



**XXIII SNPTTE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GET/14  
18 a 21 de Outubro de 2015  
Foz do Iguaçu - PR

**GRUPO – XIV**

**GRUPO DE ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E GESTÃO DA TECNOLOGIA, DA INOVAÇÃO E DA EDUCAÇÃO- GET**

**FILTROS DE POTÊNCIA COMANDADOS POR CONTROLADORES INTELIGENTES PARA MITIGAÇÃO DAS HARMÔNICAS EM UMA UTE A CARVÃO.**

**Autores: SALDIAS, C.E.P.(1); PAULETTI, P.(1); TAVARES, A.A.(1); COELHO, V.L.(1); SPACEK, A.D.(1); NETO, J.M.(1); MAGNUS, D.D.M.(1); GAIDZINSKI, M.P.(2);**  
**Instituições: SATC (1); Tractebel Energia (2).**

**RESUMO**

Este trabalho apresenta o projeto em andamento de dois filtros de potência comandados por controladores inteligentes para a mitigação de harmônicos e correção do fator de potência nos serviços auxiliares de uma Usina Termelétrica (UTE). O primeiro filtro comandado por PLC foi projetado para um retificador de seis pulsos com um banco de baterias como carga, o segundo filtro controlado por inteligência artificial foi concebido para um sistema de iluminação monofásico. Os filtros e seus controladores já foram projetados, e até agora foram feitos alguns testes no simulador PSIM, com resultados parciais satisfatórios.

**PALAVRAS-CHAVE**

Filtro Passivo sintonizado, controle inteligente, qualidade da energia, inteligência artificial, usina termelétrica.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Este trabalho apresenta o projeto e concepção de dois filtros de potência comandados por um controlador inteligente para a mitigação de harmônicos e correção do fator de potência nos serviços auxiliares de uma Usina Termelétrica (UTE). O objetivo do sistema concebido é reduzir os custos de manutenção em função da melhoria da QEE, permitindo controlar as DHT e o fator de potência dentro das recomendações da norma IEEE standard 519/1992, resultando em aumento da vida útil dos equipamentos elétricos. Sabendo-se que cerca de 10-12% de toda energia gerada por uma UTE é consumida pelos seus sistemas auxiliares, as melhorias propostas por este projeto, em conjunto com outras modelagens, pretende apresentar redução das perdas em até 10% nos serviços auxiliares. Este conjunto de ações estará contribuindo para que o Sistema Elétrico Brasileiro atinja sua meta de reduzir gradativamente as perdas no sistema elétrico para 10% até 2030. A concepção dos filtros passivos é baseada em um procedimento consagrado, cujas principais formas de adequar os níveis de harmônicos a padrões normativos passam pela correção do fator de deslocamento e potência. Em seguida define-se o fator de qualidade (Q) e calculam-se os componentes, adequando o sistema aos níveis padrões sugeridos pela norma IEEE standard 519/1992.

Os filtros e controladores já foram projetados e estão em fase de testes no simulador. Os painéis onde serão alocados os filtros e os controladores estão sendo orçados. O primeiro sistema foi concebido para ser comandado por CLP, e tem como foco a mitigação das harmônicas de um retificador capacitivo trifásico de seis pulsos 50,7kVA que é responsável pelo carregamento das baterias e alimentação dos painéis de controle e medição da planta. O segundo filtro comandado por inteligência artificial foi projetado para mitigar as harmônicas de um sistema de iluminação monofásica de 300 kVA. O princípio de funcionamento do controlador deste filtro é o manuseio e processamento de bases de conhecimento por meio de uma máquina virtual de raciocínio, a qual é implementada num agente virtual (um agente simula um operador humano autônomo). A máquina de raciocínio usada é baseada no modelo JEMO, desenvolvido num projeto de doutorado na UFSC no ano 2014, e é fundamentada numa arquitetura BDI (Belief-Desire-Intentions/ Crenças-Desejos-Intenções), modificada para aprendizado tomando como

base experiências anteriores e para emulação de processos conscientes e inconscientes regulados por estados mentais emocionais. Para a validação, ao final deste estudo será realizado um comparativo da qualidade da energia elétrica antes e depois da inserção dos filtros por meio de simulação com o software PSIM.

## 2.0 - FILTRO CONTROLADO POR PLC NO SERVIÇO AUXILIAR DE RETIFICADOR E BANCO DE BATERIAS

A melhoria da QEE será realizada num retificador trifásico de seis pulsos presente nos serviços auxiliares de uma UTE. A carga apresenta altos índices de distorções harmônicas de corrente, elevando as perdas elétricas dos equipamentos e nos condutores. O retificador carrega um banco de baterias, utilizado para suprir alguma falta de energia proveniente da rede da concessionária.

Atualmente o sistema retificador trifásico possui um filtro capacitivo para a elevação do fator deslocamento do circuito, porém o mesmo não é a solução mais indicada para a mitigação dos problemas envolvendo as distorções harmônicas. Logo, o mesmo será substituído por uma topologia de filtro passivo mais eficiente para a melhoria da QEE, sendo que este também eleva o fator de potência (FP) e deslocamento do sistema (Fdesl). Na Tabela I, apresentam-se os índices médios de tensão eficaz, corrente eficaz, frequência, DHTi, DHli<sub>5</sub>, FP e Fdesl, da fase A. Os valores obtidos nas três fases são muito similares, o que possibilita trabalhar o sistema de modo unifilar.

Tabela I: Valores obtidos com as medições.

Grandezas Elétricas	Valor
Tensão de linha eficaz [V]	448,00
Corrente de linha eficaz [A]	28,00
Frequência	60,01
DHTi [%]	24,91
DHli <sub>5</sub> [%]	1,17
DHli <sub>7</sub> [%]	24,57
DHli <sub>11</sub> [%]	0,98
FP [adim.]	0,96

Os dados utilizados para os cálculos foram medições *in loco*. Os valores da carga não linear estão presentes na Tabela II.

Tabela 1: Grandezas elétricas da carga.

Grandezas Elétricas	Valores
Tensão de entrada eficaz [V]	154
Frequência [Hz]	60
Potência ativa na saída do retificador [W]	26.000
Ondulação máxima [%]	5

O filtro proposto será instalado e conectado em paralelo entre o secundário do transformador e o retificador. A figura 1 ilustra o esquema da solução proposta, dos três filtros trifásicos em paralelo com a carga, e mostra um circuito equivalente representando a carga não linear.

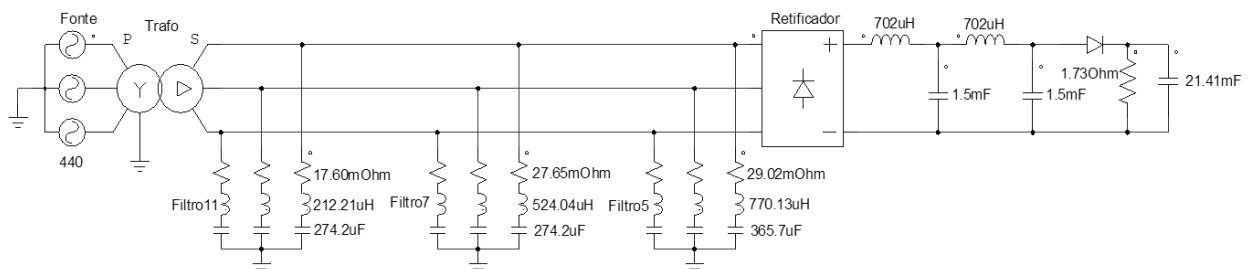


Figura1. Solução proposta.

A elaboração do filtro passivo deste trabalho baseia-se na metodologia de análise da QEE, apresentada no livro do Bollen [3]. A topologia de filtros passivos shunt série em cascata escolhida funciona com a utilização de três componentes passivos em série, sendo esses um resistor, um capacitor e um indutor. Esses elementos são associados em série e oferecem um caminho de baixa impedância ajustado à frequência da harmônica que se

deseja eliminar. A tabela III, mostra os componentes calculados e ajustados com valores comerciais para cada harmônica que os filtros devem mitigar.

Tabela III: Componente resistivo, indutivo e capacitivo dos filtros 5ª, 7ª e 11ª ordem

Componente	Filtro de 5ª ordem	Filtro de 7ª ordem	Filtro de 11ª ordem
Resistivo [mΩ]	29,02	27,65	17,60
Indutivo [μH]	770,13	524,04	212,21
Capacitivo [μF]	365,70	274,20	274,20

O programa utilizado para a modelagem e simulação do sistema é o PSIM®, por extenso denomina-se Power Simulator. Os dados da Tabela IV apresentam os resultados obtidos com a aplicação dos filtros ajustados com os valores comerciais.

Tabela IV: Comparativo entre o sistema atual modelado e o sistema com o filtro modelado ajustado.

Grandezas	Sistema atual	Sistema com o filtro
Tensão eficaz de linha [V]	152,51	153,05
Corrente eficaz de linha [A]	96,53	96,85
Potência aparente por fase [VA]	14783,64	14823,58
Potência ativa por fase [W]	11744,72	14169,89
Potência reativa por fase [VAr]	7964,26	3828,95
Fator de potência [adim.]	0,79	0,96
Fator de deslocamento [adim.]	0,83	0,98
DHTi [%]	28,26	13,98
DHTv [%]	2,83	2,42
DHli <sub>5</sub> [%]	28,73	10,39
DHli <sub>7</sub> [%]	12,15	4,80
DHli <sub>11</sub> [%]	8,22	1,67
DHli <sub>13</sub> [%]	6,21	3,95
DHli <sub>23</sub> [%]	2,87	1,97
DHli <sub>25</sub> [%]	2,43	1,64

A figura 2 mostra o comparativo de harmônicas entre as especificações IEEE standard 519/1992, o sistema atual e a simulação do sistema com os filtros projetados. A figura 3 mostra o comparativo da corrente na fase A sem filtro e com filtro inserido.

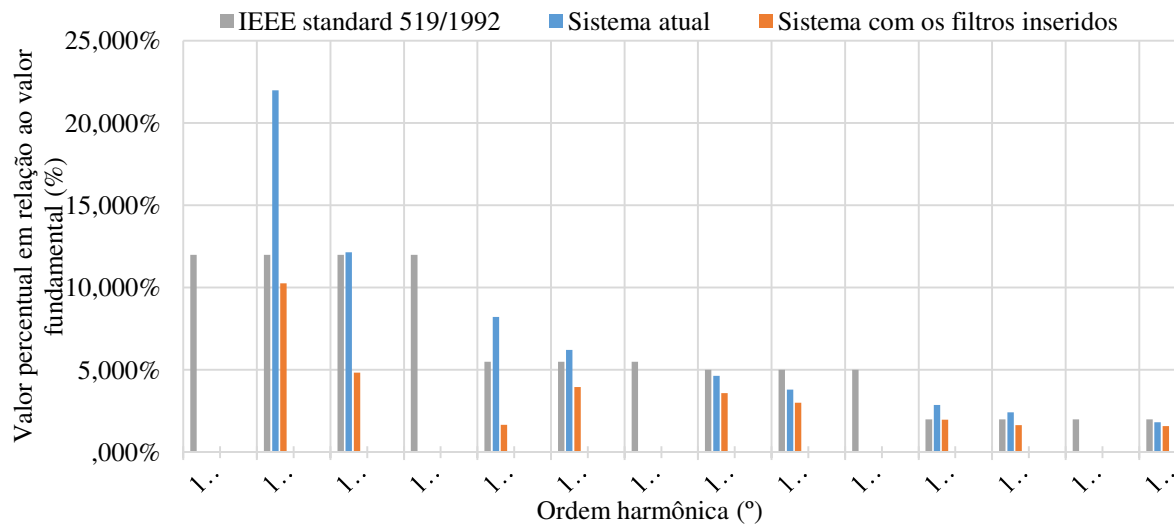


FIGURA 1. Espectro harmônico do sistema atual em comparação com o sistema com os filtros inseridos e a IEEE standard 519/1992.

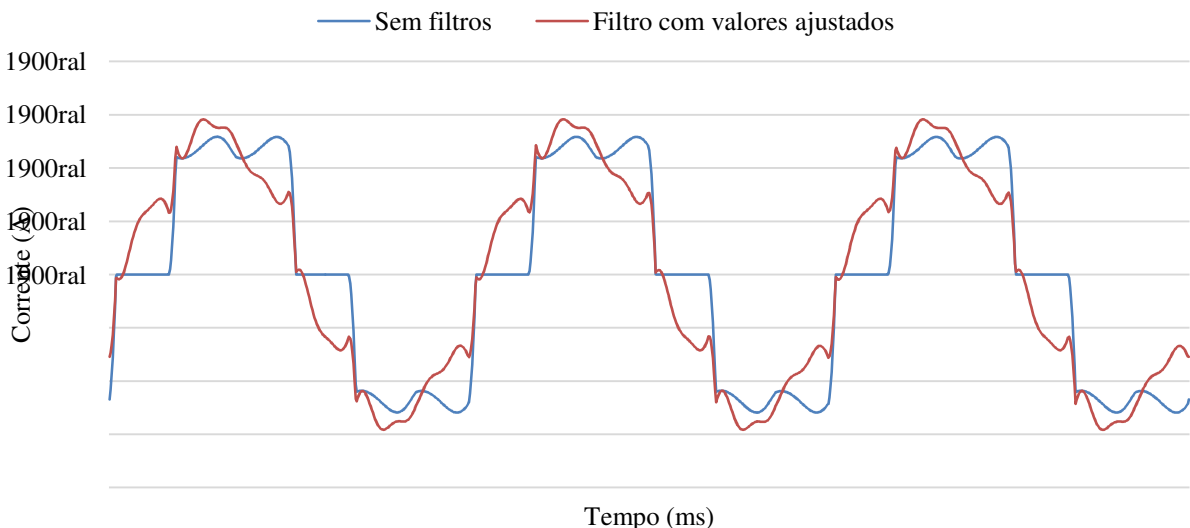


FIGURA 3. Gráfico comparativo das correntes versus tempo, em vermelho é a corrente com o sistema sem os filtros (em vermelho) e em azul a corrente com os filtros ajustados (em azul).

## 2.1 Projeto de controle do filtro

Atualmente, não existe nenhum controle de qual tipo de harmônica mais influência na rede. No projeto, esse controle é de duas vias, isso porque existe uma medição na entrada do filtro e outra depois da correção. Esse tipo de medição faz com que o processo torne-se retroalimentado, ou seja, o medidor após os filtros origina o feedback para a correção. O gerenciador de QEE automatizado será instalado no ponto entre o transformador e a carga, possuindo componentes de automação que serão responsáveis pelas leituras dos parâmetros de qualidade da energia elétrica. Essa automação é responsável pela melhor configuração do sistema de filtragem, fazendo o monitoramento em tempo real das distorções presentes no sistema elétrico, selecionando o melhor arranjo de filtros com o intuito de mitigar as interferências eletromagnéticas e mostrando assim todo o processo de filtragem por uma IHM (Interface Homem Máquina). A figura 4 ilustra a disposição do equipamento usado no chaveamento dos filtros, constituída pelos seguintes componentes: Medidor A – Responsável pela leitura dos distúrbios elétricos junto à carga, Medidor B – Responsável pela leitura dos distúrbios após a passagem pelos filtros passivos do sistema. Contator trifásico S0 – Faz a comutação do circuito de alimentação dos filtros de potência sob carga. Contator S1 – Responsável pela abertura e fechamento do circuito de alimentação dos filtros passivos sintonizados na 5ª harmônica. Contator S2 – Responsável pela abertura e fechamento do circuito de alimentação dos filtros passivos sintonizados na 7ª harmônica. Contator S3 – Responsável pela abertura e fechamento do circuito de alimentação dos filtros passivos sintonizados na 11ª harmônica. Contator S4 – Responsável pela abertura e fechamento do circuito de alimentação do filtro de potência pré-existente no lado AT do transformador, sendo este na 13ª harmônica.

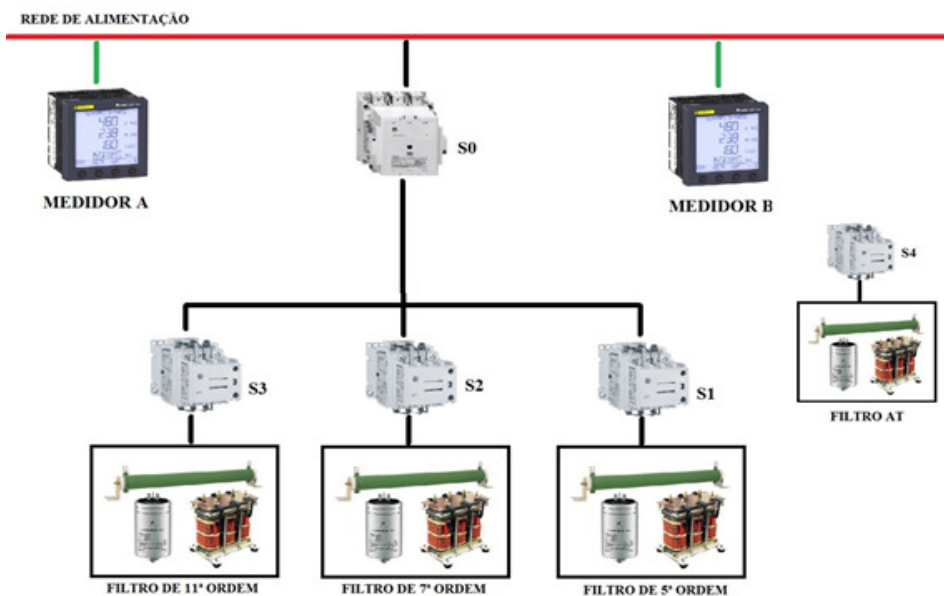


FIGURA 4. Chaveamento dos filtros.

Neste projeto, foram utilizados dois tipos de protocolos de comunicação. A Figura 5 exibe em detalhes o tipo e a abrangência de cada protocolo.

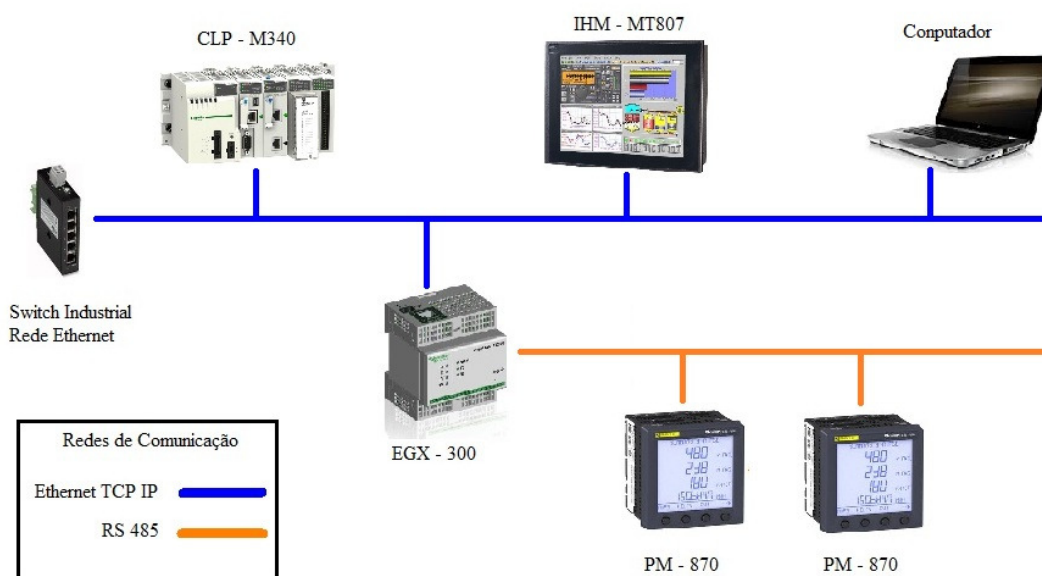


FIGURA 5. – Estrutura de comunicação

Na comunicação que utiliza o protocolo Ethernet TCP IP, existem três equipamentos e mais um computador para programação. Nesse tipo de rede cada equipamento tem um endereço de IP que é utilizado para mostrar o caminho da informação que se deseja enviar na rede. Esse gerenciamento de dados é feito pelo Switch Industrial ECX-300. No segundo tipo de rede há uma comunicação serial RS 485, que faz a troca de dados entre dois equipamentos de medição com um servidor da rede. Nessa configuração, os equipamentos são detectados na rede através de sua posição no circuito de comunicação. O sistema de gerenciamento automático de qualidade de energia conta com uma operação supervisionada através de uma interface homem máquina (IHM), a IHM weintek MT 807

## 2.0 - PROJETO DE FILTRO CONTROLADO POR INTELIGENCIA ARTIFICIAL NO SERVIÇO AUXILIAR DE ILUMINAÇÃO

O sistema de iluminação apresenta índices significativos de distorção harmônica devido às cargas monofásicas presentes. O filtro será instalado em paralelo entre a carga e a fonte, ou o transformador, onde a maioria dos métodos de mitigação de harmônicas são aplicados. Foi definido esse ponto para a aplicação, pois se situa mais próximo da fonte geradora de distúrbios, nesse caso a carga, que são lâmpadas fluorescentes com reatores conectadas em um transformador rebaixador delta-estrela. Na Tabela V, apresentam-se os índices médios de tensão eficaz, corrente eficaz, frequência, DHTi, DHli3, FP e Fdesl, da fase A. Os valores utilizados foram tratados de forma a simular um sistema equilibrado, o que possibilita trabalhar o sistema de modo unifilar. As medições foram realizadas no secundário do transformador.

Tabela V. Valores obtidos com as medições.

Grandezas Elétricas	Valor
Tensão de linha eficaz [V]	220,00
Corrente de linha eficaz [A]	302,27
Frequência	60,00
DHTi [%]	80,00
DHli3 [%]	74,37
DHli5 [%]	25,23
DHli7 [%]	5,45
Fdesl [adim.]	0,85

Analisando os valores obtidos com as medições foi possível detectar três ordens de harmônica de corrente mais agravantes, sendo essas as de 3ª, 5ª e 7ª ordem. Logo, serão desenvolvidos três filtros sintonizados a essas frequências operando em cascata. Usando a mesma metodologia de dimensionamento do filtro anterior, em base ao circuito proposta na figura 6.

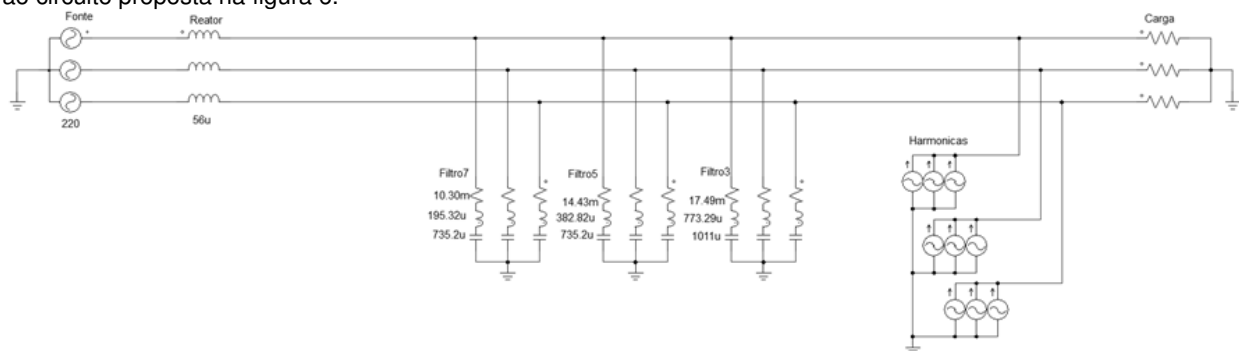


FIGURA 6. Circuito proposto para o sistema de iluminação.

Os valores dos componentes nos valores comerciais são mostrados na tabela VI.

Tabela VI. Componente resistivo, indutivo e capacitivo dos filtros de 3ª, 5ª e 7ª ordem dimensionados e ajustados aos valores comerciais.

Componente	Filtro de 3ª ordem	Filtro de 5ª ordem	Filtro de 7ª ordem
Resistivo [mΩ]	17,49	14,43	10,30
Indutivo [μH]	773,29	382,82	195,32
Capacitivo [μF]	1011,00	735,20	735,20

Os dados da Tabela VII apresentam os resultados da simulação do sistema, sendo que houve filtragem nos índices DHTi de 77,41%, DHli3 de 76,07%, DHli5 de 87,69%, DHli7 de 93,52% e DHTv de 77,42%. Ainda há um alívio da potência aparente e um incremento da potência ativa da fase do sistema, o que comprova o funcionamento dos filtros inseridos.

Tabela VII. Resultados obtidos com o implemento dos filtros ajustados aos valores comerciais.

Grandezas	Sistema atual	Sistema com o filtro
Tensão eficaz de linha [V]	221,54	224,55
Corrente eficaz de linha [A]	382,83	340,71
Potência aparente por fase [VA]	84812,37	76507,00
Potência ativa por fase [W]	60633,62	74753,00
Potência reativa por fase [VAr]	59301,79	16288,34
Fator de potência [adim.]	0,72	0,91
Fator de deslocamento [adim.]	0,85	0,97
DHTi [%]	78,44	17,72
DHTv [%]	12,93	2,92
DHli3 [%]	74,08	17,73
DHli5 [%]	24,78	3,05
DHli7 [%]	5,25	0,34

Na figura 7 pode se observar que o sistema adequou os índices de DHTv, DHli5 e DHli7 às normas IEEE standard 519/1992. Os índices de DHli3 e DHTi ficaram praticamente equivalentes ao estipulado pela norma, contudo, as condições de operação na prática podem conduzir a uma filtragem mais efetiva dependendo da quantidade de carga, o que também pode adequar esses índices aos limites estipulados.

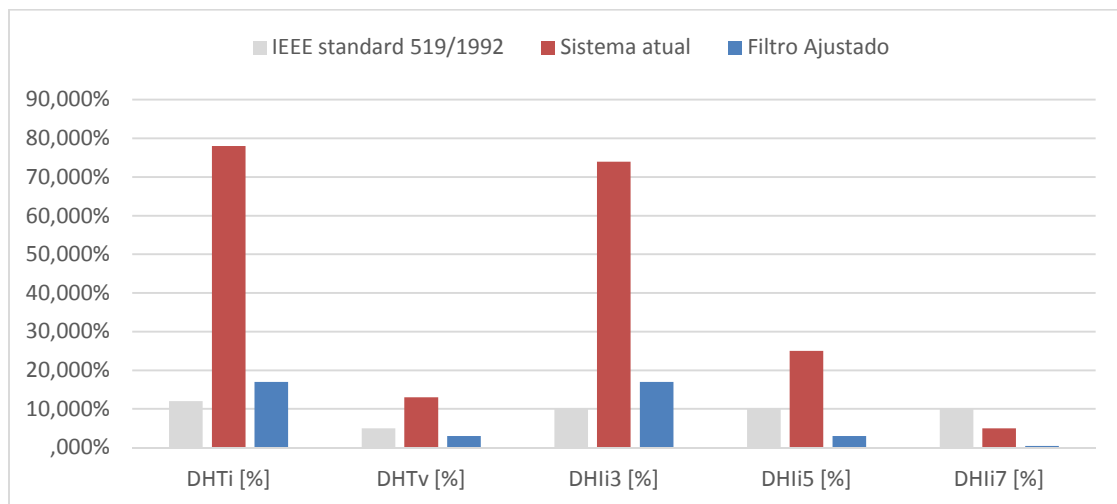


FIGURA 7. Espectro harmônico do sistema atual em comparação com o sistema com os filtros ajustados inseridos à simulação e a IEEE *standard* 519/1992.

Aplicaram-se as bases de tensão e de corrente como, respectivamente, 200 V e 200 A. Na figura 8 apresenta-se um gráfico para análise das distorções harmônicas de corrente e tensão com a inserção do filtro ajustado.

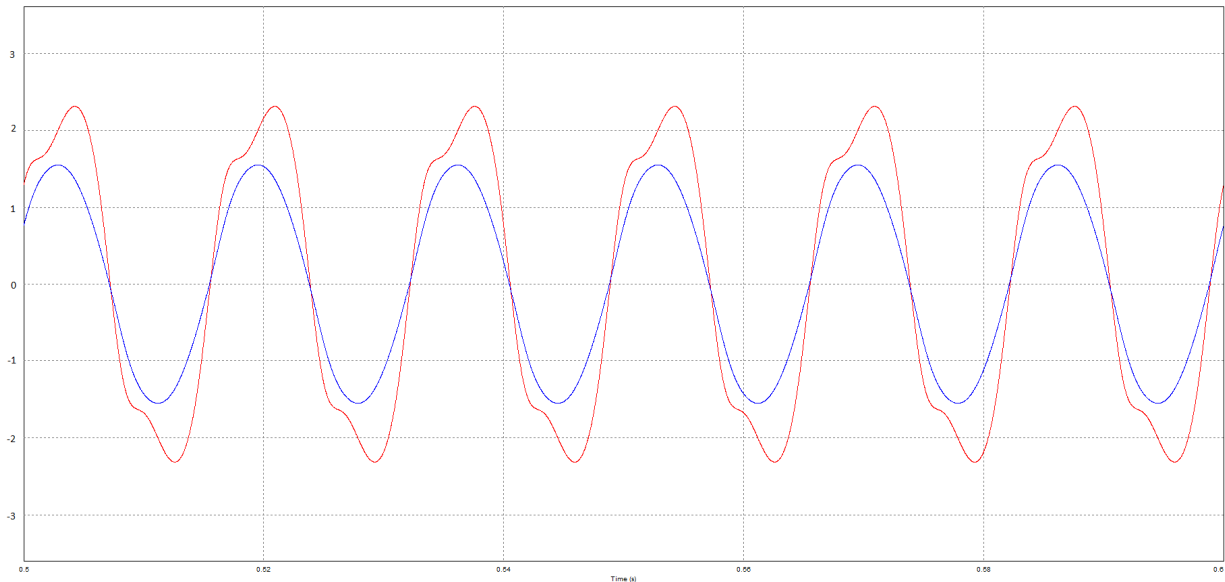


FIGURA 8. Formas de onda da tensão (azul) e corrente (vermelho) em p.u. obtidas com a simulação do sistema de iluminação com os filtros de 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> ordem ajustados aos valores comerciais e inseridos no PSIM®.

### 2.1 – Projeto do controlador inteligente

A inteligência artificial do controlador dos filtros é executada num computador industrial instalado no mesmo painel dos filtros. Um agente inteligente (pessoa virtual) gerencia o controlador. Um agente é uma entidade autônoma que entende mensagens, e de fato comunica-se por meio de mensagens de texto com outros agentes virtuais e com operadores humanos usando uma linguagem natural que pode ser entendida por todos. A diferença entre um agente e um módulo de software é que o agente é autônomo, toma decisões próprias e não é controlado por comandos ou instruções. Para ordenar um agente executar alguma ação, deve ser enviada uma mensagem de texto com uma solicitação, assim o agente pode decidir se executa aquela ação ou não. Todo agente deve estar num ambiente virtual de trabalho (container) e pode interagir com outros agentes e operadores humanos em forma local ou distribuída. A implementação do agente no projeto foi feita com apoio com o framework JADE, um software que permite criar um agente e seu ambiente virtual, porém, o agente criado não possui inteligência nenhuma (como se uma pessoa virtual não tivesse cérebro). A inteligência do agente foi implementada com uma máquina virtual de raciocínio JEMO, um pacote de software desenvolvido num projeto de doutorado na UFSC. A máquina virtual de raciocínio (MVR) é um módulo de software desenvolvido em JAVA, e o raciocínio é baseado em bases de conhecimento, que definem a funcionalidade do sistema. As bases de conhecimento são representações de um domínio específico que podem ser substituídas, modificadas, e removidas. Normalmente são representadas como regras e como ontologias (mapas ou redes conceituais).

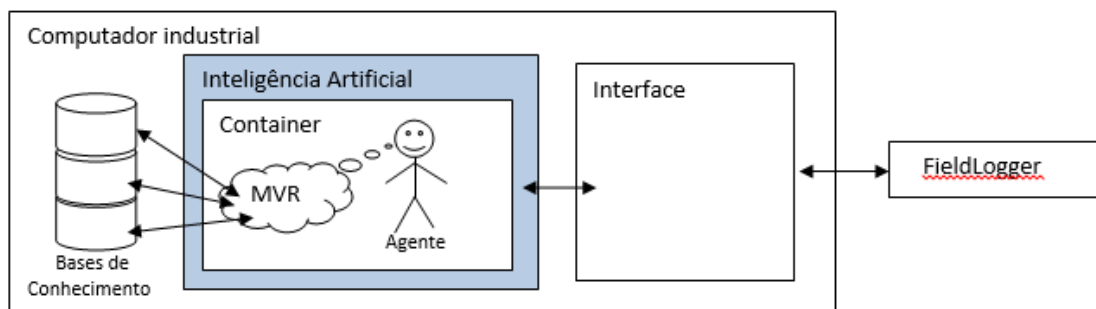


FIGURA 9. Representação da inteligência artificial no sistema

### 4.0 Conclusões

Do filtro controlado por CLP para o retificador com carga de banco de baterias, foram feitas simulações com o software PSIM concluindo que é possível notar uma significativa melhora na qualidade da energia elétrica do sistema, com a redução dos índices harmônicos individuais e total de corrente. Nota-se também uma melhora no DHTv. Em função da aplicação do filtro projetado, o sistema elétrico adequou-se aos limites definidos pela norma vigente IEEE standard 519/1992. Observa-se a melhora da QEE, com a redução da DHTi de 28,26% para



13,98%; a redução da DHTv de 2,83% para 2,42%; a redução de todas as distorções harmônicas individuais; a elevação do FP de 0,79 para 0,96 e a elevação do Fdesl de 0,83 para 0,98. Com todos os implementos citados, o retificador trifásico de seis pulsos se adequa com as principais normas relacionadas à qualidade da energia elétrica.

Do filtro controlado por inteligência artificial para uma carga de um sistema de iluminação, pode ser observar melhorias na QEE, sendo que houve filtragem nos índices DHTi de 77,41%, DHli3 de 76,07%, DHli5 de 87,69%, DHli7 de 93,52% e DHTv de 77,42%. Ainda há um alívio da potência aparente e um incremento da potência ativa da fase do sistema, o que comprova o funcionamento dos filtros inseridos. A inteligência artificial foi apenas testada teoricamente com situações simuladas. A vantagem do uso de um controlador inteligente com máquina de raciocínio JEMO é a melhoria na lógica de controle, permitindo resolver imprevistos e situações novas, e se adaptar às mudanças no sistema, como por exemplo a instalação de equipamentos novos ou reconfiguração dos filtros.

Os painéis onde serão construídos os filtros e logo instalados na planta estão em processo de orçamento. Os testes de campo serão feitos quando os painéis fossem construídos e instalados nos serviços auxiliares da usina termelétrica.

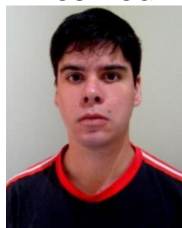
## 5.0 Agradecimentos

Este artigo é resultado do projeto de pesquisa PD-0403-0029/2012, desenvolvido no âmbito do Programa P&D da Tractebel Energia regulamentado pela ANEEL.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANDO JUNIOR, O. H. Power quality energy: concepts, classification and methodology for identifying and quantifying disturbances of power quality energy. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2012.
- [2] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. PRODIST – Módulo 8: Qualidade da Energia Elétrica. Brasília, 2008.
- [3] ALDABÓ, R. Qualidade na energia elétrica. São Paulo: Artliber, 2012.
- [2] BOLLEN, M. H. J. Understanding power quality problems: Voltage sags and interruptions. Hoboken: Wiley-Blackwell, set. 2000.
- [4] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61000-2-2: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-2: Environment - Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems. Geneva, 2002.
- [5] HIRANANDANI, A. Calculation of cable ampacities including the effects of harmonics. IEEE Industry Applications Magazine, v. 4, n. 2, p. 42-51, mar. 1998.
- [6] KASSICK, E. V. Harmônicas em sistemas industriais de baixa tensão. Florianópolis: INEP - Instituto de Eletrônica de Potência, 2008.

## DADOS BIOGRÁFICOS



Claudio Ernesto Ponce Saldias  
Nacionalidade Chileno

Possui graduação em Engenharia civil eletrônica - UNIVERSIDAD DE TARAPACA (2005), graduação em Engenharia Produção Eletrônica - UNIVERSIDAD DE TARAPACA (2001) e mestrado em Mestrado em Telecomunicações - UNIVERSIDAD DE TARAPACA (2007). Curso de Doutorado na engenharia Mecânica da UFSC (Aeronáutica), 2014, diploma em andamento.

Atualmente vinculado à faculdade SATC.

Áreas de atuação: Robótica, Mecatrônica, Automação e Aeronáutica, com ênfase em Robótica, Mecatrônica, Modelamento de Aeronaves e Inteligência Artificial.