, mas é uma rede unicamente trifásica o que torna mais fácil a sua manipulação. A figura 5.36 mostra o modelo IEEE 33 proporcionado pelo MatLab (*IEEE 33 Node Test Feeder*):

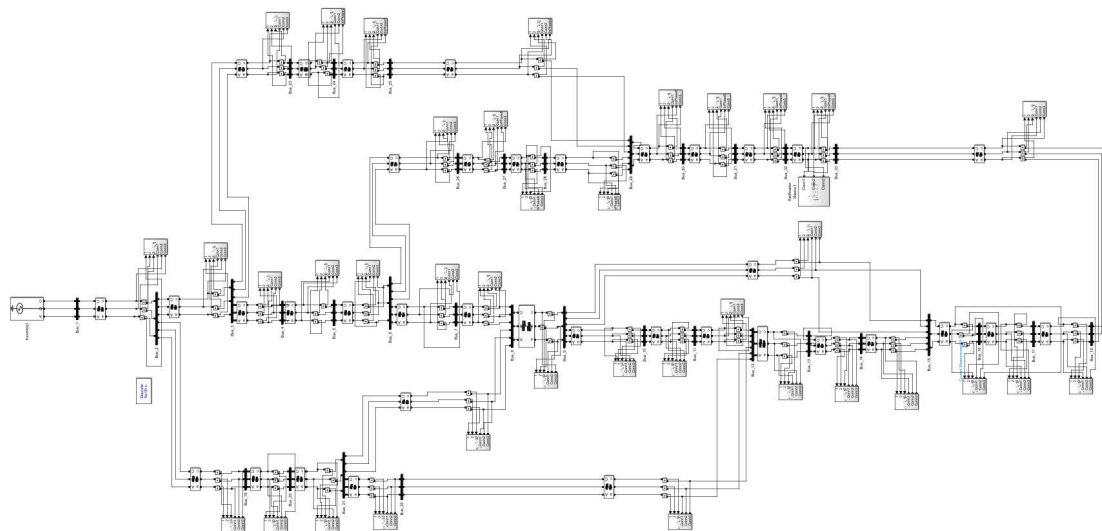


Figura 5.36 – Modelo da Rede IEEE 33 em Simulink

Tal como na rede IEEE 13 foram colocados blocos medidores na sequência de cada nó da rede IEEE 33, conseguindo assim a obtenção dos valores que serão posteriormente apresentados. A figura 5.37 mostra a composição dos blocos:

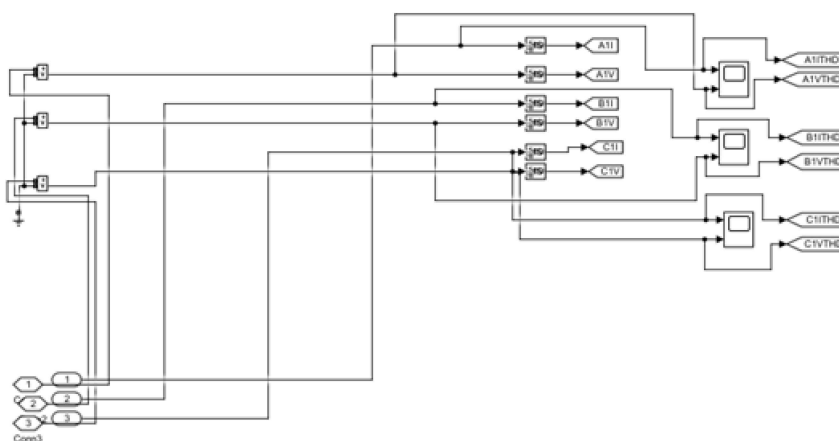


Figura 5.37 – Bloco Medidor projetado em Simulink

Estes blocos medidores são utilizados para obter os valores RMS da corrente e da

tensão bem como o THD em cada um dos nós da rede. Foi feito exatamente o mesmo processo com esta rede, tal como na rede anterior, foram colocadas as ECVE's em cada nó da rede, para assim se conseguir saber qual o melhor e o pior nó para que fosse colocada a mesma. A tabela 5.2 ajuda a assimilar os nós do IEEE 33 *Node Test Feeder* com os nós dos gráficos mostrados de seguida, para uma melhor compreensão dos mesmos.

Tabela 5.2- Nós do Gráfico vs Nós da Rede

Nó do Gráfico	Nó da Rede	Nó do Gráfico	Nó da Rede	Nó do Gráfico	Nó da Rede	Nó do Gráfico	Nó da Rede
1	1	12	9a	23	19	34	29
2	2a	13	9b	24	20	35	30
3	2b	14	10	25	21a	36	31
4	3a	15	11	26	21b	37	32
5	3b	16	12	27	22		
6	4	17	13	28	23		
7	5	18	14	29	24		
8	6a	19	15	30	25		
9	6b	20	16	31	26		
10	7	21	17	32	27		
11	8	22	18	33	28		

5.4.1 Melhor opção - 3º Caso de estudo

Ao efetuar as medições e analisando os valores dos blocos medidores para cada nó (tendo a ECVE sido colocada em cada nó da rede) obteve-se que os nós com menores oscilações foram os nós 1 e 16, nesta rede foram escolhidos dois nós tanto com menores oscilações como com as maiores, para então se fazer o estudo com duas ECVE's tanto separadamente como ao mesmo tempo, tanto para o melhor caso como para o pior caso visto esta ser uma rede maior (apenas foi colocado uma das fases pois o sistema é equilibrado).

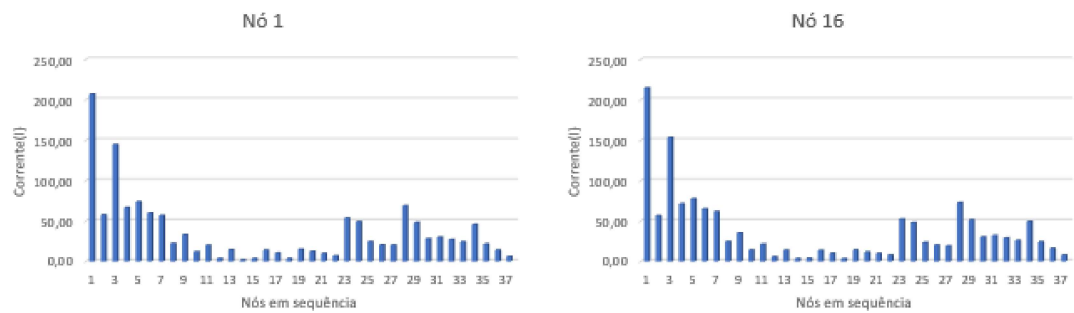


Figura 5.38 – I_{RMS} com ECVE no nó 1 e 16

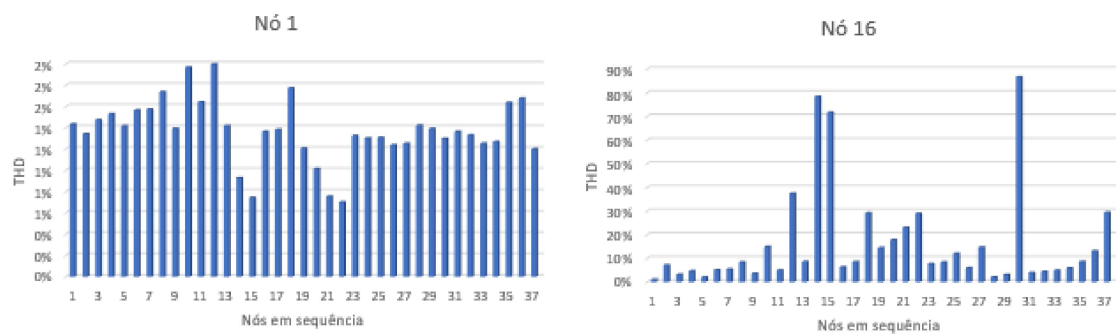


Figura 5.39 – THD da Corrente com ECVE no nó 1 e 16

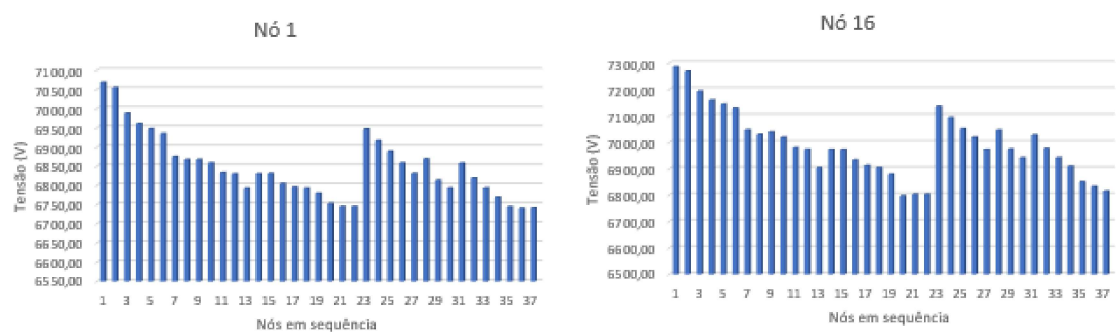


Figura 5.40 – V_{RMS} com ECVE no nó 1 e 16

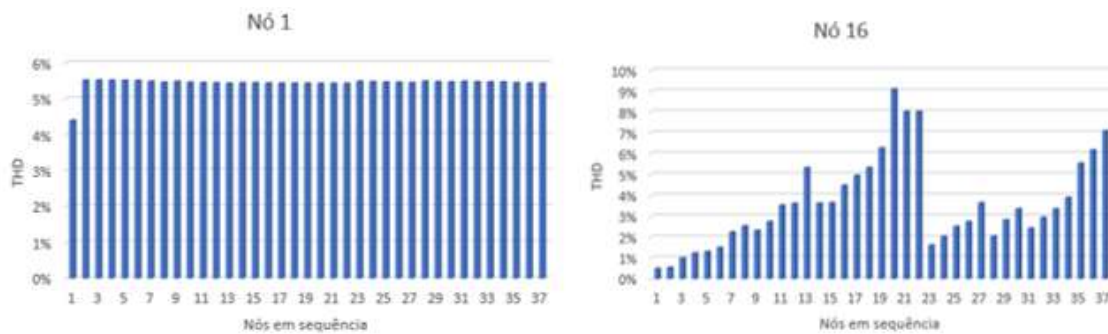


Figura 5.41 – THD da Tensão com ECVE no nó 1 e 16

Pela análise dos gráficos presentes na figura 5.38 até 5.41 observa-se que os valores V_{RMS} e I_{RMS} dos dois nós são bastante semelhantes, já os valores de THD na corrente no que diz respeito ao nó 1 são mínimos, no caso do nó 16 tem três nós com valores bastante acentuados chegando mesmo a 96% no caso do nó 30 do gráfico que diz respeito ao nó 25 da rede. Ao observar os valores THD da tensão, estes são baixos rondando os 5,5% no caso do nó 1 e não passando dos 9% no nó 16.

Ao fazer os testes com uma ECVE no nó 1 e outra no nó 16 em simultâneo, ou seja, duas ECVE's na rede obtiveram-se os valores que dizem respeito aos seguintes gráficos:

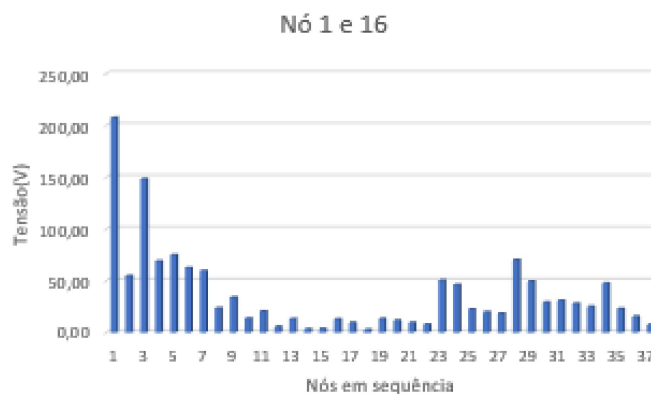


Figura 5.42 – I_{RMS} com ECVE no nó 1 e 16 em simultâneo

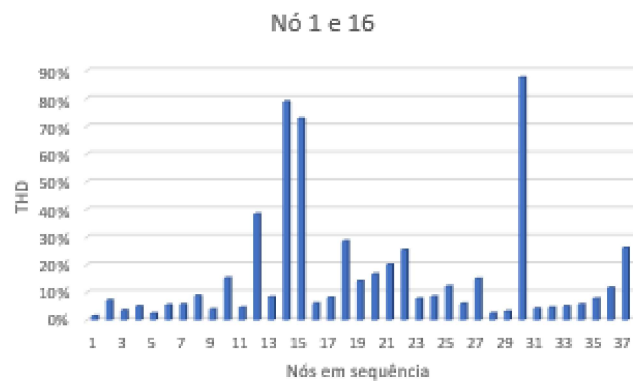


Figura 5.43 – THD da Corrente com ECVE no nó 1 e 16 em simultâneo

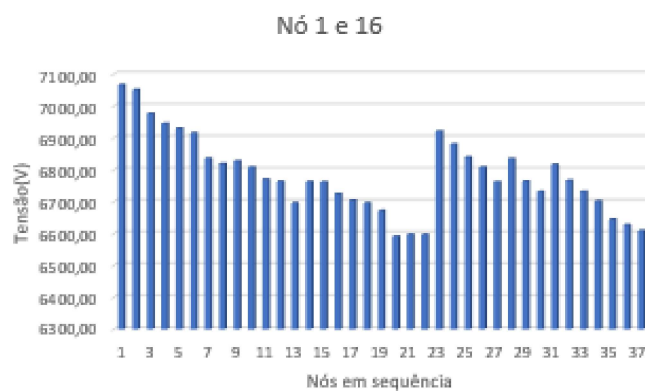


Figura 5.44 – V_{RMS} com ECVE no nó 1 e 16 em simultâneo

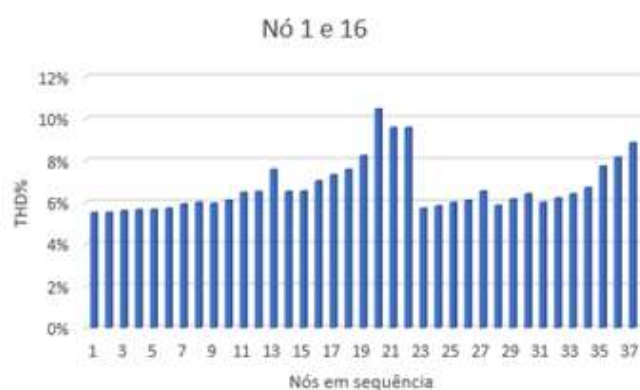


Figura 5.45 – THD da Tensão com ECVE no nó 1 e 16 em simultâneo

Como era de se esperar, os gráficos da corrente e da tensão eficaz sofreram alterações

mínimas no que diz respeito à aparência do gráfico visto os dois nós terem valores bastante semelhantes, no gráfico do THD da corrente os valores da ECVE no nó 16 sobrepõe-se aos valores da ECVE no nó 1 pois os valores no nó 1 eram bastante baixos. No gráfico do THD da tensão é de notar os valores dos dois gráficos visto estes terem valores que não ultrapassam os 10%.

5.4.2 Pior opção - 4º Caso de estudo

Ao efetuar as medições e analisando os valores dos blocos medidores para cada nó (tendo a ECVE sido colocado em cada nó da rede) obteve-se que os nós 22 e 25 (apenas foi colocado uma das fases pois o sistema é equilibrado):

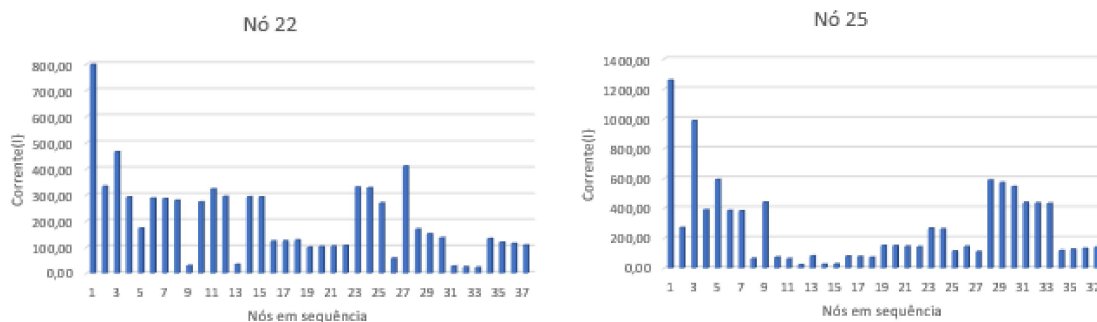


Figura 5.46 – I_{RMS} com ECVE no nó 22 e 25

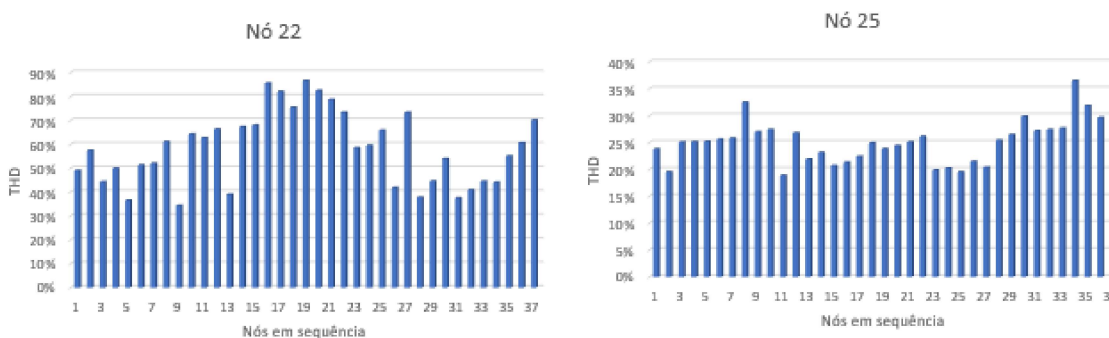


Figura 5.47 – THD da Corrente com ECVE no nó 22 e 25

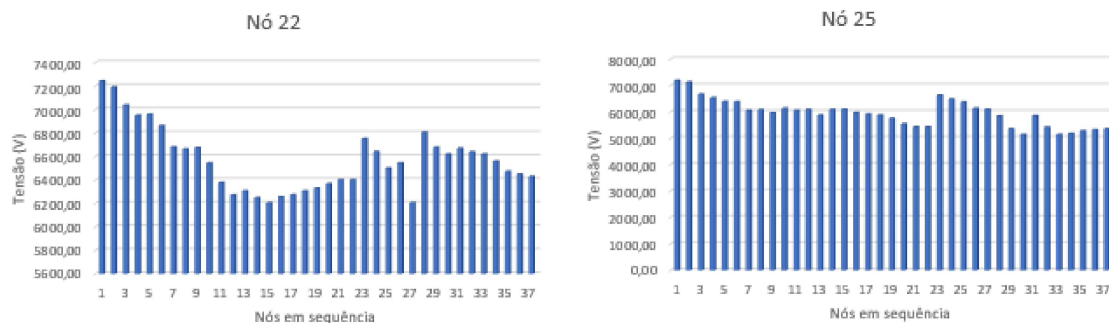


Figura 5.48 – V_{RMS} com ECVE no nó 22 e 25

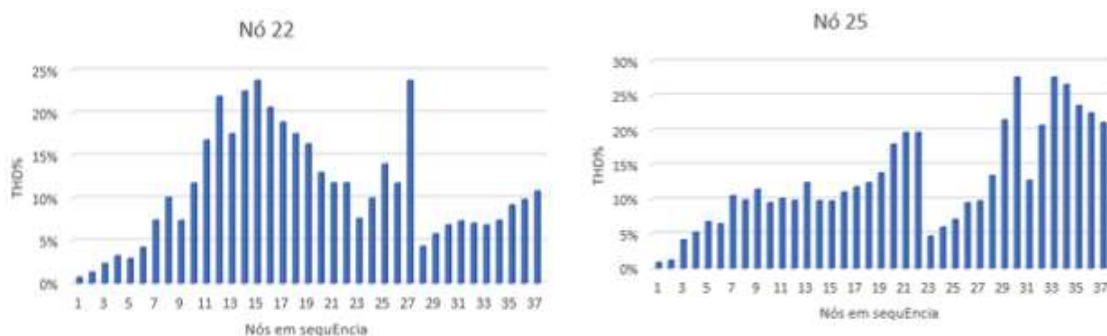


Figura 5.49 – THD da Tensão com ECVE no nó 22 e 25

De notar na comparação destes valores das duas ECVE's dos dois nós que no que diz respeito a valores de THD da corrente na ECVE no nó 22, esta tem valores bastante maiores do que na ECVE no nó 25 chegando estes a ser de 85% enquanto na ECVE no nó 25 o valor máximo é 36%. No entanto falando de THD da tensão os valores já se aproximam mais sendo o valor máximo da EVVE no nó 25 maior do que o da ECVE no nó 22.

Ao fazer os testes com uma ECVE no nó 22 e outra no nó 25 em simultâneo, ou seja, duas ECVE's na rede obtiveram-se os valores que dizem respeito aos gráficos presentes na figura 5.50 até 5.53:

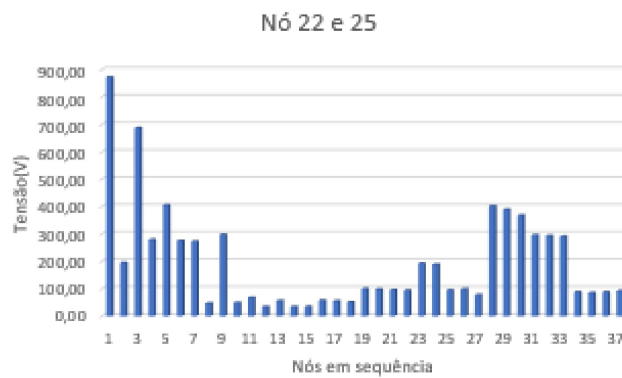


Figura 5.50 – I_{RMS} com ECVE no nó 22 e 25 em simultâneo

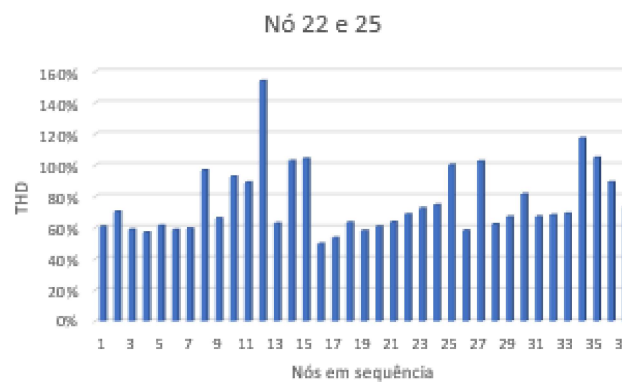


Figura 5.51 – THD da Corrente com ECVE no nó 22 e 25 em simultâneo

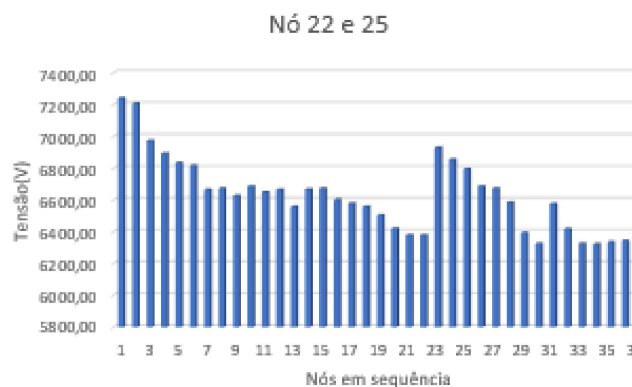


Figura 5.52 – V_{RMS} com ECVE no nó 22 e 25 em simultâneo

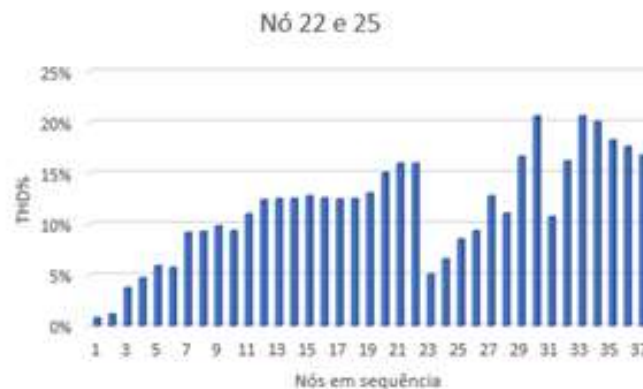


Figura 5.53 – THD da Tensão com ECVE no nó 22 e 25 em simultâneo

Ao colocar as ECVE's em simultâneo no nó 22 e 25 é notório que no THD da corrente se obtiveram valores extremamente elevados chegando mesmo aos 157%. No que diz respeito aos gráficos restantes têm-se os valores esperados da utilização de duas ECVE's, vendo os gráficos dos dois nós separadamente presentes na figura 5.46 até 5.49.

5.5 Medidas mitigadoras de distorção harmónica

Chegando à última parte desta dissertação em que será proposta a utilização de filtros no retificador, em particular no 2º e 4º caso de estudo visto estes serem as piores opções na rede IEEE 13 e na rede IEEE 33 respetivamente. Pois se a ECVE puder ser colocada no nó da rede elétrica que gera o pior caso e mesmo assim não se notar uma alteração significativa no THD% da rede então a ECVE poderá ser colocada em qualquer nó da rede sem que se espere um THD% elevado permitindo assim uma maior diversidade de escolhas de posicionamento bem como uma maior facilidade de escolha, não sendo assim obrigatório que a ECVE seja colocada sempre nos nós com menos oscilações.

5.5.1 Dimensionamento dos Filtros

Os filtros projetados para o retificador são referentes aos harmônicos 5, 7 e 11, visto estes serem os harmônicos que geram maior impacto no THD% do retificador. A metodologia utilizada foi a seguinte tendo-se medido a Potência do circuito previamente, sendo esta de 62,9kW:

$$\begin{aligned}
 P &= \sqrt{3} * U * I_{rms} * \cos(\varphi_1) \\
 \equiv \cos(\varphi_1) &= \sqrt{3} * 400 * 104,9 * 62900 \\
 &\equiv \cos(\varphi_1) = 0,87
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

Com a equação 5.1 foi possível obter o $\cos(\varphi_1)$ que é o fator de potência como mostrado nos capítulos anteriores. De seguida pretende-se calcular IL mas para isso é necessário obter o $\cos(\varphi)$ da equação 5.2, utilizando o valor de THD de 36,55%:

$$\begin{aligned}
 f.p. &= \frac{\cos(\varphi)}{\sqrt{1 + THD^2}} \\
 &\equiv \cos(\varphi) = 0,92
 \end{aligned} \tag{5.2}$$

Tendo então todos os valores necessários para calcular o IL pela equação 5.3:

$$\begin{aligned}
 IL &= \frac{P}{\sqrt{3} * U * \cos(\varphi)} \\
 &\equiv IL = 99A
 \end{aligned} \tag{5.3}$$

Com o valor de IL e obtendo os valores de $I_h/I_1\%$ para cada harmônico pelo simulink foi possível chegar à tabela 5.3:

Tabela 5.3- Impacto da corrente em cada um dos harmónico

h	I _h (A)	I _h /I ₁ (%)
1	99	100
5	21,2	21,4
7	14	14,1
11	9,5	9,6
13	7,5	7,6
17	6,2	6,3
19	5,1	5,2
23	4,5	4,6
25	3,9	3,9

Será agora necessário o cálculo da potência reativa Q expresso pela equação 5.4:

$$Q = \sqrt{3} * U * I_{rms} * \sin(\varphi_1) \quad (5.4)$$

$$\equiv Q = 35,8 kVar$$

Mas este valor seria apenas utilizado se fosse pretendido apenas um filtro, e na verdade pretende-se anular os harmónicos 5, 7 e 11 sendo então necessária a divisão desta potência para os harmónicos e assim se poder calcular os valores das bobines e dos condensadores dos filtros, começando pelo harmónico 5:

$$Q_{f_5} = Q * \frac{I_n}{\sum_{n=2}^{25} I_n} \quad (5.5)$$

$$\equiv Q_{f_5} = 3,5 kVar$$

Com este valor de Q_{f_5} é possível então o cálculo de X_c pela equação 5.6:

$$\begin{aligned}
 X_c &= \frac{U^2}{Qf_5} \\
 \equiv X_c &= 45,7\Omega
 \end{aligned}
 \tag{5.6}$$

E utilizando o X_c pode se calcular o valor do condensador Cf_5 pela equação 5.7:

$$\begin{aligned}
 Cf_5 &= \frac{1}{w * X_c} \\
 \equiv Cf_5 &= 69,6\mu F
 \end{aligned}
 \tag{5.7}$$

Na condição de ressonância $XL_5 = X_c$ pode ser calculado o valor da bobine para o filtro do harmónico 5:

$$\begin{aligned}
 wL_5 &= \frac{1}{wCf_5} \\
 \equiv w &= \frac{1}{\sqrt{L_5 * Cf_5}} \\
 \equiv L_5 &= 5,8mH
 \end{aligned}
 \tag{5.8}$$

Obtidos então os valores do filtro para o harmónico 5, os mesmos cálculos foram efetuados para os harmónicos 7 e 11 sendo os seus valores de $46,5\mu F$, $4,4mH$ e $31,8\mu F$, $2,6mH$ respetivamente.

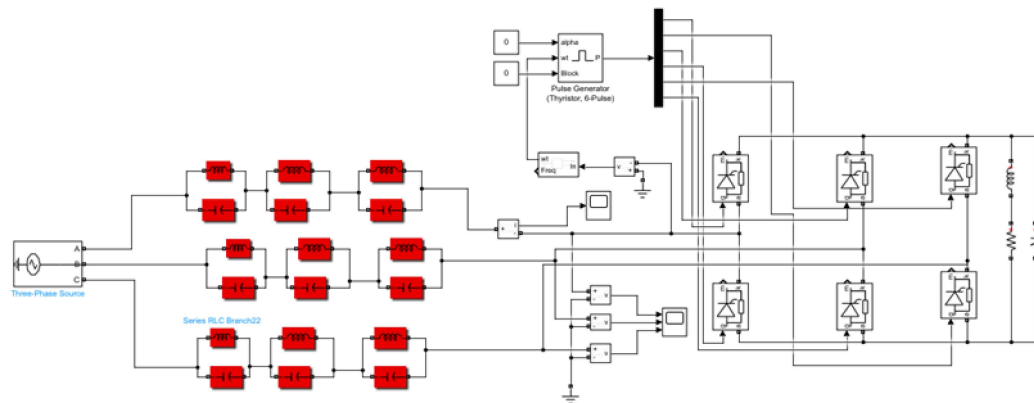


Figura 5.54 – ECVE (Retificador Trifásico) com filtro

Os filtros estão conectados em série com a alimentação, numa associação LC paralela, de modo a bloquear a passagem das parcelas das correntes indesejadas, como mostra a figura 5.54.

Comparação da corrente da ECVE sem filtro e com filtro

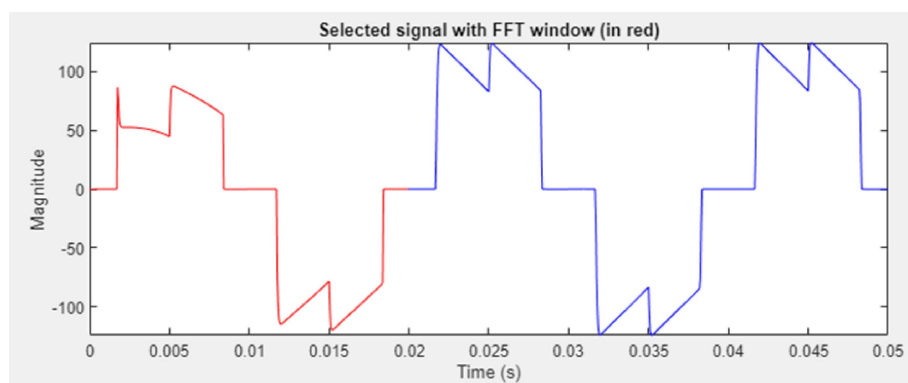


Figura 5.55 – I_{RMS} da ECVE sem filtro=104,9A

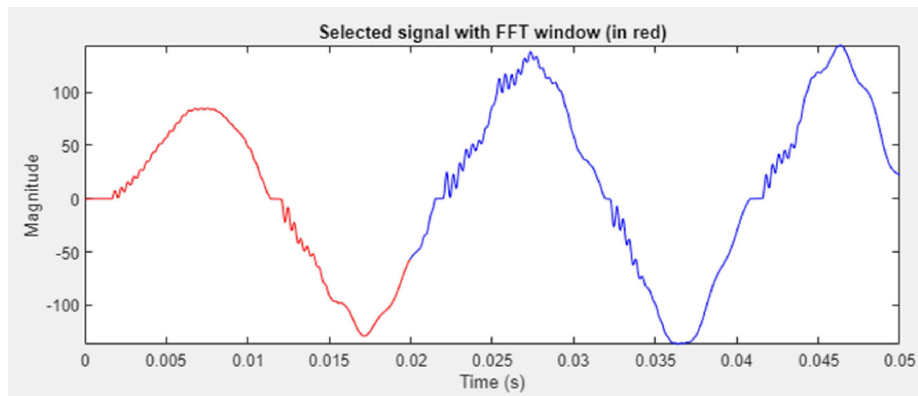


Figura 5.56 – I_{RMS} da ECVE com filtro=60,3A

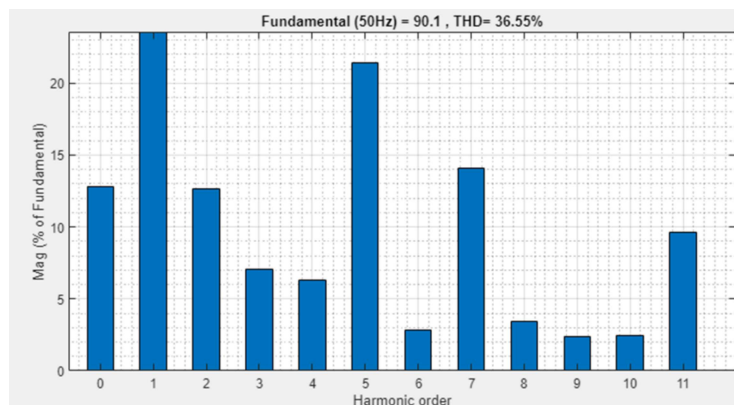


Figura 5.57 – ECVE sem filtro de THD=36,55%

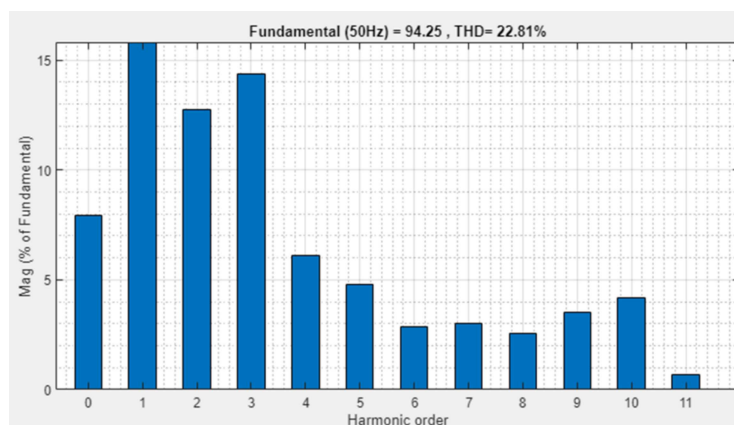


Figura 5.58 – ECVE com filtro de THD=22,81%

Ao analisar os gráficos acima pode-se concluir que com o filtro não só a corrente eficaz baixou, mas também o THD% que baixou aproximadamente 14% bem como se pode observar que os harmónicos 5; 7 e 11 que estão em destaque no gráfico da ECVE não filtrada, tiveram uma diminuição bastante acentuada, tendo assim o filtro atingido o objetivo, apenas o harmónico 3 sofreu um aumento de 7%.

5.5.2 2º Caso de Estudo

Para começar a verificação das alterações que os filtros causaram na rede elétrica, foi utilizado como caso de estudo inicial o 2º caso de estudo que como referido, é o pior caso da rede IEEE 13:

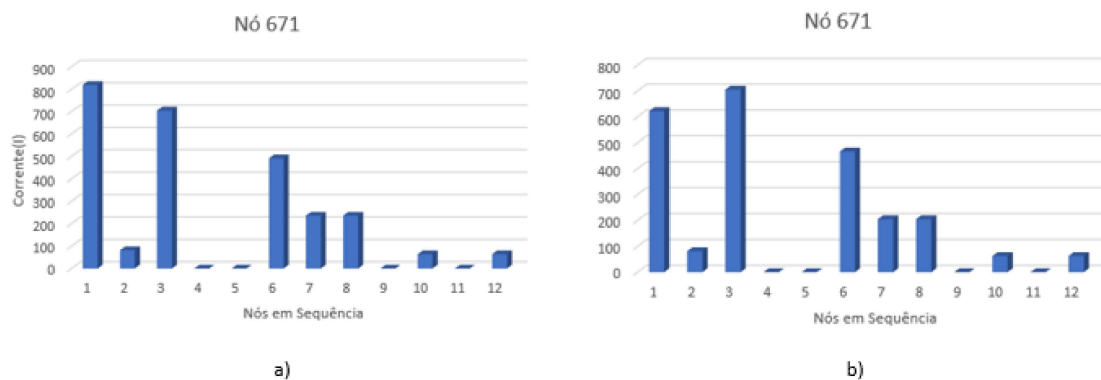


Figura 5.59 – I_{RMS} com ECVE no nó 671

Ao comparar os dois gráficos da figura 5.59 em que a) é o gráfico sem filtro e b) o gráfico com filtro, pode-se observar uma diminuição na corrente bem como aconteceu nas comparações entre a ECVE trifásica filtrada e não filtrada, mas de notar que no gráfico com filtro o pico é no nó 3 e não no nó 1 (nó 634 e 632 respetivamente).

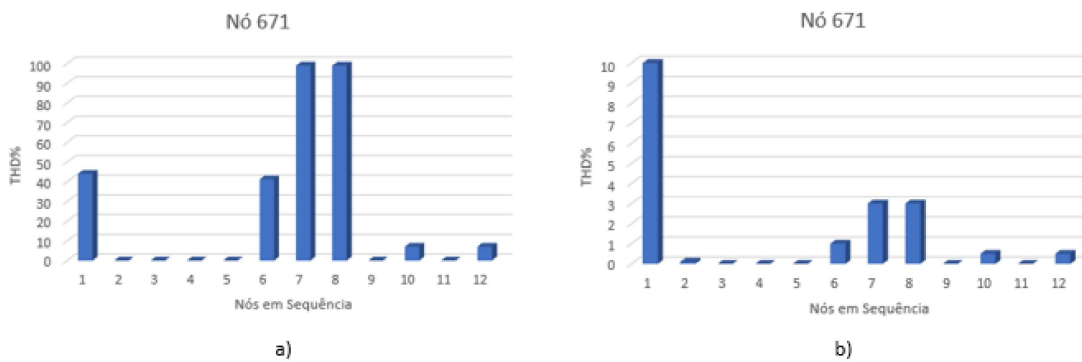


Figura 5.60 – THD do I_{RMS} com ECVE no nó 671

Ao comparar os dois gráficos da figura 5.60 em que a) é o gráfico sem filtro e b) o gráfico com filtro, é notória a diminuição do THD% em todos os nós, sendo que no nó 1 (nó 632) houve uma diminuição de 30% e no nó 7 e 8 (nó 675 e 692) houve a maior baixa de THD% e a mais necessária baixando de quase 100% para apenas 3%.

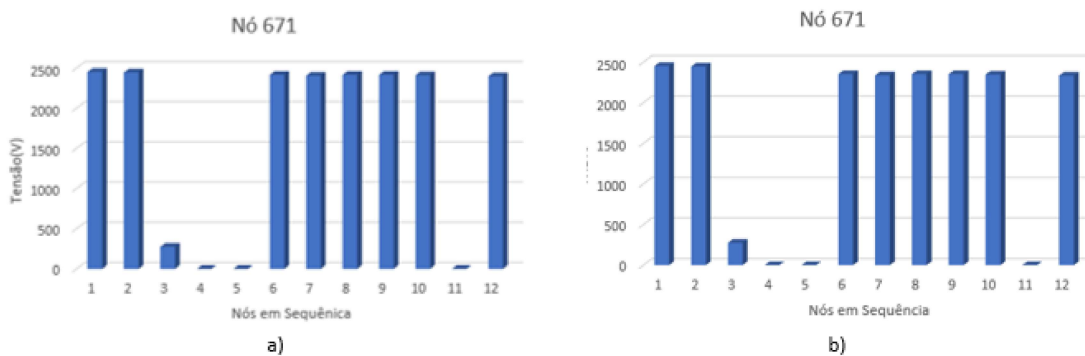


Figura 5.61 – V_{RMS} com ECVE no nó 671

Ao comparar os dois gráficos da figura 5.61 em que a) é o gráfico sem filtro e b) o gráfico com filtro, pode ser observado que com o filtro a tensão não sofreu qualquer alteração no que diz respeito ao seu valor eficaz em todos os nós da rede IEEE 13.

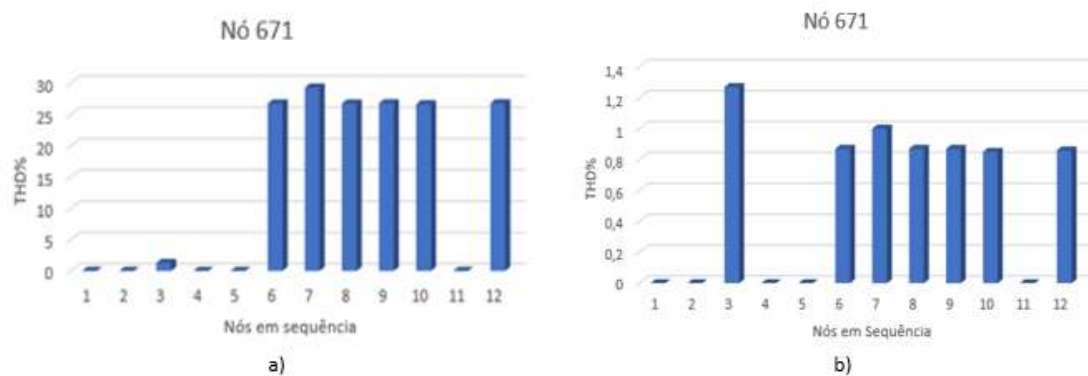


Figura 5.62 – THD do V_{RMS} no nó 671

Ao comparar os dois gráficos da figura 5.62 em que a) é o gráfico sem filtro e b) o gráfico com filtro, à primeira vista parece que o THD% aumentou no nó 3 (nó 634) mas isso é porque o THD% nos nós com valores mais elevados estavam entre 25 e 30% passando agora para valores aproximados de 1%, sendo o valor do THD% no nó 3 antes do filtro de 1,27%, mostrando assim uma melhoria significativa no THD% da tensão em todos os nós da rede.

Tabela 5.4- Rede com filtro vs sem filtro

	Corrente		Tensão	
	Pico(A)	THD max(%)	Pico(V)	THD max(%)
Nó 671 s\filtro	800	99	2452	28,4
Nó 671 c\filtro	696	9,8	2420	1,21

Concluindo então o 2º caso de estudo que era a pior opção para a rede IEEE 13 com melhorias bastante acentuadas devido à colocação do filtro no retificador pois este seria a ECVE que iria ser colocada na rede.

5.5.3 4º Caso de Estudo

Passando para a análise das alterações impostas pelos filtros no 4º caso de estudo onde estes são os piores casos da rede IEEE 33:

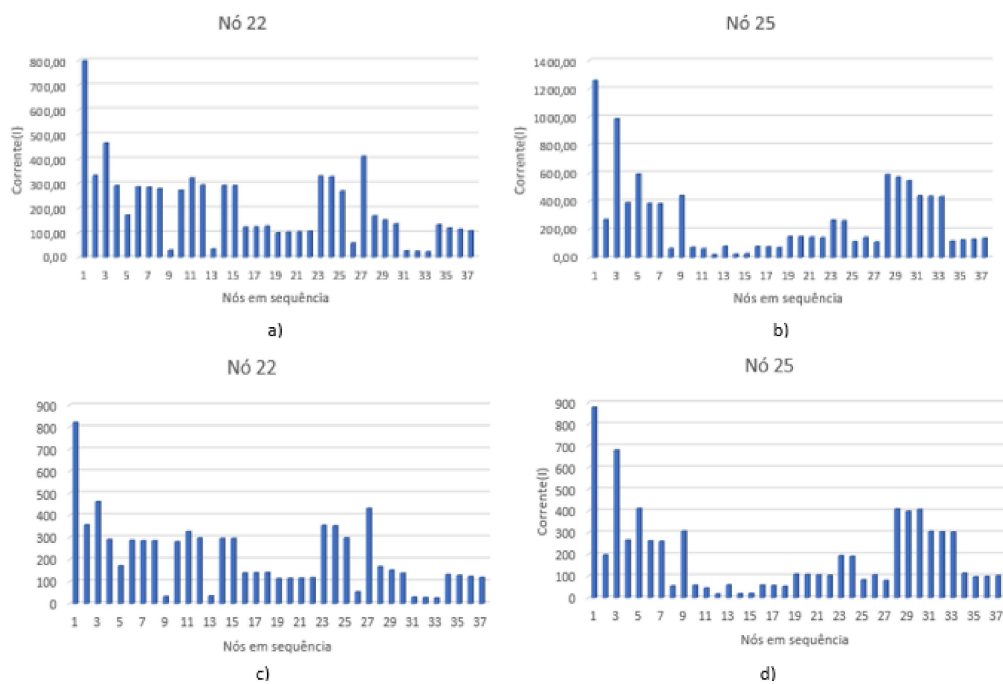


Figura 5.63 – I_{RMS} com ECVE no nó 22 e 25

Como se pode observar pela figura 5.63 em que a) e b) são os gráficos não filtrados, e c) e d) são os gráficos filtrados, pode se concluir que com o filtro na ECVE do nó 22 não houve alterações de corrente significativas, enquanto que com o filtro na ECVE do nó 25 houve uma diminuição bastante acentuada da corrente chegando mesmo por baixar para metade em alguns nós.

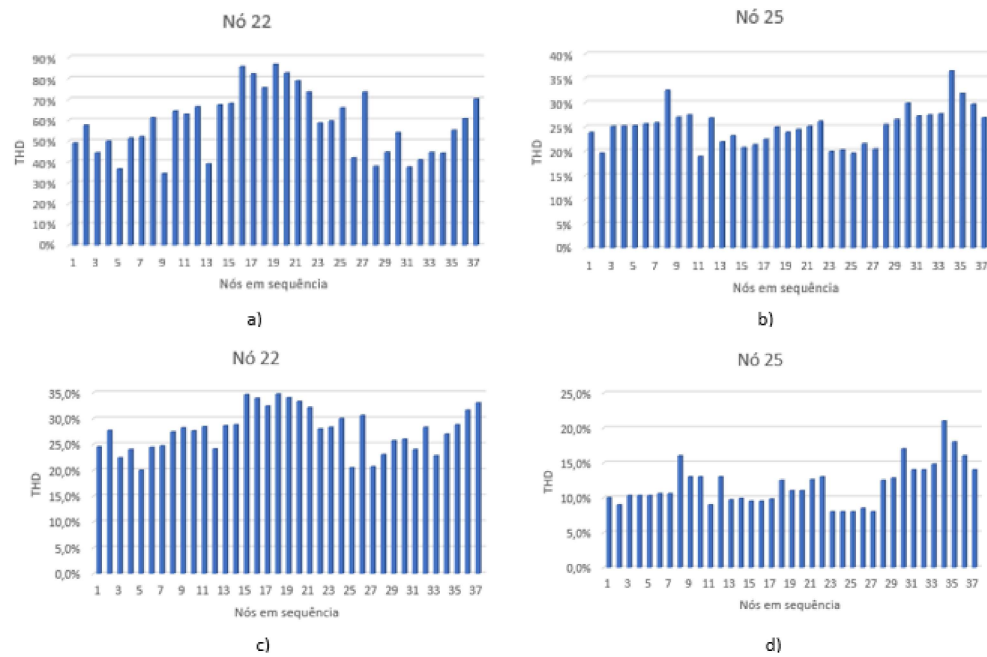


Figura 5.64 – THD do I_{RMS} com ECVE no nó 22 e 25

Como se pode observar pela figura 5.64 em que a) e b) são os gráficos não filtrados, e c) e d) são os gráficos filtrados, pode se concluir que na ECVE no nó 22 houve uma melhoria bastante significativa tendo o valor de pico de THD baixado de 86% para 34% trazendo assim uma viabilidade bastante maior se uma ECVE for colocada nesse nó. Quanto à ECVE filtrada no nó 25 há uma diminuição não tão acentuada nos THD's o que era espectável devido a estes valores serem bastante mais baixos que os valores da ECVE no nó 22, mas em suma houve diminuições de 50% em vários nós o que aumenta então a sua viabilidade em quase 50%.

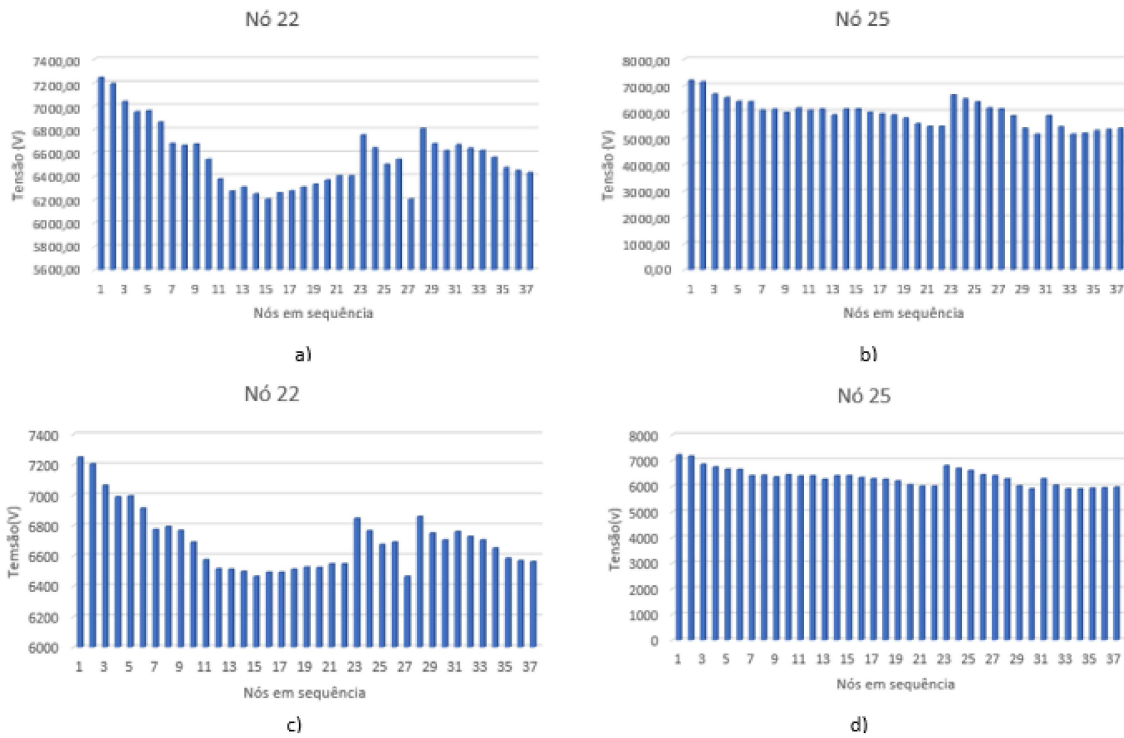


Figura 5.65 – V_{RMS} com ECVE no nó 22 e 25

Como se pode observar pela figura 6.65 em que a) e b) são os gráficos não filtrados, e c) e d) são os gráficos filtrados, pode se concluir que tanto no nó 22 quanto no nó 25 não houve alterações muito significativas na tensão eficaz, ficando os valores não filtrados e filtrados aproximadamente iguais.

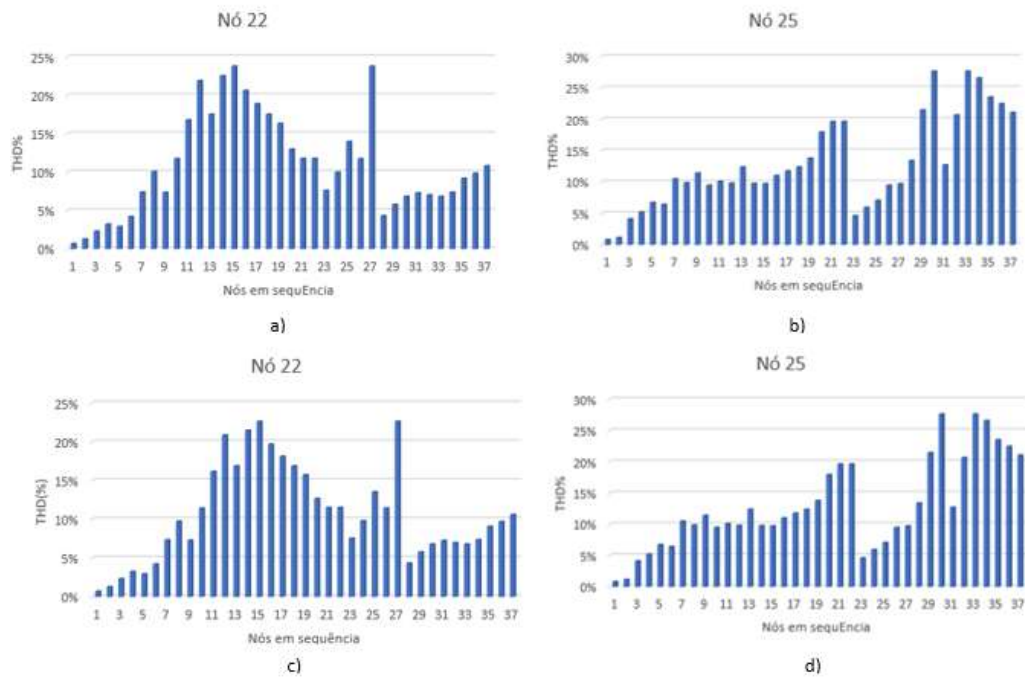


Figura 5.66 – THD% do V_{RMS} com ECVE no nó 22 e 25

Como se pode observar pela figura 6.66 em que a) e b) são os gráficos não filtrados, e c) e d) são os gráficos filtrados, pode se concluir que tanto no nó 22 quanto no nó 25 não houve alterações muito significativas no que diz respeito ao THD da tensão, ficando os valores não filtrados e filtrados aproximadamente iguais, sendo o valor de pico da ECVE no nó 22 sem filtro de 24% e com filtro de 22,5%, na ECVE no nó 25 sem filtro de 27% e filtro de 26%.

Depois de serem estudados os nós 22 e 25 separadamente foi feito o estudo dos filtros na rede IEEE 33 mas desta vez com duas ECVE filtradas em simultâneo, uma em cada nó:

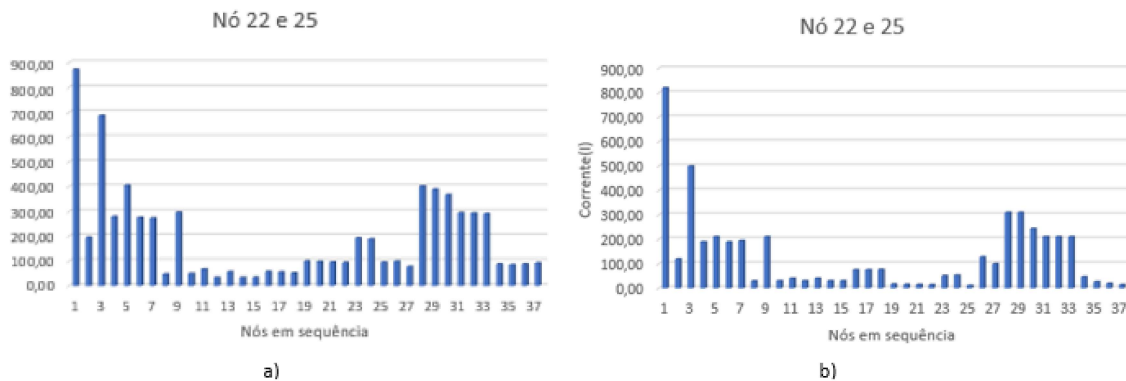


Figura 5.67 – I_{RMS} com ECVE no nó 22 e 25 em simultâneo

Ao analisar os dois gráficos da figura 6.67 em que a) é o gráfico sem filtro e b) o gráfico com filtro, é notória uma diminuição da corrente eficaz em todos os nós do gráfico com valores das ECVE's filtradas comprado ao gráfico dos valores das ECVE's não filtradas.

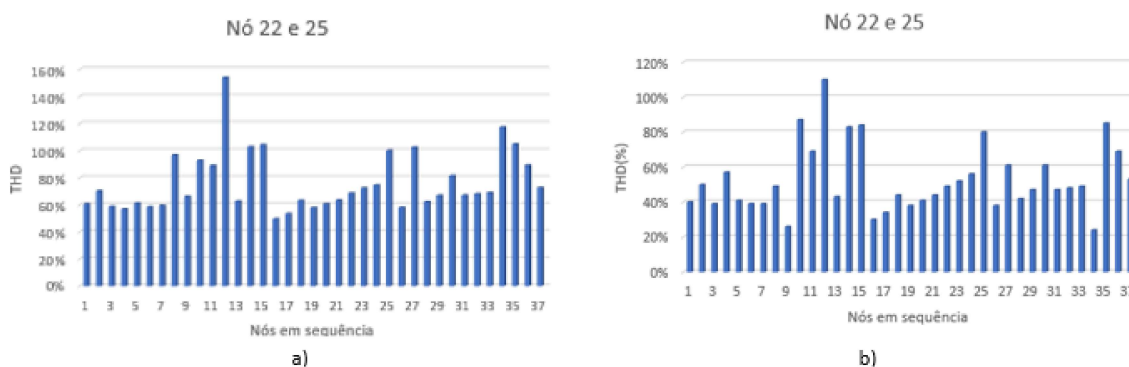


Figura 5.68 – THD% do I_{RMS} com ECVE no nó 22 e 25 em simultâneo

Ao comparar os dois gráficos da figura 6.68 em que à esquerda encontra-se o gráfico sem filtro e à direita com filtro, é possível ver uma diminuição no THD no gráfico da direita devido ao filtro, não sendo esta diminuição viável para a colocação de duas ECVE's nos dois piores nós desta rede devido ao THD continuar bastante elevado com valores como no caso do nó 12 superior a 100%, não sendo necessário então o estudo da tensão visto o THD da corrente já não ser viável.

Tabela 5.5- Rede com filtro vs sem filtro

	Corrente		Tensão	
	Pico(A)	THD max(%)	Pico(V)	THD max(%)
Nó 22 s\filtro	797	86	7220	24
Nó 22 c\filtro	805	34	7233	22,5
Nó 25 s\filtro	1200	36	7011	27
Nó 25 c\filtro	883	21	7009	27
Nó 22 e 25 s\filtro	881	157	X	X
Nó 22 e 25 c\filtro	608	110	X	X

Concluindo então o estudo dos filtros na rede IEEE 33, pode-se afirmar que é viável a colocação de apenas uma ECVE na rede, a colocação de duas ECVE's terá já de ser muito melhor estudada devido à junção dos dois piores casos não ser viável dado os valores obtidos, o que é bastante percéptível pela análise da tabela 5.5.



Conclusão

A proliferação cada vez maior das estações de carregamento de veículos elétricos nas redes elétricas tem imposto um estudo muito mais aprofundado de quais os seus impactos. Para acompanhar esse estudo foi feita a análise dos impactos em duas redes, sendo essas a rede IEEE de 13 nós e a IEEE de 33 nós, podendo analisar tudo em conjunto visto ter-se então todos os resultados necessários foi notório um ótimo aproveitamento da rede IEEE 13, de início sem os filtros os valores não eram muito favoráveis no pior caso, mas depois da implementação do filtro os resultados foram excelentes. Na rede IEEE 33 os resultados com os filtros foram bem mais favoráveis, mas visto ser uma rede com um número elevado de nós e assim ter-se tentado implementar dois carregadores na rede, lembrando serem os dois colocados nos nós menos favoráveis ou seja o pior caso possível, os resultados não foram satisfatórios, não impossibilitando a rede de poder ter dois carregadores simultâneos, apenas os piores casos não tiveram valores possíveis de aprovar, com um único carregador na rede os resultados foram satisfatórios.



Referências bibliográficas

- [1] Z. Wang and L. Yang, "Delinking indicators on regional industry development and carbon emissions: Beijing-Tianjin-Hebei economic band case," *Ecol. Indic.*, vol. 48, Jan. 2015.
- [2] Q. Wang, R. Li, and R. Jiang, "Decoupling and Decomposition Analysis of Carbon Emissions from Industry: A Case Study from China," *Sustainability*, vol. 8, no. 10, Oct. 2016. [Online]. Available: <http://www.mdpi.com/2071-1050/8/10/1059>
- [3] B. Kampman, H. van Essen, W. Braat, M. Gr unig, R. Kantamaneni, and E. Gabel, "Impact analysis for market uptake scenarios and policy implications," *CE Delft, Delft, Tech. Rep.*, Apr. 2011. [Online]. Available: www.cedelft.eu
- [4] R. Shi, X. P. Zhang, D. C. Kong, N. Deng, and P. Y. Wang, "Dynamic impacts of fast-charging stations for electric vehicles on active distribution networks," in *2012 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia, ISGT Asia 2012*, 2012.
- [5] G. Falchetta and M. Noussan, "Electric vehicle charging network in Europe: An accessibility and deployment trends analysis," *Transp. Res. D: Transp. Environ.*, vol. 94, May 2021.
- [6] M. Geske, P. Komarnicki, M. St otzer, and Z. A. Styczynski, "Modeling and simulation of electric car penetration in the distribution power system Case study," in *Proceedings - International Symposium: Modern Electric Power Systems, MEPS'10*, 2010.
- [7] P. T. Staats, W. M. Grady, A. Arapostathis, and R. S. Thallam, "A statistical analysis of the effect of electric vehicle battery charging on distribution system harmonic voltages," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 13, Apr. 1998.
- [8] D. McCarthy and P. Wolfs, "The HV system impacts of large scale electric vehicle deployments in a metropolitan area", in *Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, 2010.
- [9] A. Samson Mogos, S. Grillo, "Impact of EV Charging Stations in Power Grids in Italy and its Mitigation Mechanisms", *Politecnico di Milano Dipartimento di Elettronica, Informazione e Bioingegneria p.za Leonardo da Vinci*, 32, I-20133, Milano, Italy 2021.
- [10] Joaquim Carlos Novais de Freitas "Projeto e análise ao funcionamento de carros elétricos" *Laboratório de motores*

térmicos e SMS-Soluções de Mobilidade Sustentável 2012.

[11] Maia, Miguel Ângelo da Silva "Mobilidade elétrica: planeamento de postos de carregamento para veículos elétricos no concelho de Lisboa" Repositório da Universidade de Lisboa 2018.

[12] João A. Peças Lopes, Filipe Joel Soares, and Pedro M. Rocha Almeida, "Integration of Electric Vehicles in the Electric Power System" A conceptual framework for integrating electric vehicles into electric power systems is given 2011.

[13] Rita Pinto "Análise dos Perfis de Carregamento de Veículos Elétricos numa Estação de Carregamento" Universidade da beira interior Covilhã, junho de 2014

[14] SemaConnect "Smart versus "Dumb" EV Charging Stations" 2017.

[15] Nuno Miguel Duarte Lima "Comparação de Estratégias de Carregamento de Veículos Elétricos" Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto 2012.

[16] viral.global [Online]. Available: <https://www.virta.global/vehicle-to-grid-v2g>

[17] Jose Augusto Sampaio da Costa, José Manuel Ribeiro Baptista, "Carregamento de Veiculos Eletricos baseado em Sistemas Fotovoltaicos" Universidade trás-os-montes e alto douro 2018.

[18] Gleisson Balen, Andrei Roberto Reis, Humberto Pinheiro, Luciano Schuch "Estação de carregamento rápido com elemento armazenador de energia e filtro ativo de harmónicos para veiculos elétricos" Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria - RS, Brasil 2019.

[19] Ewaldo L. M. Mehl "Qualidade da Energia Elétrica" Universidade Federal do Paraná em Curitiba 2000

[20] Sigmar Maurer Deckmann, José Antenor Pomilio "Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica" Universidade estadual de campinas, 2017.

[21] Malabika Basu, Eugene Dermot Coyle, K. Gaughan, "Harmonic distortion caused by EV battery chargers in the distribution systems network and its remedy", Conference Paper· October 2004.

[22] Van-Linh NGUYEN, Tuan TRAN-QUOC, Seddik BACHA, "Harmonic Distortion Mitigation for Electric Vehicle Fast Charging Systems"

[23] cargas-nao-lineares [Online]. Available: <http://www.engeletrica.com.pt/manual-Cargas-nC3A3o-Lineares.html>

[24] Phipps, J. K., Nelson, J. P., Sen, P. K. (1994): "Power Quality and Harmonic Distortion on Distribution Systems", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 30, no. 2, March/April 1994

[25] J. A. Pomilio "Componentes semicondutores de potencia" Eletrônica de Potência - Cap. 1, 2014

[26] Series-de-Fourier [Online]. Available: <http://webx.ubi.pt/felippe/texts2/an-sinais-cap7.pdf>

[27] Arthur Costa de Souza, Carlos Eduardo Tavares "Análise das Distorções Harmônicas Geradas pelas Cargas não-lineares através do Aplicativo Computacional PQA" Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia/MG, Brasil

[28] KAZUO NAKASHIMA "VALOR MÉDIO E EFICAZ" UNIFEI / IESTI 2013

[29] Ahmed, Ashfaq; Ahmed, Ashfaq. Eletrônica de Potência. Editora: Prentice Hall - Br

[30] Understanding, Calculating, and Measuring Total Harmonic Distortion (THD) [Online]. Available:

<https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/the-importance-of-total-harmonic-distortion/>

-
- [31] O que é fator de potência [Online]. Available: <https://www.mundodaeletrica.com.br/fator-de-potencia-o-que-e-como-calcular/>
- [32] B. Singh, K. Al-Haddad and A. Chandra "A Review of Active Filters for Power Quality Improvement", IEEE/Trans. Ind. Elect. No 5, Vol 46 pp 960-971, 1999.
- [33] L. Gyugyi, E. Strycula "Active AC Power Filters", IEEE IAS anual meeting, pp-529-535, 1976.
- [34] N. Mohan "Active Filters for AC Harmonic Suppression", IEEE/PES Winter meeting, p. a77026-8, 1977.
- [35] B. Singh, K. Al-Haddad and A. Chandra "A Review of Active Filters for Power Quality Improvement", IEEE/Trans. Ind. Elect. No 5, Vol 46 pp 960-971, 1999.
- [36] H. Akagi "Trends in Active Power Line Conditioners", IEEE/Trans. Power. Elec. No 3, Vol 9 pp 263-268, 1994.
- [37] Arthur Hermano Rezende Rosa "Estudo e comparação de técnicas de controle não lineares aplicadas a conversores estáticos de potência" 26-Jun-2015
- [38] Ricardo Alberto Coppola Germanos Fernando Catalani Jader Souza Cabral Carlos Renato Menegatti "Power Inverters: Theoretical concepts and experimental demonstration" São Paulo - SP - Brazil 2020
- [39] Bottion, Antonio José Bento, "Conversores CC-CC básicos não isolados de três níveis" Universidade Federal de Santa Catarina, 2005
- [40] Clóvis Antônio Petry "Introdução aos Conversores CA-CA" Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, 2011
- [41] J. A. Pomilio "CONVERSORES CA-CC - RETIFICADORES" [ONLINE] Available: <https://www.dsce.fee.unicamp.br/antenor/pdffiles/eltpot/cap3>
- [42] Emily Danyani "Retificadores Controlados" [ONLINE] Available: <https://pt.scribd.com/document/476268439/RETIFICADORES-CONTROLADOS>
- [43] IEEE 13 Node Test Feeder [ONLINE] Available: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ug/ieee-13-node-test-feeder.html>
- [44] IEEE 33 Bus System [ONLINE] Available: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/73127-ieee-33-bus-system>
- [45] IEC 62196 [ONLINE] Available: https://webstore.iec.ch/preview/info_iec62196-1%7Bed1.0%7Den.pdf
- [46] IEC 61851 [ONLINE] Available: <https://www.sis.se/api/document/preview/125789/>
- [47] EN60309 [ONLINE] Available: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/clc/52233ccc-ab7f-490d-874e-4228fd2591f5/en-60309-1-1999-a1-2007-ac-2014>
- [48] EN/NP61851 [ONLINE] Available: <https://landingpage.bsigroup.com/LandingPage/Series?UPI=BS%20EN%2061851>
- [49] SAE J1772 [ONLINE] Available: https://www.sae.org/standards/content/j1772_201001/
- [50] IEC 62196-2:2011 [ONLINE] Available: <https://webstore.iec.ch/publication/6583>
- [51] IEC 60555-1 [ONLINE] Available: <https://webstore.iec.ch/publication/16571>

[52] Norma NP EN 50160:2001 [ONLINE]Available: [https://paginas.fe.up.pt/ ee86007/pagina_norma_np_en_50160 – 2001.htm](https://paginas.fe.up.pt/ee86007/pagina_norma_np_en_50160_2001.htm)

[53] IEEE 519 [ONLINE]Available: <https://standards.ieee.org/ieee/519/3710/>