

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MÁRCIO DE CAMARGO

PROJETO DE DIPLOMAÇÃO
ANÁLISE COMPARATIVA DE RETIFICADORES TRIFÁSICOS DE
SISTEMA METROVIÁRIO

Porto Alegre - RS

2022

MÁRCIO DE CAMARGO

**ANÁLISE COMPARATIVA DE RETIFICADORES TRIFÁSICOS DE
SISTEMA METROVIÁRIO**

Projeto de Diplomação apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro

Porto Alegre - RS

2022

MÁRCIO DE CAMARGO

**ANÁLISE COMPARATIVA DE RETIFICADORES TRIFÁSICOS DE
SISTEMA METROVIÁRIO**

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Atividade de “Projeto Diplomação 2”, do Curso de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Aprovado em Porto Alegre, 3 de fevereiro de 2022.

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, UFRGS
Orientador

Profa. Dra. Thieli Smidt Gabbi, UFRGS
Examinadora

Prof. Me. Igor Pasa Wiltuschnig, UFRGS
Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro pelo apoio durante a realização desse trabalho e a todos que contribuíram para conclusão do Curso de Engenharia Elétrica.

RESUMO

Retificadores de tração constituem equipamentos de eletrônica de potência que geram distorções harmônicas de corrente. Foi realizada uma análise comparativa entre dois retificadores considerando as distorções harmônicas e outras características fundamentais de um retificador como as suas proteções, assim como a facilidade de manutenção em cada tipo de retificador.

No trabalho a seguir, está descrito o modo e as técnicas que foram utilizadas durante a análise comparativa dos retificadores trifásicos de doze pulsos, em operação hoje na Trensurb (Empresa de Trens Urbanos de Porto Alegre). Também estão detalhados os métodos de cálculos realizados, bem como a configuração do analisador de energia e a metodologia de análise das leituras de distorções harmônicas de corrente em relação à IEEE 519 (2014).

Em suma, pode-se dizer que a análise central desse projeto está baseada em avaliar as distorções harmônicas de corrente para dois modelos de retificadores trifásicos de doze pulsos, para as faixas de corrente de 200 ampères e de 1280 ampères. Para essa avaliação realizou-se medições de corrente por 24 horas com um analisador de energia e usou-se o *software Power Log* para análise dos dados e geração dos gráficos.

Ao final do trabalho, pôde-se concluir que não há diferenças relevantes em relação as distorções harmônicas entre os retificadores, mas que os retificadores atuam como filtro, atenuando as distorções harmônicas de corrente quando os mesmos estão sob carga. Verificase ainda que o retificador da Subestação(SE) Sapucaia reduz percentualmente mais as distorções harmônicas, quando está operando num pico de corrente se comparado com o retificador da SE Farrapos.

Além disso, como sugestão de melhoria para o retificador da SE Farrapos, seria interessante adaptar rodinhas, nos retificadores, a fim de facilitar mudança de posição dos retificadores, no interior da SE, sem a necessidade de uma desmontagem completa. Essa sugestão é pertinente, pois os retificadores da SE Sapucaia já tem essa mesma funcionalidade, vinda de fábrica.

Por fim, pode-se ressaltar que o retificador da SE Farrapos tem tecnologia mais robusta e mais simples de manipulação, fato que facilita os trabalhos, na maioria das intervenções corretivas no equipamento.

Palavras-chave: Diodos, distorções harmônicas e retificadores.

ABSTRACT

Traction rectifiers are power electronics equipment that generate current harmonic distortions. A comparative analysis was carried out between two rectifiers considering the harmonic distortions and other fundamental characteristics of a rectifier such as its protections, as well as the ease of maintenance in each type of rectifier.

The following work describes the mode and techniques that were used during the comparative analysis of the twelve-pulse three-phase rectifiers, in operation today at Trensurb (Empresa de Trens Urbanos de Porto Alegre). Also detailed are the calculation methods performed, as well as the configuration of the energy analyzer and the methodology for analyzing the readings of current harmonic distortions in relation to IEEE 519 (2014).

In summary, it can be said that the central analysis of this project is based on evaluating the current harmonic distortions for two models of twelve-pulse three-phase rectifiers, for the current ranges of 200 amperes and 1280 amperes. For this evaluation, current measurements were carried out for 24 hours with an energy analyzer and the Power Log software was used to analyze the data and generate the graphs.

At the end of the work, it was concluded that there are no relevant differences in relation to harmonic distortions between the rectifiers, but that the rectifiers act as a filter, attenuating the current harmonic distortions when they are under load. It is also verified that the Sapucaia Substation (SE) rectifier reduces harmonic distortions in percentage more, when it is operating at a peak current compared to the SE Farrapos rectifier.

Furthermore, as an improvement suggestion for the SE Farrapos rectifier, it would be interesting to adapt wheels on the rectifiers, in order to facilitate the change of position of the rectifiers, inside the SE, without the need for complete disassembly. This suggestion is pertinent, as the SE Sapucaia rectifiers already have this same functionality, coming from the factory.

Finally, it can be noted that the SE Farrapos rectifier has more robust technology and is simpler to handle, a fact that facilitates the work in most corrective interventions in the equipment.

Keywords: Diodes, harmonic distortions and rectifiers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Veículo elétrico na década de 1890.	16
Figura 2 - Ponte de Graetz Dupla.	18
Figura 3 - Esquema elétrico da subestação Sapucaia.	19
Figura 4 - Diagrama simplificado da ligação do transformador com o retificador.	20
Figura 5 - Retificador da SE Farrapos.	21
Figura 6 - Esquema da distribuição das correntes.	22
Figura 7 - Corrente drenada pela corrente de alimentação.	23
Figura 8 - Conversão CA – CC.....	25
Figura 9 - Ondulação.	26
Figura 10 -Tetraedro das Potências.	26
Figura 11 - Triângulo das Potências.	27
Figura 12 - Espectro harmônico para estrutura mostrada na figura 4.....	28
Figura 13 - Analisador de Energia e de Qualidade de Energia Fluke 435 II.....	31
Figura 14 - Conexão do analisador com um sistema de distribuição trifásico.	31
Figura 15- Equipamento configurado com parâmetros iniciais.....	34
Figura 16 - Tela das configurações para medição.	35
Figura 17 - Ligação do Analisador de Energia.	35
Figura 18 - Analisador instalado junto ao retificador.	36
Figura 19 - Intervalos das partidas dos trens.	37
Figura 20 - Tela do <i>Software Power Log</i>	39
Figura 21 - Dados da subestação Sapucaia.....	41
Figura 22 - Dados da subestação Farrapos.	42
Figura 23 - Retificador da subestação Sapucaia.	45
Figura 24 - Retificador da subestação Farrapos.	45
Figura 25 - Placa do retificador.	46
Figura 26 - Gráficos das tensões de entrada e de saída do retificador.....	47
Figura 27 - Valores RMS, médios e máximo.	48
Figura 28 - Corrente de saída do retificador , corrente e tensão em um diodo.....	48
Figura 29 - Valores RMS, médios e máximos.....	48
Figura 30- Gráfico do registro da corrente de 201 ampères.	50
Figura 31 - Distorção harmônica para 201 ampères.....	51
Figura 32 - Legenda da figura 31.	52
Figura 33 - Histograma da corrente RMS.....	53

Figura 34 - Distorção harmônica para 1281 ampères.....	54
Figura 35 - Valores percentuais das taxas de distorção harmônica.	55
Figura 36 - Tensões de entrada e de saída do retificador.	56
Figura 37 - Valores RMS, médios e máximos.....	57
Figura 38 - Corrente de saída, corrente e tensão em um diodo.	57
Figura 39 - Valores RMS, médios e máximos.....	58
Figura 40 - Gráfico do registro da corrente de 198 ampères.	59
Figura 41 - Distorção harmônica da corrente para 198 ampères.	60
Figura 42 - Legenda da figura 41.	61
Figura 43 - Gráfico do registro da corrente de 1282 ampères.	62
Figura 44 - Distorção harmônica da corrente para 1282 ampères.	63
Figura 45 - Taxa de distorção harmônica.	64
Figura 46 - Registro da TDD para corrente de 1282 ampères.	65
Figura 47 - Placa dos retificadores.	69

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Terminologia.	30
Quadro 2 - Limites de distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental)...	30
Quadro 3 - Parâmetros de distorção harmônica de corrente.	43
Quadro 4 - Características dos diodos.	66
Quadro 5 - Leituras das distorções harmônicas.	67
Quadro 6 - Análise das proteções.	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A.C.	Antes de Cristo
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DHI	Distorção Harmônica Individual
DTT	Distorção Harmônica Total da Tensão Fundamental
FP	Fator de Potência
Hz	Hertz
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
kV	Quilovolts
kVCA	Quilovolts Corrente Alternada
kVCC	Quilovolts Corrente Contínua
kW	Quilowatt
MVA	Megavoltampère
MW	Megawatt
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PWM	Modulação de Largura de Pulso
RMS	Raiz Quadrada Média
SE	Subestação
TDD	Taxa de Distorção de Demanda (%)
THD	Taxa de Distorção Harmônica Total de Corrente(%)
TRENSURB	Empresa de Trens Urbanos de Porto Alegre S/A
VCA	Volt Corrente Alternada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	JUSTIFICATIVA.....	13
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1	BREVE HISTÓRICO DA CONVERSÃO DE CORRENTE CA PARA CC.....	16
2.2	RETIFICADORES TRIFÁSICOS	17
2.3	EQUAÇÕES DE TENSÃO E CORRENTE NOS ENROLAMENTOS.....	21
2.4	PARÂMETROS DE DESEMPENHO	24
2.4.1	Ondulação.....	25
2.4.2	Fator de Deslocamento	26
2.4.3	Fator de Potência.....	26
2.4.4	Taxa de Distorção Harmônica.....	27
2.4.4.1	Taxa de Distorção Harmônica Individual	28
2.4.4.2	Taxa de Distorção Harmônica Total	29
2.4.4.3	Distorção Total da Demanda	29
2.4.5	PRODIST - Módulo 8.....	29
2.4.6	Analizador de Energia e de Qualidade de Energia - FLUKE 435 II.....	30
2.4.7	Efeitos de harmônicos em uma instalação.....	31
3	ANÁLISE DOS RETIFICADORES DE 12 PULSOS.....	32
3.1	AVALIAÇÃO DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE CORRENTE	32
3.1.1	Configuração do analisador de energia	33
3.1.2	Local da medição.....	35
3.1.3	Horários de avaliação da corrente e das distorções harmônicas	37
3.1.4	Software Power Log	38
3.1.5	Método de avaliação das leituras de distorção harmônica	40
3.1.5.1	Cálculo da corrente máxima (I_{sc}).....	40
3.1.5.2	Cálculo da IL e da relação ISC/IL	40

3.1.5.2.1	Subestação Sapucaia.....	41
3.1.5.2.2	Subestação Farrapos	42
3.1.5.3	Referência para análise.....	43
3.1.5.4	SIMULAÇÃO DOS RETIFICADORES NO PSIM.....	44
4	EXPERIMENTOS E RESULTADOS	46
4.1	RETIFICADOR DA SUBESTAÇÃO SAPUCAIA.....	46
4.1.1	Dados técnicos e avaliação de desempenho	46
4.1.1.1	Gráficos obtidos da simulação do PSIM.....	47
4.1.1.2	Avaliação das taxas de distorções harmônicas de corrente	49
4.2	RETIFICADOR DA SUBESTAÇÃO FARRAPOS	55
4.2.1	Simulação do PSIM	55
4.2.2	Avaliação das taxas de distorções harmônicas de corrente.....	58
4.3	Resumo das análises	65
4.3.1	Diodos e dissipadores	65
4.3.2	Distorções harmônicas	66
4.3.3	Comparações gerais e proteções	68
5	Considerações Finais.....	70
5.1	CONCLUSÃO	70
5.2	SUGESTÃO PARA ESTUDOS FUTUROS	71
6	REFERÊNCIAS	72
7	ANEXOS.....	74
	ANEXO A – SE Sapucaia	74
	ANEXO B – SE Farrapos.....	79
	ANEXO C – Leituras das distorções harmônicas.....	83

1 INTRODUÇÃO

O transporte de pessoas em grande quantidade usando trens elétricos, metrô ou trens de alta velocidade é um fator fundamental na questão da mobilidade urbana dos grandes aglomerados populacionais em todo mundo. Cidades como Xangai, na China, Nova York, nos EUA, e Londres, no Reino Unido possuem os maiores sistemas de metrô da atualidade, sendo que o metrô de Xangai é o maior de todos, com aproximadamente 420 km de extensão. No Brasil, o maior sistema de metrô é o de São Paulo com (70,6 km), seguido pelo Metrô do Rio de Janeiro com (48,1 km), pelo MetrôDF em Brasília (45,5 km) e pelo Trensurb de Porto Alegre com (43,4 km).

Nos últimos anos, em função das diversas crises envolvendo energia, seja pela disparada do preço dos combustíveis, seja pela falta de chuvas devido aos fenômenos climáticos como o La Niña, aumenta-se a importância da utilização de equipamentos elétricos, principalmente, que sejam mais eficientes e que não produzam perturbações, nos sistemas de distribuição de energia elétrica.

Os equipamentos elétricos, com passar dos anos, vão perdendo a capacidade de desempenho e eficiência, desse modo tendem a dar espaço a equipamentos novos que consomem menos energia e que têm melhor desempenho. Isso é o que normalmente acontece com a maioria dos aparelhos eletrodomésticos como geladeiras, televisores, condicionadores de ar e etc. Entretanto, quando se trata de retificador de tração elétrica, a análise de substituir ou não, deve ser mais criteriosa e basear-se em estudos e testes, os quais comprovem se o retificador de tração atende aos requisitos mínimos ou se está na hora de trocá-lo por um novo.

É nesse contexto de eficiência energética, a qual já está presente nos trens da série 200, através da regeneração de energia, na qual os trens devolvem energia para rede aérea. E também devido a importância da mobilidade urbana, através do uso de metrô, que comparar os retificadores é necessário a fim de que se evite interrupções na operação dos trens, em função de falhas nos retificadores, gerando prejuízo às pessoas e à economia com um todo.

1.1 JUSTIFICATIVA

Os sistemas metroviários elétricos consistem-se de conversores eletrônicos de potência, sejam nas subestações de tração, sejam incorporados nos trens. O uso desses componentes de eletrônica de potência geram distorções do sinal fundamental da corrente, produzindo

conteúdos harmônicos, no sistema elétrico, levando danos a todo sistema, como o superaquecimento dos condutores e diminuição do fator de potência. Por isso, de forma a mitigar tais danos quer de natureza técnica e conseqüentemente econômica, é necessária uma análise do conteúdo harmônico das correntes, nas subestações de tração, em especial nos retificadores de tração (FRANCO, 2020).

Com base nisto, e devido a diversidade de retificadores trifásicos de tração na Trensurb (03 unidades), com defasagem de mais de 36 anos, entre as tecnologias empregada, aliada a importância de se operar equipamentos que não causem perturbações à rede de distribuição de energia elétrica, motivou-se o desenvolvimento desse trabalho.

Foram encontrados muitos trabalhos relacionados a tração elétrica e à comparação de retificadores trifásicos, como em PIRES (2006) e RODRIGUES (2018), respectivamente, mas como o tema relacionado à retificadores trifásicos é muito amplo, não foi encontrado estudo específico comparando retificadores de tração, do modo como que se pretende abordar nesse trabalho.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O foco desse trabalho é realizar uma análise comparativa entre dois retificadores trifásicos, em operação em duas subestações da Trensurb, o primeiro instalado na subestação Sapucaia, na cidade de Sapucaia do Sul operando desde 2019 e o segundo instalado na subestação Farrapos, na cidade Porto Alegre, operando desde 1985.

O presente trabalho foi dividido em seis capítulos, a seguir está apresentado um breve resumo do que cada capítulo trata, ao longo do seu desenvolvimento:

Capítulo 1: Contempla a introdução do trabalho e tem por objetivo discorrer sobre a monografia de forma genérica, sem aprofunda-se em detalhamentos técnicos, o subtópico de justificativa aborda os motivos pelos quais levaram o desenvolvimento desse estudo e no final do primeiro capítulo traz-se a estrutura do trabalho, que nada mais é que uma síntese de como o mesmo está desenvolvido;

Capítulo 2 : Esse capítulo apresenta a revisão bibliográfica e a fundamentação teórica. Desse modo, traz um pouco da história da conversão da corrente CA para CC, as principais equações relacionadas às formas de onda de corrente e tensão na entrada e na saída dos retificadores. Além disso, apresenta alguns parâmetros que podem ser utilizados na avaliação de desempenho de um retificador, como os que são relacionados à distorção harmônica de corrente. O capítulo apresenta a referência ao módulo 8 do PRODIST e a norma IEEE 519

(2014), e encerra-se o capítulo apresentando o analisador de energia e de qualidade de energia – FLUKE 435 II, juntamente com os efeitos causados pelas distorções harmônicas em uma instalação;

Capítulo 3: Esse capítulo tem como objetivo apresentar a forma como foi implementada a solução. Dessa maneira, são apresentados o método de configuração do analisador de energia, o local onde foram realizadas as medições, o critério adotado para avaliar os resultados obtidos, o *software Power Log* e método do cálculo necessário, para avaliar as leituras em relação ao que é recomendado pela IEEE 519 (2014). Ao final do capítulo são apresentados os circuitos simulados no *software* PSIM;

Capítulo 4: Essa etapa da monografia foi reservada à apresentação dos experimentos e resultados. Na seção 4.1 são apresentados os resultados das comparações relacionadas ao retificador da SE Sapucaia, tais como as características principais e a avaliação de desempenho. Por fim, são mostrados, as avaliações e os resultados das leituras de distorções harmônicas de corrente. Na seção 4.2 são apresentados os resultados relacionados ao retificador da SE Farrapos. No final do capítulo tem-se um resumo dos resultados encontrados durante as medições, cálculos e análise comparativa com a norma IEEE 519 (2014);

Capítulo 5: Espaço destinado a conclusão do trabalho, nele são descritos os principais resultados e avaliações observadas, durante os estudos. Por fim são apresentadas as sugestões de estudos futuros;

Capítulo 6: Esse capítulo traz as referências bibliográficas, que embasaram o projeto e que deram apoio as hipóteses levantadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Inicialmente, será apresentada uma revisão bibliográfica dos retificadores trifásicos, desde a invenção até a sua aplicação em tração elétrica. Na sequência do trabalho, está apresentada a fundamentação teórica usada para desenvolver a metodologia de comparação entre os retificadores trifásicos.

2.1 BREVE HISTÓRICO DA CONVERSÃO DE CORRENTE CA PARA CC

A conversão da corrente trifásica em contínua é um objetivo de profunda evolução desde a origem da tração elétrica (TESSIER, 1978).

A forma mais antiga desta conversão, é através de um grupo-gerador: um motor síncrono trifásico acionava dois geradores de corrente contínua ligados em série (tipo 1). Surgiram depois o conversor síncrono trifásico (tipo 2), que é a combinação em uma só máquina do grupo motor-gerador, e o retificador a vapor de mercúrio (tipo 3), que se impôs universalmente (GARREAU,1965), (TESSIER, 1978).

A tração elétrica comercialmente é marcada com a primeira via de elétricos na Grã-Bretanha, o *Blackpool Tramway*, que foi inaugurado no dia 29 de setembro de 1885 ao longo da *Blackpool Promenade*. Na figura 1 é mostrado um veículo elétrico na *Blackpool Promenade*, nos anos iniciais de atendimento ao público.

Figura 1 - Veículo elétrico na década de 1890.



Fonte: <http://blackpool-trams.yolasite.com./history.php>.

Retornando as formas de conversão de energia, tem-se que o surgimento de cada um destes tipos de conversores, citados acima, não constitui três períodos consecutivos e bem separados dentro da história da tração elétrica, em corrente contínua. Um exemplo são as linhas de 3000 V que, por razões técnicas, continuaram a utilizar os grupos motor-gerador até o

advento dos retificadores a vapor de mercúrio (GARREAU, 1965). O retificador de vapor de mercúrio, por sua vez, ou mutador de vapor de mercúrio, foi desenvolvido por Peter Cooper-Hewitt em 1902.

Por fim, surgiram os retificadores a semicondutores de silício, hoje amplamente empregados, trazendo as seguintes vantagens (TESSIER, 1978):

- Simplicidade das instalações;
- Diminuição no preço de construção;
- Redução nos custos com manutenção;
- Aumento do rendimento em relação às formas anteriores de conversão.

2.2 RETIFICADORES TRIFÁSICOS

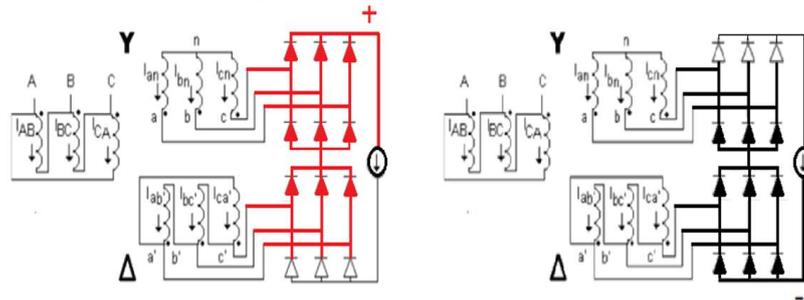
Este trabalho limita-se ao estudo de retificadores de 12 pulsos, com ponte de Graetz alimentada por transformador com conexão delta no primário e delta – estrela no secundário.

O conversor CA-CC alimentado por um transformador com ligação delta/delta-estrela, com as saídas ligadas em série, é analisado em termos da corrente absorvida do sistema trifásico de alimentação. A especificação da potência aparente de cada enrolamento do transformador é determinada em função da potência fornecida à carga (BARBI, 2000).

Para o fornecimento de uma tensão de saída com uma ondulação de 12 pulsos, utiliza-se a montagem em ponte dupla de Graetz. Na figura 2 pode ser visto que o transformador apresenta dois enrolamentos secundários, um ligado em estrela (na parte superior) e outro ligado em delta (na parte inferior), constituindo dois sistemas defasados em 30°. Cada secundário alimenta uma ponte de Graetz trifásica (PIRES, 2006).

Na figura 2 é demonstrado o modo de condução dos diodos durante os semi-ciclos positivos e negativos das fases A, B e C, lembrando que o desenho representa uma simplificação da conversão CA-CC.

Figura 2 - Ponte de Graetz Dupla.



Fonte: BARBI, (2006).

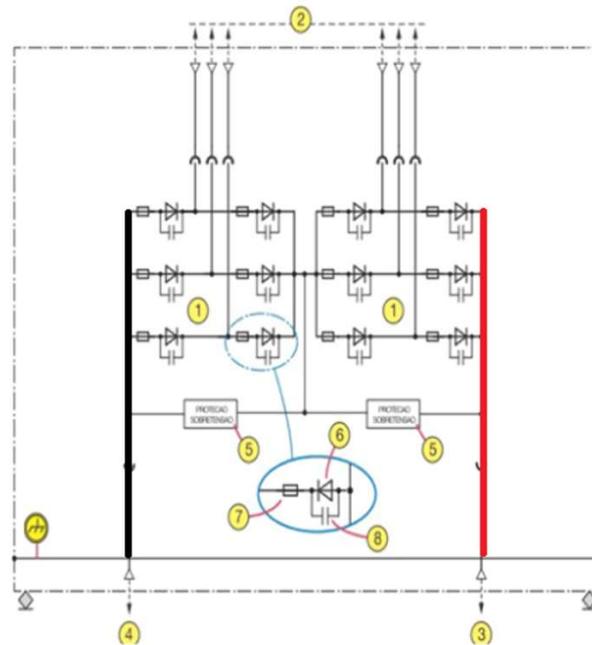
Como exemplo de utilização da configuração em ponte dupla de Graetz, tem-se o sistema de tração do Metrô de São Paulo. Na linha 1, entre as estações Santana e Jabaquara, cada subestação possui três conjuntos de retificadores (um de reserva) montados em ponte de Graetz dupla. Os retificadores são chamados grupos retificadores tendo cada um a potência de 2500 kW (PIRES, 2006).

Por fim, a conexão em triângulo provê um circuito fechado para as harmônicas da corrente de magnetização do transformador múltiplas de três. Desse modo, estas harmônicas são suprimidas e a distorção da corrente de linha é menor (TESSIER, 1978).

O primeiro retificador de 3,36 kVCC, a ser analisado, foi fabricado pela SIEMENS, e está instalado na subestação Sapucaia, na cidade de Sapucaia do Sul. Esse equipamento consiste em duas pontes retificadoras a diodo conectadas em série. Ambas as pontes são preparadas para serem alimentadas a partir de dois enrolamentos secundários do transformador, defasados em 30° . A tensão secundária nominal do transformador de alimentação corresponde a 1277 VCA, tanto para conexão delta como para a ligação em estrela, isso só é possível, por que a relação de espiras na ligação em delta possui 1,73 vezes a relação de espiras da ligação em estrela. Na saída do retificador a tensão média é de 3,36 kVCC como resultado da conexão série das duas pontes de diodos. Cada ponte é criada a partir de 18 diodos e cada braço da ponte é criado por três diodos conectados em paralelo.

O esquema elétrico simplificado do retificador, é apresentado na figura 3.

Figura 3 - Esquema elétrico da subestação Sapucaia.

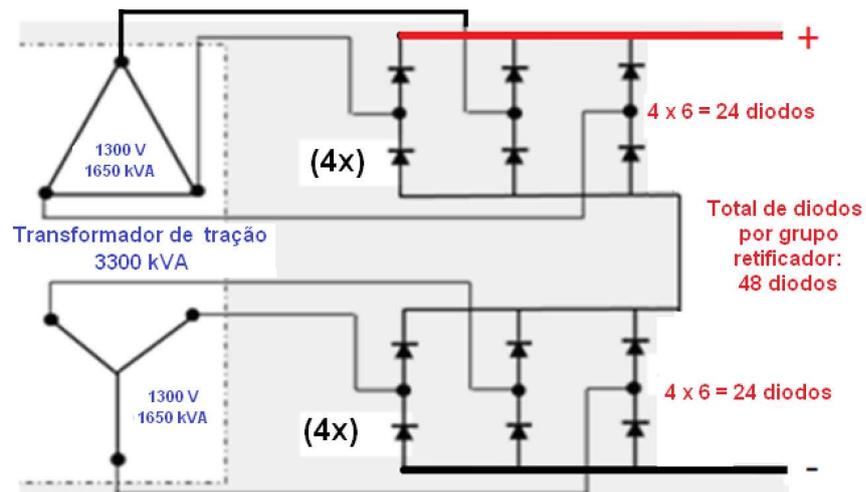


Fonte: ACERVO TRENSURB, (2022).

A legenda da figura 3 é a seguinte: 1 - Pontes retificadoras; 2 - Conexão ao transformador de tração; 3 - Saída 3360 VCC (+) para os cubículos CC; 4 - Saída 3360 VCC (-) para os cubículos CC; 5 - Proteção sobretensão (RC); 6 - Diodos; 7 - Fusível diodo; 8 - Snubber. Observação: cada diodo, representado na figura 3, equivale a três diodos em paralelo, no retificador instalado, na subestação Sapucaia.

O segundo retificador de 3,36 kVCC a ser analisado está instalado na SE Farrapos. Ele tem como uma das principais diferenças a quantidade de diodos, que é 48 ao invés de 36 diodos como nos retificadores da SE Sapucaia. Isso é explicado porque no retificador com 48 diodos, há 4 diodos em paralelo para o ciclo positivo e 4 diodos em paralelo, para o ciclo negativo, para cada fase da ligação em estrela e, para cada fase da ligação em delta. Nos retificadores com 36 diodos, a configuração é composta de 3 diodos em paralelo. Desse modo, nos retificadores da subestação Sapucaia há 6 diodos por fase, sabendo que há 6 fases no lado dos secundários, totalizam-se 36 diodos. Na figura 4 é apresentado um desenho simplificado do retificador instalado na subestação Farrapos, em Porto Alegre.

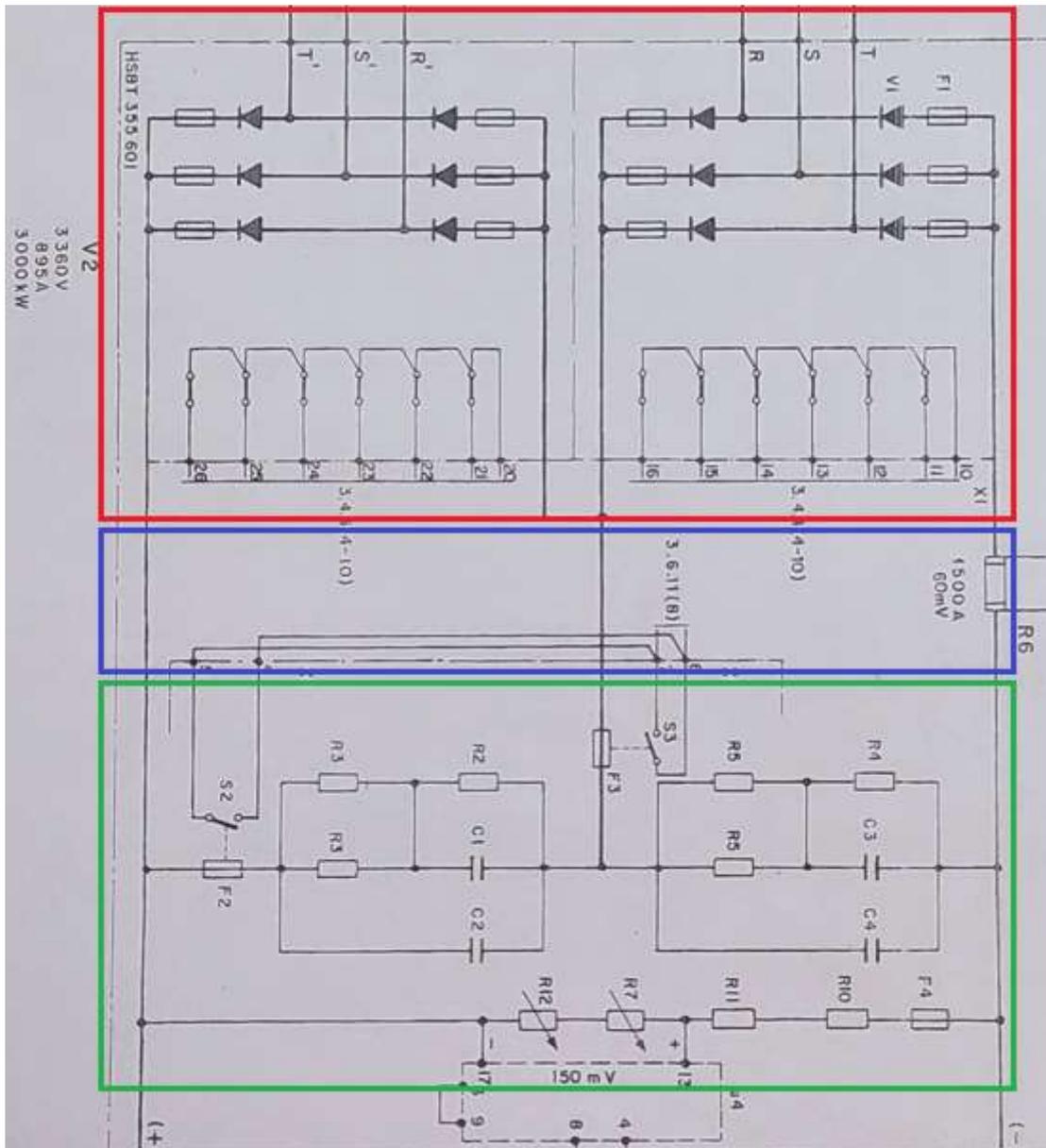
Figura 4 - Diagrama simplificado da ligação do transformador com o retificador.



Fonte: ACERVO TRENSURB, (2022).

Na figura 5 é apresentado parte do esquema elétrico original do retificador.

Figura 5 - Retificador da SE Farrapos.



Fonte: ACERVO TRENURB, (2022).

Na figura 5, dentro do retângulo em vermelho estão apresentados os diodos com os respectivos fusíveis em série. No retângulo em azul, está resistor shunt usado para leitura de corrente do retificador. E por fim, no retângulo em verde, pode-se observar o divisor resistivo usado para leitura de tensão e realização da proteção contra sobretensão, caso a mesma ocorra.

2.3 EQUAÇÕES DE TENSÃO E CORRENTE NOS ENROLAMENTOS

Segundo AHMED (2006), a partir da ligação delta do primário para ligação estrela do secundário, tem-se a equação (1).

$$V_{secy} = \frac{V_{prim}}{a} \times \sqrt{3} \quad (1)$$

em que, V_{secy} é a tensão de linha da ligação estrela do secundário, V_{prim} é a tensão de linha do primário e a é a relação do número de espiras do primário para o secundário.

Segundo BARBI (2012), a partir da ligação delta do primário para ligação delta do secundário, tem-se a equação (2).

$$V_{secd} = \frac{V_{prim}}{a} \quad (2)$$

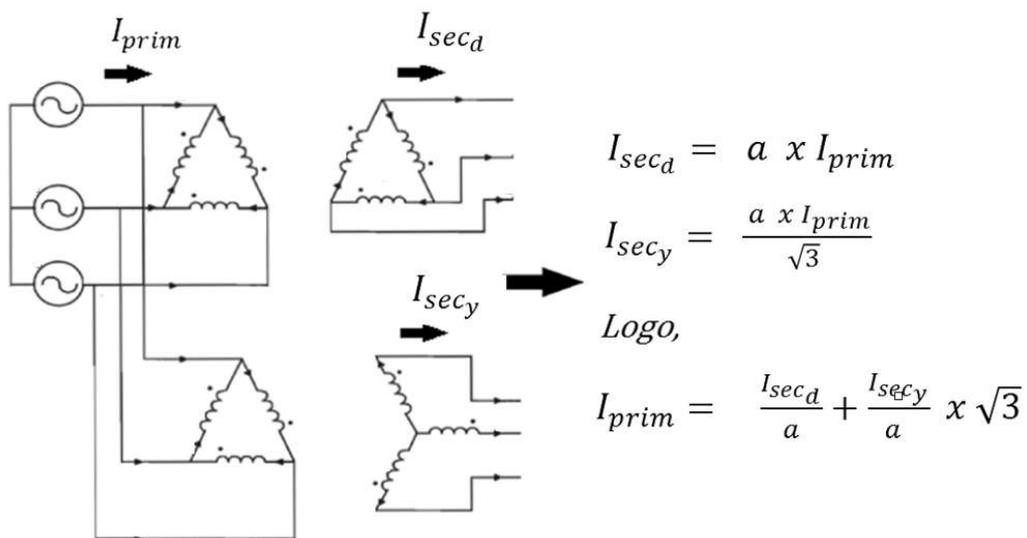
em que, V_{secd} é a tensão de linha da ligação delta do secundário e a é a relação do número de espiras do primário para o secundário.

Segundo PÉRES et al. (1997), as correntes de linha do secundário se dividem de acordo com as ligações delta ou estrela do secundário, conforme apresentado da equação (3).

Na figura 6 é apresentado um esquema para facilitar o entendimento do equacionamento.

$$I_{prim} = \frac{I_{secd}}{a} + \frac{I_{secy}}{a} \times \sqrt{3} \quad (3)$$

Figura 6 - Esquema da distribuição das correntes.



Fonte : BARBI, (2006).

em que, I_{sec_d} é a corrente de linha da ligação estrela do secundário, I_{sec_y} é a corrente de linha da ligação delta do secundário e I_{prim} é corrente de linha do primário (BARBI, 2012).

A partir de BARBI (2012), tem-se que a corrente do primário pode ser dada pela equação (4), usando série de Fourier.

$$I_{prim}(\omega\tau) = 4 \frac{\sqrt{3}}{\pi} Id \left[\cos(\omega\tau) - \frac{1}{11} \cos(11\omega\tau) + \frac{1}{13} \cos(13\omega\tau) - \frac{1}{23} \cos(23\omega\tau) + \frac{1}{25} \cos(25\omega\tau) \right] \quad (4)$$

em que, ω é a frequência angular da tensão do primário, t é o tempo e id é a corrente que circula na carga.

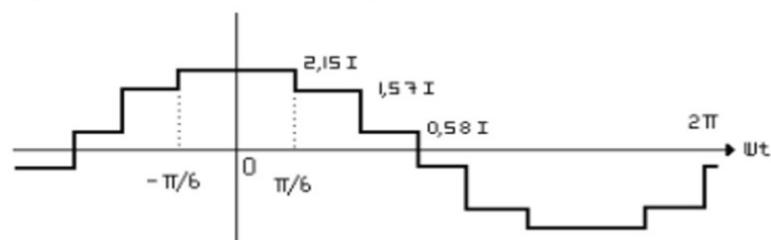
Segundo PÉRES et al. (1997), a série de Fourier representa uma forma de onda que pode ser descrita pela expressão (5),

$$I_{prim} = \begin{cases} 2,5I & 0 \leq \omega\tau \leq \frac{\pi}{6} \\ 1,57I & \frac{\pi}{6} \leq \omega\tau \leq \frac{2\pi}{6} \\ 0,58I & \frac{2\pi}{6} \leq \omega\tau \leq \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (5)$$

em que, I a corrente eficaz da carga, ou seja, a corrente da saída do retificador.

A partir da equação (5), tem-se o gráfico da figura 7.

Figura 7 - Corrente drenada pela corrente de alimentação.



Fonte: PÉRES et al (1997).

A partir da análise gráfica da figura 7, obtém-se a corrente eficaz no secundário da ligação estrela dada pela equação (6).

$$I_{sec_{yef}} = I \frac{\sqrt{6}}{3} \quad (6)$$

em que, $I_{sec_{yef}}$ é a corrente eficaz da ligação estrela do secundário.

Da mesma forma, a partir da análise gráfica da figura 7, obtém-se a corrente eficaz no secundário da ligação delta dada pela equação (7).

$$I_{sec_{def}} = I \frac{\sqrt{2}}{3} \quad (7)$$

Também por análise gráfica, obtém-se a relação entre a corrente eficaz no primário ($I_{prim_{ef}}$) e a corrente de saída eficaz (I) que é dada pela equação (8).

$$I_{prim_{ef}} = 0,98I \quad (8)$$

Ainda segundo PÉRES et al. (1997), a relação entre a tensão eficaz na bobina do primário (V_d) e a tensão média na carga (V) é dada pela equação (9).

$$V_d = 4,68V \quad (9)$$

Por fim, segundo PÉRES et al. (1997), a potência aparente de entrada (S_{prim}) do retificador e a potência de saída (P) do retificador é dada pela equação (10).

$$S_{prim} = 1,008P \quad (10)$$

Pela equação (10), observa-se que o retificador apresenta fator de potência próximo ao unitário. Segundo BARBI (2012), a distorção da forma de onda da corrente ainda que não atrasada da tensão, causa alteração o fator de potência. Assim, observa-se um pequeno desvio do valor unitário do fator de potência que se deve a distorção da corrente que também é baixa.

2.4 PARÂMETROS DE DESEMPENHO

Os principais parâmetros de qualidade na análise de regime permanente são: *ripple* (do inglês, ondulação), fator de deslocamento, fator de potência, taxa de distorção harmônica, seguimento de referência, dentre outros (DUGAN, 2004).

No viés da qualidade da energia, tem-se a norma do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos, a IEEE 519 (p.10), que traz que as distorções harmônicas são

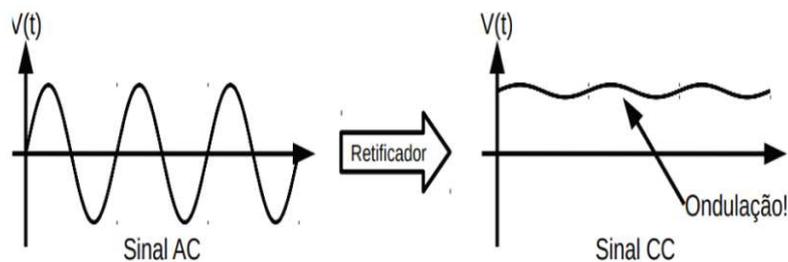
componentes senoidais de uma onda periódica, com frequências sendo múltiplos inteiros da frequência fundamental dessa ordem. No âmbito desse trabalho, interessa a corrente elétrica, que normalmente varia analogamente a uma onda senoidal e, portanto, é suscetível à presença de harmônicos.

2.4.1 Ondulação

A ondulação é dada pela razão entre a tensão eficaz da parte alternada do sinal e o nível CC do sinal. O sinal de saída é subtraído de seu nível médio e é calculado o seu valor eficaz. O resultado é dividido pelo nível médio do sinal original (LIBERT, 2014).

Na figura 8, é apresentado uma das formas de obtenção do sinal CC, que é através de um retificador:

Figura 8 - Conversão CA – CC.



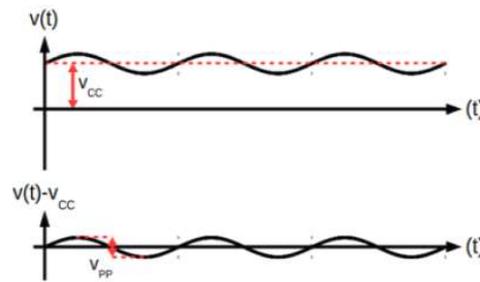
Fonte: LIBERT, (2014).

A equação 10 apresenta uma das formas de cálculo da ondulação na saída de um retificador. Em que, V_{pp} é a diferença entre o maior e o menor valor da onda do sinal CC e V_{CC} é o valor médio desse sinal.

$$Ondulação \cong \frac{V_{pp}}{\frac{(2\sqrt{2})}{V_{CC}}} \times 100\% \quad (11)$$

A figura 9 mostra, no gráfico, da ondulação, os referenciais que devem ser utilizados na aplicação da equação 11.

Figura 9 - Ondulação.



Fonte: LIBERT, (2014).

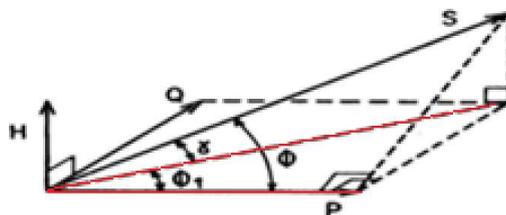
2.4.2 Fator de Deslocamento

O fator de deslocamento é o cosseno do ângulo entre as componentes fundamentais da corrente e da tensão, o que representa a defasagem entre a tensão e a corrente no circuito. O fator de deslocamento é baseado puramente na frequência da linha fundamental (50 ou 60 Hz) de conteúdo, enquanto o fator de potência real considera as harmônicas do circuito. Para correntes sinusoidais (sem distorção), o fator de deslocamento é o mesmo que o fator de potência aparente (SCHNEIDER, 2022).

Na figura 10, no tetraedro de potências, pode-se observar a posição de ϕ_1 , o qual é usado na equação 12 para obtenção do fator de deslocamento. O ângulo ϕ_1 é o ângulo entre a projeção de S e o vetor de P (DUGAN, 2004).

$$FD = \cos \phi_1 \quad (12)$$

Figura 10 - Tetraedro das Potências.



Fonte: STEPHAN, (1991).

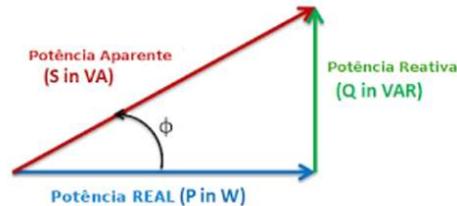
2.4.3 Fator de Potência

Matematicamente, o fator de potência pode ser definido como a relação entre o componente ativo da potência e o valor total desta mesma potência (MAMEDE, 2017). Ele pode ser usado para indicar se a proporção entre potência reativa e ativa está adequada através

da equação (13). O fator de potência desejado na maioria dos casos é o unitário. Na figura 11, é possível verificar que ϕ é o ângulo entre os vetores das potências aparente e ativa(real).

$$FP = \frac{P}{S} = \cos\left(\tan^{-1}\left(\frac{Q}{P}\right)\right) = \cos(\phi) \quad (13)$$

Figura 11 - Triângulo das Potências.



Fonte: <https://universoeletroneca.blogspot.com>

2.4.4 Taxa de Distorção Harmônica

Os indicadores de harmônicos mais comuns são os indicadores de taxa de distorção harmônica individual e total, os quais resultam valores em porcentagem sobre o valor referente à tensão de cada componente harmônica e todas juntas em relação ao valor da tensão da componente fundamental (DUGAN, 2004).

Os retificadores a diodo ou a tiristores introduzem harmônicas de corrente, na fonte alternada de alimentação. Essas harmônicas são indesejáveis, pois além de representar circulação de potência reativa nos geradores, transformadores e cabos de alimentação, ao circular nas linhas, provocam interferência eletromagnética conduzida ou irradiada. Tais interferências provocam mau funcionamento de dispositivos, equipamentos e sistemas alimentados pela mesma fonte ou instalados em regiões próximas das linhas de alimentação (BARBI, 2006).

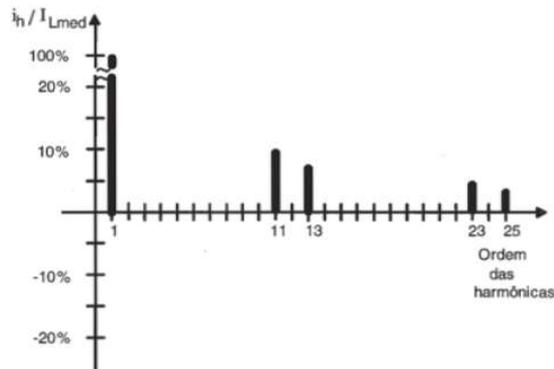
A THD, taxa de distorção harmônica de corrente de entrada, para uma forma de onda representada pela equação (14) é aproximadamente igual a 14%, computando-se até a harmônica de corrente de ordem 37 (BARBI, 2006).

$$\frac{I_{v1}(t)}{I_{Lmed}} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{6}{(12n \pm 1)\sqrt{3\pi}} \sin[(12n \pm 1)\omega t] \quad (14)$$

em que, $I_{v1}(t)$ é a corrente de entrada variante no tempo, I_{Lmed} é a corrente de linha média na saída do retificador e ω equivale a $2\pi f$ (BARBI, 2006).

Na figura 12, é apresentado um espectro harmônico desta forma de onda. Pode-se observar que as harmônicas de ordem $6n \pm 1$, para $1 \leq n < \infty$, foram canceladas, como esperado, resultando apenas as harmônicas de ordem $12n \pm 1$, para $1 \leq n < \infty$ (BARBI, 2006).

Figura 12 - Espectro harmônico para estrutura mostrada na figura 4.



Fonte: BARBI, (2006).

Particularmente, importante é o cancelamento das harmônicas de ordem 5 e 7, por serem de grande amplitude nos retificadores individuais e muito contribuírem para a degradação da qualidade da corrente de entrada (BARBI, 2006).

A interferência eletromagnética pode ser irradiada (via ar), conduzida (via condutores), induzida (normalmente acima de 30MHz) ou combinação das mesmas (CASSIOLATO, 2021).

Sabe-se que as harmônicas de corrente causam distorção da tensão da fonte, o que por sua vez provocam perdas adicionais nas diversas cargas supridas pela mesma fonte (BARBI, 2006).

Há muitas soluções possíveis para reduzir as harmônicas dos retificadores, como o emprego de filtros ativos ou passivos, emprego de retificadores PWM e o emprego de retificadores com 12,18 ou 24 pulsos (BARBI, 2006).

2.4.4.1 Taxa de Distorção Harmônica Individual

A taxa de distorção harmônica individual (DHI%) é o cálculo realizado para se obter a influência de uma determinada componente harmônica em relação à componente principal (FUCHS, 2008).

$$DHI\% = \frac{I_n}{I_1} \times 100 \quad (15)$$

em que, I_n é o valor RMS da componente harmônica de corrente a ser calculada em que, I_1 o valor RMS da componente fundamental da corrente.

2.4.4.2 Taxa de Distorção Harmônica Total

A taxa de distorção harmônica total, entretanto, é a medida sobre a quantidade de conteúdo harmônico existente em uma forma de onda. A distorção harmônica total de uma onda é (FUCHS, 2008).

$$DHT\% = \frac{\sqrt{(I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 \dots)}}{I_1} \times 100 \quad (16)$$

em que, I_1 é o valor RMS total da componente fundamental da corrente [A] em que, I_2, I_3, I_4 são os valores RMS das harmônicas.

2.4.4.3 Distorção Total da Demanda

A distorção de demanda total (TDD) é expressa em termos da máxima corrente de carga de demanda, pela equação (16) (DUGAN, 2004).

$$TDD = \frac{\sqrt{(\sum_2 I_h^2)}}{I_L} \times 100\% \quad (17)$$

em que, I_h é a taxa de distorção harmônica de ordem n , para $n \geq 2$ e I_L é a corrente demanda da carga em A.

2.4.5 PRODIST - Módulo 8

No módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), as distorções harmônicas são descritas como fenômenos associados a deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação a onda senoidal da frequência fundamental.

Inicialmente, no quadro 1 são apresentadas as terminologias aplicáveis ao cálculo das distorções harmônicas.

Quadro 1 - Terminologia.

Identificação de Grandezas	Símbolo
Valor do Indicador DTT% que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas.	DTT95 %
Valor do Indicador DTT _p % que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas.	DTT _p 95 %
Valor do Indicador DTT _i % que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas.	DTT _i 95 %
Valor do Indicador DTT ₃ % que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas.	DTT ₃ 95 %

Fonte: PRODIST - Módulo 8, (2021).

A ANEEL, dentro das suas atribuições, através do PRODIST, edita os valores máximos de distorções harmônicas totais. Caso esses limites sejam ultrapassados, multas podem ser geradas aos consumidores infratores. O quadro 2 apresenta os limites das distorções harmônicas.

Quadro 2 - Limites de distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
DTT95%	10,0%	8,0%	10,0%
DTT _p 95 %	2,5%	2,0%	1,0%
DTT _i 95 %	7,5%	6,0%	4,0%
DTT ₃ 95 %	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: PRODIST - Módulo 8, (2021).

2.4.6 Analisador de Energia e de Qualidade de Energia - FLUKE 435 II

O Analisador de Energia e de Qualidade de Energia - Fluke 435 II visa identificar problemas de qualidade de energia e os custos da energia desperdiçada. O processo de medição e a saída de dados dos analisadores 435-II foi otimizado para ajudar o operador a acessar as informações mais críticas com facilidade (FLUKE, 2012).

Um das principais funcionalidades do equipamento são para medição, cálculo e geração de gráficos de tensão, corrente, distorção harmônica, potência e energia, calculadora de perda de energia, eficiência de inversor de energia e etc. A figura 13 apresenta a imagem frontal do equipamento.

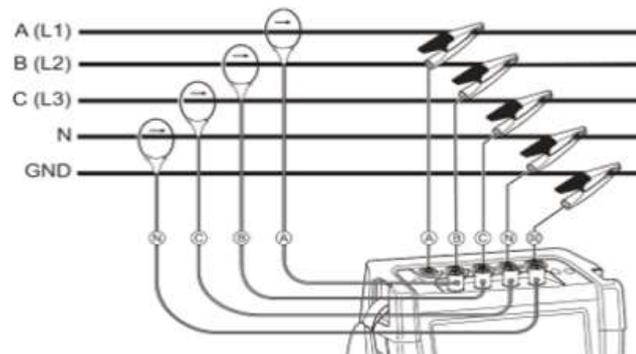
Figura 13 - Analisador de Energia e de Qualidade de Energia Fluke 435 II.



Fonte: FLUKE, (2012).

Na figura 14, é apresentado o diagrama unifilar das ligações para obtenção das medidas de tensão e de corrente de um sistema trifásico.

Figura 14 - Conexão do analisador com um sistema de distribuição trifásico.



Fonte: FLUKE, (2012).

2.4.7 Efeitos de harmônicos em uma instalação

O grau com que harmônicos podem ser toleradas em um sistema de alimentação depende da susceptibilidade da carga. Os equipamentos menos sensíveis, geralmente, são os de carga resistiva, para os quais a forma de onda não é relevante. Os mais sensíveis são aqueles que, em seu projeto, assumem a existência de uma alimentação senoidal. Contudo, mesmo para as cargas de baixa susceptibilidade, a presença de harmônicos pode ser prejudicial, produzindo maiores esforços nos componentes e isolantes (IEEE 519, 2014).

3 ANÁLISE DOS RETIFICADORES DE 12 PULSOS.

No capítulo anterior, foi exposta a fundamentação teórica relacionada aos retificadores trifásicos de doze pulsos, assim como os aspectos do mesmo, a fim de que seja possível prever o comportamento dele, nos testes e experimentos.

Nesse capítulo, é abordado o detalhamento da solução implementada com intuito de comparar os retificadores.

Num primeiro momento, optou-se por avaliar as taxas de distorções harmônicas de corrente (THD) produzidas pelos retificadores, durante uma faixa de corrente de 200 ampères e durante uma faixa de corrente de 1281 ampères, em ambos os retificadores. A distorção harmônica da tensão não é avaliada, nesse trabalho, em função da limitação de tensão que o analisador de energia pode ser submetido, no caso 1000 V.

Posteriormente, realizou-se simulações no PSIM com intuito de comparar e verificar alguns parâmetros de desempenho dos retificadores como da tensão de saída, da corrente RMS, da corrente média e da corrente máxima dos diodos.

3.1 AVALIAÇÃO DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE CORRENTE

Inicialmente, as distorções harmônicas eram causadas principalmente pela saturação magnética em materiais ferromagnéticos, como transformadores e máquinas rotativas, e a utilização de dispositivos à arco, como fornos à arco elétrico (ROSA, 2006). Contudo, com o aumento do emprego de cargas não-lineares, ou seja, aquelas em que a forma de onda da corrente não é diretamente proporcional à tensão aplicada (ANTUNES et al., 2014), como em retificadores, elevou-se o espectro de conteúdo harmônico no sistema e, conseqüentemente, afetou a qualidade da energia elétrica fornecida.

Desse modo, se uma onda periódica é rica em componentes harmônicos de alta intensidade, implica que sua forma é bastante distorcida, em relação ao padrão senoidal do sistema elétrico em corrente alternada, podendo provocar efeitos indesejados no modo de operação e na redução da vida útil dos equipamentos alimentados (HÁTERAS, 2019).

Por esse motivo, é muito importante conhecer as distorções harmônicas de corrente que estão sendo submetidos os equipamentos, a fim de que possam ser adotadas medidas, quando necessárias, com intuito de atenuar os efeitos produzidos pelas distorções.

Uma das ferramentas disponíveis para medição das distorções harmônicas são os analisadores de energia.

3.1.1 Configuração do analisador de energia

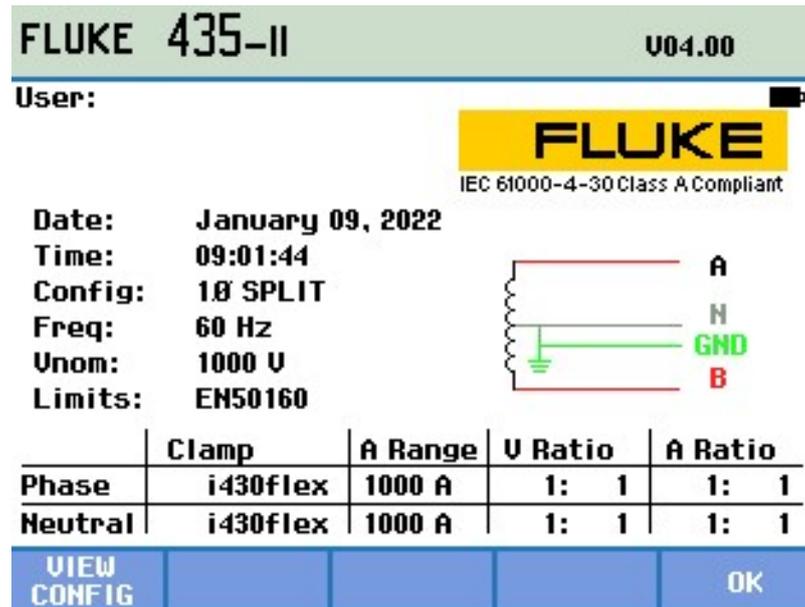
O Fluke 435 II foi o equipamento escolhido, para realização desse projeto, por estar disponível, no metrô de Porto Alegre, para realização de medições nas subestações e por ser um equipamento eficiente e com funções úteis para realização de estudos de qualidade de energia. Com base nisso, para que as medições possam representar a grandeza elétrica que está sendo medida, é necessário realizar um estudo detalhado do manual do equipamento a fim de se evitar erros de medição e ou até a queima do equipamento.

O objetivo desse subtópico é apresentar o modo como ele foi configurado, para que pudessem ser realizadas as medições de corrente elétrica e também a análise das taxas de distorções harmônicas de corrente.

Na tela apresentada da figura 15 são apresentadas as configurações para medição desse trabalho. Como pode ser visto, inicialmente devem ser configurados o tipo de ligação (delta, estrela, monofásico, bifásico, trifásico, etc...), a frequência, a tensão nominal, o tipo de sonda de medição de corrente (clamp), o *range* de corrente e a relação de transformação, caso a medida seja feita em sinais elétricos oriundos de transformadores de potencial ou transformadores de corrente.

Após a configuração dos parâmetros de medição, devem ser definidas as grandezas que se deseja medir e quais fatores se quer que o analisador calcule. Nesse trabalho, foram selecionados os itens das harmônicas de corrente até a 37º com integralização de 0,05 segundos, segundo recomendação da IEEE 519 (2014).

Figura 15- Equipamento configurado com parâmetros iniciais.



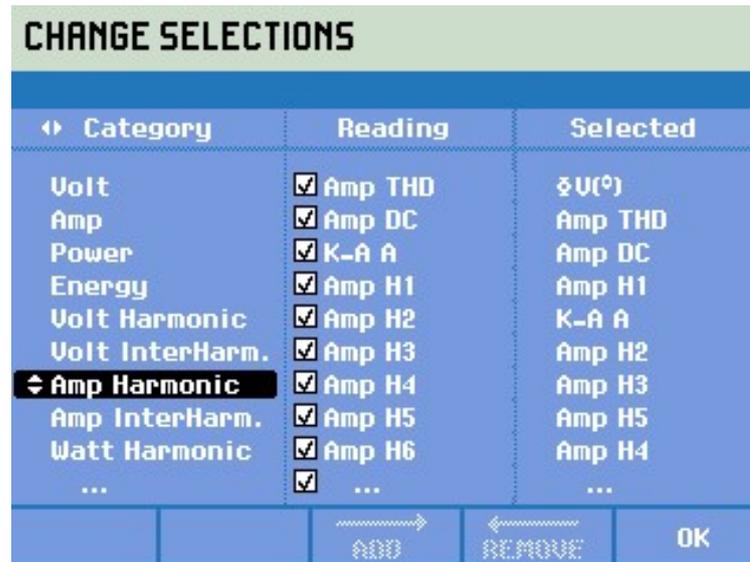
Fonte: FLUKE, (2012).

A configuração com esquema de ligação para duas fases somente, é justificada pelo fato de que a tensão máxima que o equipamento pode ser submetido é de 1000 V, e que a tensão entre fases, no lado CA, do retificador é de 1277 V. Como a medição foi realizada na fase A da ligação estrela e na fase A da ligação triângulo, a medição não traria risco de dano ao analisador.

Como a corrente nominal é 772 ampères, na SE Sapucaia e 730 ampères, na SE Farrapos, parametrizou-se 1000 A, tendo em visto que o retificador pode operar, sem atuação da proteção de sobrecarga, por duas horas com 1,5 da potência máxima e por 1 minuto com 3 vezes a potência nominal. Mas que, em alguns momentos, a corrente elétrica é próxima a zero, quando não há trens tracionando. Por fim, ressalta-se que as sondas de medição do modelo (i430flex) medem até 6000 A. Durante as medições deste trabalho não foi necessário configurar relação de transformação, pois as medições foram realizadas de forma direta, ou seja, relação 1:1.

Na figura 16, é mostrada a tela com as configurações dos fatores que foram medidos. Nesse caso são: medição de corrente RMS, fator K (número que quantifica a sobrecarga potencial nos transformadores devido às correntes de harmônicas) e harmônica de corrente da 0 a 37ª, distorção harmônica total (THD) e A escolha das leituras de harmônicas de ordem 0 até 37, deve-se a BARBI (2006), pois segundo ele, a THD é de aproximadamente 14 %, para equação (14) computando-se até a 37ª ordens de harmônicas. Além disso, a figura 16 mostra somente até a harmônica de ordem 6, em função da limitação de espaço da tela do equipamento.

Figura 16 - Tela das configurações para medição.



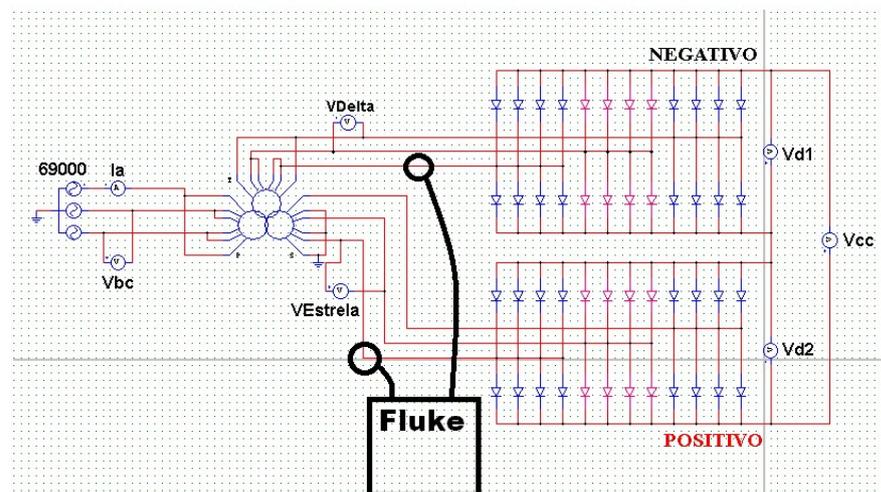
Fonte: FLUKE, (2022).

Concluídas as configurações do equipamento, o próximo passo foi instalar o mesmo para realização das medições.

3.1.2 Local da medição

O local escolhido para posicionar o analisador de energia, foi no interior da cela do retificador de tração de 3,36 kVCC. Na figura 17, é mostrado um esquema simplificado da instalação do analisador de energia, para medição de corrente que circula entre retificador e transformador.

Figura 17 - Ligação do Analisador de Energia.



Fonte: PSIM, (2022).

Cabe destacar, que a figura 17 foi extraída do circuito do *software* PSIM e adaptada, sendo genérica e desejando-se mostrar apenas o ponto de medição. Os outros detalhes do circuito estão abordados em outros momentos desse trabalho.

Na figura 18, é apresentada a imagem da medição em campo, realizada na subestação Sapucaia.

Figura 18 - Analisador instalado junto ao retificador.



Fonte: Autor, (2022).

Na figura 18 pode ser observada uma base de cor preta para o analisador de energia. Trata-se de um tapete com isolamento para 36 kV, essa medida de controle de risco foi adotada para proteger o equipamento de uma eventual sobretensão na rede alta tensão. Além disso, na imagem à esquerda, podem ser vistas as sondas de corrente envolvendo os dois condutores da fase A da ligação estrela e os dois condutores da fase A da ligação em delta. Já na imagem à direita, dentro da elipse, o ponto de luz é o analisador de energia, no interior da cela do retificador.

O ponto de medição foi escolhido a fim de que pudessem ser observadas as distorções harmônicas de corrente do retificador sem a influência de outros equipamentos.

Cabe frisar que apesar dos cabos de conexão entre o transformador e o retificador serem isolados, a instalação do analisador de energia foi realizada com o retificador desligado, com as seccionadoras de 69 kVCA, a seccionadora do positivo e a seccionadora do negativo do retificador, todas abertas. Além disso, ressalta-se que devido ao sistema de proteção do

retificador, caso alguém tente abrir a porta da cela, com ele ligado, o disjuntor de alta tensão desarma e o retificador é desligado.

Em relação a restrição para instalação do analisador, pode-se dizer que o mesmo foi instalado durante a madrugada e retirado na madrugada seguinte, a fim de que as medições não interferissem na operação dos trens. Por outro lado, isso possibilitou uma quantidade maior de dados, ou seja, permitiu avaliar o comportamento da corrente e da taxa distorção harmônica em diferentes horários, ou seja, quando o retificador estivesse operando na faixa de 200 ampères e na faixa de 1281 ampères.

3.1.3 Horários de avaliação da corrente e das distorções harmônicas

No final do ano de 2021, a Trensurb lançou um aplicativo para usuários do sistema operacional Android, onde é possível verificar o status da operação do sistema metroviário, bem como a localização e intervalos de partidas dos trens, das estações, durante os sete dias da semana.

Na figura 19, é mostrada a tela do aplicativo, a qual foi a referência para filtro dos horários de maior e menor circulação de trens. Desse modo, facilitou a avaliação das medidas obtidas pelo analisador, em relação aos dois modelos de retificadores analisados.

Figura 19 - Intervalos das partidas dos trens.

The screenshot shows the 'Operação do metrô' screen with the following data:

Partidas da Estação Mercado		Partidas da Estação Novo Hamburgo	
Faixa horária	Intervalo (minutos)	Faixa horária	Intervalo (minutos)
05h00 - 06h31	12	05h00 - 05h43	12
06h31 - 06h58	10	05h43 - 05h53	10
06h58 - 07h19	7	05h53 - 06h21	7
07h19 - 16h19	12	06h21 - 07h06	5
16h19 - 16h43	8	07h06 - 08h09	7
16h43 - 18h25	6	08h09 - 17h18	12
18h25 - 18h57	8	17h18 - 18h07	8
18h57 - 19h07	10	18h07 - 19h55	12
19h07 - 19h55	12	19h55 - 20h25	15
19h55 - 20h25	15	20h25 - 23h25	20
20h25 - 23h25	20		

Fonte: TRENSURB, (2022).

A partir dos intervalos das partidas das estações, foi possível prever o intervalo em qual ocorreria o pico e vale de corrente. E em vermelho, está destacado o pico da manhã e em verde está o vale da circulação de trens.

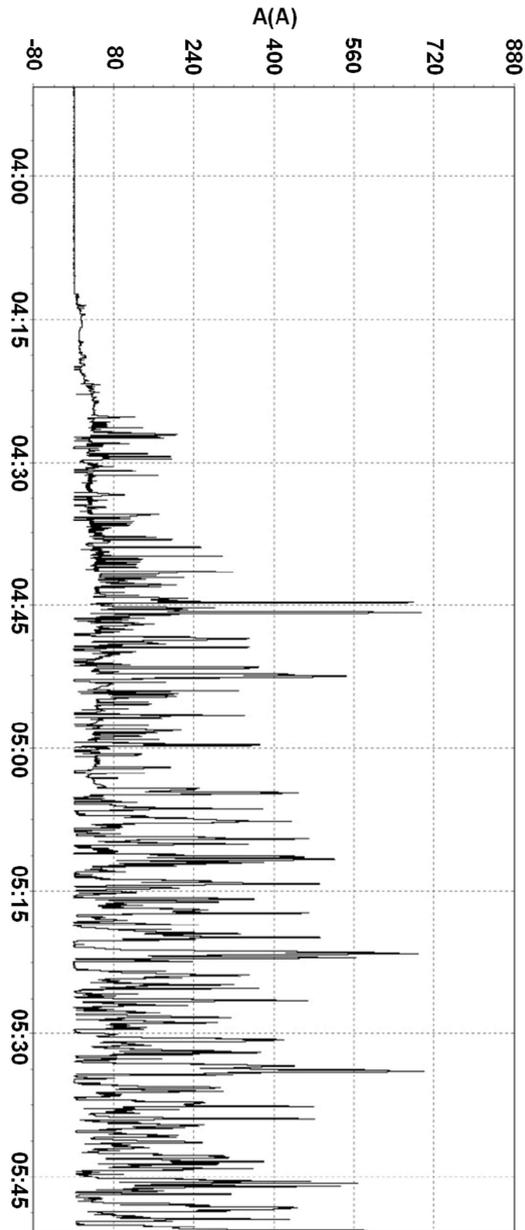
Foi filtrado um tempo de medição de 15 minutos, com tempo de integralização dos valores a cada 500 milissegundos, devido à Norma IEEE 519 (2014).

3.1.4 Software Power Log

Power Log é o *software* usado para baixar os dados do analisador de energia, na figura 21, é mostrada a tela do *software*.

A Taxa de Distorção Harmônica Total de corrente (THD%), a Taxa de Distorção Harmônica Individual(DHI%) da ordem 0 até a 37^a ordem e a Taxa de Distorção de Demanda (TDD%), ficaram a cargo dos cálculos realizados pelo analisador de energia.

Na figura 20 é apresentada a captura do intervalo entre às 03h50min e 05h50min. É possível selecionar intervalos até sete dias de consecutivos de medição, entretanto haverá um tempo maior para geração dos gráficos proporcionalmente ao intervalo de medição.

Figura 20 - Tela do *Software Power Log*.

Fonte: *Power Log*, (2022).

O gráfico apresentado na figura 20, é o da corrente elétrica quando iniciou a circulação dos trens no dia 06 de janeiro de 2022, percebe-se que houve variação da corrente próximo das 04h15min. Nesse momento, os trens estavam sendo ejetados do estacionamento para se posicionarem nas estações e a partir das 05h00min iniciar a operação comercial.

Além de gráficos de corrente, o *Power Log* permite gerar os gráficos da THD de corrente com valores máximos e mínimos, do fator de potência e das distorções harmônicas de cada ordem medida.

3.1.5 Método de avaliação das leituras de distorção harmônica

O quadro 3, extraído da IEEE-519 (2014) foi usado para comparação dos valores medidos. Antes disso, foram determinados os valores da máxima corrente de curto-circuito (I_{SC}), máxima corrente (na frequência fundamental) demanda pela carga (I_L) e posteriormente a relação I_{SC}/I_L .

O método de cálculo de (I_{SC}) e (I_L) para aplicação do quadro 3, foi retirado de DUGAN (2004).

3.1.5.1 Cálculo da corrente máxima (I_{SC})

É possível determinar a corrente de curto-circuito trifásico aproximada (I_{SC}) no ponto de entrega. Esse valor pode ser obtido diretamente da concessionária, e expresso em ampères. Se a potência nominal for dada em MVA, pode-se converter a mesma para um valor em ampères, usando a seguinte expressão (DUGAN, 2004):

$$I_{SC} = \frac{1000 \times (P_n \times 3)}{\sqrt{3} \times V_L} \quad (18)$$

em que, P_n é a potência nominal do transformador e V_L é a tensão de linha no lado que se deseja avaliar. A potência nominal do transformador foi multiplicada por 3, porque em um regime maior que 3 vezes a potência nominal, o disjuntor do grupo retificador abre imediatamente. Como há dois secundários, nos transformadores de tração, desse projeto e potência nominal do mesmo é 3,3 MVA. O valor usado para P_n será 1,650 MVA, pois é essa a potência nominal de um único enrolamento.

3.1.5.2 Cálculo da I_L e da relação I_{SC}/I_L

Pode-se encontrar a demanda média de quilowatts da carga, na fatura de energia, avaliando-se os 12 meses mais recentes (DUGAN, 2004).

Para calcular a corrente de demanda média (I_L) a partir da demanda média em quilowatts usa-se a seguinte expressão (DUGAN, 2004),

$$I_L = \frac{D_m}{FP \times \sqrt{3} \times V_L} \quad (19)$$

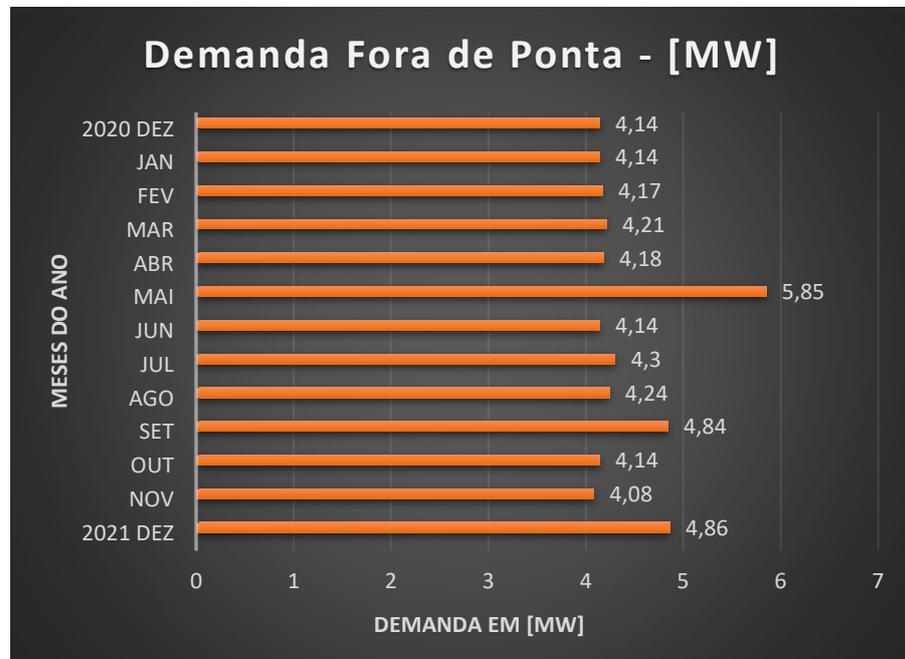
em que, D_m representa a demanda média, FP representa o fator de potência da instalação e V_L representa a tensão de linha (DUGAN, 2004).

Para o cálculo da D_m foram extraídos os dados da fatura da subestação Sapucaia e da subestação Farrapos, posteriormente foi calculada a demanda média para as mesmas.

3.1.5.2.1 Subestação Sapucaia

Na figura 21, estão apresentados os dados da fatura da subestação Sapucaia.

Figura 21 - Dados da subestação Sapucaia.



Fonte: Excel, (2022).

O mesmo método foi utilizado para as duas subestações, no entanto, na SE Sapucaia a tensão de linha no secundário é de 1277 V. Para o cálculo foram utilizados os últimos doze valores medidos no horário fora de ponta.

$$D_{m_Sapucaia} = \frac{4,86+4,08+4,14+4,84+4,24+4,30+4,14+5,85+4,18+4,21+4,17+4,14}{12} = 4,429 \text{ MW} \quad (20)$$

Como essa demanda refere-se aos dois retificadores que operam na subestação, o valor usado será $\frac{4,429}{2} = 2,215 \text{ MW}$. Mas como se trata de dois enrolamentos no secundário do transformador, então, $\frac{2,215}{2} = 1,107 \text{ MW}$.

Utilizando as equações (18) e (19), tem-se os seguintes resultados, aplicando a tensão de linha do secundário do transformador da subestação Sapucaia, tem-se os seguintes resultados:

$$I_{SC_Sapucaia} = \frac{1000 \times (P_n \times 3)}{\sqrt{3} \times V_n} = \frac{1000 \times (1,650 \text{ MVA} \times 3)}{\sqrt{3} \times 1,277 \text{ kV}} = 2238 \text{ A} \quad (21)$$

$$I_{L_Sapucaia} = \frac{D_{m_Sapucaia}}{FP \times \sqrt{3} \times V_{L_Sapucaia}} = \frac{1107 \text{ kW}}{0,91 \times \sqrt{3} \times 1,277 \text{ kV}} = 550 \text{ A} \quad (22)$$

Dessa forma, tem-se as informações necessárias para determinação da relação I_{sc}/I_L , da subestação Sapucaia.

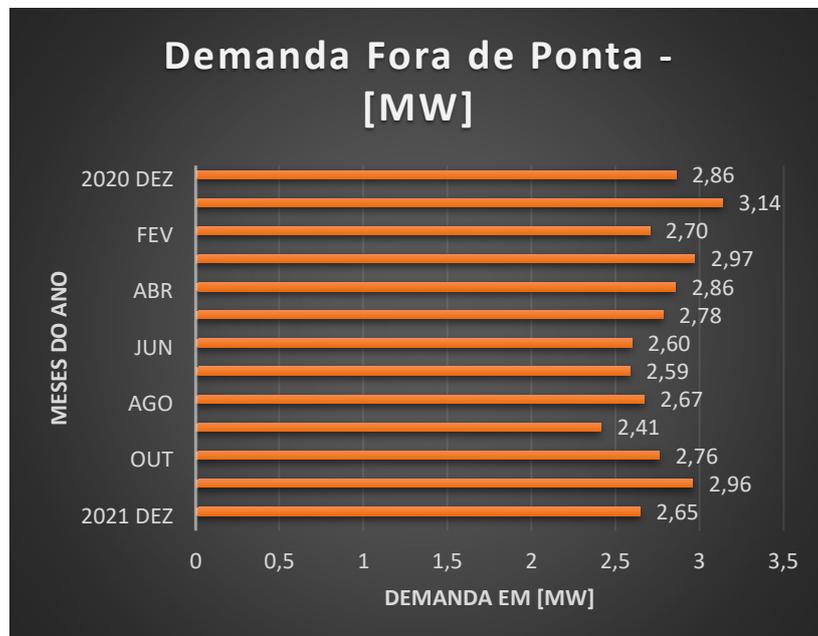
Logo,

$$\frac{I_{sc}}{I_L} = \frac{2238}{550} = 4,07 \quad (23)$$

3.1.5.2.2 Subestação Farrapos

Na figura 22, estão apresentados os dados de demanda da SE Farrapos.

Figura 22 - Dados da subestação Farrapos.



Fonte:Excel, (2022).

Calculando-se a média da demanda medida fora de ponta, a partir de fevereiro. Desse modo, tem-se que:

$$D_{m_Farrapos} = \frac{3,14+2,70+2,97+2,86+2,78+2,60+2,59+2,67+2,41+2,76+2,96+2,65}{12} = 2,76 \text{ kW} \quad (24)$$

Foram usados os valores de fora ponta, pois nesse horário está a análise das medições de distorção harmônica de corrente.

Como essa demanda calculada na equação (23) refere-se aos dois retificadores que operam simultaneamente na subestação, o valor usado será $\frac{2,76}{2} = 1,38 \text{ MW}$. E como os transformadores de tração possuem dois enrolamentos secundários, então, $\frac{1,38}{2} = 0,69 \text{ MW}$. Além disso, o fator potência considerado é de 0,91.

Utilizando as equações (18) e (19), tem-se os seguintes resultados, e aplicando a tensão de linha do secundário da subestação Farrapos, tem-se:

$$I_{SC_Farrapos} = \frac{1000 \times (P_n \times 3)}{\sqrt{3} \times P_n} = \frac{1000 \times (1,650 \text{ MVA} \times 3)}{\sqrt{3} \times 1,300 \text{ kV}} = 2198 \text{ A} \quad (25)$$

$$I_{L_Farrapos} = \frac{D_{m_Farrapos}}{FP \times \sqrt{3} \times V_{L_Farrapos}} = \frac{690 \text{ kW}}{0,91 \times \sqrt{3} \times 1,300 \text{ kV}} = 336 \text{ A} \quad (26)$$

Dessa forma, tem-se as informações necessárias para determinar a relação I_{sc}/I_L da subestação Farrapos.

Logo,

$$\frac{I_{SC}}{I_L} = \frac{2198}{336} = 6,54 \quad (27)$$

3.1.5.3 Referência para análise.

Como pôde ser verificado nos cálculos, as duas subestações se enquadram na relação $I_{sc}/I_L < 20$, ou seja, primeira linha do quadro 3.

Quadro 3 - Parâmetros de distorção harmônica de corrente.

Taxa da distorção harmônica em (%)						
Isc/IL	< 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 25	35 < h	TDD
< 20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20 < 50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50 < 100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100 < 1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
> 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Fonte: IEEE 519, (2014).

3.1.5.4 SIMULAÇÃO DOS RETIFICADORES NO PSIM

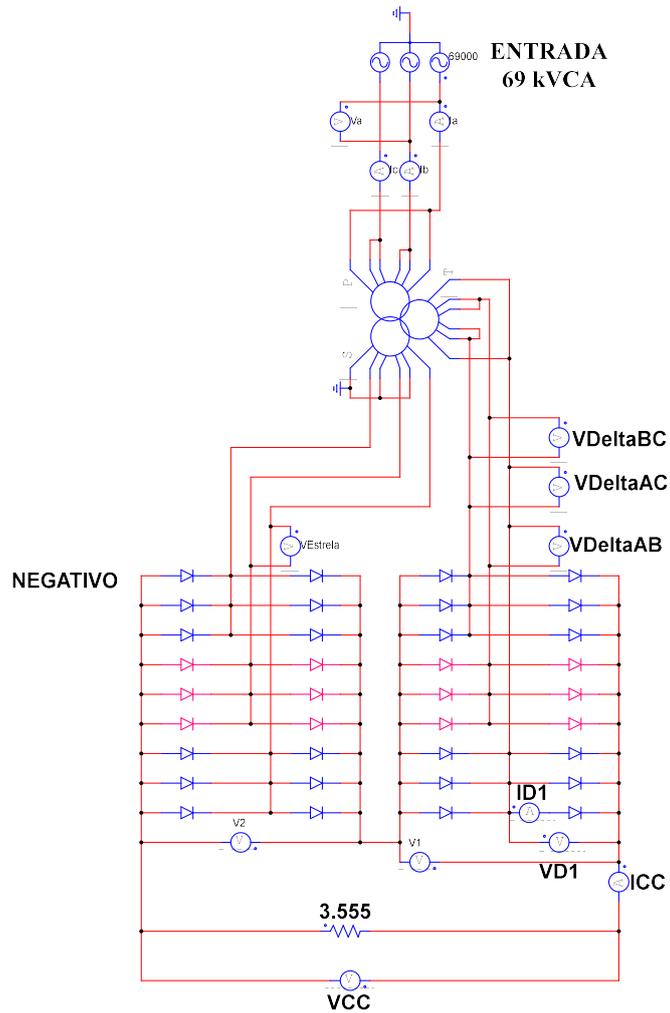
Os circuitos dos retificadores da SE Sapucaia e da SE Farrapos foram simulados no *software* PSIM, a fim de averiguar o comportamento da tensão de saída, e da tensão de entrada CA, nos retificadores, além das correntes RMS, média e de pico dos diodos dos retificadores.

As simulações no PSIM foram necessárias, pois não havia equipamento disponível, durante a realização desse trabalho, com classe de tensão necessária para realização das medições, no caso 3,36 kVCC.

Na figura 23, é apresentado o circuito simulado no PSIM referente à SE Sapucaia e na figura 24 é mostrado o circuito simulado no PSIM do retificador referente à SE Farrapos. No próximo capítulo estão apresentados os gráficos e os resultados dessas simulações.

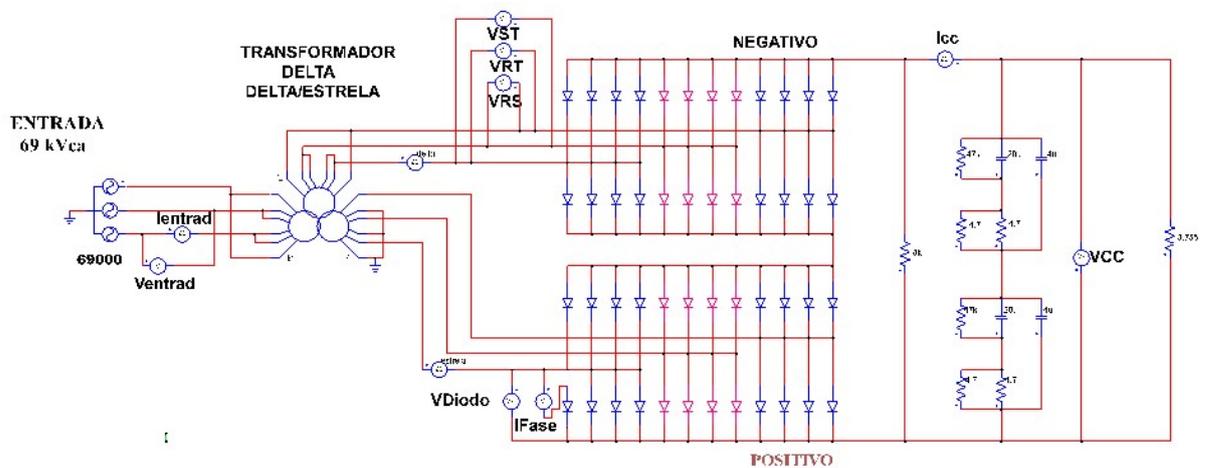
Figura 23 - Retificador da subestação Sapucaia.

3 MW/3.36 kVCC/946 A



Fonte: PSIM, (2022).

Figura 24 - Retificador da subestação Farrapos.



Fonte: PSIM, (2022).

4 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Esse capítulo traz os resultados das comparações realizadas nos retificadores trifásicos de doze pulsos instalados, e em operação na SE Farrapos, em Porto Alegre, e na SE Sapucaia, em Sapucaia do Sul.

Durante a realização desse trabalho, foram identificadas diversas diferenças entre os modelos dos equipamentos analisados, o número de diodos por fase, capacidade condução de corrente elétrica dos diodos e a potência dos dissipadores de calor entre outras.

Além disso, sugere-se a adaptação de rodinhas, nos retificadores com o objetivo de facilitar a movimentação dos mesmos, no interior da subestação.

4.1 RETIFICADOR DA SUBESTAÇÃO SAPUCAIA

4.1.1 Dados técnicos e avaliação de desempenho

Nesta subseção será apresentada a análise quantitativa do retificador com dados de placa apresentados na Figura 25.

Figura 25 - Placa do retificador.

Redresseur - Gleichrichter - Rectifier					
Type D T150 36 1 2DBS 12 N DRD1430F45 S					
No HS	S00889-01-102	Date	2018		
P_{dN}	3178	kW	U_{v0}	1277	V_{eff}
U_{dN}	3360	V	I_{vN}	772	A_{eff}
I_{dN}	946	A	f	60	Hz
Classe charge	150% 7200s 300% 60s			6	P_h

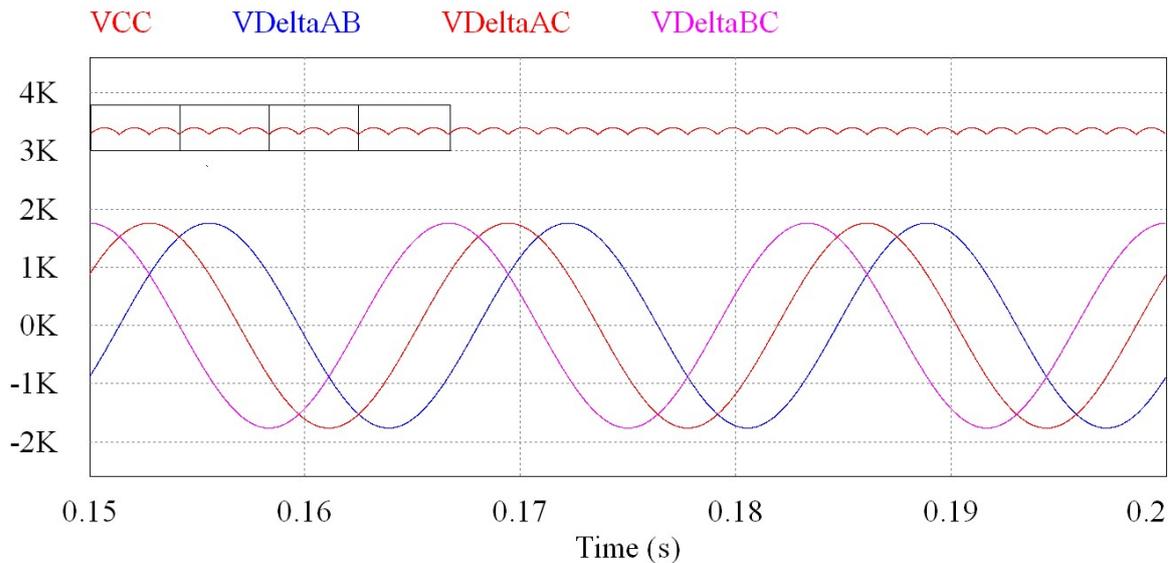
Fonte: ACERVO TRENURB, (2022).

Na figura 25, à esquerda estão os dados de corrente e de tensão elétrica, relacionados ao lado CC do retificador, e à direita estão os dados de tensão e de corrente que dizem respeito ao lado CA do equipamento. Na última linha com informações técnicas são apresentados os tempos de sobrecarga ao qual o equipamento foi projetado e teve suas proteções ajustadas, sendo 150% de sobrecarga durante 2 horas e 300% de sobrecarga durante 1 minuto.

4.1.1.1 Gráficos obtidos da simulação do PSIM.

Nesse momento, são apresentados os gráficos e os valores obtidos durante as simulações no *software* PSIM, versão estudante do circuito apresentado na Figura 23. Na figura 26, estão exibidas as formas de onda da tensão de entrada e da tensão de saída, do retificador.

Figura 26 - Gráficos das tensões de entrada e de saída do retificador.



Fonte: PSIM, (2022).

Na figura 26, VCC é a tensão de saída do retificador, a qual tem o formato diferente das demais ondas. Foi editado um retângulo a cada três pulsos da VCC afim de verificar a ocorrência dos doze pulsos, num ciclo completo de uma tensão VDelta. Os doze pulsos, característica desse retificador se deve fundamentalmente ao fato das tensões das fases (A, B e C) da ligação estrela e das fases (A, B e C) da ligação em delta estarem 30° defasadas entre si. Desse modo, num ciclo de 360° , tem-se os doze ciclos como está destacado, na figura 26. Em relação as tensões VDelta apresentarem onda de formato senoidal, é em função delas não estarem sob o efeito de elementos não ideais, desse modo apresentam um formato senoidal puro.

Pelo motivo de não haver ponteiros disponíveis para medição, na saída do retificador, o presente projeto, nesse aspecto, limitou-se as simulações do PSIM.

Na figura 27 são apresentados os valores RMS, médio e máximo das ondas de tensão da figura 26.

Figura 27 - Valores RMS, médios e máximo.

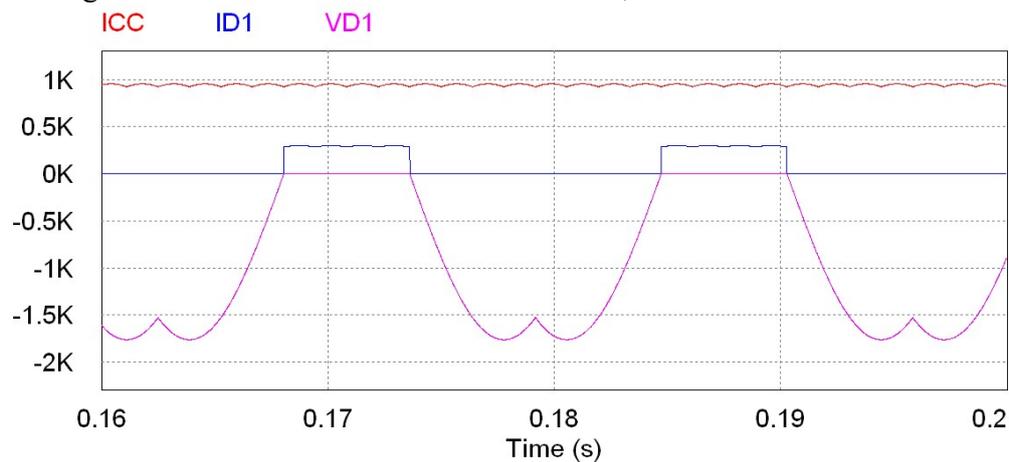
RMS Value		Average Value		Measure	
Time From	Time To	Time From	Time To	Time	Measure
	1.5001000e-001		1.5001000e-001		1.7986000e-001
	2.0000000e-001		2.0000000e-001		
VCC	3.3637280e+003	VCC	3.3635501e+003	VCC	3.4022956e+003
VDeltaAB	1.2453276e+003	VDeltaAB	-5.4059126e-003	VDeltaAB	-1.7009649e+003
VDeltaAC	1.2453275e+003	VDeltaAC	-5.4074242e-003	VDeltaAC	-1.2458501e+003
VDeltaBC	1.2453275e+003	VDeltaBC	-1.5116274e-006	VDeltaBC	4.5511487e+002

Fonte: PSIM, (2022).

As simulações mostraram-se bastante coerentes em relação à corrente de saída RMS do retificador. Em relação à entrada, houve uma diferença de 42 VCA, de certa forma, pode-se dizer que é irrelevante essa diferença ao comparar-se com 1277 VCA.

Na figura 28, são apresentados os gráficos da corrente de saída do retificador, da corrente em um diodo e da tensão em um diodo.

Figura 28 - Corrente de saída do retificador , corrente e tensão em um diodo.



Fonte: PSIM, (2022).

Na figura 29 são apresentados os valores RMS, médios e máximos das ondas de tensão da figura 28.

Figura 29 - Valores RMS, médios e máximos.

RMS Value		Average Value		Measure	
Time From	Time To	Time From	Time To	Time	Measure
	1.6000000e-001		1.6000000e-001		1.7291295e-001
	2.0000000e-001		2.0000000e-001		
ICC	9.4626626e+002	ICC	9.4621639e+002	ICC	9.5703721e+002
ID1	1.5581306e+002	ID1	8.2101886e+001	ID1	2.9907419e+002
VD1	1.2124556e+003	VD1	-9.8624944e+002	VD1	3.2898161e-003

Fonte: PSIM, (2022).

Em que, ICC representa a corrente de saída do retificador e pode-se perceber que ela varia proporcionalmente a tensão de saída pelo fato de haver somente um resistor conectado, na saída do circuito simulado, da figura 23. A ID1 representa a corrente em um diodo, sendo possível observar que o diodo só está em condução quando a diferença de potencial entre os terminais dele é zero. Por fim, tem-se VD1 que representa a tensão em um diodo, sobre a qual pode-se destacar o valor RMS de 1212 Volts que equivale aproximadamente 1/3 da VCC. Isso é explicado em função da topologia do circuito, no qual há sempre três diodos em série, por fase, em condução.

Os valores apresentados, mostram algumas das características fundamentais durante especificação para aquisição de um semicondutor que são: Corrente média, corrente máxima e máxima tensão que o diodo pode suportar.

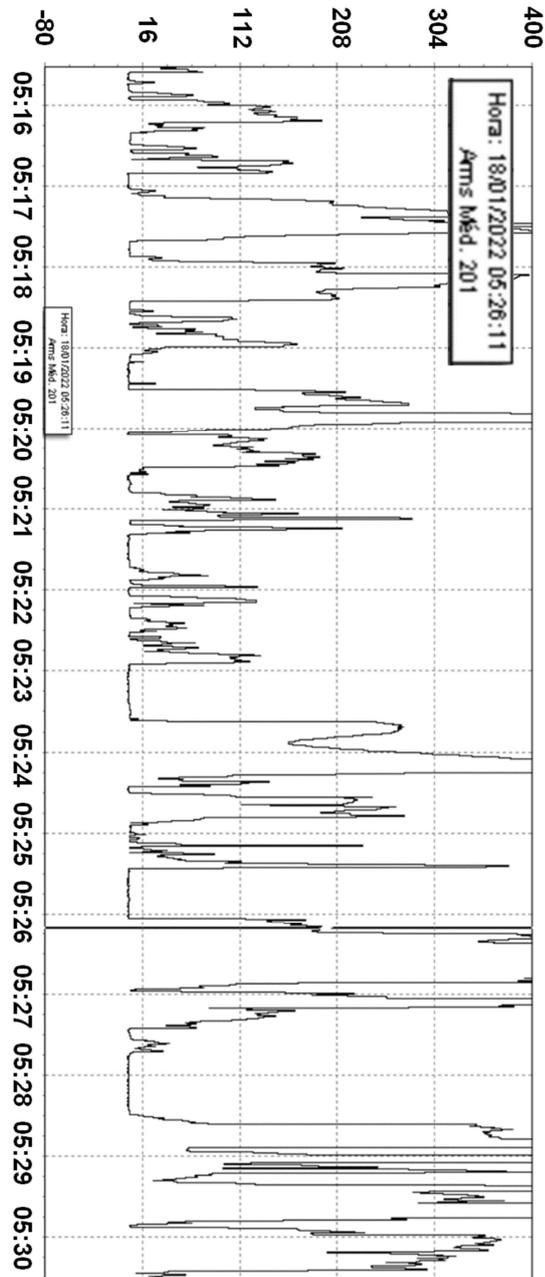
4.1.1.2 Avaliação das taxas de distorções harmônicas de corrente

As medições, na SE Sapucaia e na SE Farrapos, ocorreram num período, de aproximadamente 24 horas, em dias normais de operação dos trens. Com o objetivo de avaliar as distorções harmônicas de corrente, comparou-se o comportamento das distorções harmônicas no horário de maior circulação de trens (que é o horário de maior corrente no retificador) e no horário de menor circulação de trens.

Inicialmente realizou-se um filtro de horário, no *software Power Log*, da leitura de corrente RMS das 05h15 às 05h30min. Nesse intervalo, as partidas dos trens ocorrem a cada 12 minutos nos dois extremos do sistema metroviário.

Com essa faixa de tempo selecionada, verificou-se a corrente elétrica RMS média de 201 A, às 05h26min11seg. Na figura 30 é apresentado o gráfico do registro da corrente de 201 ampères, no intervalo selecionado.

Figura 30- Gráfico do registro da corrente de 201 ampères.
A(A)



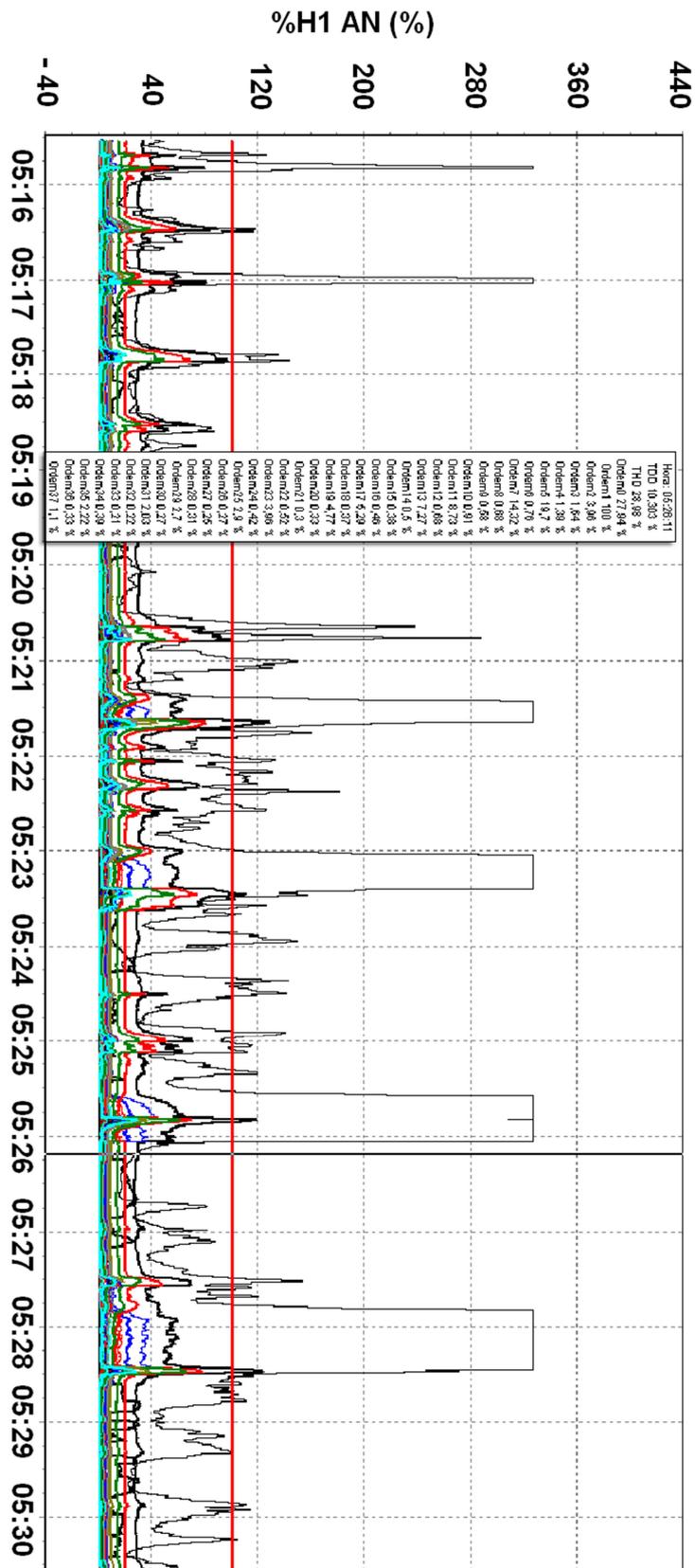
Fonte: Power Log, (2022).

A seguir, foi inserido o valor de 550 ampères, no *Power Log*, para o cálculo da TDD, esse valor de corrente foi obtido na equação (22). Desse modo, pôde-se gerar o gráfico da evolução temporal da distorção harmônica.

Na figura 31, é apresentada a evolução temporal da taxa distorção harmônica total, da TDD, e das harmônicas de ordem 0 até a ordem 37, no período das 05h15 às 05h30min.

Considerou-se até a 37^a harmônica, pois segundo (BARBI, 2006) a THD é de aproximadamente 14 %, para retificadores de doze pulsos, quando se considera até a distorção harmônica de ordem 37.

Figura 31 - Distorção harmônica para 201 ampères.



Fonte: Power Log, (2022).

Na figura 32, são apresentados os percentuais da distorção harmônica da figura 31, essa apresentação separada tem como objetivo melhorar a visualização dos valores obtidos.

Figura 32 - Legenda da figura 31.

Hora: 05:26:11	
TDD 10,303 %	Ordem18 0,37 %
THD 28,98 %	Ordem19 4,77 %
Ordem0 27,94 %	Ordem20 0,33 %
Ordem1 100 %	Ordem21 0,3 %
Ordem2 3,96 %	Ordem22 0,52 %
Ordem3 1,64 %	Ordem23 3,96 %
Ordem4 1,39 %	Ordem24 0,42 %
Ordem5 19,7 %	Ordem25 2,9 %
Ordem6 0,76 %	Ordem26 0,27 %
Ordem7 14,32 %	Ordem27 0,25 %
Ordem8 0,68 %	Ordem28 0,31 %
Ordem9 0,58 %	Ordem29 2,7 %
Ordem10 0,91 %	Ordem30 0,27 %
Ordem11 8,73 %	Ordem31 2,03 %
Ordem12 0,68 %	Ordem32 0,22 %
Ordem13 7,27 %	Ordem33 0,21 %
Ordem14 0,5 %	Ordem34 0,39 %
Ordem15 0,38 %	Ordem35 2,22 %
Ordem16 0,46 %	Ordem36 0,33 %
Ordem17 5,29 %	Ordem37 1,1 %

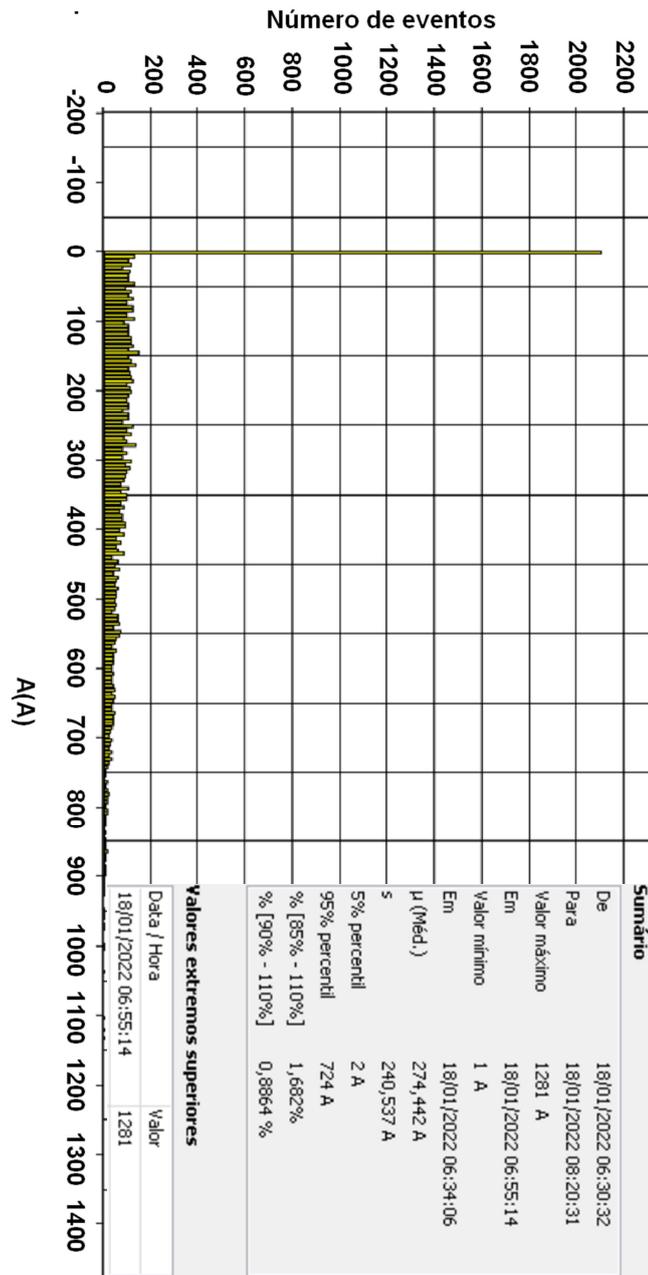
Fonte: *Power Log*, (2022).

Na figura 32, é possível verificar, que os valores estão acima do que seria esperado (THD deveria de ser em torno de 14 %) isso se deve ao fato de que essa corrente lida não tem a influência do filtro das harmônicas múltiplas de 3, produzido pela ligação delta do secundário do transformador, tampouco possui a influência do cancelamento das harmônicas de 5^a e 7^a ordens, gerados pela combinação das ligações delta e estrela dos secundários do transformador (BARBI, 2006).

Ainda sobre a figura 31, pode-se verificar que o cursor foi posicionado no instante onde a corrente RMS medida foi de 201 ampères às 05h26min11seg. Desse modo, foram apresentados os valores percentuais da THD, da TDD e das harmônicas de ordem 0 até a ordem 37.

Posteriormente, foi realizado um novo filtro no *software*, a fim de encontrar o pico de corrente, para isso foi selecionado o horário das 06h30min às 08h20min. Na figura 33, é apresentado um histograma da corrente RMS, no qual pode ser verificado que, às 06h55min14seg ocorre um pico de corrente, que equivale a 1281 ampères. Isso é muito coerente, pois na figura 19 mostrou-se que o intervalo dos trens partindo da estação Novo Hamburgo é de 5 minutos, entre às 06h21min e às 07h06min. Salienta-se que essa estação fica à 15,4 km da SE Sapucaia.

Figura 33 - Histograma da corrente RMS.

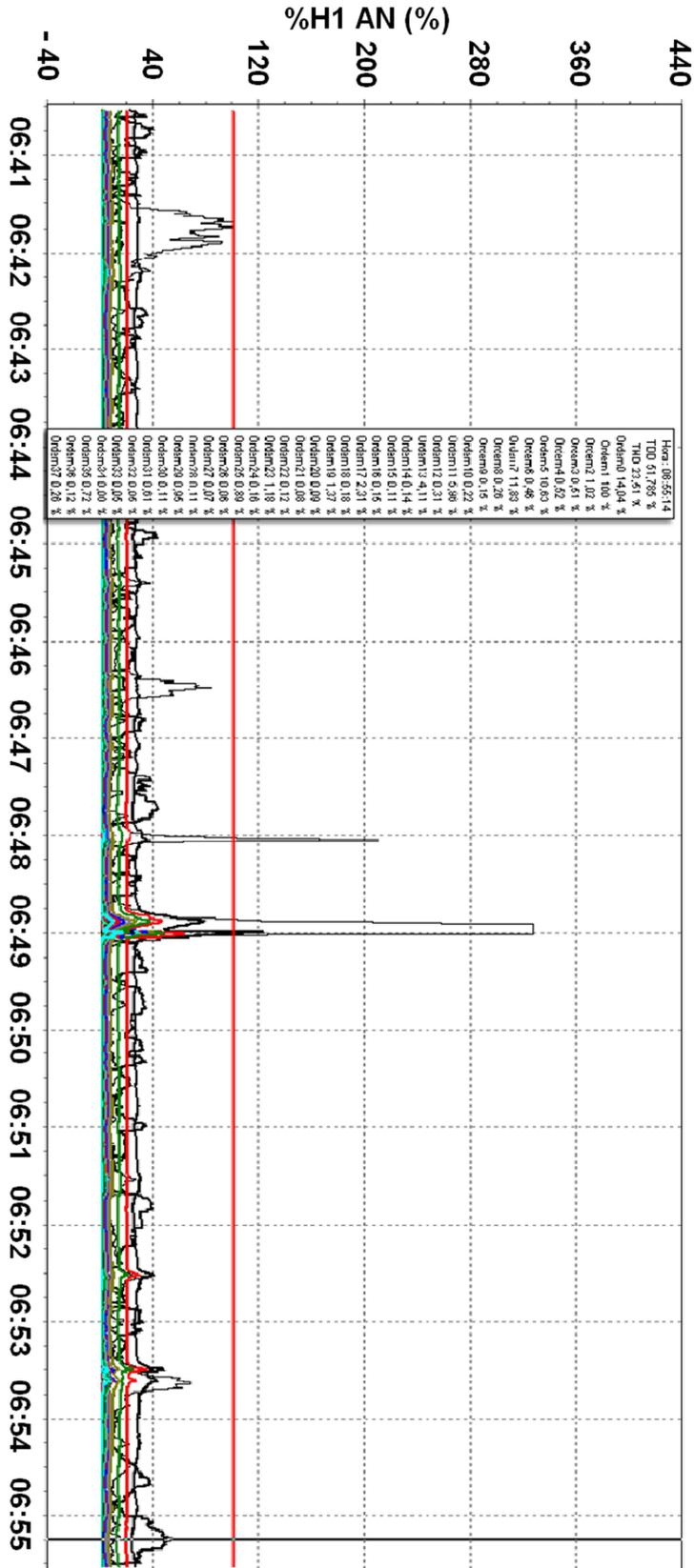


Fonte: *Power Log*, (2022).

Na sequência da análise, foi atualizado o valor da demanda de corrente de carga para 550 A resultado obtido na equação (22), no *Power Log*, com objetivo de se obter o valor da TDD. Dessa forma, gerou-se o gráfico da taxa de distorção harmônica para o intervalo das 06h40min às 06h55min. O intervalo de 15 minutos é para atender a recomendação de IEEE-519, e o instante de início do intervalo foi escolhido para facilitar a visualização de todas as ordens harmônicas analisadas.

Na figura 34, é apresentado o gráfico de distorção harmônica com o cursor posicionado no mesmo instante em que ocorreu a leitura de 1281 ampères às 06h55min14seg.

Figura 34 - Distorção harmônica para 1281 ampères.



Fonte: Power Log, (2022).

Na figura 35 é mostrada a legenda da figura 34, a separação das figuras foi necessária para melhorar a visualização dos dados.

Figura 35 - Valores percentuais das taxas de distorção harmônica.

Hora: 06:55:14	
TDD 51,785 %	Ordem18 0,18 %
THD 23,51 %	Ordem19 1,37 %
Ordem0 14,04 %	Ordem20 0,09 %
Ordem1 100 %	Ordem21 0,08 %
Ordem2 1,02 %	Ordem22 0,12 %
Ordem3 0,51 %	Ordem23 1,18 %
Ordem4 0,52 %	Ordem24 0,16 %
Ordem5 18,63 %	Ordem25 0,89 %
Ordem6 0,46 %	Ordem26 0,06 %
Ordem7 11,83 %	Ordem27 0,07 %
Ordem8 0,26 %	Ordem28 0,11 %
Ordem9 0,15 %	Ordem29 0,95 %
Ordem10 0,22 %	Ordem30 0,11 %
Ordem11 5,96 %	Ordem31 0,61 %
Ordem12 0,31 %	Ordem32 0,05 %
Ordem13 4,11 %	Ordem33 0,05 %
Ordem14 0,14 %	Ordem34 0,09 %
Ordem15 0,11 %	Ordem35 0,72 %
Ordem16 0,15 %	Ordem36 0,12 %
Ordem17 2,31 %	Ordem37 0,26 %

Fonte: *Power Log*, (2022).

Em relação a figura 34, é possível perceber que existe uma diminuição da distorção harmônica quando o retificador está com uma corrente mais elevada. Conclui-se, preliminarmente, que o retificador de doze pulsos funciona como um filtro de distorção harmônica de corrente, quando posto em carga, segundo os resultados obtidos. Isso é coerente com BARBI (2006), que mostra que os retificadores de doze pulsos podem ser usados como atenuadores de distorções harmônicas.

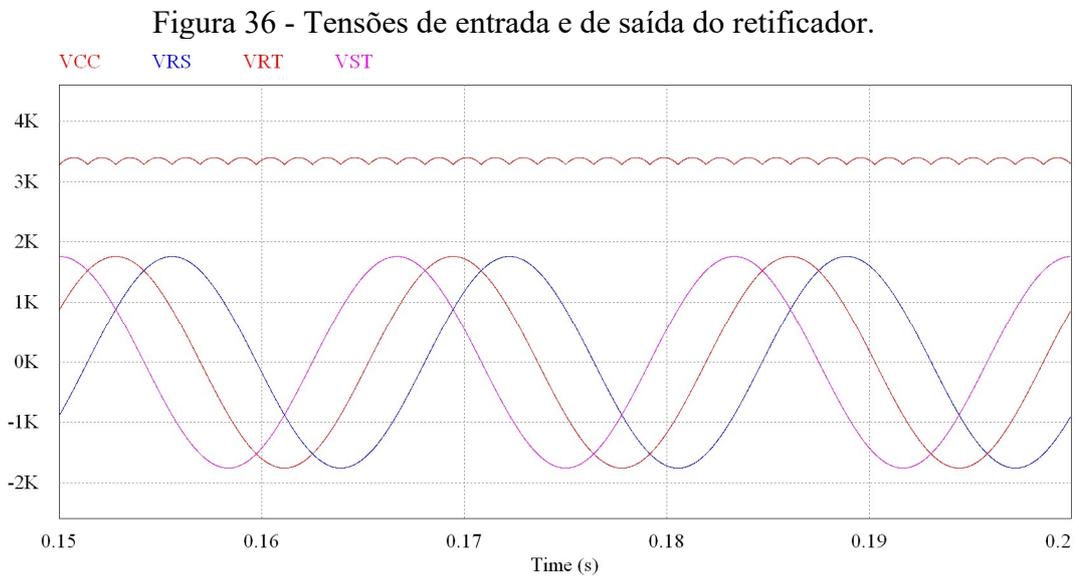
4.2 RETIFICADOR DA SUBESTAÇÃO FARRAPOS

Nesta subseção será abordado o retificador instalado na subestação Farrapos, que quando comparado ao retificador instalado na subestação Sapucaia apresenta uma defasagem tecnológica de aproximadamente 36 anos. Desta forma, não será possível apresentar a mesma quantidade de detalhes para este modelo de retificador.

4.2.1 Simulação do PSIM

O retificador foi simulado conforme o circuito apresentado na figura 24.

Na figura 36 é apresentada a tensão de linha no lado CA do retificador, não há uma identificação da tensão, se é tensão de linha do secundário ou do terciário do transformador porque nos dois casos a tensão de linha é a mesma.



Em relação a tensão de saída (V_{CC}), a mesma é praticamente igual à V_{CC} do retificador da SE Sapucaia, pois os diodos do PSIM não foram dimensionados nem relação a tensão de ruptura nem em relação a resistência interna. Isso se justifica, pois, o objetivo da simulação estava direcionado, principalmente em obter os valores de corrente e tensão individuais dos diodos. E do modo que foi realizada a simulação esse objetivo foi alcançado. As tensões V_{RS} , V_{RT} e V_{ST} são as tensões de linha, na entrada do retificador.

Na figura 37 são apresentados os valores RMS, médios e máximos referente a simulação da figura 36. Além disso, pode-se perceber que os valores RMS das tensões (V_{RS} , V_{RT} e V_{ST}) são iguais, como era esperado ao avaliar, visualmente o gráfico da figura 36.

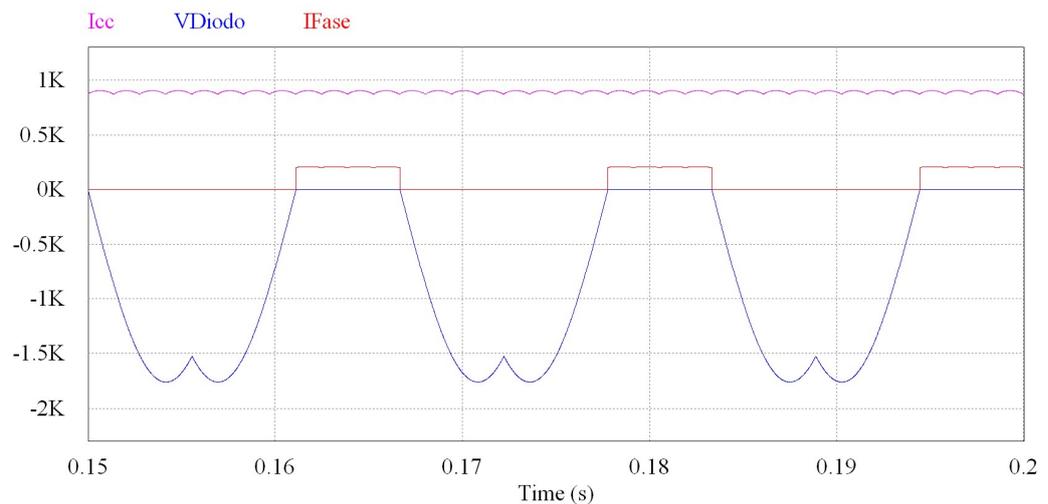
Figura 37 - Valores RMS, médios e máximos.

RMS Value		Average Value		Measure	
Time From	Time To	Time From	Time To	Time	Measure
1.5001000e-001	1.9997000e-001	1.5001000e-001	1.9997000e-001	1.7292213e-001	
VCC	3.3628889e+003	VCC	3.3627114e+003	VCC	3.4013716e+003
VRS	1.2451841e+003	VRS	5.2657351e-001	VRS	1.6997495e+003
VRT	1.2451882e+003	VRT	-5.3046080e-001	VRT	4.5218412e+002
VST	1.2446252e+003	VST	-1.0570343e+000	VST	-1.2475654e+003

Fonte: PSIM, (2022).

Na figura 38 são apresentados os gráficos da corrente contínua de saída do retificador, da corrente em um diodo e da tensão em um diodo. É importante observar que quando a tensão sobre os terminais do diodo é zero, ele está em condução. E isso é o que realmente acontece durante a operação do retificador.

Figura 38 - Corrente de saída, corrente e tensão em um diodo.



Fonte: PSIM, (2022).

Na figura 39 são apresentados os valores RMS, médios e máximos da simulação da figura 38. Cabe ressaltar que esses valores foram simulados supondo que a corrente média, na saída do retificador é igual 895 A. Além disso, tem-se que a IFase representa a corrente em um diodo, sendo que para esse modelo de retificador a corrente RMS é de 106 ampères e a corrente máxima em um diodo é de 210 ampères quando o retificador está operando com 100% da potência nominal.

Figura 39 - Valores RMS, médios e máximos.

RMS Value		Average Value		Measure	
Time From	1.0002000e-001	Time From	1.0002000e-001	Time	1.2981000e-001
Time To	1.3000000e-001	Time To	1.3000000e-001	Time	1.2981000e-001
icc	8.9570180e+002	icc	8.9564801e+002	icc	9.0623081e+002
IFase	1.0617491e+002	IFase	5.4075050e+001	IFase	2.1085028e+002
VDiodo	1.1772825e+003	VDiodo	-9.3438015e+002	VDiodo	2.3193531e-003

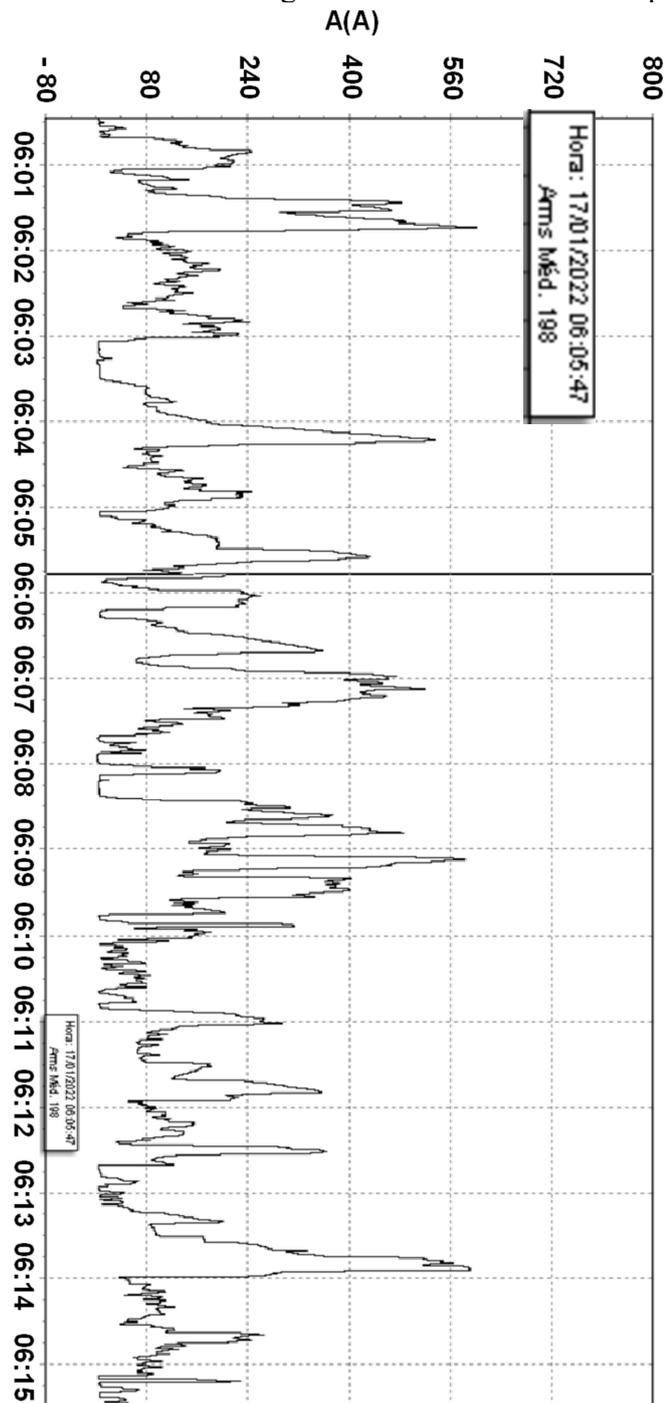
Fonte: PSIM, (2022).

4.2.2 Avaliação das taxas de distorções harmônicas de corrente

Inicialmente, foi filtrado, no *software Power Log*, o horário das 06h00min às 06h15min para verificação do comportamento da corrente elétrica. Observou-se que às 06h05min47seg foi registrado o valor de 198 ampères, como pode ser visto na figura 40.

Esse valor de 198 ampères foi considerado relevante, pois dessa forma é possível comparar as taxas de distorções harmônicas do retificador da SE Sapucaia com as distorções harmônicas do retificador da SE Farrapos. A primeira análise harmônica, no retificador da SE Sapucaia, foi realizada com o valor de 201 ampères.

Figura 40 - Gráfico do registro da corrente de 198 ampères.

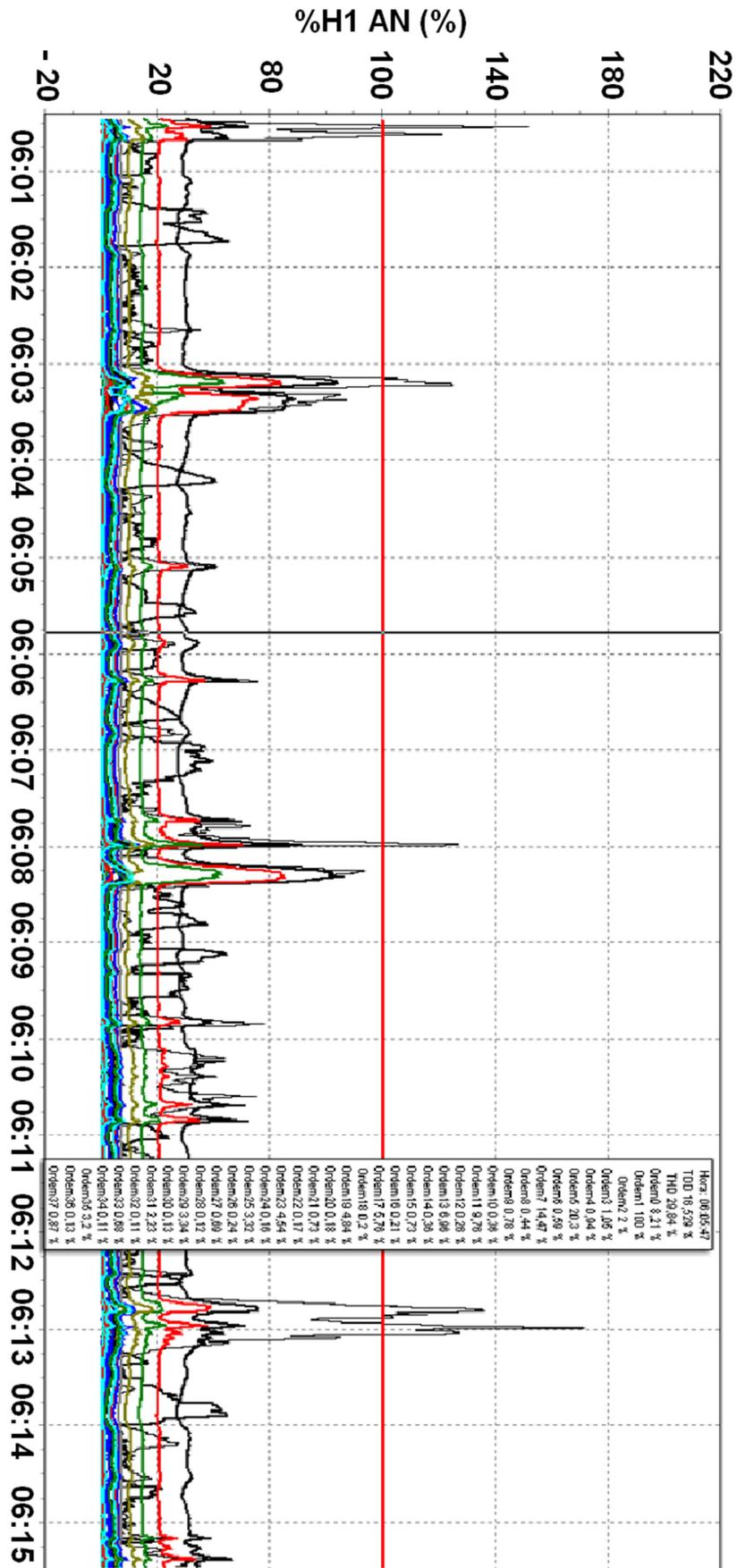


Fonte: *Power Log*, (2022).

Posteriormente, foi inserido o valor de 336 para demanda de corrente da carga em ampères, no *Power Log*, esse valor foi obtido na equação (26), e gerado o gráfico da evolução temporal da taxa de distorção harmônica, no mesmo período do gráfico da figura 40. Além disso, posicionou-se o cursor no exato instante em que a corrente era 198 ampères.

Ao observar a figura 41, pode-se verificar os valores da THD, da TDD e as harmônicas de corrente da 1ª até a 37ª ordem.

Figura 41 - Distorção harmônica da corrente para 198 ampères.



Fonte: Power Log, (2022).

Figura 42 - Legenda da figura 41.

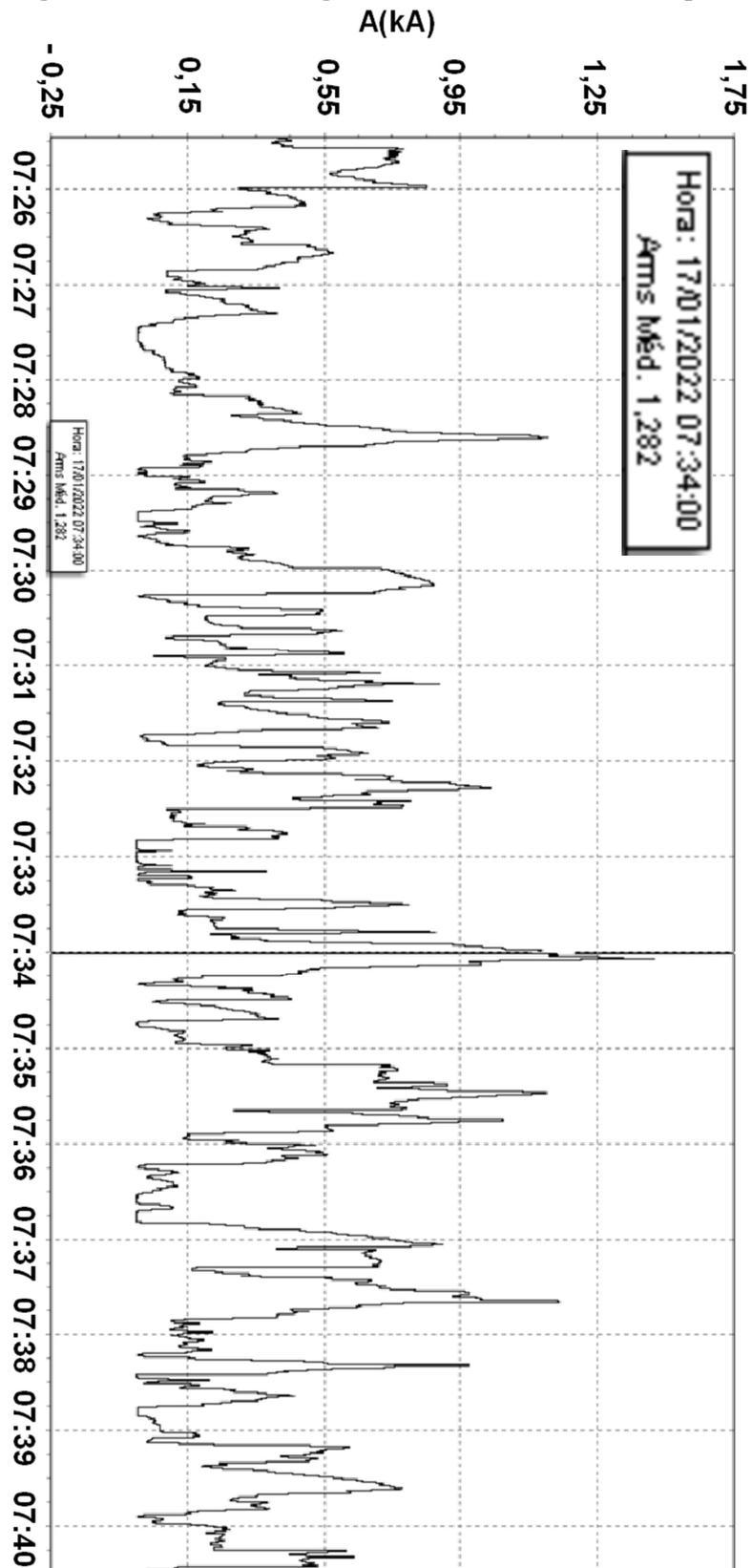
Hora: 06:05:47	
TDD 16,529 %	Ordem18 0,2 %
THD 29,84 %	Ordem19 4,84 %
Ordem0 8,21 %	Ordem20 0,18 %
Ordem1 100 %	Ordem21 0,73 %
Ordem2 2 %	Ordem22 0,17 %
Ordem3 1,05 %	Ordem23 4,54 %
Ordem4 0,94 %	Ordem24 0,16 %
Ordem5 20,3 %	Ordem25 3,32 %
Ordem6 0,59 %	Ordem26 0,24 %
Ordem7 14,47 %	Ordem27 0,69 %
Ordem8 0,44 %	Ordem28 0,12 %
Ordem9 0,78 %	Ordem29 3,34 %
Ordem10 0,36 %	Ordem30 0,13 %
Ordem11 9,76 %	Ordem31 2,23 %
Ordem12 0,26 %	Ordem32 0,11 %
Ordem13 6,96 %	Ordem33 0,68 %
Ordem14 0,36 %	Ordem34 0,11 %
Ordem15 0,73 %	Ordem35 3,2 %
Ordem16 0,21 %	Ordem36 0,13 %
Ordem17 5,76 %	Ordem37 0,87 %

Fonte: *Power Log*, (2022)

Após a avaliação da taxa de distorção harmônica, com uma corrente de 198 ampères circulando no retificador, realizou-se um novo filtro, no programa, agora objetivando um valor próximo a 1281 ampères, para que fosse possível comparar com as distorções harmônicas apresentadas pelo retificador da SE Sapucaia.

No gráfico da corrente em RMS, na figura 43, foi selecionado o intervalo entre 07h25min e 07h40min. Pode-se ver que às 07h34min, a corrente RMS corresponde à 1282 ampères, ou seja, apenas 1 ampère de diferença em relação à corrente medida para o retificador da SE Sapucaia, durante a segunda análise harmônica.

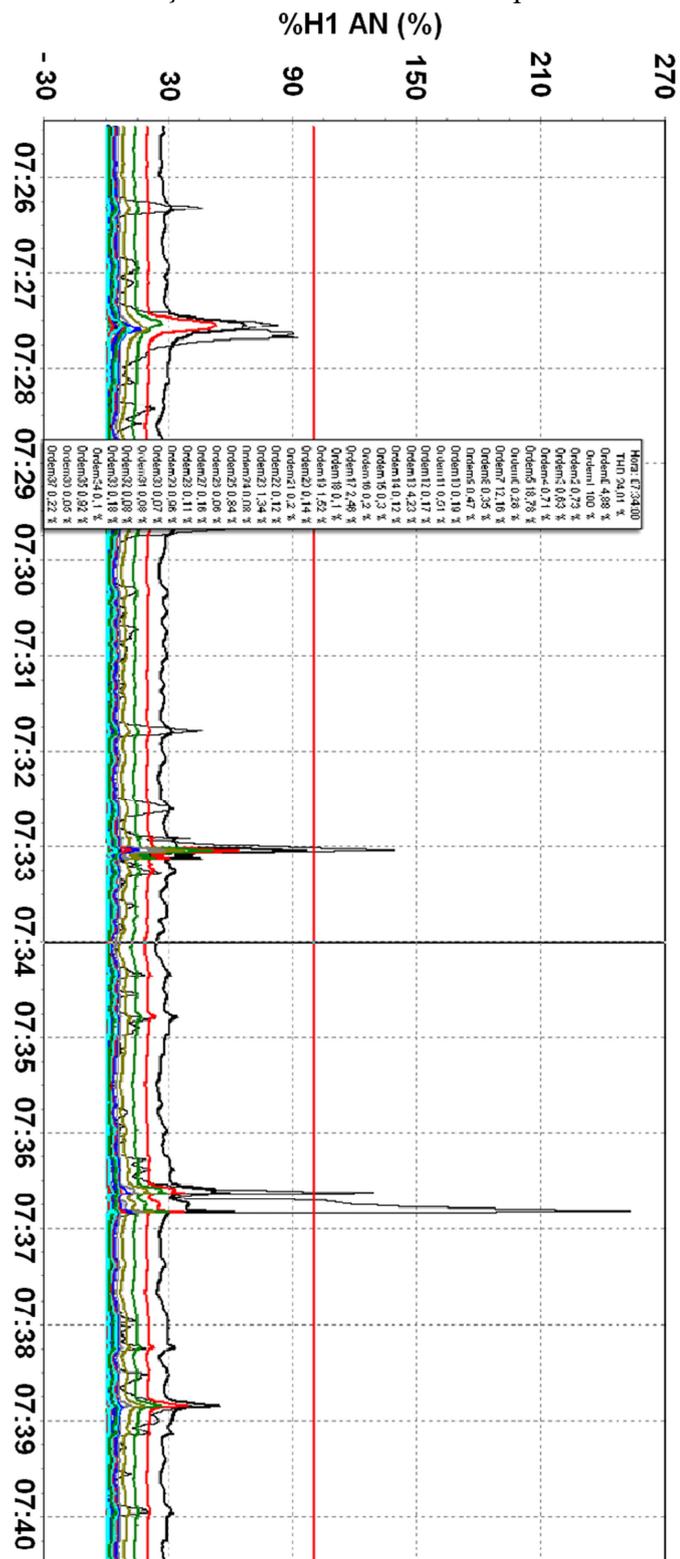
Figura 43 - Gráfico do registro da corrente de 1282 ampères.



Fonte: Power Log, (2022).

Seguindo a mesma lógica das análises anteriores, gerou-se o gráfico da distorção harmônica, agora posicionando o cursor sobre o instante das 07h34min, na figura 44.

Figura 44 - Distorção harmônica da corrente para 1282 ampères.



Fonte: Power Log, (2022).

Na figura 45 é possível observar os percentuais da THD e das harmônicas da ordem 0 até a ordem 37.

Em função do grande número de harmônicas avaliadas e a fim de facilitar a leitura dos percentuais, a figura 45 mostra os mesmos, em escala de melhor visualização.

Figura 45 - Taxa de distorção harmônica.

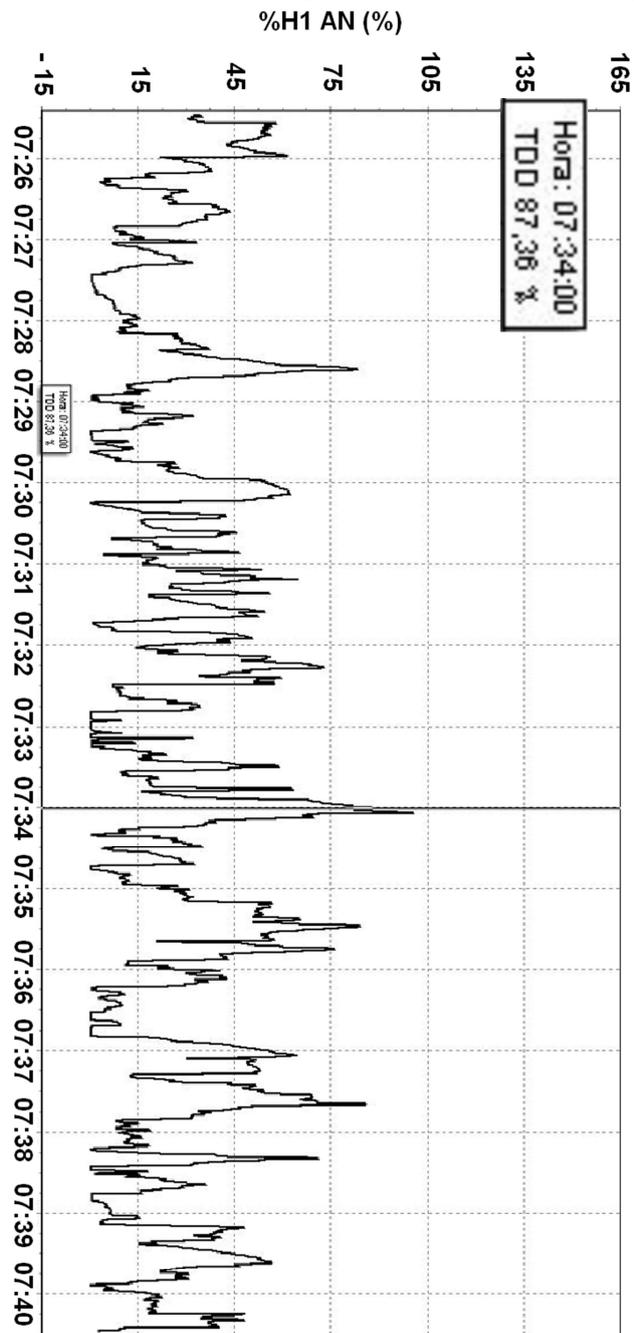
Hora: 07:34:00	Ordem18 0,1 %
THD 24,01 %	Ordem19 1,52 %
Ordem0 4,88 %	Ordem20 0,14 %
Ordem1 100 %	Ordem21 0,2 %
Ordem2 0,73 %	Ordem22 0,12 %
Ordem3 0,63 %	Ordem23 1,34 %
Ordem4 0,71 %	Ordem24 0,08 %
Ordem5 18,78 %	Ordem25 0,84 %
Ordem6 0,28 %	Ordem26 0,06 %
Ordem7 12,16 %	Ordem27 0,16 %
Ordem8 0,35 %	Ordem28 0,11 %
Ordem9 0,47 %	Ordem29 0,96 %
Ordem10 0,19 %	Ordem30 0,07 %
Ordem11 6,51 %	Ordem31 0,68 %
Ordem12 0,17 %	Ordem32 0,08 %
Ordem13 4,23 %	Ordem33 0,18 %
Ordem14 0,12 %	Ordem34 0,1 %
Ordem15 0,3 %	Ordem35 0,92 %
Ordem16 0,2 %	Ordem36 0,05 %
Ordem17 2,46 %	Ordem37 0,22 %

Fonte: *Power Log*, (2022).

Em relação aos percentuais expostos na figura 45, ao final do capítulo, está posto um resumo para melhor compreensão dos mesmos.

A avaliação da TDD foi realizada de forma separada, em função da sua variação, a qual iria poluir o gráfico da figura 44. Na figura 46 é apresentado o gráfico da TDD encontrada.

Figura 46 - Registro da TDD para corrente de 1282 ampères.



Fonte: *Power Log*, (2022).

4.3 Resumo das análises

Nesse subtópico estão apresentados os resumos das análises.

4.3.1 Diodos e dissipadores

No quadro 4 é apresentado um resumo das correntes RMS e máximas nas diferentes situações de carga que os diodos podem ser submetidos, num regime de operação (100% e 150%).

Também pode-se verificar que os diodos da SE Sapucaia precisam suportar uma quantidade maior de corrente, em função de serem 36 unidades e precisarem fornecer uma corrente de 51 ampères a mais que o retificador da SE Farrapos, com carga de 100 %.

Nota: Corrente de saída do retificador da SE Sapucaia é igual a 946 ampères, corrente de saída do retificador da SE Farrapos é igual a 895 ampères. Logo $946 \text{ A} - 895 \text{ A} = 51 \text{ A}$.

Quadro 4 - Características dos diodos.

Percentual de carga	Grandeza	Retificador SE Sapucaia	Retificador SE Farrapos	Simulação (FP = 1)	
				SE Sapucaia	SE Farrapos
100%	Corrente RMS em 1 diodo (FP =0,91)	173 A	122 A	155 A	106 A
	Corrente máximo em 1 diodo	300 A	212 A	299 A	210 A
	Potência dissipada sobrecarga	185 W	179 W	(155 A)/0,91=170 A (106 A)/0,91=116 A	
	Δ máx da temp. da junção	116[°C]	112[°C]		
	Δ máx da temp. do dissipador	115[°C]	111[°C]		
150%	Corrente RMS em 1 diodo (FP =0,91)	260 A	184 A	234 A	159 A
	Corrente máximo em 1 diodo	450 A	319 A	448 A	316 A
	Potência dissipada sobrecarga	298 W	305 W	(234 A)/0,91=257 A (159 A)/0,91=174 A	
	Δ máx da temp. da junção	114[°C]	107[°C]		
	Δ máx da temp. do dissipador	115[°C]	105[°C]		

Fonte: Autor, (2022).

No canto superior direito do quadro 4, são exibidos os valores encontrados nas simulações do PSIM. Os valores simulados tiveram uma pequena diferença devido que, na metodologia do cálculo das correntes foi considerado um fator de potência de 0,91. Observando-se a primeira linha tem-se que $173 \text{ A} \times 0,91 = 157 \text{ A}$ (próximo ao 155 A encontrado na simulação) e $122 \text{ A} \times 0,91 = 111 \text{ A}$ (próximo ao 106 A encontrado na simulação), desse modo pode-se validar a resposta da simulação em relação aos cálculos.

Além disso, foi realizada uma pesquisa de preços dos diodos, e verificou-se que na data de aquisição em 24/09/2021, uma unidade do diodo, com características semelhantes ao retificador SE Sapucaia, custou R\$ 1145,00 e em 24/05/2021, o valor unitário de diodo para retificador da SE Farrapos custou R\$ 1916,16. Essa diferença de preço, com os diodos da SE Farrapos, de quase 70 % mais caros, se deve possivelmente a escassez do componente, em função de ser usado numa tecnologia com mais de 36 anos de existência.

4.3.2 Distorções harmônicas

No quadro 5, é apresentado um resumo geral de todas leituras realizadas nas subestações Sapucaia e Farrapos, juntamente com a referência da recomendação da IEEE 519 (2014).

Na cor azul, estão destacados os percentuais que atenderam o que recomenda a norma IEEE 519 (2014).

Quadro 5 - Leituras das distorções harmônicas.

	Valores recomendados pela IEEE 519 - 1992 - I _{sc} /I _L <20	SE Sapucaia Retificador: 201 A 05h26m11s	SE Farrapos Retificador: 198 A 06h05m47s	SE Sapucaia Retificador: 1281 A 6h55m14s	SE Farrapos Retificador: 1282 A 7h34m00s
0	4,0	27,97%	8,21%	14,04%	4,88
1		100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
2		3,96%	2,00%	1,02%	0,73%
3		1,64%	1,05%	0,51%	0,63%
4		1,39%	0,94%	0,52%	0,71%
5		19,70%	20,30%	18,63%	18,78%
6		0,76%	0,59%	0,46%	0,28%
7		14,32%	14,47%	11,83%	12,15%
8		0,68%	0,44%	0,26%	0,35%
9		0,58%	0,78%	0,15%	0,47%
10		0,91%	0,36%	0,22%	0,19%
11	2,0	8,73%	9,76%	5,96%	6,51%
12		0,68%	0,26%	0,31%	0,17%
13		7,27%	6,96%	4,11%	4,23%
14		0,50%	0,36%	0,14%	0,12%
15		0,38%	0,73%	0,11%	0,30%
16		0,46%	0,21%	0,15%	0,20%
17	1,5	5,29%	5,76%	2,31%	2,46%
18		0,37%	0,20%	0,18%	0,10%
19		4,77%	4,84%	1,37%	1,52%
20		0,33%	0,18%	0,09%	0,14%
21		0,30%	0,73%	0,08%	0,20%
22		0,52%	0,17%	0,12%	0,12%
23	0,6	3,96%	4,54%	0,18%	1,34%
24		0,42%	0,16%	0,16%	0,08%
25	0,3	2,90%	3,32%	0,89%	0,84%
26		0,27%	0,24%	0,06%	0,06%
27		0,25%	0,69%	0,07%	0,16%
28		0,31%	0,12%	0,11%	0,11%
29		2,70%	3,34%	0,95%	0,96%
30		0,27%	0,13%	0,11%	0,07%
31		2,03%	2,23%	0,61%	0,68%
32		0,22%	1,10%	0,05%	0,08%
33		0,21%	0,68%	0,05%	0,18%
34		0,39%	0,11%	0,09%	0,10%
TDD	5,0	10,30%	16,53%	51,79%	87,36%
THD	14,0	28,98%	29,84%	23,51%	24,01%

Fonte: Excel, (2022).

Preliminarmente, as conclusões que podem ser extraídas do quadro 5 são:

1. Para os dois modelos de retificadores a adição de carga elétrica funciona como um filtro atenuando as taxas de distorções harmônicas de corrente;
2. Na condição de 200 ampères de corrente, o retificador da subestação Sapucaia apresenta menor valor da THD apesar de em 19 ocasiões apresentar distorção harmônica individual de corrente maior que a SE Farrapos. A TDD da SE Sapucaia apresenta percentual menor devido a sua demanda de corrente de carga calculada ser maior ;
3. Na condição em que os retificadores tinham as suas maiores corrente RMS (1281 ampères), o retificador da subestação Sapucaia apresentou menores distorções harmônicas, tanto nas distorções individuais quanto na distorção harmônica total. Isso deve ao fato que de essa subestação possui uma maior demanda de corrente de carga calculada, no caso 550 A contra 336 A da subestação Farrapos;
4. Em relação aos índices que não foram atendidos da IEEE 519, cabe lembrar que as leituras foram realizadas entre o transformador e o retificador. Desse modo, as harmônicas de 5ª e 7ª ordens não foram atenuadas pela combinação delta-estrela do secundário e terciário, respectivamente, do transformador;
5. Foi realizada uma simulação, no Excel, (ver ANEXO Q) supondo índices de 4% para as harmônicas de 5ª e 7ª ordem. E nos 4 casos analisados(do quadro 5). Desse modo verificou-se que para a condição de 1281 ampères, os novos valores de THD seriam : 9,82 % para SE Sapucaia e 10,38 % e para SE Farrapos. Concluindo-se assim, que para uma medição de distorção harmônica total, no lado da alta tensão do transformador, com uma corrente na faixa de 1000 ampères, os percentuais recomendados pelo IEEE -519 seriam atendidos.

4.3.3 Comparações gerais e proteções

Na figura 47 são apresentadas as placas dos retificadores, à esquerda SE Sapucaia e à direita SE Farrapos. Dessa forma, podem ser observadas as diferenças entre as placas dos retificadores, em relação as principais grandezas elétricas como tensão, corrente e potência.

Figura 47 - Placa dos retificadores.

Redresseur - Gleichrichter - Rectifier					Type D HN2 F 4812 DBS 12 N 405 S						
Type D T150 38 1 2083 12 N DRD1430F45 S					N. HS 27029/1 Date 83						
No HS	500889-01-102	Date	2018		P _{dN}	3000	kW	U _{vo}	1300	V _{eff}	
P _{dN}	3178	kW	U _{vo}	1277	V _{eff}	U _{dN}	3360	V	I _{vN}	730	A _{eff}
U _{dN}	3360	V	I _{vN}	772	A _{eff}	I _{dN}	895	A	f	60	Hz
I _{dN}	946	A	f	60	Hz	Classe charge		150% 200s 300% 60s		6	P _n
					Classe charge 150% 2H - 300% 1min. 6 P _n						

Fonte: ACERVO TRENURB, (2022).

No quadro 6 é apresentado um resumo das proteções dos dois retificadores.

Quadro 6 - Análise das proteções.

Relação das Proteções do Retificadores		
	SE Sapucaia	SE Farrapos
Contra sobretensão	Sim	Sim
Contra curto-circuito	Não tem, o transformador que faz a proteção.	Sim
Contra sobrecarga	Não tem, o transformador que faz a proteção.	Sim
Contra corrente inversa	Sim	Sim
1 diodo com defeito e 2 diodos com defeitos	Sim	Sim
Fuga a Terra	Sim	Sim
Sobre temperatura 1º e 2º estágio.	Sim	Sim, 1º (90 [°C]) e 2º (100 [°C])

Fonte: Excel, (2022).

Em relação as proteções, ambos os retificadores estão protegidos igualmente, na SE Sapucaia a diferença é que as proteções contra curtos-circuitos e contra sobrecargas são realizadas pela proteção do transformador. Uma sugestão, seria a realização de teste periódicos anuais, nas proteções, a fim de garantir que elas estejam desempenhando corretamente suas funções.

5 Considerações Finais

5.1 CONCLUSÃO

A melhor forma de se determinar o modelo de retificador trifásico de tração, que produz a menor taxa de distorção harmônica de corrente e o menor custo de manutenção é, realizando um estudo através da medição de corrente elétrica, com um analisador de energia, e através da avaliação da capacidade de condução de corrente dos diodos. Como a carga dos retificadores é variável ao longo das horas do dia devido à variação dos intervalos entre os trens, foram realizadas medições de corrente num período de 24 horas em dois retificadores de tração para comparar as distorções harmônicas produzidas com correntes semelhantes.

Nos resultados das leituras de corrente elétrica para faixa de 200 ampères, verificou-se que o retificador instalado na SE Sapucaia apresenta uma taxa de distorção harmônica total de 0,88 % menor que o retificador, instalado na SE Farrapos. Para a faixa de corrente elétrica de 1281 ampères, verificou-se novamente que a taxa de distorção harmônica total de corrente foi menor na SE Sapucaia, entretanto, agora com 0,5 % menor que na SE Farrapos. Além disso, verificou-se que a taxa de distorção total de demanda foi menor, na SE Sapucaia, nas duas faixas de corrente, 200 e 1281 ampères. Adicionado a isso, em função do retificador da SE Farrapos ter diodos de uma tecnologia mais antiga, resulta em componentes com menor oferta no mercado, resultando em preços unitários de diodos quase 70 % mais caros.

Nas leituras de corrente, para as duas faixas avaliadas, percebeu-se que o retificador da SE Farrapos apresentou um pequeno percentual a mais de distorção harmônica total, mas esse retificador permite fazer manutenção com uma mão-de-obra mais barata. Esses fatores são de grande importância na hora da compra de um equipamento novo, pois os custos de manutenção e o quanto o equipamento pode distorcer a corrente elétrica podem definir qual tipo de retificador será comprado.

Portanto, pode-se concluir que não há diferenças relevantes em relação as distorções harmônicas entre os retificadores, mas que os retificadores atuam como filtro, atenuando as distorções harmônicas de corrente quando os mesmos estão sob carga. Além disso, o retificador da SE Sapucaia é um equipamento que possui uma tecnologia atual, apresenta menores taxas de distorções harmônicas, têm diodos mais baratos, como foi visto e dessa forma pode-se concluir que é sem dúvida um equipamento superior ao retificador da SE Farrapos. Por outro lado, o retificador da SE Farrapos, apesar de não ter o mesmo desempenho do retificador da SE

Sapucaia, continua em operação há mais de 36 anos e certamente irá operar por muitos anos ainda pelo fato de ser um equipamento funcional e confiável.

5.2 SUGESTÃO PARA ESTUDOS FUTUROS

O trabalho proposto analisou as distorções harmônicas totais de corrente realizando medições entre o transformador e o retificador. Por esse motivo, os valores de THD ficaram acima da recomendação da IEEE-519, o que não prejudicou de forma significativa a análise comparativa. Como ideia de melhoria seria interessante analisar as medições de corrente no lado de alta tensão do transformador e avaliar essas leituras em relação ao fator de potência total das subestações, que tem histórico de pagamento de multa, por fator de potência capacitivo.

6 REFERÊNCIAS

ACERVO TRENSRUB. **Manuais de manutenção**. Acesso em 01 jan.2022

ANTUNES, F.; LEÃO, R.; SAMPAIO, R. **Harmônicos em sistemas elétricos**. [S.l.]: Elsevier Brasil, 2014.

AHMED, Ashfaq. **Eletrônica de Potência**. 2. ed. São Paulo: Editora da Pearson / Prentice Hall, 2006. 479 p

BARBI, Ivo. **Eletrônica de Potência**. 3. ed. Florianópolis: Editora do Autor, 2000.

BARBI, Ivo. **Eletrônica de Potência**. 6. ed. Florianópolis: Editora do Autor, 2006.

BARBI, Ivo. **Eletrônica de Potência**. 8. ed. Florianópolis: Editora do Autor, 2012.

DYNAMICS, Microsoft – Acervo Trensurb, Acesso em 21 jan.2022.

DUGAN, Roger C. *et al.* **Electrical Power Systems Quality**. 2. ed. [S. l.]: McGraw-Hill, 2004. 521 p.

CASSIOLATO, César. EMI– **Interferência Eletromagnética**. Disponível em < <https://www.instrumatic.com.br/artigo/profibus-aterramento-blindagem-ruídos-interferências-reflexões-e-muito-mais>>. Acesso em: 25 dez.2021

FLUKE. **Manual Analisador de Qualidade de Energia 435 série II**, 2012.

FRANCO, Ageu Ilídio. **Análise de Conteúdo Harmônico de Correntes em Subestação de Tração**, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ipl.pt/bitstream/10400.21/12457/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o.pdf>. Acesso em 10 jan.2022

FUCHS, E. F.; MASOUM, M. A.S. “**Power quality in power systems and electrical machines**”, 1e, Elsevier, USA, March 2008. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/10021/2/CT_COELE_2016_2_08.pdf Acesso em 10 jan.2022

GARREAU, M. **La traction électrique**. 1.ed Paris: Éditions Scientifiques Riber, 1965. 469p.

HÁTERAS, Luís Eduardo Pompeu de Sousa Brasil. **Retificadores multi-pulsos**, 2019. Disponível: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/50446/1/2019_tcc_lepsbateras.pdf. Acesso em 11 jan.2022

<http://blackpool-trams.yolasite.com/history.php>. Acesso em 11 jan.2022

<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/197731/ABB/5SDA06D5007.html>. Acesso em 11 jan.2022

<http://universoeletrotecnica.blogspot.com/2017/02/o-triangulo-das-potencias.html>. Acesso em 10 jan.2022

IEEE. **IEEE Standard 519-2014: IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems**, 2014.

LIBERT, Nicolas. **Manutenção de Sistemas Eletrônicos Industriais ET54A Tecnologia em Automação Industrial**, 2014. Disponível em: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/55973843/Aula_07_-_Retificadores_Industriais-with-cover-page-v2.pdf. Acesso em 25 dez. 2021.

MAMEDE FILHO, João. **Instalações elétricas industriais: de acordo com a norma NBR 5419:2015** / João Mamede Filho – 9.ed – Rio de Janeiro : LTC, 2017

PÉRES, Adriano et al. **Retificadores Multipulsos a Diodo: Retificador Trifásico de Doze Pulsos Alimentado Por Transformador Com Conexão Delta/Estrela-Delta Com Saídas Ligadas em Série**. Orientador: Prof. Dr. Ivo Barbi. 1997. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 1997. 154 f.

PIRES, Cassiano Lopes. Simulação do Sistema de Tração Elétrica Metro-Ferroviária. In: PIRES, Cassiano Lopes. **Simulação do Sistema de Tração Elétrica Metro-Ferroviária**. Orientador: Silvio Ikuyo Nabeta. 2006. Tese de doutorado (Doutor em Engenharia elétrica) - Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2006. f. 448.

PRODIST, **Módulo 8 - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional**. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_7.pdf Acesso em 26 jan.2021

RODRIGUES, Yago Freitas. **Análise Comparativa Entre Retificadores Trifásicos Com Controle Pela Rede versus Retificadores Com Controle PWM Para Aplicações Com Fonte C.A. de Alta Impedância de Saída**. Orientador: Prof. Dr. José Gomes de Matos. 2018. 75 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia elétrica) - Universidade Federal do Maranhão, Porto Alegre, São Luís.

ROSA, F. D. L. **Harmonics and power systems**. [S.l.]: CRC press Boca Raton, 2006.

SCHNEIDER, Electric. Disponível em : <https://www.se.com/br/pt/faqs/FA296915/> Acesso em 10 jan.2022

TESSIER, M. **Tracion électrique et termo-électrique**. Paris: Éditions Scientifiques Riber, 1978.585p

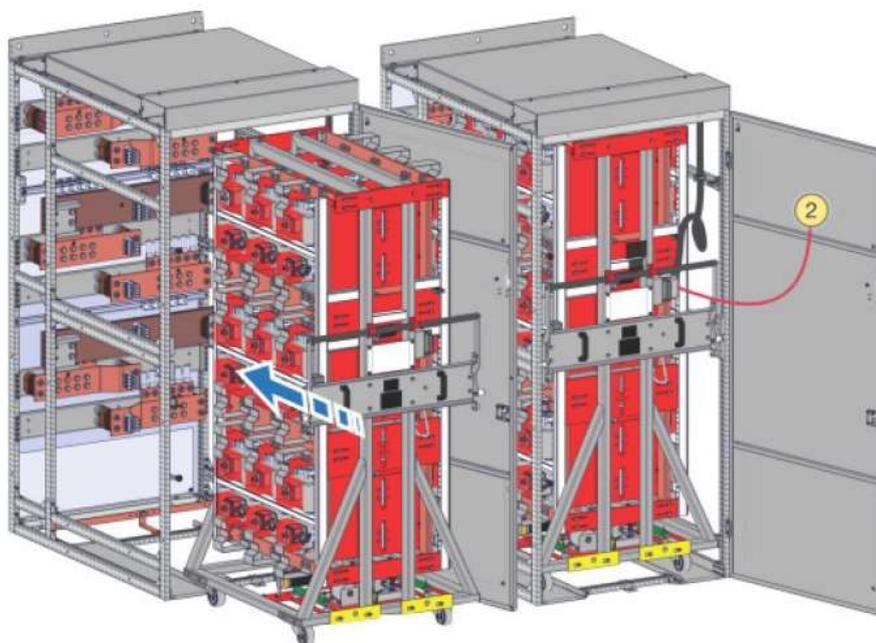
TRENSURB, disponível em http://www.trensurb.gov.br/paginas/paginas_detalle.php?codigo_sitemap=18. Acesso em 10 jan.2022

WATANABE, E.; STEPHAN, R. **Potência ativa e reativa instantâneas em sistemas elétricos com fontes e cargas genéricas**. [S.l.], [1991]. Disponível em <<http://www.site.uft.edu.br/index.php/seelto/SEEL/paper/viewFile/3072/727>>. Acesso em: 25 dez. 202.

7 ANEXOS

ANEXO A – SE Sapucaia

Cubículo do retificador.



Fonte: ACERVO TRENSRUB, 2019.

Avaliação da capacidade condução dos diodos

A seguir é apresentada uma análise relacionada a quantidade de corrente que circula nos diodos nas situações de sobrecarga e a potência consumida pelos dissipadores a fim de manter o retificador em operação. O método de cálculo a seguir foi extraído do manual técnico do fabricante do retificador (Siemens). Para o retificador da subestação Farrapos o método de cálculo foi replicado baseado nas características do diodo usado na SE Farrapos.

Uma vez que é impossível medir diretamente a temperatura de junção dos diodos, a temperatura da junta virtual dos diodos é calculada como medida das caixas dos diodos.

A máxima temperatura virtual na junção, é segundo a equação A1,

$$T_{jmax} = \Delta T_{caso} + P_{diodo} \times T_{thjc} + T_a \quad (A1)$$

Onde:

$T_{jmax} = 160$ [°C]: Temperatura máxima na junção (diodo :DRD1430F45 datasheet)

ΔT_{caso} : Temperatura máxima da variação do diodo usado como teste

$T_{\text{thjc}} = 0,02$ [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$]: Resistência térmica da caixa de junção

$T_{\text{rhch}} = 0,005$ [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$]: Resistência térmica da junção para o caso para dissipador de calor

$T_a = 40$ [$^{\circ}\text{C}$]: Temperatura máxima ambiente

Máxima temperatura com aumento da carga nominal.

Valor RMS (FP=0,91) da corrente fluindo através de um diodo,

$$I_{\text{RMS}} = \frac{I_{\text{dn}}}{N_p \times 3 \times f_p} = \frac{946}{2 \times 3 \times 0,91} = 173 \text{ A} \quad (\text{A2})$$

Onde N_p é o número de ramos de diodos em paralelo e I_{dn} é a corrente nominal

Máximo valor fluindo através de um diodo

$$I_{\text{máx}} = I_{\text{RMS}} \times \sqrt{3} = 300 \text{ A} \quad (\text{A3})$$

$V_{t0} = 0,92$ [V]: Tensão limite do diodo

$R_t = 0,291$ [$\text{m}\Omega$]: Resistência de inclinação do diodo (resistência do diodo não ideal)

Potência dissipada no diodo durante sobrecarga de 100% de curto intervalo de tempo.

$$P_{\text{diodo}} = V_{t0} \times I_{\text{RMS}} + R_t \times I_{\text{máx}}^2 = 185 \text{ [W]} \quad (\text{A4})$$

O aumento de temperatura máximo admissível do caso torna-se,

$$\Delta T_{\text{caso}} = T_{\text{jmax}} - P_{\text{diodo}} \times R_{\text{thjc}} - T_a \quad (\text{A5})$$

$$\Delta T_{\text{caso}} = 160 - 185 \times 0,02 - 40 \quad (\text{A6})$$

$$\Delta T_{\text{caso}} = 116 \text{ [}^{\circ}\text{C]} \quad (\text{A7})$$

O aumento de temperatura máximo admissível do dissipador de calor torna-se,

$$\Delta T_{\text{dissip. calor}} = T_{\text{jmax}} - P_{\text{diodo}} \times (R_{\text{thjc}} + T_{\text{rhch}}) - T_a \quad (\text{A8})$$

$$\Delta T_{\text{dissip. calor}} = 160 - 185 \times (0,02 + 0,005) - 40 \quad (\text{A9})$$

$$\Delta T_{\text{dissip. calor}} = 115 \text{ [}^{\circ}\text{C]} \quad (\text{A10})$$

Máxima temperatura com uma sobrecarga longa de 150 %.

Valor RMS (FP=0,91) da corrente fluindo através de um diodo,

$$I_{RMS} = \frac{I_{dn} \times 150\%}{N_p \times 3 \times f_p} = \frac{946 \times 150\%}{2 \times 3 \times 0,91} = 260 \text{ A} \quad (A11)$$

Máximo valor fluindo através de um diodo,

$$I_{máx} = I_{RMS} \times \sqrt{3} = 450 \text{ A} \quad (A12)$$

$V_{t0} = 0,92 \text{ [V]}$: Tensão limite do diodo

$R_t = 0,291 \text{ [m}\Omega\text{]}$: Resistência de inclinação do diodo

Potência dissipada no diodo durante sobrecarga de 150% de curto intervalo de tempo.

$$P_{diodo} = V_{t0} \times I_{RMS} + R_t \times I_{máx}^2 = 298 \text{ [W]} \quad (A13)$$

O aumento de temperatura máximo admissível do caso torna-se,

$$\Delta T_{caso} = T_{jmax} - P_{diodo} \times R_{thjc} - T_a \quad (A14)$$

$$\Delta T_{caso} = 160 - 298 \times 0,02 - 40 \quad (A15)$$

$$\Delta T_{caso} = 114 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (A16)$$

O aumento de temperatura máximo admissível do dissipador de calor torna-se,

$$\Delta T_{dissip. calor} = T_{jmax} - P_{diodo} \times (R_{thjc} + R_{thch}) - T_a \quad (A17)$$

$$\Delta T_{dissip. calor} = 160 - 298 \times (0,02 + 0,005) - 40 \quad (A18)$$

$$\Delta T_{dissip. calor} = 115 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (A19)$$

Proteções do retificador contra sobretensão

Sobretensão interna: Ao desligar o retificador, a corrente de carga do diodo não deixa imediatamente de fluir, mas continua, durante breves momentos, na direção inversa como uma corrente de recuperação inversa. Esta corrente de recuperação inversa de pico, provoca um pico de tensão que é eliminado por um circuito supressor individual, montado em paralelo com cada diodo, ou seja, o Snubber que é indicação 8 da figura 3 (Sécheron S/A, 2007).

Sobretensão externa: A sobretensão externa deve-se essencialmente aos raios que atingem a linha. O retificador é equipado no lado da CC de um filtro RC capaz de absorver uma sobretensão significativa. Opcionalmente, pode-se instalar um protetor de sobretensão diretamente entre os terminais e o retificador. (Sécheron S/A, 2007).

Proteções do retificador contra curtos-circuitos

Todos os retificadores de tração são concebidos para suportar um curto-circuito externo sem causar danos e até que o disjuntor de entrada abra. (Sécheron S/A, 2007).

Proteções do retificador contra sobrecarga

Os diodos do retificador estão protegidos contra temperaturas excessivas por termostatos montados nos dissipadores de calor (limites do alarme e do disparo). (Sécheron S/A, 2007).

Dados técnicos e avaliação de desempenho

Em relação a placa de identificação, pode-se dizer que não existem muitas diferenças relevantes, pois apesar das diferenças construtivas, as tensões de entrada e saída são muito parecidas. No retificador da SE Farrapos a corrente de saída retificada é de 895 ampères contra 946 ampères do retificador da SE Sapucaia. Em relação a tensão de entrada, o retificador da SE Farrapos indica 33 VCA a mais que o retificador da SE Sapucaia, isso representa aproximadamente 2 % da tensão entre fases da entrada.

Preço do diodo semelhante ao da SE Sapucaia.

Disponível (1 - trs) - Número do item: 33011167 Fechada: Não Número do item: 33011167, Novo Registro

Arquivo Transações Requisitos Líquidos Disponível intercompanhia Ajuste de quantidade Histórico de contagem Mostrar d

Visão geral Visão geral de peso variável Disponível

Item

Número do item: 33011167

Nome do produto: DIODO RETIFICADOR AVALANCHE

Unidades

Mostrar: Unidade de estoque

Unidade: un

Unidade de PV:

Disponível

Quantidade física disponível: 16,0000

Em ordem no total:

Preço de custo: 1.145,00

Fonte: DYNAMICS, (2022).

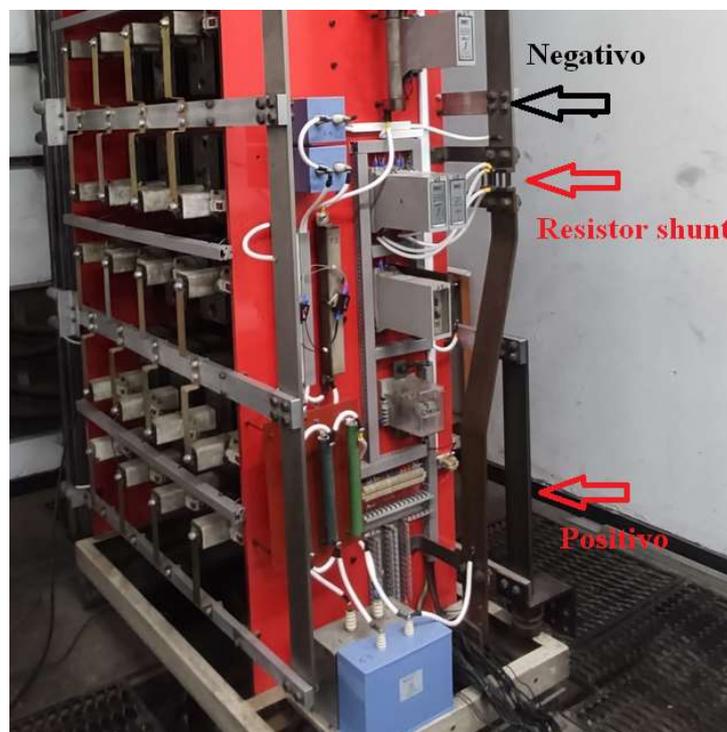
ANEXO B – SE Farrapos.

Imagens frontal e posterior do retificador



Fonte: ACERVO TRENSURB, (2022).

Detalhes do retificador



Fonte: ACERVO TRENSURB, (2022).

Placa do retificador

Type	D HN2 F 481 2 DBS 12 N 405 S			
No HS	27029/1	Date	83	
P _{dN}	3000	kW	U _{vD}	1300 V _{eff}
U _{dN}	3360	V	I _{vN}	730 A _{eff}
I _{dN}	895	A	f	60 Hz
Classe charge	150 % 2H - 300 % 1 min.			6 Ph

Fonte: ACERVO TRENSURB, (2022).

O sistema de proteção do retificador é baseado quase que exclusivamente em proteger os diodos. Desse modo, em ambos os modelos de retificadores as proteções são contra: corrente inversa, sobrecarga, sobretensão, 1 diodo com defeito, 2 diodos com defeito, sobre temperatura estágio 1 e sobre temperatura estágio 2. A única proteção que não é relacionada aos diodos é a proteção (carcaça terra), que deve atuar permitindo um caminho de fuga para corrente em caso de curto circuito, no retificador.

Com relação a proteção diodo com defeito, os dois modelos de retificadores continuam funcionando mesmo com um diodo com defeito. Em função da capacidade de corrente ser maior nos diodos da subestação Sapucaia, lá, uma fase pode operar com 5 diodos, enquanto na SE Farrapos são necessários pelo menos 7 diodos por fase para o retificador continuar operando.

Avaliação da capacidade condução dos diodos

Para o retificador da subestação Farrapos, tem-se a seguinte avaliação,

$$T_{jmax} = \Delta t_{caso} + P_{diodo} \times T_{thjc} + T_a \quad (B1)$$

Onde:

$T_{jmax} = 160$ [°C]: Temperatura máxima na junção (DAS405 – 50A datasheet)

Δt_{caso} : Temperatura máxima da variação do diodo usado como teste

$T_{thjc} = 0,04$ [°C/W]: Resistência térmica da caixa de junção

$T_{rhch} = 0,008$ [°C/W]: Resistência térmica da junção para caso para dissipador de calor.

$T_a = 40$ [°C]: Temperatura máxima ambiente

Máxima temperatura com aumento da carga nominal

Valor RMS (FP=0,91) da corrente fluindo através de um diodo,

$$IRMS = \frac{Idn}{Np \times 4 \times fp} = \frac{895}{2 \times 4 \times 0,91} = 122 \text{ A} \quad (\text{B2})$$

Máximo valor fluindo através de um diodo

$$Imáx = IRMS \times \sqrt{3} = 212 \text{ A} \quad (\text{B3})$$

$V_{t0} = 1,10 \text{ [V]}$: Tensão limite do diodo

$R_t = 1,01 \text{ [m}\Omega\text{]}$: Resistência de inclinação do diodo

Potência dissipada no diodo durante sobrecarga de 100% de curto intervalo de tempo.

$$P_{\text{diodo}} = V_{t0} \times IRMS + R_t \times Imáx^2 = 179 \text{ [W]} \quad (\text{B4})$$

O aumento de temperatura máximo admissível do caso torna-se,

$$\Delta T_{\text{caso}} = T_{j\text{max}} - P_{\text{diodo}} \times R_{thjc} - T_a \quad (\text{B5})$$

$$\Delta T_{\text{caso}} = 160 - (179 \times 0,04) - 40 \quad (\text{B6})$$

$$\Delta T_{\text{caso}} = 112 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (\text{B7})$$

O aumento de temperatura máximo admissível do dissipador de calor torna-se,

$$\Delta T_{\text{dissip. calor}} = T_{j\text{max}} - P_{\text{diodo}} \times (R_{thjc} + R_{thch}) - T_a \quad (\text{B8})$$

$$\Delta T_{\text{dissip. calor}} = 160 - 179 \times (0,04 + 0,008) - 40 \quad (\text{B9})$$

$$\Delta T_{\text{dissip. calor}} = 111 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (\text{B10})$$

Máxima temperatura com uma sobrecarga longa de 150 %.

Valor RMS (FP=0,91) da corrente fluindo através de um diodo,

$$IRMS = \frac{Idn \times 150\%}{Np \times 4 \times fp} = \frac{895 \times 150\%}{2 \times 4 \times 0,91} = 184 \text{ A} \quad (\text{B11})$$

Máximo valor fluindo através de um diodo

$$I_{\text{máx}} = I_{\text{RMS}} \times \sqrt{3} = 319 \text{ A} \quad (\text{B12})$$

$V_{t0} = 1,10 \text{ [V]}$: Tensão limite do diodo

$R_t = 1,01 \text{ [m}\Omega\text{]}$: Resistência de inclinação do diodo

Potência dissipada no diodo durante sobrecarga de 150% de curto intervalo de tempo,

$$P_{\text{diodo}} = V_{t0} \times I_{\text{RMS}} + R_t \times I_{\text{máx}}^2 = 305 \text{ [W]} \quad (\text{B13})$$

O aumento de temperatura máximo admissível do caso torna-se:

$$\Delta T_{\text{caso}} = T_{j\text{max}} - P_{\text{diodo}} \times R_{\text{thjc}} - T_a \quad (\text{B14})$$

$$\Delta T_{\text{caso}} = 160 - 305 \times 0,04 - 40 \quad (\text{B15})$$

$$\Delta T_{\text{caso}} = 107 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (\text{B16})$$

O aumento de temperatura máximo admissível do dissipador de calor torna-se,

$$\Delta T_{\text{dissip. calor}} = T_{j\text{max}} - P_{\text{diodo}} \times (R_{\text{thjc}} + R_{\text{thch}}) - T_a \quad (\text{B17})$$

$$\Delta T_{\text{dissip. calor}} = 160 - 305 \times (0,04 + 0,008) - 40 \quad (\text{B18})$$

$$\Delta T_{\text{dissip. calor}} = 105 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (\text{B19})$$

Preço do diodo da SE Farrapos.

The screenshot shows a software interface for item management. The title bar reads 'Disponível (1 - trs) - Número do item: 33010012 Fechada: Não Número do item: 33010012, Novo Registro'. The main menu includes 'Arquivo', 'Transações', 'Requisitos líquidos', 'Disponível intercompanhia', 'Ajuste de quantidade', 'Histórico de contagem', and 'Mostrar dimensões'. The 'Disponível' tab is active, showing the following details:

- Item:**
 - Número do item: 33010012
 - Nome do produto: DIODO RETIFICADOR AVALANCHE
- Unidades:**
 - Mostrar: Unidade de estoque
 - Unidade: PC
 - Unidade de PV:
- Disponível:**
 - Quantidade física disponível: 32,0000
 - Em ordem no total:
 - Preço de custo: 1.916,16

Fonte: DYNAMICS, (2022).

ANEXO C – Leituras das distorções harmônicas.

	Valores recomendados pela IEEE 519-1992 - I _{sc} /I _L <20	SE Sapucaia Retificador - 201 A 05h26m11s	SE Farrapos Retificador - 198 A 06h05m47s	SE Sapucaia Retificador: 1281 A 6h55m14s	SE Farrapos Retificador: 1282 A 7h34m00s
0	4,0	27,97%	8,21	14,04%	4,88
1		100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
2		3,96%	2,00%	1,02%	0,73%
3		1,64%	1,05%	0,51%	0,63%
4		1,39%	0,94%	0,52%	0,71%
5		4,00%	4,00%	4,00%	4,00%
6		0,76%	0,59%	0,46%	0,28%
7		4,00%	4,00%	4,00%	4,00%
8		0,68%	0,44%	0,26%	0,35%
9		0,58%	0,78%	0,15%	0,47%
10		0,91%	0,36%	0,22%	0,19%
11	2,0	8,73%	9,76%	5,96%	6,51%
12		0,68%	0,26%	0,31%	0,17%
13		7,27%	6,96%	4,11%	4,23%
14		0,50%	0,36%	0,14%	0,12%
15		0,38%	0,73%	0,11%	0,30%
16		0,46%	0,21%	0,15%	0,20%
17	1,5	5,29%	5,76%	2,31%	2,46%
18		0,37%	0,20%	0,18%	0,10%
19		4,77%	4,84%	1,37%	1,52%
20		0,33%	0,18%	0,09%	0,14%
21		0,30%	0,73%	0,08%	0,20%
22		0,52%	0,17%	0,12%	0,12%
23	0,6	3,96%	4,54%	0,18%	1,34%
24		0,42%	0,16%	0,16%	0,08%
25	0,3	2,90%	3,32%	0,89%	0,84%
26		0,27%	0,24%	0,06%	0,06%
27		0,25%	0,69%	0,07%	0,16%
28		0,31%	0,12%	0,11%	0,11%
29		2,70%	3,34%	0,95%	0,96%
30		0,27%	0,13%	0,11%	0,07%
31		2,03%	2,23%	0,61%	0,68%
32		0,22%	1,10%	0,05%	0,08%
33		0,21%	0,68%	0,05%	0,18%
34		0,39%	0,11%	0,09%	0,10%
35		2,22%	3,20%	0,72%	0,92%
36		0,33%	0,13%	0,12%	0,05%
37		1,10%	0,87%	0,26%	0,22%
TDD	5,0	10,30%	16,53%	51,79%	87,36%
THD	14,0	16,69%	17,38%	9,82%	10,38%

Fonte: Excel, (2022).