

## AUMENTO DA QUALIDADE DE ENERGIA ENTREGUE À EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS - AVALIAÇÃO DE DUAS TOPOLOGIAS DE COMPENSADORES DE TENSÃO \*

Marcos Paulo Brito Gomes<sup>1</sup>  
Igor Amariz Pires<sup>2</sup>  
José Ronaldo Silveira Júnior<sup>3</sup>  
Adriano Felício de Freitas<sup>4</sup>  
Braz de Jesus Cardoso Filho<sup>5</sup>

### Resumo

Este artigo aborda o estudo de um Restaurador Dinâmico Tensão (DVR), sendo um Compensador Serie Tensão (SVC) aplicado à proteção contra surtos de tensão, capaz de manter a energia em equipamentos sensíveis durante falhas na rede elétrica e aumentar a confiabilidade de acionamentos e equipamentos eletrônicos industriais. Estima-se que os problemas de qualidade de energia gerem prejuízos, perdas de produção e tempo em inatividade nos processos industriais, em consequência de falhas de equipamentos sensíveis. Primeiro, será citado o restaurador dinâmico de tensão senoidal convencional e em seguida serão discutidas duas topologias simplificadas, com a proposta de um compensador de tensão em onda quadrada (SW-SVC) capaz de compensar quedas de tensão com melhor custo-benefício, melhorando a qualidade da energia industrial.

**Palavras-chave:** Qualidade de energia; Afundamento de tensão; Restaurador Dinâmico de Tensão; Compensador série de tensão em onda quadrada.

### ENERGY QUALITY ENHANCEMENT DELIVERED TO INDUSTRIAL EQUIPMENT - EVALUATION OF TWO VOLTAGE COMPENSATORS TOPOLOGIES

### Abstract

This paper addresses a study of a Dynamic Voltage Restorer (DVR), a Series Voltage Compensator (SVC) applied to voltage surge protection, able to maintain the voltage on susceptible loads when grid faults occur, improving reliability of drives and electronic loads. It is estimated that power quality problems generate production losses and downtime in manufacturing process at industries, in consequence of susceptible loads to voltage sags. First, the conventional sinusoidal Dynamic Voltage Restorer will be cited, and then two simplified topologies will be discussed, with the proposal of a square-wave series voltage compensator (SW-SVC) able to compensate voltage sags with improved cost-efficiency, improving industrial power quality.

**Keywords:** Power quality; Voltage sag; Dynamic Voltage Restorer (DVR); Square-wave series voltage compensators (SW-SVC).

<sup>1</sup> Engenheiro, Mestrando, Estudante, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro, Doutor, Professor, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro, Mestre, Estudante, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>4</sup> Engenheiro, Mestre, Estudante, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>5</sup> *Engenheiro, Doutor, Professor, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

A qualidade da energia elétrica é uma preocupação para indústrias e concessionária, que apoiam o estudados fenômenos prejudiciais, bem como as formas de mitigá-los. O objetivo é fornecer aos consumidores energia de alta confiabilidade, de acordo com normas e indicadores. O afundamento de tensão é um desses problemas e tem sido estudado extensivamente nos últimos 23 anos. É caracterizada por uma diminuição súbita no valor da tensão de alimentação para valores entre 0,1 a 0,9 p.u. em relação aos valores nominais, e com duração de 0,5 ciclo a 1 minuto, de acordo com a norma IEEE 115-2009 [1]. Pesquisas revelam que as principais causas do fenômeno do afundamento de tensão são falhas do sistema de transmissão de energia, falhas no sistema de distribuição remota, falhas no sistema de distribuição local, corrente de partida de motores e bombas de grande porte, interrupções curtas e ações de proteção, [2]. Em relação às causas de faltas nos sistemas de transmissão e distribuição, elas podem variar de acordo com local e clima, as principais causas são descargas atmosféricas, contato de animais e arvores, ventos fortes, bem como ações humanas, [3].

Quedas e interrupções de tensão levam a perdas financeiras significativas para consumidores residenciais, comerciais e industriais. Em um ambiente industrial com uma tendência crescente para automação e uso de dispositivos eletrônicos de controle e monitoramento e ainda com o advento da indústria 4.0, equipamentos como contadores, computadores pessoais (PCs), controladores lógicos programáveis (PLCs) e acionamentos de velocidade variável (ASDs) são altamente sensíveis a quedas de tensão, [4]. A vulnerabilidade de alguns componentes motivou os institutos de pesquisa a realizarem testes de compatibilidade com alguns componentes eletrônicos e eletromecânicos que são subpartes integradas de máquinas ou ferramentas. Os resultados são mostrados na Tabela 1.

**Tabela 1.** Razões mais comuns para afundamento de tensão relacionados à desligamentos de equipamentos para 33 aparelhos testados.

<b>Classificação de susceptibilidade à afundamentos de tensão</b>	<b>Equipamentos Frágeis</b>	<b>Porcentagem geral</b>
1	<i>Circuitos de Proteção: Relé Piloto (33%) e Contadores Principais (14%)</i>	47%
2	<i>Fontes de Energia CC: PC (7%), Controladores (7%), I/O (5%)</i>	19%
3	<i>Fontes de Alimentação Trifásica: Magnetron (5%), RF (5%), Ion (2%)</i>	12%
4	<i>Bombas de vácuo</i>	12%
5	<i>Bombas de pressão</i>	7%
6	<i>Inversores AC</i>	2%

Fonte: Adaptado de "EPRI - Technical and Economic Considerations for Power Quality Improvements" [5].

Os resultados indicam que e em 33 casos de desligamentos, 47% estão relacionados a relés e contadores de circuito de proteção, 19% relacionados a fonte de alimentação CC, 12% relacionados a fonte de alimentação trifásica, bombas de vácuo 12%, bombas de pressão 7% e Inversores CA correspondem à 2%, [5]. Estes

dispositivos podem falhar, mal operar ou serem desligados por um sistema de proteção quando submetidos a reduções na magnitude da tensão.

A perda financeira devida à qualidade da energia é um problema iminente para o setor industrial. Algumas pesquisas avançam no sentido de melhorar a estimativa de perdas devido a quedas de tensão e interrupções, propondo métricas estatísticas para estimar o custo dos eventos de qualidade de energia e identificar os potenciais financeiros associados, [6-9]. De fato, para a implementação de soluções de qualidade de energia, é necessário um investimento de capital inicial. Para conhecer as vantagens financeiras deste investimento é necessário entender os danos causados por quedas de tensão e interrupções. O retorno financeiro varia de acordo com o segmento produtivo da indústria, suscetível a afundamentos de tensão. A Tabela 2 mostra dados obtidos de estudos separados de qualidade de energia realizados pelo *Electric Power Research Institute* (EPRI) e indica eventos de qualidade de energia, relatos de casos de 20 indústrias diferentes, [5].

**Tabela 2.** Relatório de Custos por afundamento de tensão gerados em indústrias

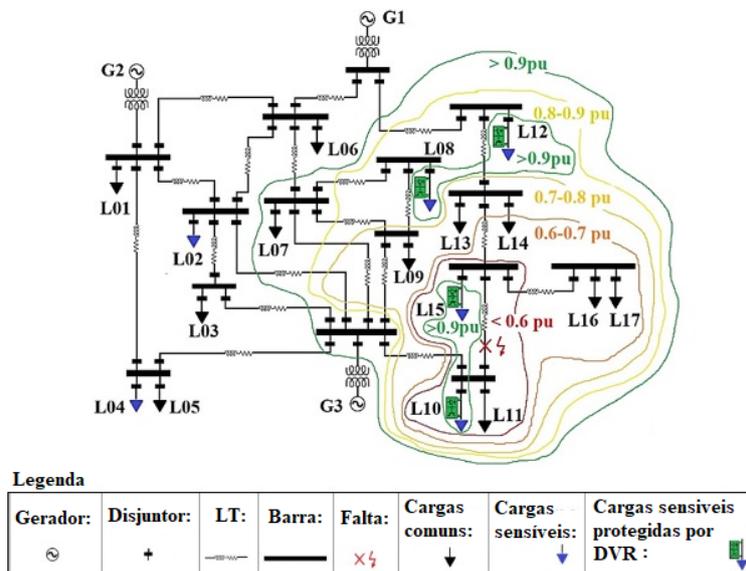
No.	Segmento Produtivo	Prejuízo	Tensão de serviço	Carga
1	Semicondutor	\$ 1,500,000	69 kV	25 MW
2	Semicondutor	\$ 1,400,000	161 kV	30 MW
3	Semicondutor	\$ 700,000	12.5 kV	10 MW
4	Fundição de metais	\$ 200,000	13.8 kV	16 MW
5	Indústria química	\$ 160,000	12.5 kV	5 MW
6	Moinho de Celulose e Papel	\$ 110,000	161 kV	100 MW
7	Usinagem de motores aeroespaciais	\$ 100,000	13.8 kV	10 MW
8	Alimentos e Bebidas	\$ 87,000	12.5 kV	5 MW
9	Industria química	\$ 75,000	66 kV	3 MW
10	Industria química	\$ 75,000	66 kV	5 MW
11	Componente Eletrônico	\$ 75,000	12.5 kV	5 MW
12	Enriquecimento de Cristal	\$ 60,000	12.5 kV	1 MW
13	Industria química	\$ 46,000	66 kV	30 MW
14	Fabricação de Fiação	\$ 34,000	12.5 kV	2 MW
15	Indústria química	\$ 18,000	12.5 kV	2 MW
16	Indústria de Fibras	\$ 15,000	12.5 kV	1 MW
17	Papel e Embalagem	\$ 10,000	12.5 kV	4 MW
18	Fabrico de sacos de plástico	\$ 10,000	480 V	4 MW
19	Plásticos	\$ 7,500	12.5 kV	4 MW
20	Fabricação de aço inoxidável	\$ 5,500	12.5 kV	2 MW

Fonte: Adaptado de "EPRI - Technical and Economic Considerations for Power Quality Improvements" [5].

Para a escolha da solução de qualidade de energia mais viável para diferentes segmentos industriais, usando os dados da Tabela 2, é necessário calcular um indicador de custo reportado por carga. É possível notar que as indústrias de semicondutores têm o maior valor de perda financeira por demanda de energia, sendo cerca de US \$60.000/MW, quando submetidas a quedas de tensão e interrupções. Neste contexto, padrões como o SEMI F47 foram desenvolvidos com o apoio da indústria, propondo que um melhor projeto de equipamento ofereceria uma ótima solução para imunidade contra problemas de afundamento de tensão. Analisando o Relatório nº 2 da Tabela 2, indústria com equipamentos já em operação, é possível implementar um compensador de tensão industrial para toda a

instalação, de média e alta tensão, como o Restaurador dinâmico de Tensão (*Dynamic Voltage Restorer -DVR*) com potência nominal próximo a 10 MVA, com um retorno de um ano, considerando 4 eventos anuais de qualidade de energia. Com base nessa estratégia de compensação de tensão, considerando os custos de DVR, instalações e manutenção anual, no final do período de três anos, a economia total do projeto atingiria US\$10,9 milhões, [5, 8].

No entanto, pesquisas indicam que as implantações de soluções de qualidade de energia distribuída podem ser mais econômicas. Uma terceira solução seria a instalação de reguladores de tensão e compensadores embutidos nos equipamentos do processo na instalação. Essa estratégia empregaria soluções como o *Dip Proofing Inverter (DPI)*, o *Small Dynamic Sag Corrector (MiniDySC)*, o *Dynamic Sag Corrector (DySC)* e o *Constant Voltage Transformer (CVT)*. Outra estratégia são soluções de baixa tensão instaladas em um barramento de instalação ou nível de painel, elas são eficazes para proteger muitas cargas sensíveis de uma só vez. As soluções são as tecnologias *Static Series Compensation technologies (SSC)*, *Uninterruptible Power Supply (UPS)*, dispositivos *Sag Ride-Through (SRT)* e DVRs de baixa potência [5]. O custo dessas soluções pode ser justificado com base no número de processos ou máquinas que serão protegidos instalados ao longo da linha de produção, usando componentes mais robustos quando possível. Com base nessa solução de controle de tensão, estima-se que a fábrica de semicondutores atingisse uma economia de US\$ 15,6 milhões até o final dos primeiros 3 anos [5, 8]. Compensações de tensão perto de cargas sensíveis, como demonstrado na Figura 1, são mais econômicas pois estão dedicados a aumentar a robustez destas cargas [5,10].



**Figura 1.** Áreas de vulnerabilidade de cargas suscetíveis a queda de tensão conectadas a uma rede sob falta.

Existem métodos computadorizados reconhecidos que determinam as magnitudes das tensões ao redor do sistema para qualquer local de falta e ao estabelecer a área de vulnerabilidade é possível aplicar compensadores próximos às cargas suscetíveis, [8, 11]. No entanto, conforme proposto na norma IEEE 1346-1998, os dados de afundamento de tensão são necessários para realizar uma avaliação de compatibilidade com equipamentos de processo eletrônico, [8].

Em uma rede trifásica, afundamentos podem ocorrer em uma, duas ou três fases e pode haver defasagem entre fases. Os afundamentos são classificados como tipos A, B, C, D, E, F e G, ilustrados na Figura 2 abaixo, [2]. Para quedas que

ocorrem sem defasagem, é possível implementar um SVC como solução simplificada e de baixo custo, objetivo deste trabalho e discutido nas seções seguintes. Para um afundamento de tensão defasado de até um limite (3,4 graus, de acordo com as normas *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA) e IEC 60034-26), é possível usar soluções SVCs simplificados, como o SVC quase-sinusoidal, [15]. O SVC senoidal é capaz de compensar os dois cenários, mas a necessidade de filtros senoidais na saída aumenta seu custo, volume e a complexidade. Estes inversores precisam comutar em frequências na ordem de quilohertz, enquanto soluções simplificadas permitem comutação na frequência de rede, melhorando sua compatibilidade eletromagnética, [15].

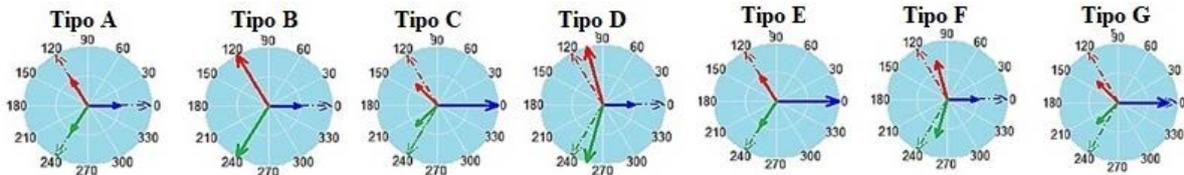
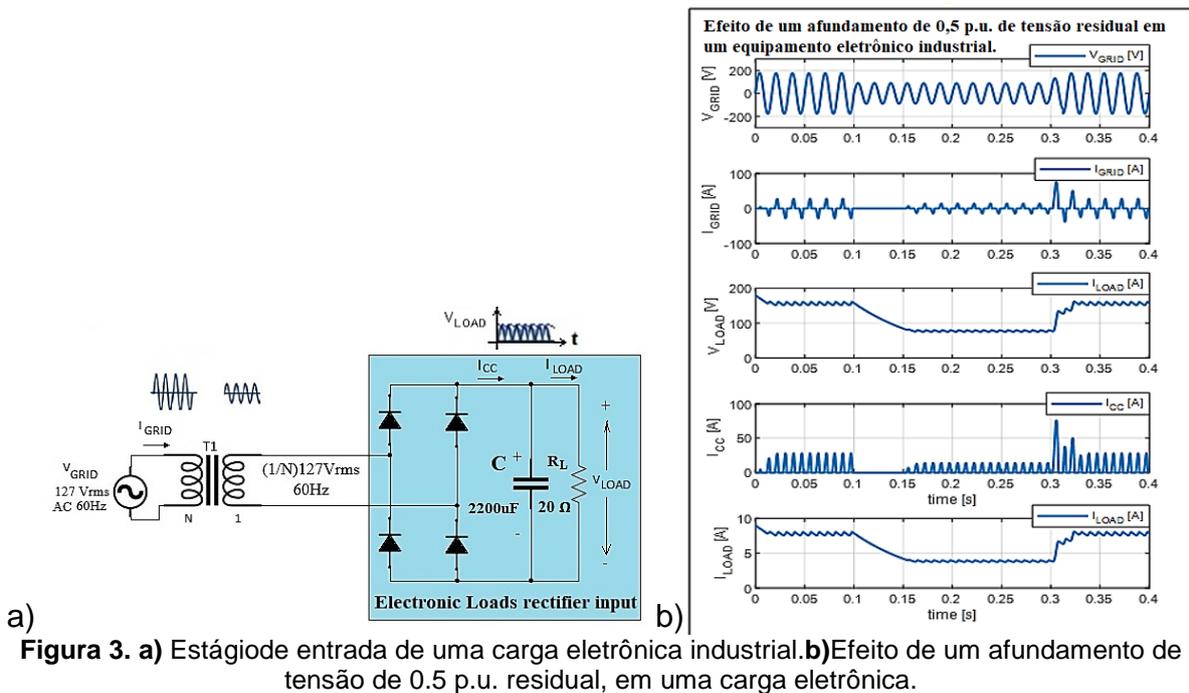


Figura 2. Tipos de afundamentos de tensão.

A Figura 3a) demonstra um estágio retificador de tensão, bastante comum em cargas eletrônicas. Este estágio consiste em um transformador que tem o objetivo de isolar o retificador e as partes internas do circuito da rede (escolhido por simplicidade relação de transformação  $N=1$ ), bem como ajustar os níveis internos de tensão. O barramento CC do estágio do retificador possui um capacitor adequadamente dimensionado para controlar a ondulação da tensão CC e é bastante suscetível à queda de tensão.

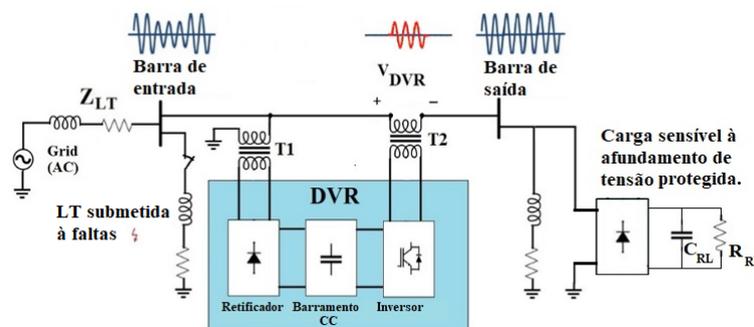
Quando parcialmente descarregado, o capacitor C causa subtensões e subcorrentes em dispositivos eletrônicos, diminuindo as tensões úteis das fontes internas do equipamento, prejudicando a operação correta de circuitos integrados (CIs), que podem falhar ou desligar. A Figura 3b) abaixo ilustra este problema durante um afundamento residual de tensão de 0,5 p.u. na rede e seu efeito em uma carga eletrônica. Acionadores de velocidade ajustável (ASDs), controladores lógicos programáveis (CLPs), contadores e computadores pessoais (PCs) que processam e armazenam dados estão sujeitos a erros e danos durante quedas de tensão, [4].



## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 O Restaurador Dinâmico de Tensão (DVR) convencional, com compensação de tensão senoidal.

A Figura 4 mostra um DVR convencional capaz de fornecer compensações de tensão na forma senoidal. Quando a impedância do sistema elétrico é baixa e a corrente de curto-circuito é muito maior que a corrente nominal das cargas ( $I_{sc}/I_n > 2$ ), o transformador de entrada do DVR, T1, é capaz de drenar uma corrente de rede carregando a tensão do capacitor interno por meio de um estágio retificador. Para o funcionamento correto desta topologia, um loop de controle sintonizado deve controlar a tensão do barramento CC enquanto outro loop de controle sintonizado deve atuar em sincronismo com a tensão da rede usando um PLL (*Phase Locked Loop*). Além disso, os filtros de saída são estabelecidos, devido à necessidade de mitigar os harmônicos do inversor, comutado em kilohertz (em torno de 5kHz e 12 kHz).



**Figura 4.** DVR convencional, compensação senoidal.

A Figura 5 é uma explicação mais detalhada do DVR senoidal, estão ilustrados o estágio retificador, circuito de controle PLL, inversor de frequência, filtros de saída e transformadores de acoplamento com a rede. A topologia do DVR tem sido continuamente explorada, com a tendência para simplificações de componentes

sendo um grande alvo de pesquisas, visando soluções de baixo custo. A tendência tem sido migrar de topologias que usam transformadores shunt combinados com retificadores que substituem o armazenamento de energia, que é drenada da rede [13]. Outra evolução é a substituição dos filtros de saída por usar uma compensação de tensão realizada na frequência da rede, [16,17]. A proposta neste trabalho e explicada nos tópicos a seguir é um compensador de tensão simplificado de onda quadrada (SW-SVC), de melhor custo-benefício para aumentar qualidade de energia industrial.

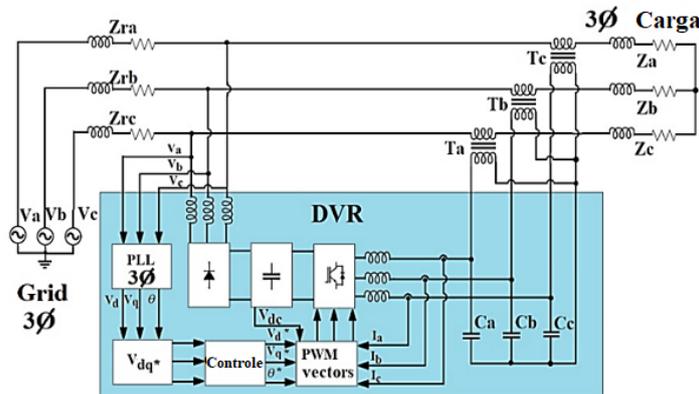


Figura 5. DVR convencional, compensação senoidal. Ilustrção do sistema de controle e sincronismo, filtros de saída e transformadores de acoplamento.

## 2.2 O Restaurador Dinâmico de Tensão (DVR) simplificado com compensação de tensão em onda quadrada (SW-SVC). Topologia A – Células em cascata.

A Figura 6 mostra um Restaurador Dinâmico de Tensão (DVR) simplificado com compensação de tensão em onda quadrada com células em cascata (SW-SVC Topologia A). A necessidade de uma topologia multinível é devido às diferentes amplitudes de afundamentos de tensão. O estágio inicial do transformador de cada célula atende aos níveis de tensão, que serão então armazenados no capacitor na forma CC e o número de células implica em custo final do DVR.

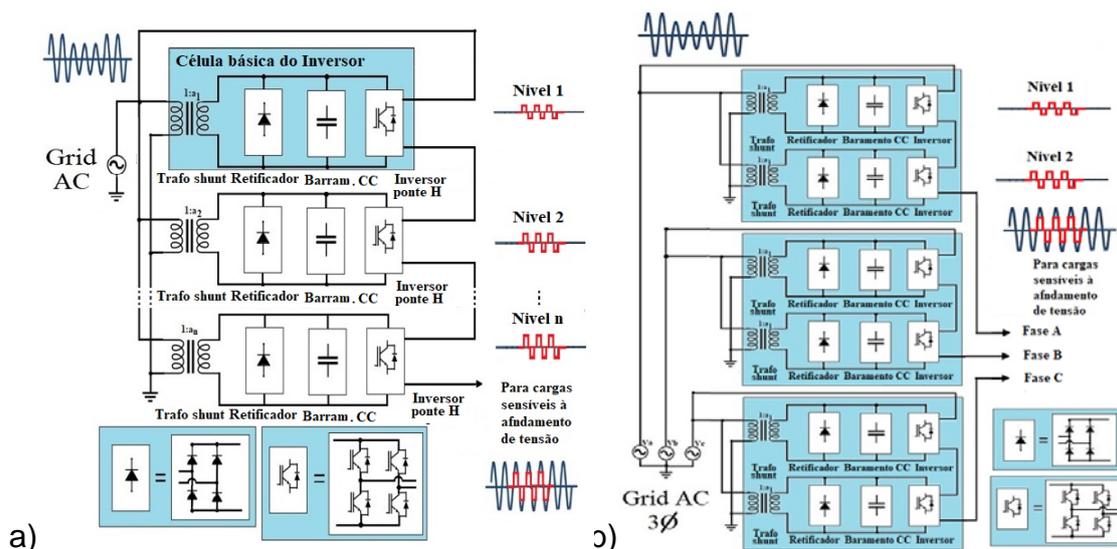


Figura 6. SW-SVC Topologia A – Células em cascata. a) Modelo monofásico. b) Modelo trifásico.

A norma internacional IEEE 1250-2011 [9], indica que os níveis de tensão da rede devem estar entre 0,9 p.u. e 1,05 p.u., para segurança e conformidade com equipamentos. Como mostrado na Tabela 3 um compensador composto por duas

células com uma relação de transformação de 1:0,2 e 1:0,6, compensa tensões de 0,5 p.u. até 0,9 p.u., o que corresponde à maioria dos casos sendo de 80,5% [16,17]. Com estas relações de transformação é possível sintetizar os níveis de  $\pm 0,2$  p.u. (célula 1),  $\pm 0,4$  p.u. (célula 2-célula 1),  $\pm 0,6$  p.u. (célula 2) e  $\pm 0,8$  p.u. (célula 2 + célula 1). Uma combinação linear pode ser estabelecida, conforme a equação (1):

$$v_{comp} = v_{sag} + a(v_{sag}) = v_{sag}(1 + a) \quad (1)$$

Desde que os valores para  $a$  possam ser (0.2, 0.4, 0.6 e 0.8), os valores possíveis para  $v_{sag_{min}}$  e  $v_{sag_{max}}$  são, estabelecendo  $a_{max} = 0.8$  e  $a_{min} = 0.2$  iguais a:

$$v_{sag_{min}} = \frac{0.9}{1 + a_{max}} = 0.5 \quad (2)$$

$$v_{sag_{máx}} = \frac{0.9}{1 + a_{min}} = 0.875 \cong 0.9 \quad (3)$$

O aumento do número de níveis traria custos mais elevados para o equipamento e acabaria não abrangendo um número significativo de afundamentos de tensão. A topologia de duas células torna-se aquela com o maior custo-benefício, compensando os afundamentos de tensão de 0,9 a 0,5 p.u., quando varia de P1 a P8 na Figura 7.

Tabela 3. Número de células versus porcentagem dos afundamentos de tensão compensados.

Nº de células	Relação de Transformação	Faixa de Afundamento Compensada (p.u.)	Porcentagem de Afundamentos Compensados
1	1:0,2	0,75 a 0,9	41,9 %
2	1:0,2 + 1:0,6	0,50 a 0,9	80,5 %
3	1:0,2 + 1:0,6 + 1x1:1	0,32 a 0,9	90,4 %
4	1:0,2 + 1:0,6 + 2x1:1	0,24 a 0,9	93,5 %
5	1:0,2 + 1:0,6 + 3x1:1	0,19 a 0,9	95,9 %
6	1:0,2 + 1:0,6 + 4x1:1	0,16 a 0,9	95,9 %
7	1:0,2 + 1:0,6 + 5x1:1	1,13 a 0,9	96,9 %
8	1:0,2 + 1:0,6 + 6x1:1	0,12 a 0,9	96,9 %
9	1:0,2 + 1:0,6 + 7x1:1	0,10 a 0,9	97,6 %

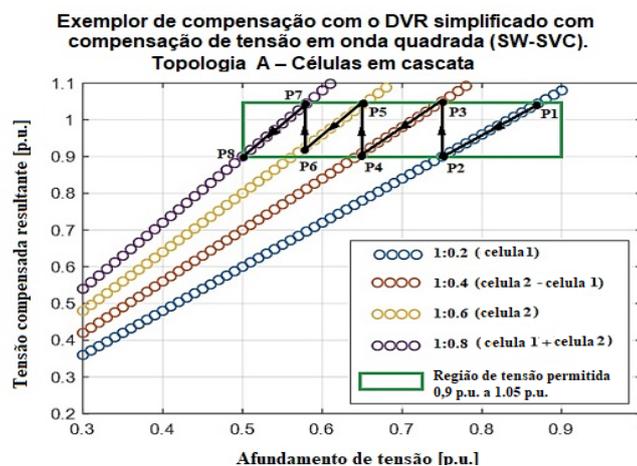
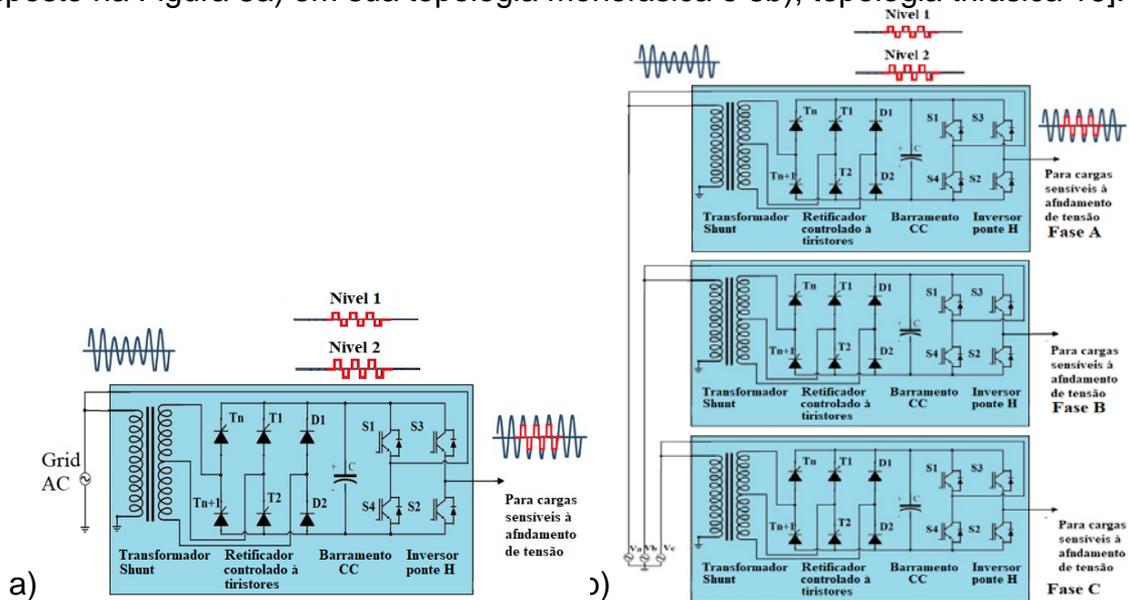


Figura 7. Exemplos de compensação para o SW-SVC – Topologia A.

### 2.3 O Restaurador Dinâmico de Tensão (DVR) simplificado com compensação de tensão em onda quadrada (SW-SVC). Topologia B – Retificador controlado com seleção de Taps.

Para simplificar ainda mais o compensador de onda quadrada da Figura 6, as células em cascata podem ser modificadas pelo uso de apenas um transformador de entrada com derivações de tensão seleccionadas por retificador controlado, como disposto na Figura 8a) em sua topologia monofásica e 8b), topologia trifásica [16].



**Figura 8.** SW-SVC Topologia B – Retificador controlado com seleção de Taps do transformador. a) Modelo monofásico. b) Modelo trifásico.

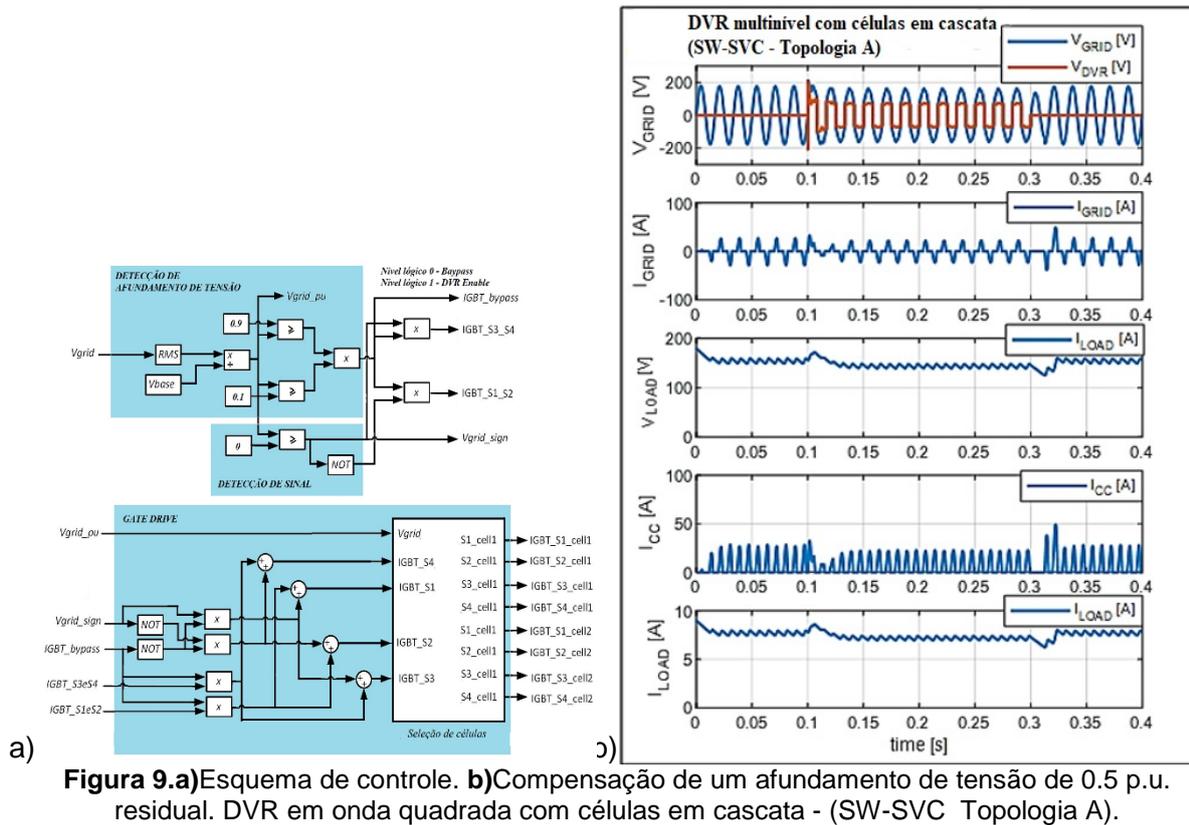
A topologia apresentada na Figura 8 é multinível SW-SVC que selecciona derivações de transformador por retificador controlado. O braço do tiristor seleccionado atua em sincronia com o braço do diodo que fornece a carga do capacitor no nível de tensão adequado para compensação de tensão. A ponte H composta de IGBTs acopla o capacitor carregado à rede. Isso significa que no meio ciclo positivo o capacitor é acoplado à rede para aumentar a tensão, e no meio-ciclo negativo o capacitor será acoplado à rede para reduzir ainda mais a tensão, restaurando o valor RMS de tensão.

## 2.5 Resultados Simulados

Os seguintes resultados simulados serão apresentados para as duas topologias de compensação de séries de tensão na forma de onda quadrada.

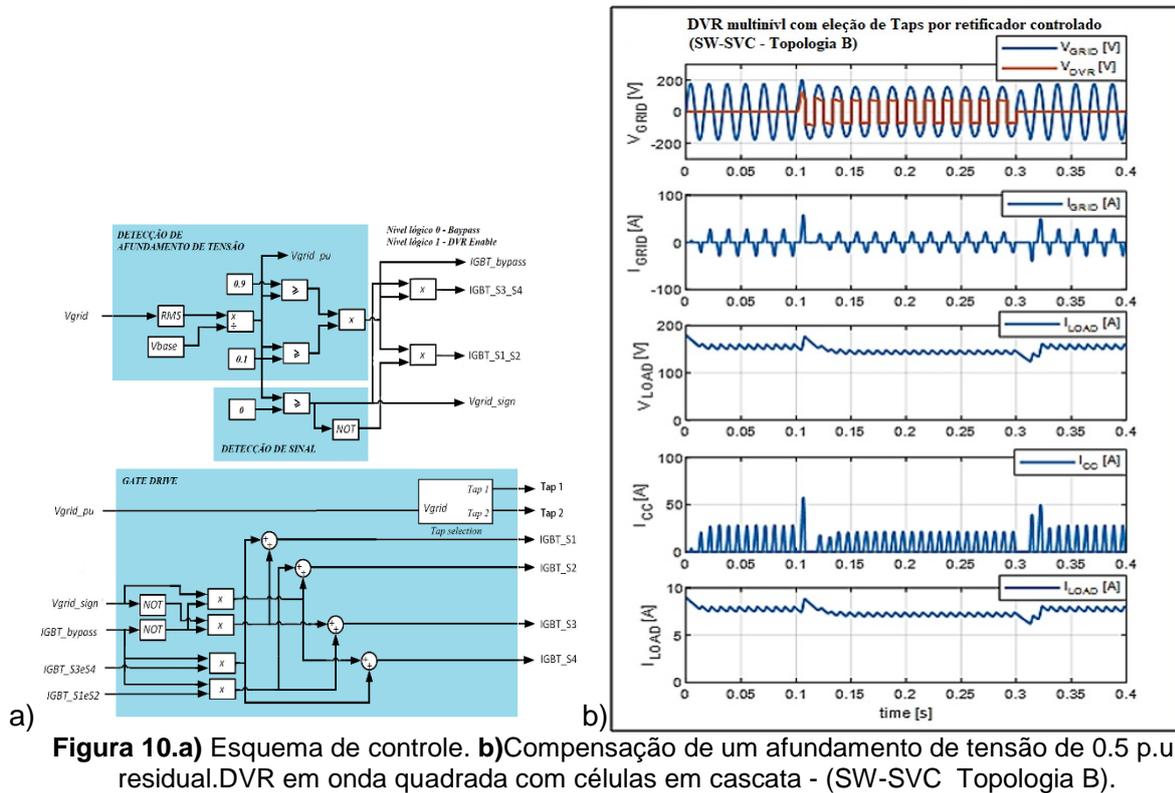
### 2.5.1 Simulação para o DVR simplificado com compensação de tensão em onda quadrada (SW-SVC). Topologia A – Células em cascata.

A Figura 9a) mostra o sistema de controle para o DVR multinível de onda quadrada com células em cascata - (SW-SVC Topology A). Há um bloco de detecção de afundamento de tensão, a detecção do sinal de tensão da rede (sistema de sincronismo) e o acionamento dos gates necessário para alternar os IGBTs. Existe um bloco de "selecção de células" que tem a lógica abordada na Figura 7 capaz de seleccionar células comutadas ou em *bypass*. A Figura 9b) ilustra o resultado simulado para um afundamento de tensão de 0,5 p.u.



### 2.5.2 Simulação para o DVR simplificado com compensação de tensão em onda quadrada (SW-SVC). Topologia B – Retificador controlado com seleção de Taps.

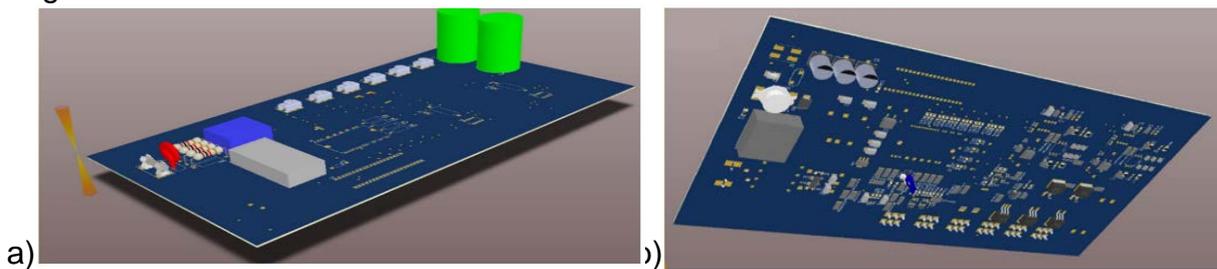
A Figura. 10a) demonstra o sistema de controle para DVR multinível de onda quadrada com retificador controlado - (SW-SVC Topology B). O bloco "Seleção de derivação" escolhe o nível de tensão no barramento CC para compensação correta de acordo com a queda de tensão. Os outros blocos são semelhantes ao controle anterior da Topologia A, mas agora há apenas uma ponte H de IGBTs controlados por fase. A Figura 10b) ilustra o resultado simulado para uma queda de tensão de 0,5 p.u restaurada.



**Figura 10.a)** Esquema de controle. **b)** Compensação de um afundamento de tensão de 0.5 p.u. residual. DVR em onda quadrada com células em cascata - (SW-SVC Topologia B).

## 2.6 Resultados Experimentais

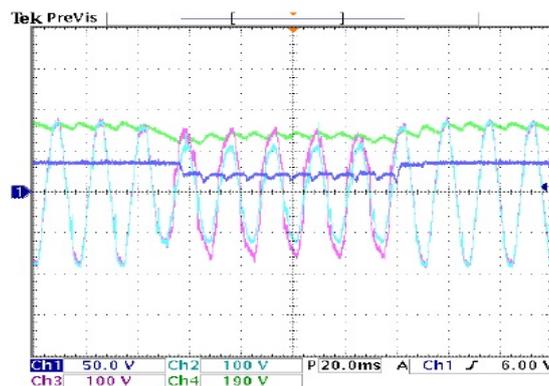
A topologia com DVR multinível de onda quadrada com retificador controlado - (SW-SVC Topologia B) foi montada na bancada do laboratório e seus circuitos de controle estão em processo de prototipagem em Placa de Circuito Impresso (PCB), projetada para fornecer 2 kVA potência, 220V, o projeto em pequena escala é mostrado na Figura 11. A Tabela 4 apresenta uma lista dos principais componentes utilizados para o teste de topologia e a Figura 12 mostra um resultado experimental já alcançado, onde existe uma compensação de tensão de 0,5 p.u. residual em uma carga eletrônica industrial.



**Figura 11.** Projeto do DVR em onda quadrada com células em cascata - (SW-SVC Topologia B). **a)** Vista superior. **b)** Vista inferior.

**Tabela 4.** Componentes principais utilizados para testar DVR em onda quadrada com células em cascata - SW-SVC Topologia B).

Componente	Especificações
Transformador Shunt	Transformador com relação de transformação 1:0,075 e 1:0,15
Tiristor	AEGIS A3LI90TT4L
Braço de diodos	Siemens 95A 12N
Barramento CC	Capacitor 1000 $\mu$ F / 63V



**Figura 12.** Resultado experimental para compensação de afundamento de tensão de 0.5 p.u. residual em carga retificadora (equipamento eletrônico industrial) utilizando DVR em onda quadrada com células em cascata – (SW-SVC Topologia B).

### 3 CONCLUSÃO

A melhoria de qualidade de energia foi investigada e a eficiência dos dois SW-SVC comprovada por meio de simulação, bem como seus sistemas de controle e sincronização com a rede, e eles são simplificados em comparação com as topologias convencionais dos DVRs senoidais. A Topologia B é mais promissora, e tem um melhor custo benefício, pois possui significativamente menos componentes. Para DVRs de topologias convencionais trazem uma preocupação que é a comutação em frequências altas (5kHz a 12kHz). Isso pode diminuir a compatibilidade eletromagnética do compensador. Os compensadores SW-SVC ao comutarem em frequências baixas diminuem problemas de interferência e estressam menos os IGBTs. Todas as duas topologias são capazes de melhorar o *Low Voltage Ride Through* (LVRT) de cargas eletrônicas industriais, o que significa aumentar a robustez dos equipamentos e trazer benefícios econômicos ao proteger o sistema contra afundamentos de tensão. A topologia B foi escolhida para montagem e confirmou resultados experimentais.

### Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Nível Superior (CAPES), agências de fomento à pesquisa do governo federal brasileiro, por seu apoio financeiro.

### REFERÊNCIAS

- 1 IEEE Std 1159-2009, Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. (Revision of Std 1159- 1995). IEEE, 2009.
- 2 M. H. J. Bollen, "Understanding power quality problems: Voltage sags and interruptions," in IEEE Press Series on Power Engineering. Piscataway, NJ, USA: Wiley/IEEE Press, 2000.
- 3 B. Brumsickle, "T-68 Protecting Your Equipment through Power Quality Solutions". SoftSwitching Technologies/Rockwell Automation, 2012.

- 4 Juan C. Cebrian, Jovica V. Milanovic and Nelson Kagan. Probabilistic assessment of financial losses in distribution due to fault-induced process interruptions considering process immunity time [J]. IEEE transactions on Power delivery. 2015, 30(3): 1478-1486.
- 5 EPRI TR-1005910:2001, Technical and Economic Considerations for Power Quality Improvements.
- 6 Juan C. Cebrian, Nelson Kagan and Jovica V. Milanovic. Probabilistic estimation of distribution network performance with respect to voltage sags and interruptions considering network protection setting: Part IIEconomic assessment[J]. IEEE transactions on Power delivery. IEEE Early Access Articles.
- 7 Juan C. Cebrian, Jovica V. Milanovic, Nelson Kagan. Case studies of application of process immunity time in assessment of Financial Losses due to system faults induced industrial Process Interruptions. IEEE Power & Energy Society General Meeting. IEEE, 2015.
- 8 IEEE Std 1346-1998, Recommended Practice for Evaluating Electric Power System Compatibility with Electronic Process Equipment. IEEE, 1998.
- 9 IEEE Std 1250-2011. IEEE Guide for Identifying and Improving Voltage Quality in Power Systems. IEEE Power & Energy Society, 2011.
- 10 Lim PK, Dor DS.: "Understanding and resolving voltage sag related problems for sensitive industrial customers". IEEE Power Eng Soc Winter Meet 2000;4:2886--90.
- 11 M. McGranaghan, D. Mueller, and M. Samotyj, "Voltage sags in industrial systems," in IEEE IAS I & CPS Tech. Con\$, May 1991, paper 91CH2990-/091/0000-018.
- 12 Alan Finch, "A cement plant's experience in investigating power sags leads to a reduction in kiln outages by utilizing power hardening methods". Cement Industry Conference (IAS/PCA CIC). IEEE-IAS/PCA, 2015.
- 13 J.G. Nielsen, F. Blaabjerg, "A detailed comparison of system topologies for dynamic voltage restorers", IEEE Trans on Industrial Applications, Volume 41, Issue 5, Sept.-Oct 2005, Page(s) 1272-1280.
- 14 I. A. Pires, S. M. Silva, and B. J. Cardoso Filho, "Increasing ride-through capability of control panels using square-wave series voltage compensator," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 51, no. 2, pp. 1309–1316, Mar./Apr. 2015.
- 15 I. A. Pires, B. J. C. Filho, and J. C. de Oliveira, "A series voltage regulator based on Quasi-Sinusoidal waveform to achieve smart-grid requirements," in Proc. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), pp. 1-7, 2010.
- 16 I. A. Pires, B. J. C. Filho, and S. M. Silva, "Design aspects of a squarewave series voltage compensator," in Proc. IEEE Energy Conversion Conf. Expo., Phoenix, AZ, 2011, pp. 4240–4247.
- 17 I. A. Pires, S. M. Silva, F. V. Amaral, and B. J. Cardoso Filho, "Protecting control panels against voltage sags: Using a square-wave series voltage compensator," IEEE Ind. Appl. Mag., vol. 20, no. 5, pp. 24–33, Sep./Oct. 2014.