

Desenvolvimento de Protótipo Funcional de Novo Conjunto Transformador Atenuador de Harmônicos

Renan Ferraz, Erik L. Bonaldi, Levy Ely de L. de Oliveira, Germano Lambert-Torres, Luiz Eduardo Borges da Silva, Rondineli R. Pereira, Robson Bauwelz Gonzatti e Antonio Carlos V. Delgado

Resumo – Este artigo apresenta um trabalho de P&D voltado ao desenvolvimento de um sistema para compensação do conteúdo harmônico gerado por cargas não-lineares alimentadas por um motor gerador de usina termelétrica. Este conteúdo harmônico, presente na corrente do gerador, diminui sua eficiência, consequentemente aumentando o consumo de óleo combustível. Desta maneira, o trabalho em desenvolvimento propõe o uso de transformadores atenuadores de harmônicos em conjunto com um filtro ativo híbrido para realização da compensação dos harmônicos gerados pelas cargas de ventilação. Em um primeiro momento os transformadores atenuadores irão eliminar parte do conteúdo harmônico, sendo o restante eliminado pelo filtro ativo híbrido. Através desta mitigação harmônica espera-se um aumento na eficiência do gerador com a diminuição do consumo de óleo combustível.

Palavras-chave – Eficiência Energética, Filtro Ativo Híbrido, Gerador, Harmônicos, Transformador Atenuador de Harmônicos.

I. INTRODUÇÃO

As melhorias no conforto, no lazer, na facilidade de comunicação, na automatização de processos, na eficiência energética e no aumento de produtividade decorrente do uso da tecnologia eletrônica em geral, e da eletrônica de potência em particular, nas diversas áreas da atividade humana, trouxe nas últimas décadas uma série de benefícios à sociedade, mas também trouxe efeitos indesejáveis para os sistemas elétricos. Tais efeitos, vistos como poluições indesejáveis, devem-se a não linearidade característica dos controles eletrônicos que provocam sérios distúrbios nas fontes de tensão alternada.

Estes distúrbios têm como causa principal a geração de

correntes harmônicas, que provocam quedas de tensão ao longo das impedâncias das redes de suprimentos, aquecimentos imprevistos nos cabos e transformadores de distribuição, funcionamento inadequado dos medidores eletromecânicos de faturamento de energia e nos relés de proteção. Ainda podem causar fenômenos como ressonâncias, interferências eletromagnéticas e distorções nas tensões, que alimentam as próprias cargas geradoras de correntes harmônicas, bem como outras que nada tem a ver com esse processo e se encontram conectadas no mesmo sistema elétrico de suprimento. Todos esses fenômenos indesejáveis geram instabilidades no sistema elétrico, diminuindo as margens seguras de operação e contribuindo para uma crescente degradação da qualidade da energia elétrica fornecida.

Além do mais, a alimentação de cargas não lineares pelos geradores pode causar alguns inconvenientes nas máquinas e também em seus sistemas, como: aquecimento excessivo dos enrolamentos estatóricos e barras de amortecimento devido ao aumento das perdas no cobre; aquecimento das chapas do estator e rotor devido ao aumento das perdas no ferro; correntes de neutro excessivas, ocasionadas por desequilíbrio; sobredimensionamento de cabos, quadros, proteções, etc.

O efeito cumulativo do aumento das perdas reflete-se numa diminuição da eficiência e da vida útil da máquina. A redução na eficiência é indicada na literatura como de 5 a 10% dos valores obtidos com uma alimentação senoidal. O que implica diretamente num maior consumo de óleo em usinas termelétricas.

Para que os níveis dos conteúdos harmônicos estejam dentro dos níveis preconizados, tradicionalmente recorre-se ao uso de filtros de harmônicos que podem ser passivos, ativos ou híbridos [1]-[3]. Entretanto, no intuito de reduzir custos e maximizar a eficiência na redução dos harmônicos, transformadores com configurações especiais podem ser utilizados em conjunto com os filtros de modo a se obter uma solução eficaz para se atingir os níveis preconizados [4].

A abordagem para solução do problema apresentado está sendo desenvolvida através do projeto de P&D intitulado “Desenvolvimento de Protótipo Funcional de Novo Conjunto Transformador Atenuador de Harmônicos” com código ANEEL PD-6599-0003/2015 e suporte financeiro da Energética SUAPE II e execução pelo Instituto Gnarus e o Centro de Gestão de Tecnologia e Inovação (CGTI).

O presente projeto propõe pesquisar e desenvolver um conjunto atenuador de harmônicos constituído de transfor-

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do IX Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (IX CITENEL).

Renan Ferraz trabalha na SUAPE II (e-mail: renanferraz@suapeenergia.com.br)

E. L. Bonaldi, L. E. L. de Oliveira, e G. Lambert-Torres são pesquisadores do Instituto Gnarus (e-mails: {levy.oliveira, erik.bonaldi, germanolortres}@gmail.com).

L. E. B. da Silva, Rondineli R. Pereira, Robson Bauwelz Gonzatti são professores da Universidade Federal de Itajubá (e-mail: {leborgess, rondinelirp, bauwelz}@gmail.com).

Antonio Carlos V. Delgado é pesquisador do CGTI (e-mail: carlosd@correionet.com.br)

madores de distribuição defasadores e um filtro ativo híbrido [3]. O transformador terá a função de mitigar, a níveis normalizados, determinadas correntes harmônicas e o filtro híbrido de eliminar as componentes harmônicas não reduzidas pelos enrolamentos do transformador. A proposta caracteriza uma nova tecnologia, por se tratar de um equipamento híbrido com os enrolamentos do transformador e com os elementos passivos e ativos do filtro híbrido.

Desta maneira, a compensação do conteúdo harmônico presente na corrente da carga irá possibilitar o aumento da potência disponível pelo gerador que agora irá alimentar uma carga com corrente senoidal. Para tanto, o projeto de P&D que está sendo implementado contribui de forma efetiva com a melhoria da eficiência dos geradores. A carga selecionada para a instalação do sistema foram os motores do sistema de exaustão em função de seus retificadores, que constituem uma das principais cargas não-lineares da planta. O resultado após a eliminação dos harmônicos é um menor consumo de óleo diesel na usina termelétrica.

Os resultados alcançados até o momento são: medições de qualidade de energia na planta da Energética SUAPE II, simulações e testes em laboratório das topologias dos transformadores atenuadores, simulações e testes em laboratório da topologia do filtro ativo híbrido, especificação da potência do conjunto atenuador de harmônicos constituído de transformador e filtro ativo híbrido. Já os resultados futuros esperados são: montagem do protótipo do conjunto atenuador de harmônicos, testes em laboratório, instalação do protótipo na planta da Energética SUAPE II, análise das informações provenientes do funcionamento do protótipo na planta e publicação de artigos.

II. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

Diante dos problemas causados pelos harmônicos, o IEEE - *The Institute of Electrical and Electronics Engineers* criou a norma IEEE 519/92 que visa recomendar níveis aceitáveis de conteúdos harmônicos nos pontos de acoplamento comum das unidades consumidoras [5]. No Brasil a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL instituiu no Módulo 8 - Qualidade de Energia Elétrica nos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST os níveis aceitáveis de distorções harmônicas nas redes elétricas aqui operantes [6].

Como citado na seção anterior a compensação do conteúdo harmônico pode ser realizada por: filtros passivos sintonizados, filtros ativos de potência série ou paralelo e filtros ativos híbridos. Já a solução proposta nesta pesquisa faz uso de transformadores atenuadores de harmônicos em conjunto com um filtro ativo híbrido.

Basicamente a redução dos harmônicos circulantes por meio de transformadores é obtida via a impedância proporcionada pela fonte (transformador) ou por meio da recombinação das ondas senoidais. A recombinação das ondas senoidais ocorre dentro do próprio transformador nos pontos de ligação dos enrolamentos, ou por meio de defasagens feitas através da associação de transformadores em cascata [4].

Após simulações e ensaios em escala reduzida, foi definido

que os arranjos de transformadores que geram defasagem de 30° entre a tensão de alimentação das duas cargas são os que apresentam melhor atenuação harmônica. Estas configurações podem ser obtidas com dois transformadores independentes ou com um transformador com três enrolamentos, um primário e dois secundários.

A topologia de filtros ativos híbridos é tradicionalmente definida pelo trabalho em conjunto de uma parte passiva (indutores e capacitores) e uma parte ativa (conversor eletrônico de potência). Na topologia de filtro híbrido, utilizada neste projeto, não há mais uma célula L-C sintonizada. O filtro passivo sintonizado é substituído por um simples banco de capacitores e a sintonia do ramo híbrido é feita eletronicamente pelo filtro ativo a partir do conceito da impedância ativa. Esta topologia apresenta ótimas características de compensação e isolamento harmônica [3].

No sistema em desenvolvimento serão utilizados 6 transformadores atenuadores de harmônicos, cada transformador alimentará 2 grupos de 18 motores do sistema de arrefecimento. O filtro ativo híbrido será conectado na entrada do conjunto dos 6 transformadores, sendo responsável pela compensação do conteúdo harmônico restante após a compensação dos transformadores atenuadores. Desta maneira a carga de ventiladores de uma das três casas de força da usina será compensada. A Figura 1 apresenta este sistema.

Nesta configuração, a corrente harmônica após cada transformador atenuador será a soma dos harmônicos de duas cargas descontando a atenuação esperada pelo transformador atenuador. Conforme ensaios prévios e simulações o transformador atenuador deve eliminar as componentes de ordem 5, 7, 17 e 19. Além do mais, com a conexão do primário do transformador em delta espera-se também a redução dos harmônicos de sequência zero, principalmente os de ordem 3.

O emprego dos transformadores permite que o filtro tenha uma potência menor, reduzindo seu custo e facilitando a construção do protótipo do filtro baseado numa topologia híbrida inovadora conhecida como "smart impedance" [3]. As topologias existentes e disponíveis no mercado são do tipo "shunt". Neste tipo de topologia, toda a corrente harmônica a ser compensada deve ser gerada pela eletrônica de potência e, neste caso, o inversor gera todo o conteúdo harmônico que a carga necessita, resultando em perdas maiores e menor vida útil da eletrônica de potência desses equipamentos. Já na topologia híbrida "Smart Impedance", a potência que a eletrônica deve fornecer é bem menor, pois a maior parte é fornecida pelo elemento passivo que é o capacitor do filtro, reduzindo perdas, aumentando a vida útil, implicando menor custo de manutenção. Além disso, este novo conceito de filtro é mais confiável e possui características de atenuação de ressonâncias harmônicas.

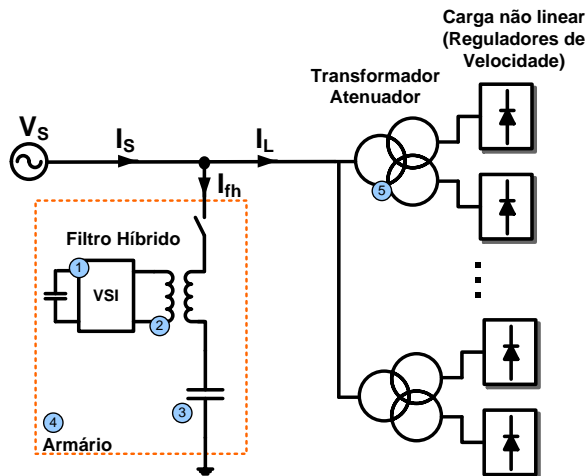


Figura 1. Diagrama equivalente monofásico do sistema híbrido de compensação harmônica, com os seguintes componentes: (1) inversor de frequência, (2) transformador de acoplamento, (3) banco de capacitores, (4) armário elétrico do filtro híbrido e (5) transformador atenuador de harmônicos.

Com o objetivo de se aplicar e testar esta nova topologia em campo, procurou-se dentro do presente projeto da Usina Térmica de Suape II (mitigação de harmônicos nos sistemas auxiliares com vistas a melhorar a eficiência da planta, reduzindo as perdas no gerador e permitindo a redução no consumo de combustível) reduzir a potência harmônica a ser mitigada pelo filtro, para reduzir seu custo que ainda é alto por ser uma tecnologia nascente e também reduzir a complexidade do protótipo que será instalado em baixa tensão e gerenciará menor potência. Como solução, foi proposto o conjunto atenuador de harmônico composto pelo transformador atenuador mais filtro ativo híbrido.

III. ESPECIFICAÇÃO DO PROTÓTIPO

Para correta especificação do transformador atenuador e do filtro ativo híbrido, foram realizadas medições na planta da Energética Suape II. Através destas medições foi possível o levantamento do conteúdo harmônico da carga que será compensada.

A tabela I apresenta a corrente harmônica observada em um grupo de 18 ventiladores. Lembrando que cada transformador atenuador de harmônicos irá alimentar dois grupos de 18 ventiladores, um em cada enrolamento.

Tabela I. Conteúdo harmônico da carga para um grupo de 18 ventiladores.

Fases	A	B	C
RMS Total	82,13 A	84,95 A	78,48 A
RMS Harmônico	29,76 A	30,97 A	32,14 A
THD	36,28 %	36,48 %	41,00 %

Considerando a configuração apresentada na Figura 1, cada transformador atenuador alimenta dois conjuntos de 18 ventiladores com o conteúdo harmônico apresentado na tabela I. O filtro híbrido será conectado na entrada de um conjunto de seis transformadores atenuadores, contemplando

assim a carga de ventiladores de uma casa de força. Lembrando que o transformador atenuador deve eliminar as componentes de ordem 5, 7, 17 e 19. Além da conexão do primário do transformador em delta reduzir os harmônicos de ordem 3. A partir destas considerações a tabela II apresenta a corrente harmônica esperada após cada transformador atenuador.

Tabela II. Conteúdo harmônico da carga após o transformador atenuador.

Fases	A	B	C
RMS Total	165,0 A	170,5 A	157,8 A
RMS Harmônico	15,88 A	14,64 A	16,00 A
THD	9,61 %	8,58 %	10,14 %

A corrente harmônica a ser compensada pelo filtro híbrido será a soma dos harmônicos provenientes de seis conjuntos de transformadores atenuadores. Uma estimativa da corrente harmônica resultante está apresentada na tabela III.

Tabela III. Conteúdo harmônico a ser compensado pelo filtro ativo híbrido.

Fases	A	B	C
RMS Total	990,04 A	1023,07 A	946,48 A
RMS Harmônico	94,03 A	86,58 A	94,39 A
THD	9,50 %	8,46 %	9,97 %

Através destes dados é possível a correta especificação tanto do transformador atenuador quanto do filtro ativo híbrido.

A. Especificação do Transformador Atenuador

Como citado anteriormente os arranjos de transformadores com configuração que gera defasagem de 30° entre a tensão de alimentação das duas cargas são os que apresentam melhor atenuação harmônica. Estas configurações podem ser obtidas com dois transformadores independentes ou com um transformador com três enrolamentos, um primário e dois secundários.

As medições de carga na SUAPE II mostraram que cada grupo de ventiladores possui uma potência nominal de aproximadamente 75 kW. A partir desses dados foram especificados cinco transformadores, sendo três com dois enrolamentos e dois com três enrolamentos a fim de definir qual configuração apresenta melhor custo-benefício. Os transformadores especificados foram:

- Transformador trifásico, potência nominal de 100 kVA, regime contínuo, resfriamento por ar natural, a seco, tensão primária 480 V, ligação primária em triângulo, tensão secundária 480 V, ligação em triângulo.
- Transformador trifásico, potência nominal de 100 kVA, regime contínuo, resfriamento por ar natural, a seco, tensão primária 480 V, ligação primária em triângulo, tensão secundária 480/277 V, ligação em estrela com neutro acessível.

- Transformador trifásico, potência nominal de 100 kVA, regime contínuo, resfriamento por ar natural, a seco, primária 480 V, ligação primária em triângulo, tensão secundária 480/277 V, ligação em zig-zag.
- Transformador trifásico, potência nominal de 200 kVA, regime contínuo, resfriamento por ar natural, a seco, tensão primária 480 V, ligação primária em triângulo, tensão secundária 480/277 V e 480V, ligação estrela – triângulo.
- Transformador trifásico, potência nominal de 200 kVA, regime contínuo, resfriamento por ar natural, a seco, tensão primária 480 V, ligação primária em triângulo, tensão secundária 480/277 V e 480/277 V, ligação Zig-Zag (Duplo).

As configurações com três enrolamentos apresentam melhor custo-benefício, já que um transformador nesta configuração é 20% mais barato que a aquisição de dois transformadores independentes. O uso de um transformador de três enrolamentos também é interessante do ponto de vista de espaço físico.

A escolha para implementação neste projeto foi um transformador trifásico com três enrolamentos com o primário em triângulo e os dois secundários em estrela-triângulo. Pois, esta é uma configuração comumente utilizada na indústria.

B. Especificação do Filtro Ativo Híbrido

A topologia do filtro ativo híbrido trifásico se baseia em três estruturas iguais a da Figura 1. A adoção da construção do filtro trifásico por meio de três estruturas monofásicas, conectadas em estrela, permite a compensação de harmônicos desequilibrados nas três fases.

A especificação dos componentes de potência do filtro híbrido depende principalmente da quantidade de corrente harmônica a ser compensada. Essa corrente vai depender da corrente da carga, da sua distorção harmônica (THD) e, neste caso, da mitigação harmônica obtida através do transformador atenuador.

Conforme apresentado na tabela III, a corrente harmônica total que deve ser compensada pelo filtro híbrido fica em torno de 94 A.

O princípio de funcionamento do filtro híbrido baseia-se na sintonia ativa do ramo híbrido para cada frequência. Então, além de definir a corrente harmônica total e de cada componente, é necessário definir a tensão que deve ser imposta pela parte ativa do filtro para sintonia de cada harmônico. Essa tensão depende do banco de capacitores utilizado. A tabela IV mostra a tensão necessária para a compensação das correntes harmônicas calculadas, apresentadas na Tabela III, para três valores de capacitância. Note que são consideradas as tensões até a 25ª ordem, já que o filtro híbrido é programado para compensar harmônicos até essa frequência, uma vez que as de ordem mais elevada apresentam valores muito pequenos.

Tabela IV. Tensão harmônica necessária para cada valor de capacitor.

Capacitor	600 μ F	700 μ F	800 μ F
Ordem Harmônica	Volts	Volts	Volts

9	5,68	4,87	4,26
11	29,13	24,97	21,85
13	14,31	12,27	10,73
15	2,61	2,23	1,95
21	1,18	1,01	0,88
23	3,62	3,10	2,72
25	2,97	2,55	2,23
V_{RMS} harmônico	33,07	28,35	24,80

Pode-se notar que a tensão necessária para compensar os harmônicos é reduzida com o aumento da capacitância. Por outro lado, um aumento da capacitância do banco causa aumento da corrente de 60 Hz circulando pelo ramo do filtro, uma corrente capacitiva excessiva no filtro híbrido deve ser motivo de atenção por dois motivos:

- aumento da potência reativa entregue pelo banco, o que pode ser indesejado dependendo do fator de potência e da regulação de tensão do sistema. Caso ambos estejam dentro dos limites antes da instalação do filtro, pode-se ter, após sua conexão, excesso de reativo no sistema e sobretensões;
- devido à conexão série entre a parte ativa do filtro e o banco de capacitores, toda a corrente do banco passa pelo conversor que constitui a parte ativa do filtro. Havendo corrente elevada em 60 Hz, devido a um banco de alta capacitância, deve-se especificar componentes que suportem a corrente harmônica de compensação mais a corrente em 60 Hz. Quanto maior a capacidade de corrente mais caro são os IGBT's que compõe o conversor, elevando seu custo, além do aumento de perdas devido à condução de maiores correntes.

Deste modo deve-se encontrar um ponto de equilíbrio entre tensão harmônica imposta e corrente passante pelo filtro de modo a otimizar sua especificação e reduzir o custo dos conversores, que representam uma parcela considerável do custo total do equipamento.

A tabela V apresenta um resumo dos valores de tensão, corrente e potência aparente calculados para três bancos de capacitores diferentes.

A partir dos dados da tabela V observa-se que a potência aparente tende a reduzir com o aumento do capacitor, mas, por experiência prévia da especificação desta topologia de filtro, essa queda se torna menor para capacitâncias muito elevadas. Assim, é interessante escolher uma capacitância intermediária, neste caso, será utilizado para as especificações dos componentes do filtro híbrido uma configuração com capacitor em torno de 700 μ F.

Tabela V. Correntes, tensões e potências do filtro ativo para vários capacitores.

Capacitor	600 μF	700 μF	800 μF
X_c (60Hz)	4,42 Ω	3,78 Ω	3,31 Ω
Corrente fundamental para V_m 275 V	62,2 A	72,6 A	82,9 A
Corrente harmônica	90,85 A	90,85 A	90,85 A
Corrente filtro total (harmônicos + fundamental)	110,1 A	116,3 A	123,0 A
Tensão RMS Harmônica do Filtro Ativo	33,4 V	28,63 V	25,05 V
Tensão RMS Fundamental do Filtro Ativo ^a	26,72 V	25,77 V	25,05 V
Tensão RMS Total Filtro Ativo (harmônicos + fundamental)	42,87 V	38,60 V	35,50 V
Potência Aparente do Filtro Ativo	4720 VA	4488 VA	4366 VA

^a O valor da tensão fundamental foi calculado baseado em testes realizados em laboratório, estimando a queda de tensão no filtro ativo para suprir as perdas de compensação.

a) Banco de Capacitores

Os bancos de capacitores estão associados em série com o transformador de acoplamento, e são responsáveis pela formação do filtro sintonizado em cada frequência harmônica. O filtro ativo híbrido é sintonizado para cada frequência a partir da combinação da impedância do capacitor, com uma impedância ativa criada pelo inversor de frequência.

O tamanho do banco de capacitores deve ser ajustado de acordo com a corrente capacitiva que deve ser injetada no sistema. Esta corrente também está relacionada com o controle da tensão do *link DC* do inversor.

De acordo com os cálculos anteriores foram especificados bancos de capacitores de 700 μF , com classe de tensão de 380 V. Esse nível de tensão é suficiente para conexão dos bancos em estrela em um sistema com tensão 275 V fase-neutro (480 V fase-fase) mantendo uma boa margem de segurança para suportar a tensão em 60 Hz mais as tensões harmônicas que o banco deve suportar.

b) Transformador de Acoplamento

A especificação do transformador depende principalmente da determinação de duas grandezas, a corrente total do filtro (fundamental + harmônicos) e da tensão total que deverá ser imposta (tensão harmônica para compensação e tensão em 60 Hz para carregar o *link DC*).

De acordo com os valores calculados e apresentados na tabela V para o banco de capacitores escolhido (700 μF) a corrente total será de aproximadamente 116 A e a tensão total necessária de, aproximadamente, 40 V. Entretanto, alguns fatores devem ser considerados para a especificação final do transformador. Primeiramente, a tensão a qual o transformador está submetido é altamente poluída por harmônicos (chegando facilmente à THD_v de 200%), sendo necessário um sobredimensionamento do seu nível de tensão para garantir que não haja saturação durante o funcionamento. A saturação do transformador de acoplamento compromete fortemente a capacidade de compensação harmônica do filtro híbrido e deve ser evitada. Além do mais, os cálculos de tensão e corrente harmônicas apresentados aqui são estimativas e as corrente e tensões harmônicas reais podem su-

perar as calculadas, sendo então prudente a utilização de margens de segurança razoáveis na especificação do primeiro protótipo a ser instalado.

Uma tensão de trabalho de 50:380V resultando em uma relação de transformação de 1:7,6 apresenta bom desempenho em termos de saturação, nível de tensão adequada para os IGBTs no lado de alta e boa margem para compensação de mais harmônicos, caso necessário. Para garantir uma margem também na corrente de compensação, um transformador com corrente em torno de 120 A seria o ideal. Fazendo assim com que a potência nominal fique em torno de 6 kVA para cada fase. Em relação à impedância percentual, um compromisso entre impedância suficiente para carregar o link DC e não impedir a imposição de tensões harmônicas aparece com impedâncias entre 3% e 5%, sendo 4% um valor razoável de acordo com resultados experimentais [3].

Deve-se notar que a potência do transformador de acoplamento é cerca de 2% da potência da carga (considerando a potência trifásica são $3 \times 6 \text{ kVA} = 18 \text{ kVA}/900 \text{ kVA}$). Esta será a potência também do inversor de frequência, ou seja, a parte ativa do filtro neste arranjo (filtro híbrido + transformador atenuador) será de apenas 18 kVA para compensação harmônica de uma carga de 900 kVA e THD_i de 36 %.

Estão sendo considerados transformadores toroidais para serem utilizados como transformador de acoplamento. Esse tipo de transformador apresenta as seguintes vantagens em relação aos convencionais:

- Baixíssima irradiação do campo magnético ao redor do transformador, não afetando circuitos eletrônicos sensíveis, sejam eles analógicos ou digitais.
- Baixíssimas perdas, o que proporciona um menor consumo pois a corrente consumida em vazio (sem carga) é bastante pequena.
- Menor variação de tensão na saída de potência, ou seja, a diferença entre a tensão de saída com carga e sem carga (em vazio) é inferior a de um transformador convencional.
- Tamanho reduzido, em geral, entre 40 e 60% menores e mais leves que os transformadores convencionais.
- Fácil montagem em equipamentos, podendo ser fixado com apenas 1 parafuso ou abraçadeiras plásticas, reduzindo tempo de montagem.

c) Inversor de Frequência

A Figura 2 mostra a topologia de um inversor em ponte H monofásico. Na construção do equipamento trifásico serão utilizadas três pontes H, conforme a da figura.

De acordo com os cálculos prévios e com a especificação da relação de transformação do transformador de acoplamento, a corrente que deve passar pelos IGBTs será de 120 A (corrente no lado de baixa do transformador) dividido pela relação de transformação de 7,6. O resultado é uma corrente de aproximadamente 15 A. A tensão suportada pela ponte é definida pelos capacitores do link DC e pela capacidade de tensão dos IGBTs. Como já mencionado, um valor de tensão normalmente suportado pelos IGBTs é de 1200 V, já os capacitores podem ser de 250 V, 450 V e 900 V. Para suportar

o valor de pico da tensão máxima possível no lado de alta do transformador de acoplamento, $380 \cdot \sqrt{2} \text{ V} = 535 \text{ V}_p$, e considerando uma margem de segurança, deve-se optar por capacitores de 900 V.

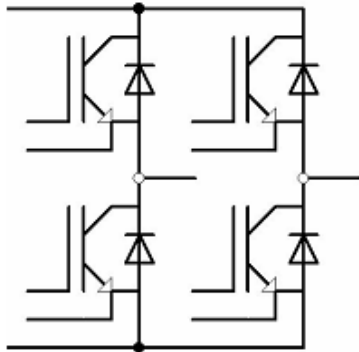


Figura 2. Topologia em ponte H do inversor de frequência.

A especificação completa da ponte, com todos os seus componentes: IGBTs, drivers, capacitores para o link DC e dissipador de calor adequado é feita a partir das especificações de tensão e corrente da aplicação.

i. Componentes Eletrônicos

Todas as variáveis de tensão e corrente a serem processadas pelo filtro híbrido são lidas inicialmente de maneira analógica, através de sensores *Hall*. Para que este sinal seja posteriormente convertido para um sinal digital através do conversor análogo-digital do DSP (*Digital Signal Processor*).

Desta forma, os transdutores de tensão e corrente têm a função de compatibilizar os níveis de tensão e corrente do circuito de potência com o circuito eletrônico de controle, além de proporcionar isolamento elétrico entre os dois circuitos.

Todos os sensores de efeito *Hall* utilizados apresentam saída em corrente, menos susceptível a interferências e ruídos externos.

O circuito de condicionamento do filtro ativo híbrido é composto basicamente por 4 placas: condicionamento de sinais AC, condicionamento de sinais DC, placa de conexão e driver do IGBT.

A fim de compatibilizar os sinais advindos dos sensores de corrente e tensão com as entradas do conversor A/D do DSP são necessários circuitos de condicionamento compostos basicamente por um filtro passa-baixas para redução dos ruídos de alta frequência, um ganho para adequação da amplitude do sinal a ser amostrado e um ajuste de offset de 1,5 V, já que o conversor A/D só trabalha com sinais na faixa de 0 a 3 V.

A Figura 3 mostra um diagrama representativo do circuito de condicionamento.

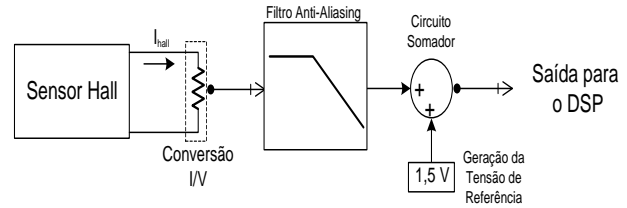


Figura 3. Diagrama representativo do circuito de condicionamento.

A Figura 4 mostra dois canais da placa de condicionamento, o canal superior para leitura de grandezas DC e o inferior para leitura de tensões e correntes alternadas.

Todo o processamento e controle do equipamento é feito por um DSP responsável por calcular, em tempo real, as referências de tensão e corrente para gerenciar o sistema de carga do *link DC* e compensar os harmônicos de corrente.

A placa de conexão é formada por dois circuitos isolados para os sinais de entrada e saída do DSP. Essa conexão para os sinais de entrada é feita para evitar o uso de cabos *flats*. O segundo circuito serve para rotear através das trilhas do circuito impresso os sinais na ordem correta que devem ser entregues ao *driver*.

A principal finalidade dessa placa é a de isolar em circuitos diferentes as trilhas dos sinais de entrada do DSP, das trilhas nas quais passam os sinais de chaveamento do PWM. Criando uma placa comum para conexão do DSP, porém sem que haja interferência nos sinais de entrada pelos sinais de chaveamento de saída.

A placa de conexão é mostrada na Figura 5, onde o DSP é ligado diretamente a placa sem a utilização de cabos.

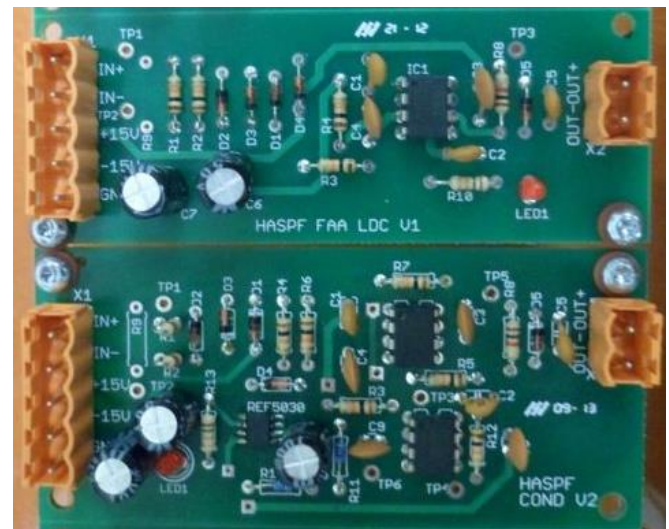


Figura 4. Placa do circuito de condicionamento.



Figura 5. Placa de conexão entre o DSP e os demais circuitos eletrônicos.

Para o acionamento dos IGBTs são necessários drivers para compatibilizar os sinais vindos do DSP com os níveis de tensão aplicados ao componente. Para tanto, utiliza-se um circuito com buffer para elevar o nível de tensão dos pulsos de 3 V vindos do DSP para 15 V, que é o nível de tensão de referência para os drivers comerciais existentes no módulo dos conversores.

Além dos buffers para ajuste dos níveis de tensão, estes circuitos possuem optoacopladores para isolar os terras dos sinais de saída do DSP dos sinais chaveamento que irão acionar os IGBTs.

O circuito do driver é composto por 2 buffers e por um optoacoplador. Como a frequência dos pulsos dos sinais de saída do PWM é 20kHz, é necessário um optoacoplador especial que trabalhe com frequências mais elevadas. No entanto, o circuito integrado disponível capaz de operar com esta frequência opera somente com níveis de tensão de 0 a 5 V. Por isso, é necessário um buffer para elevar os sinais de 3 V do DSP para 5 V. Por fim, utiliza-se outro buffer para elevar a tensão deste sinal de 5 para 15 V, como mostra a Figura 6.

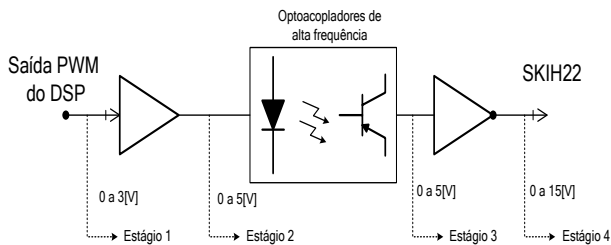


Figura 6. Esquemático do driver para os pulsos de acionamento dos IGBTs.

Este circuito também é responsável por compatibilizar os níveis de tensão dos sinais de erro do SKHI (15 V) de volta para as entradas I/O do DSP (3 V), onde os pulsos serão interrompidos caso algum sinal de erro seja detectado. Esse circuito é representado pelo esquemático da Figura 7.

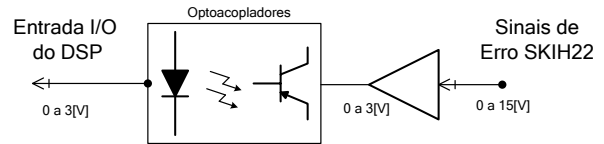


Figura 7. Esquemático do driver para os sinais de erro do SKIH 22.

A Figura 8 mostra a placa de driver desenvolvida.

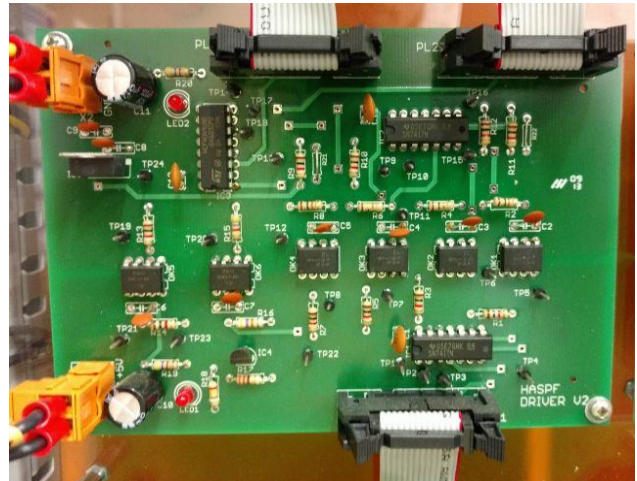


Figura 8. Placa de driver.

Além da parte de condicionamento e processamento é necessário um circuito de comando, constituído por relés e portas lógicas para efetuar a lógica de inicialização do equipamento e comando das operações de abertura e fechamento dos contatores para conexão na rede, além de receber e enviar sinais de sinalização do painel de comando. A Figura 9 mostra a placa de comando.

Todo o circuito eletrônico é alimentado com níveis de tensão de 5 V, ± 15 V e 24 V, para isto foram especificadas fontes chaveadas para fornecer esses diferentes níveis de tensão. Essas fontes devem ser acondicionadas no armário do equipamento.



Figura 9. Placa de comando.

IV. SIMULAÇÃO DO SISTEMA

Para verificar se os cálculos para especificação do filtro híbrido estão corretos, foi realizada uma simulação computacional no *Matlab/Simulink*®, simulando a carga de ventiladores de uma das casas de força com a instalação de 6 transformadores atenuadores e um filtro ativo híbrido.

A configuração de três enrolamentos para o transformador atenuador de harmônicos foi utilizada, sendo o primário em triângulo e o secundário com um enrolamento em estrela e outro em triângulo.

A Figura 10 mostra a forma de onda e o espectro harmônico da corrente na carga, representando o regulador de velocidade de 18 ventiladores cada, com um THD próximo de 40%.

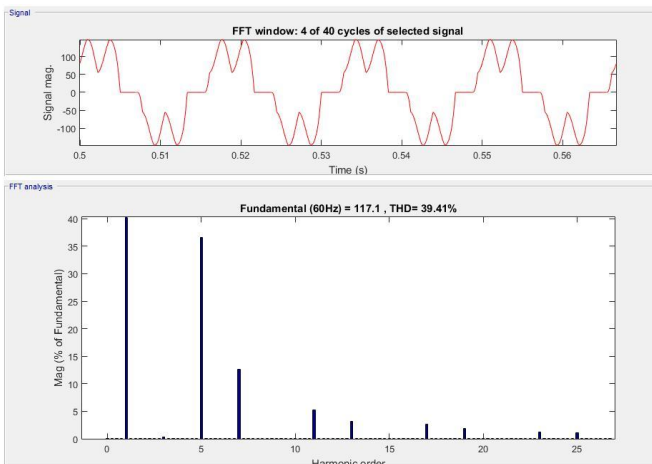


Figura 10. Corrente na carga para 18 ventiladores.

A Figura 11 mostra a forma de onda e o espectro harmônico do somatório das correntes após os seis transformadores atenuadores, mas sem atuação do filtro ativo. Os harmônicos de ordem 5, 7, 17 e 19 são eliminados e o THD está próximo de 5%.

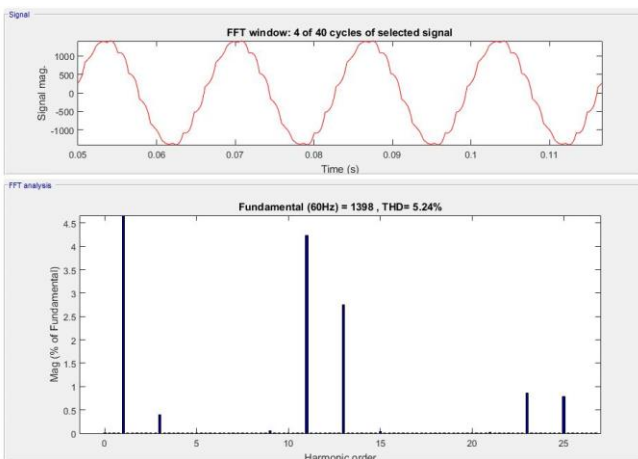


Figura 11. Corrente das cargas somadas após os transformadores atenuadores sem atuação do filtro ativo híbrido.

A Figura 12 mostra a forma de onda e o espectro harmônico do somatório das correntes após os seis transformadores atenuadores com compensação ativa do filtro híbrido. Praticamente todos os harmônicos são eliminados e o THD cai para próximo de 0,5%.

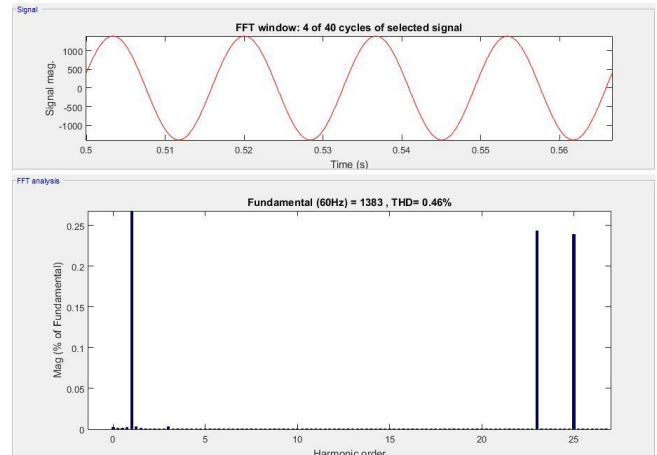


Figura 12. Corrente das cargas somadas após os transformadores atenuadores com atuação do filtro ativo híbrido.

V. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou os desenvolvimentos realizados até o presente momento no projeto de P&D intitulado “Desenvolvimento de Protótipo Funcional de Novo Conjunto Transformador Atenuador de Harmônicos” com suporte financeiro da Energética SUAPE II.

A partir das medições realizadas na SUAPE II e dos conhecimentos obtidos das simulações e ensaios feitos com os transformadores em escala reduzida, foram realizadas as especificações dos transformadores atenuadores e do filtro híbrido a serem instalados para compensação dos harmônicos gerados pelo sistema de refrigeração de um dos geradores.

Uma simulação do sistema foi realizada para confirmação da capacidade do filtro em eliminar os harmônicos remanescentes e verificar se os cálculos da tensão e corrente harmônica no filtro ativo estavam corretos.

A compensação do conteúdo harmônico presente na corrente da carga irá possibilitar o aumento da potência disponível pelo gerador termoeletrônico, que agora irá alimentar uma carga com corrente senoidal. Isto implica na melhoria da eficiência energética do gerador e conseqüente economia do consumo de óleo na usina termoeletrônica.

Os benefícios obtidos pela aplicação do conjunto transformador atenuador de harmônicos, juntamente com o filtro híbrido, podem ser estendidos para melhoria de qualquer instalação que possua cargas não lineares, e não somente para sistemas de geração. Isto devido à redução de perdas em cabos e transformadores e aumento da vida útil desses equipamentos. A característica híbrida da solução para mitigação harmônica reduz o custo de implementação, quando comparada com soluções puramente ativas, sendo uma tecnologia interessante para aplicação em diversos setores industriais e do setor elétrico.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F. Z. Peng, H. Akagi, e A. Nabae, “A New Approach to Harmonic Compensation in Power System”, in Proc. 1988 *IEEE Industry Applications Society Conf.*, pp. 874.

- [2] S. Bhattacharya, D. M. Divan, "Synchronous Frame Based Controller Implementation for Hybrid Series Active Filter System", in Proc. 1995 *IEEE Industry Applications Society Conf.*, pp. 2531-2540.
- [3] R. B. Gonzatti, S. C. Ferreira, C. H. da Silva, R. R. Pereira, L. E. Borges da Silva, e G. Lambert-Torres, "Smart Impedance: A New Way to Look at Hybrid Filters", *IEEE Trans. Smart Grid*, vol.7, no.2, pp.837-846, March 2016.
- [4] Square D, "Harmonic Mitigating Transformers" Data Bulletin 17400DB0301, Nashville, TN, USA, July 2003.
- [5] *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*, IEEE Standard 519-1992, 1993.
- [6] *PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, "Módulo 8 - Qualidade de Energia Elétrica"*, Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. Rev. 07, 2016.