

# Compensação de Afundamentos de Tensão usando Armazenamento de Energia em Volantes Inerciais com Geradores conectados à Rede

Renato K. Miyamoto\* Alessandro Goedtel\*  
Marcelo F.Castoldi\* Sebastião L. Nau\*\*  
Adilson C. Machado\*\*

\* *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica  
Federal do Paraná, Cornélio Procópio/PR, Brasil*  
*E-mails: renato\_miyamoto@icloud.com, agoedtel@utfpr.edu.br,  
marcastoldi@utfpr.edu.br*

\*\* *Departamento de Pesquisa e Inovação Tecnológica, WEG  
Equipamentos Elétricos S.A, Jaraguá do Sul/SC, Brasil,*  
*E-mails: slnau@weg.net, adilsonnm@weg.net*

---

**Abstract:** This work presents a method of restoring electrical energy by applying an induction generator connected to the electrical grid. The method uses a cylindrical flywheel with a high inertia coupled to the generator to store kinetic energy, which is converted into electrical energy. Toroidal inductors are used to mitigate the effects of current transients in the injection of energy to the grid. The proposal is validated, employing tests on an experimental bench. The results presented show that this system can supply under-voltage of up 0.2pu three-phase and 0.4pu per phase.

**Resumo:** Este trabalho apresenta um método de compensação de energia elétrica aplicando um gerador de indução conectado diretamente à rede elétrica. O método utiliza um volante cilíndrico de alto teor inercial acoplado ao gerador, para o armazenamento de energia cinética que será convertida em energia elétrica. Indutores toroidais são utilizados para mitigar os transitórios de corrente na injeção de energia na rede. A validação ocorre por meio de testes em uma bancada experimental, e os resultados mostraram que o sistema pode suprir afundamentos momentâneos de tensão de até 0,2pu trifásico e 0,4pu por fase.

*Keywords:* Flywheel; Induction generator; Momentary Voltage Sag; Energy quality.

*Palavras-chaves:* Volante inercial; Gerador de indução; Afundamentos momentâneos de tensão; Qualidade de energia.

---

## 1. INTRODUÇÃO

Os afundamentos momentâneos de tensão são alterações compreendidas entre 0,1 e 0,9pu na amplitude da forma de onda da tensão em relação a uma tensão de referência, dentro de um intervalo de tempo inferior a três segundos. Essas alterações, podem ocorrer nas formas de onda das tensões e das correntes no sistema elétrico, e estão relacionadas a qualidade da energia elétrica em variações de tensão de curta duração (ANEEL, 2016).

No setor industrial, os afundamentos momentâneos de tensão representam 68% dos problemas relacionados a qualidade da energia, e podem ser justificadas pela elevada extensão do sistema de transmissão e distribuição, acarretando em faltas no sistema elétrico (Gee et al., 2017). Adicionalmente, esse tipo de afundamento, de modo geral, não provoca danos ao equipamento, mas interrompe processos industriais, resultando em perdas de qualidade e no tempo para retomada de produção (Choudhury, 2022; ANEEL, 2016).

Desse modo, evidencia-se a importância de uma análise de metodologias para a redução dos impactos ocasionados por esses distúrbios, através de técnicas de compensação de tensão quando há uma falta parcial do fornecimento de energia pela concessionária (Miyamoto, 2017).

Algumas estratégias utilizam-se de um autotransformador equipado com um mecanismo responsável pela mudança das derivações dos TAP'S, obtida alterando o número de voltas, quando há afundamentos da rede elétrica (Hu et al., 2016; Aredes et al., 2009). O mecanismo opera com um atraso de 5 segundos para atuação das chaves, fato que inviabiliza sua aplicação para afundamentos momentâneos de tensão. Assim, sua aplicação pode ser direcionada para afundamentos temporários de tensão, com instantes compreendidos entre 3 segundos e 1 minuto.

Nesse cenário, também é possível citar a aplicação de restauradores dinâmicos para a compensação de afundamentos de tensão. O referido sistema é formado por baterias, transformadores e um controle de tensão por

inversor trifásico. O inversor fornece a tensão de compensação no primário dos transformadores de injeção no momento que ocorre o afundamento, para que a tensão de carga permaneça próxima da nominal. Em contrapartida, a utilização de baterias pode encarecer o sistema, além de demandar maior espaço físico para instalação (Gee et al., 2017; Ghanbari et al., 2018; Abas et al., 2020).

Outras estratégias utilizam o armazenamento de energia cinética para auxiliar na compensação de afundamentos de tensão. Ghosh e Kamalasadán (2017), utilizam um volante inercial em conjunto com um gerador de indução duplamente alimentado (DFIG). A arquitetura de regulação da tensão de saída é realizada modificando as tensões do rotor por meio de um compensador estático, integrado ao DFIG e ao volante inercial, durante condições de baixa tensão no barramento da rede elétrica (Ghosh e Kamalasadán, 2017; Döşođlu, 2021).

Adicionalmente, há pesquisas que utilizam volantes inerciais em conjunto com um sistema de controle de velocidade em geradores de indução (Li e Palazzolo, 2022; Arredondo et al., 2019; Choudhury, 2022). Em Aredes et al. (2009), os autores relataram a redução de custos na ordem de 21,2% se comparado ao mesmo sistema sem a aplicação do volante inercial. Este fato é justificado pela redução dos algoritmos e periféricos (Choudhury, 2022). A validação do sistema ocorreu por meio de ensaios em *softwares* computacionais.

Assim, este trabalho propõe um método de compensação de afundamentos momentâneos de tensão fundamentado no princípio da conservação de energia cinética. A energia cinética é armazenada em um volante inercial, que está acoplado a um Gerador de Indução com Rotor em Gaiola de Esquilo (GIRGE), operando em sincronismo com a rede elétrica. A estratégia deste trabalho consiste em acoplar o GIRGE com número de polos superior à máquina primária, devolvendo a energia cinética acumulada à rede elétrica.

A conexão à rede elétrica é realizada por indutores e contadores, para mitigar os efeitos dos transitórios de corrente. Em regime permanente, o *bypass* dos indutores é realizado. Ainda, devido ao fato de que o GIRGE está operando sincronizado à frequência da rede elétrica, o sistema não necessita de um tempo de resposta de um controlador, destacando o aspecto de robustez dessa metodologia.

Esse sistema pode contribuir para a redução de problemas de qualidade de energia, tais quais: i) a compensação de afundamentos momentâneos de tensão; ii) amortização de transitórios de corrente indesejados na conexão à rede elétrica; iii) melhoria da eficiência energética em sistemas que utilizam cargas inerciais, e iv) aspectos ambientais, destinados a pesquisa sobre tecnologias de armazenamento de energia que podem contribuir com o desenvolvimento sustentável.

Uma breve introdução sobre as contribuições e as características do tema proposto nesse trabalho foram apresentadas. A sequência deste trabalho está organizada em quatro seções, a saber: Na Seção 2 é apresentado o estado da arte sobre o modelo matemático do gerador e do volante inercial. A metodologia proposta para os ensaios simulados

e experimentais são apresentados na Seção 3. A Seção 4 apresenta a discussão dos resultados obtidos e a Seção 5 descreve as conclusões relativas a esta pesquisa.

## 2. MODELO MATEMÁTICO

Nesta seção são apresentados os modelos matemáticos do GIRGE e do volante inercial, fundamentais para o estudo do comportamento dinâmico do sistema proposto.

### 2.1 Modelo matemático do GIRGE

Para compreender o comportamento físico da máquina elétrica e seu acionamento é necessário um conjunto de equações matemáticas que propiciam uma aproximação do sistema físico real, possibilitando a implementação em ambiente computacional Matlab®/Simulink (Ong, 1998; Simões e Farret, 2014; Miyamoto, 2017). As equações (1) à (5) apresentam, de forma resumida, o modelo do GIRGE. As equações (1) e (2) apresentam as tensões trifásicas no estator e rotor, respectivamente.

$$V_s^{abc} = i_s^{abc} R_s + \frac{d\lambda_s^{abc}}{dt} \quad (1)$$

$$V_r^{abc} = i_r^{abc} R_r + \frac{d\lambda_r^{abc}}{dt} \quad (2)$$

onde:

$V_s^{abc}$  são as tensões trifásicas do estator ( $V$ );

$V_r^{abc}$  são as tensões trifásicas do rotor ( $V$ );

$i_s^{abc}$  são as correntes trifásicas do estator ( $A$ );

$i_r^{abc}$  são as correntes trifásicas do rotor ( $A$ );

$R_s$  é a resistência de estator ( $\Omega$ );

$R_r$  é a resistência de rotor ( $\Omega$ );

$\lambda_s^{abc}$  são os fluxos do estator ( $Wb$ );

$\lambda_r^{abc}$  são os fluxos do rotor ( $Wb$ ).

Os fluxos concatenados do estator e rotor são apresentados pelas equações (3) e (4) respectivamente.

$$\lambda_s^{abc} = L_{ss}^{abc} i_s^{abc} + L_{sr}^{abc} i_r^{abc} \quad (3)$$

$$\lambda_r^{abc} = L_{sr}^{abc} i_s^{abc} + L_{rr}^{abc} i_r^{abc} \quad (4)$$

onde:

$L_{ss}^{abc}$  é a matriz de indutância própria do estator ( $H$ );

$L_{rr}^{abc}$  é a matriz de indutância própria do rotor ( $H$ );

$L_{rs}$  é a matriz de indutância mútua entre rotor e estator ( $H$ ).

Adicionalmente, para a modelagem do gerador de indução, os parâmetros mecânicos devem ser considerados. Além da carga acoplada ao eixo, deve-se considerar o momento de inércia e o coeficiente de atrito do rotor, que gira a uma velocidade  $\omega_r$ , de acordo como a equação (5):

$$T_{em} = T_c + J \frac{d\omega_r}{dt} + D\omega_r \quad (5)$$

onde:

$T_{em}$  é o torque eletromagnético ( $N.m$ );

$T_c$  é o torque de carga ( $N.m$ );

$J$  é o momento de inércia do motor e do volante ( $kg.m^2$ );

$\omega_r$  é a velocidade do rotor ( $rad/s$ );

$D$  é o coeficiente de atrito ( $N.m.s$ ).

Basicamente, os modelos matemáticos do gerador de indução são os mesmos empregados nos motores de indução, inclusive no que se refere a convenção da corrente de estator. O que diferencia o modelo do gerador, essencialmente, são os valores negativos do conjugado eletromagnético, mecânico e de escorregamento (Simões e Farret, 2014).

Segundo Simões e Farret (2014); Bolund et al. (2007); Wen et al. (2022), a utilização de volantes inerciais aplicados em conjunto ao GIRGE, pode trazer benefícios em renovação energética. Neste contexto, seu estudo e modelagem são descritos na Seção 2.2.

### 2.2 Modelo matemático do volante inercial

O volante inercial é um elemento mecânico utilizado em sistemas de armazenamento de energia, pois conserva energia cinética quando está em movimento rotacional ao se opor nas acelerações bruscas de um movimento rotativo amenizando as perdas de velocidade (Wen et al., 2022; Miyamoto, 2017).

Os avanços tecnológicos possibilitam que os volantes inerciais contribuam com resultados promissores no âmbito industrial. Por meio da equação (6), percebe-se que a otimização dos sistemas pode ser obtida a partir de estudos para o aumento da energia cinética ( $E_c$ ) armazenada no volante inercial Bolund et al. (2007):

$$E_c = \frac{1}{2} J \omega_r^2 \quad (6)$$

onde:

$J$  é o momento de inércia da massa rotacional ( $kg.m^2$ );

$\omega_r$  é a velocidade rotacional ( $rad/s$ ).

O momento de inércia é dado conforme a equação (7):

$$J = \frac{1}{2} r^2 m \quad (7)$$

onde:

$r$  é o raio ( $m$ );

$m$  é a massa do volante ( $kg$ ).

Para os volantes inerciais tem-se a forma dominante de um cilindro sólido e o momento de inércia pode ser escrito como:

$$J = \frac{1}{2} r^2 m = \frac{1}{2} r^4 \pi \alpha \rho \quad (8)$$

onde:

$\alpha$  é o comprimento do cilindro ( $m$ );

$\rho$  é a densidade do material ( $kg/m^3$ ).

A partir do modelo matemático do GIRGE (Ong, 1998; Simões e Farret, 2014), e do modelo do volante inercial (Bolund et al., 2007; Wen et al., 2022; Miyamoto, 2017), o comportamento dinâmico do sistema foi previamente simulado em *software* para posterior validação em bancada de acionamentos. A metodologia aplicada aos ensaios está descrita na Seção 3.

## 3. METODOLOGIA

Os aspectos metodológicos utilizados para a simulação computacional são apresentados na Seção 3.1. Ainda, o método utilizado para mitigação dos transitórios de corrente é descrito na Seção 3.2 e na Seção 3.3 é apresentada a metodologia utilizada nos ensaios experimentais.

### 3.1 Metodologia aplicada às simulações

Foram realizados dois ensaios, sob as seguintes condições: i) o gerador conectado à rede elétrica; ii) o gerador conectado à rede elétrica com terminais dos indutores 1mH, 5mH e 10mH associados ao gerador como técnica de mitigação de transitórios de corrente.

A Figura 1 ilustra o diagrama de blocos do modelo computacional implementado: é simulado um barramento trifásico em que as bobinas do estator do gerador podem ser conectadas diretamente ou através de um indutor em série. O sistema opera em 220 V/ 60Hz. Ainda, o modelo utilizou os parâmetros reais de uma rede de distribuição elétrica 100MVA/34,5kV que parte da subestação brasileira nas cidades de Cornélio Procópio-PR à Santa Mariana-PR, coletados em parceria com a COPEL (Companhia Paranaense de Energia Elétrica).

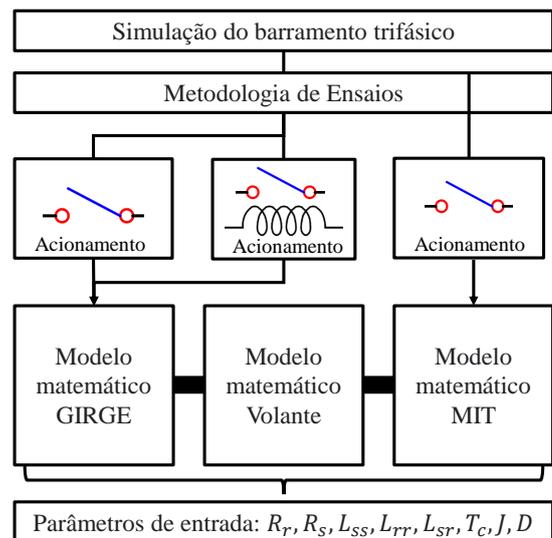


Figura 1. Diagrama de blocos do modelo matemático.

No conjunto inercial utilizado neste trabalho tem-se o motor de indução primário (M1 - MIT), o gerador de indução (M2 - GIRGE) e o volante inercial. A Tabela 1 apresenta os parâmetros do momento de inércia que foram

utilizados em simulação computacional para modelagem do sistema de geração distribuída proposto.

Tabela 1. Momento de inércia do sistema

Parâmetros	Momento de inércia
MIT	0,001 kg/m <sup>2</sup>
GIRGE	0,00052 kg/m <sup>2</sup>
Volante	0,1020 kg/m <sup>2</sup>
Conjunto inercial	0,10352 kg/m <sup>2</sup>

No modelo matemático implementado, as tensões trifásicas nos terminais do estator do GIRGE são aquisitadas no domínio do tempo e comparadas aos sinais de entrada do barramento. Com o intuito de mitigar efeitos indesejados dos elevados valores de transitório de corrente, este trabalho utiliza como técnica a inserção de indutores associados em série ao estator do gerador conforme descrito na Seção 3.2.

### 3.2 Metodologia aplicada à mitigação de transitórios de correntes

Os indutores podem ser classificados de acordo com suas características construtivas. Assim, seu núcleo pode ser de ferro, de ferrite, de ar, laminado ou formato toroidal. O formato da bobina toroidal é indicado quando é necessária uma indutância precisa, sendo utilizados em linhas de transmissão para filtrar transitórios e reduzir interferências eletromagnéticas (Simões e Farret, 2014).

Foram analisados três valores de indutores com intuito amortizar o transitório da corrente elétrica na entrada do gerador à rede. Os indutores foram projetados a partir da análise do circuito equivalente da máquina de indução com os enrolamentos do estator estando em série ao indutor, dentro da faixa para valores de corrente que não sature o elemento. A vantagem neste método consiste na manipulação e no chaveamento de cargas em regime transitório ou permanente.

Para cada terminal de indutância foi estimado um transitório de corrente equivalente, conforme informado na Tabela 2, em que  $Z_{eq}$  é a impedância equivalente,  $ipt$  é a corrente de pico em regime transitório, e  $T_x$  é a taxa, em porcentagem, de redução estimada de transitório de partida.

Tabela 2. Projeção do transitório de corrente

	Sem indutor	1 mH	5 mH	10 mH
$Z_{eq}$	8,68 $\Omega$	9,59 $\Omega$	10,72 $\Omega$	12,53 $\Omega$
$ipt$	35,84 A	31,42 A	25,02 A	20,12 A
$T_x$	-	12,33 %	30,18 %	43,86 %

A escolha do indutor de 1mH considera um valor de baixa indutância com intuito de analisar previamente o comportamento do sistema sem causar alterações significativas. Para este valor de indutância estimou-se a redução de 12,33% no transitório de partida. Adicionalmente, se forem inseridos indutores de 5mH e 10mH estima-se a redução de 30,18% e 43,86%, respectivamente.

### 3.3 Metodologia aplicada aos ensaios experimentais

Foram realizados quatro ensaios experimentais, sob as seguintes condições: i) conectada à rede elétrica; ii) co-

nectada à rede com terminais dos indutores 1mH, 5mH e 10mH associados ao gerador; iii) afundamento de 0,2pu trifásico; iv) afundamento de 0,4pu na fase  $V_{ab}$ .

Para validação do modelo computacional foram realizados ensaios experimentais em bancada de acionamentos da Figura 2. O conjunto inercial é composto pela máquina primária (MIT Siemens 2CV - 220V /60Hz) acoplado ao mesmo eixo por meio de mancais e rolamentos à um volante inercial responsável pelo armazenamento de energia cinética acoplado a máquina secundária (GIRGE Weg 1CV - 220V /60Hz) que opera como gerador de indução para velocidades superiores a 1800 rpm.

O acionamento elétrico do conjunto inercial é realizado por meio de um painel de acionamentos, onde as máquinas estão com os campos magnéticos em sentidos concordantes devido ao fato de estarem conectados pelos eixos mecânicos. As grandezas analisadas são coletadas por meio de um sistema de aquisição de sinais, que possui circuitos de condicionamento conectados a uma placa de aquisição (NI DAQ6009), que armazena os dados em um microcomputador.

## 4. RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados de simulação e experimentais. São realizados dois ensaios simulados com o gerador: i) conectado à rede, e ii) conectado à rede com os terminais dos indutores associados em série ao estator. Os resultados experimentais são apresentados para validar a proposta deste trabalho, sendo eles com o gerador: i) conectado à rede elétrica; ii) conectado à rede com os terminais dos indutores associado ao estator; iii) submetido a afundamentos de tensão de 0,2pu trifásico; e iv) submetido a afundamentos de tensão de 0,4pu entre fases.

### 4.1 Resultados simulados do GIRGE

O ensaio 1 (Figura 3) tem o objetivo de demonstrar a influência do volante inercial no sistema em operação conectada à rede elétrica. Para isso, as máquinas são ligadas simultaneamente e desligadas no instante 2s por meio de uma chave que as conecta à rede. Na Figura 3(a) no instante 2s do desligamento, há a liberação da energia cinética armazenada no volante inercial a qual é transferida ao GIRGE. No mesmo instante na Figura 3(b), constata-se que as correntes instantaneamente adquirem valores 0A. Em 3(c), na simulação sem o volante inercial, as tensões adquirem valores 0V instantaneamente.

O ensaio 2, apresentado na Figura 4 utiliza indutores com diferentes derivações como técnica de auxílio para reduzir os transitórios de corrente. O GIRGE é acionado com as terminações de indutâncias. No instante 1,5s é realizado o *bypass* dos indutores. A Figura 4 (a) ilustra as tensões e as correntes para o ensaio com o indutor de 1mH. Observa-se a redução de 14,8% da corrente de partida quando comparado ao ensaio 1 (Figura 3(b)). No instante 1,5s (durante o *bypass*) há o aumento da corrente com duração de 10ms, nesse instante a tensão no barramento é de 314,4V. Percebe-se a atenuação das correntes a medida que os valores das indutâncias são maiores (Figura 4 (b) e 4 (c)), no entanto observa-se um aumento no pico de corrente ao realizar o *bypass*.

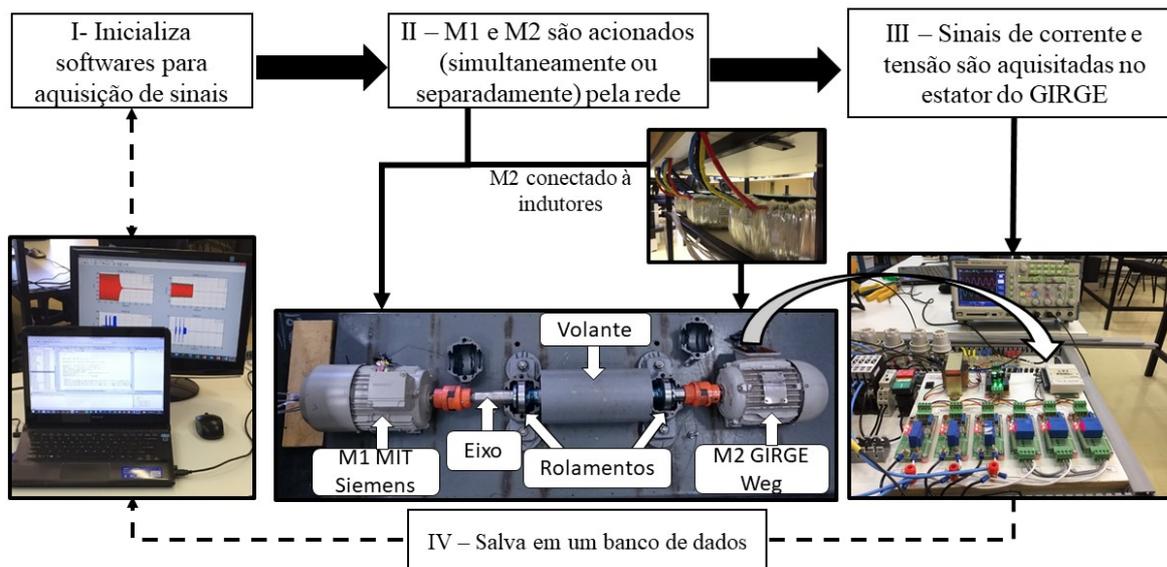


Figura 2. Bancada de ensaios experimental.

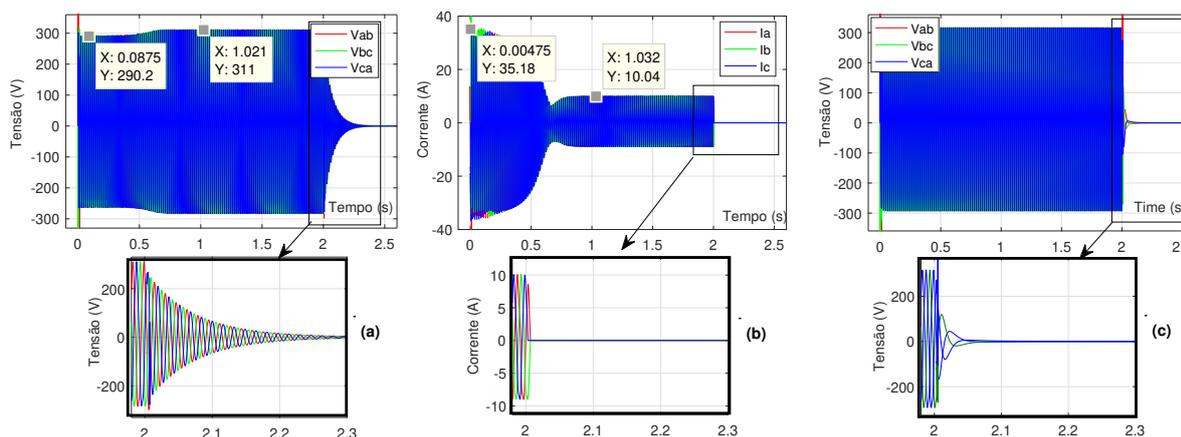


Figura 3. Ensaio 1: M1 e M2 acionados simultaneamente com e sem o volante; (a) Tensões trifásicas simuladas com o volante; (b) Correntes trifásicas simuladas com o volante; (c) Tensões trifásicas simuladas sem o volante.

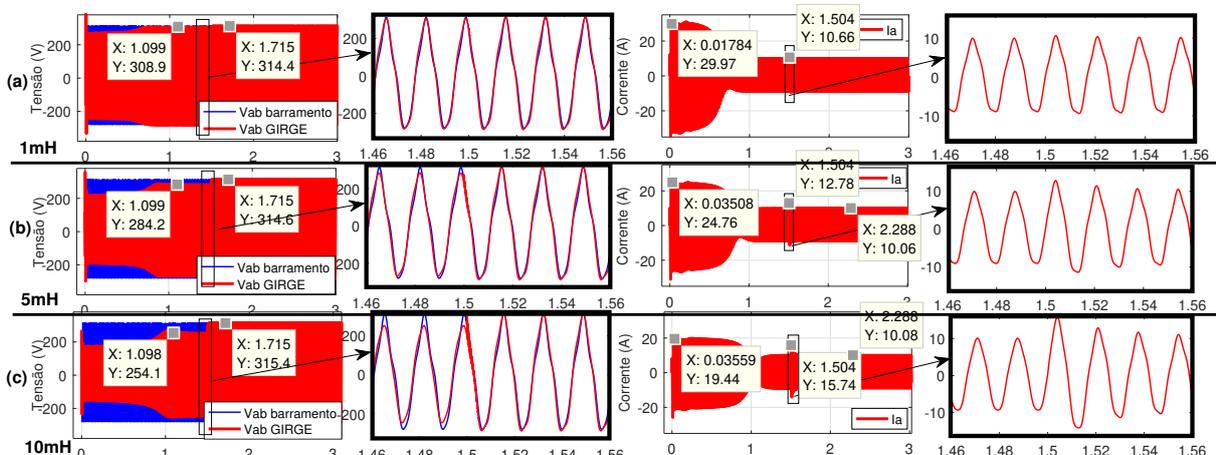


Figura 4. Ensaio 2: Tensões e correntes no GIRGE; (a) terminal de 1mH; (b) terminal de 5mH; (c) terminal de 10mH.

A partir das simulações realizadas, os dados são apresentados na Tabela 3 para cada terminal de indutância, onde  $i_{pt}$  é a corrente de pico em regime transitório, e  $T_x$  é a taxa de redução da corrente de partida em %.

Tabela 3. Comparação dos transitórios de corrente

	Sem indutor	1 mH	5 mH	10 mH
$i_{pt}$	35,18 A	29,97 A	24,76 A	19,44 A
$T_x$	–	14,8 %	29,62 %	44,74 %

A implementação de indutores na simulação computacional comprova a eficácia destes elementos passivos na mitigação de transitórios resultando numa redução de até 44,74% do pico de corrente transitória.

#### 4.2 Resultados Experimentais do GIRGE

Com base no estudo do comportamento dinâmico do GIRGE e do volante inercial, a proposta foi validada por meio de ensaios experimentais em bancada de acionamentos. Para o ensaio experimental 1, apresentado na Figura 5, ambas as máquinas foram acionadas simultaneamente em operação conectada à rede elétrica.

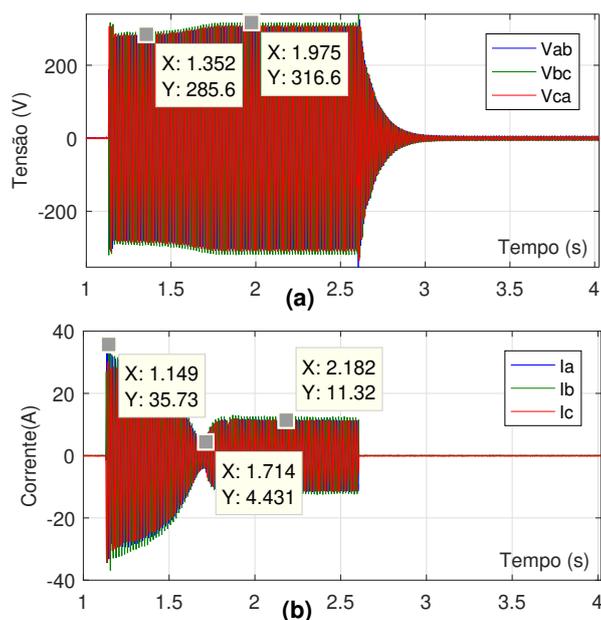


Figura 5. Ensaio experimental 1: Tensões e correntes no GIRGE; (a) tensões trifásicas; (b) correntes trifásicas.

A Figura 5(a) ilustra a tensão em regime permanente com valores de 316,6V. O GIRGE é desligado da rede no instante 2,6s, e as correntes trifásicas vão instantaneamente a zero. Assim como no modelo computacional desenvolvido, no ensaio simulado apresentado na Figura 3, percebe-se uma elevada corrente de partida com valores de 35,73A de pico, conforme a Figura 5(b).

O ensaio experimental 2, ilustrado na Figura 6, tem o objetivo de observar os efeitos de transitórios de corrente utilizando um indutor toroidal com terminais de 1mH, 5mH e 10mH conectado ao estator do gerador. Em regime permanente o *bypass* é realizado nos instantes 5,19s, 4,57s

e 4,51s, respectivamente para cada indutor. Percebe-se na Figura 6(a), uma corrente de partida de 29,16A de pico devido a limitação da reatância da bobina do indutor de 1mH ligada em série com o GIRGE. Em instantes anteriores a 2,45s, onde a velocidade do rotor é inferior à nominal, observa-se o afundamento devido ao fato de que a tensão induzida no estator do gerador durante a operação de motorização é inferior a tensão da rede.

A Figura 6(b) ilustra o efeito da utilização do indutor de 5 mH por fase. O contator de *bypass* é acionado no instante 4,57s, onde ocorre um pico de corrente de 40ms e, a partir deste instante, a tensão nos terminais do estator é de 309,7V (esquerda). A Figura 6(c) evidencia a redução da corrente de partida para 19,45A de pico utilizando o indutor de 10mH.

Para o ensaio experimental 3, o sistema foi submetido a um afundamento de 0,2pu (44V) no alimentador, por meio de um variac trifásico, e seu comportamento está ilustrado na Figura 7. No instante 3,5s é realizado o *bypass* do indutor de 5mH. A falha de afundamento de tensão foi inserida nos instantes 5s, 7,3s e 9,8s com duração de aproximadamente 1,8s, e de acordo com a Figura 7(b) e percebe-se o decréscimo da corrente e conseqüente redução da velocidade das máquinas. O conjunto GIRGE e volante inercial atua no restabelecimento da tensão de 302,3V no barramento por meio da conversão da energia cinética em energia elétrica.

No ensaio experimental 4 foi inserido um afundamento de 0,4pu apenas na fase  $V_{ab}$  no instante 5s com duração aproximada de 1,8s. O *bypass* do terminal de 5mH ocorre no instante 2,9s. Para este ensaio, de acordo com a Figura 8, no instante do afundamento houve a redução na corrente de 12,58A para 9,82A. Adicionalmente, as tensões nos terminais do GIRGE mantiveram-se entre 317,7V e 315,1V, comprovando a aplicação do volante inercial para auxiliar na compensação de afundamentos momentâneos de tensão.

#### 4.3 Validação

Buscando a validação do modelo computacional desenvolvido, os dados simulados e os adquiridos em bancada experimental são apresentados na Tabela 4, onde  $i_{pt}$  é a corrente de pico em regime transitório.

Tabela 4. Validação do modelo computacional

Parâmetros	Simulado	Experimental
$i_{pt}$	35,18 A	35,73 A
$i_{pt}(1mH)$	29,97 A	29,16 A
$i_{pt}(5mH)$	24,76 A	24,81 A
$i_{pt}(10mH)$	19,44 A	19,45 A

A variância média do modelo assumindo todos os pontos de amostragem é de 0,0019 e o desvio padrão é de 0,0436.

Os resultados obtidos apresentaram um erro médio de 0,5A em regime transitório. Considerando que a estratégia proposta nesse trabalho opera nos instantes de transitório, o modelo apresentado mostra-se eficaz. A influência do volante inercial no armazenamento de energia cinética foi observada elucidando os benefícios que este tipo de carga pode trazer ao sistema de compensação de tensão.

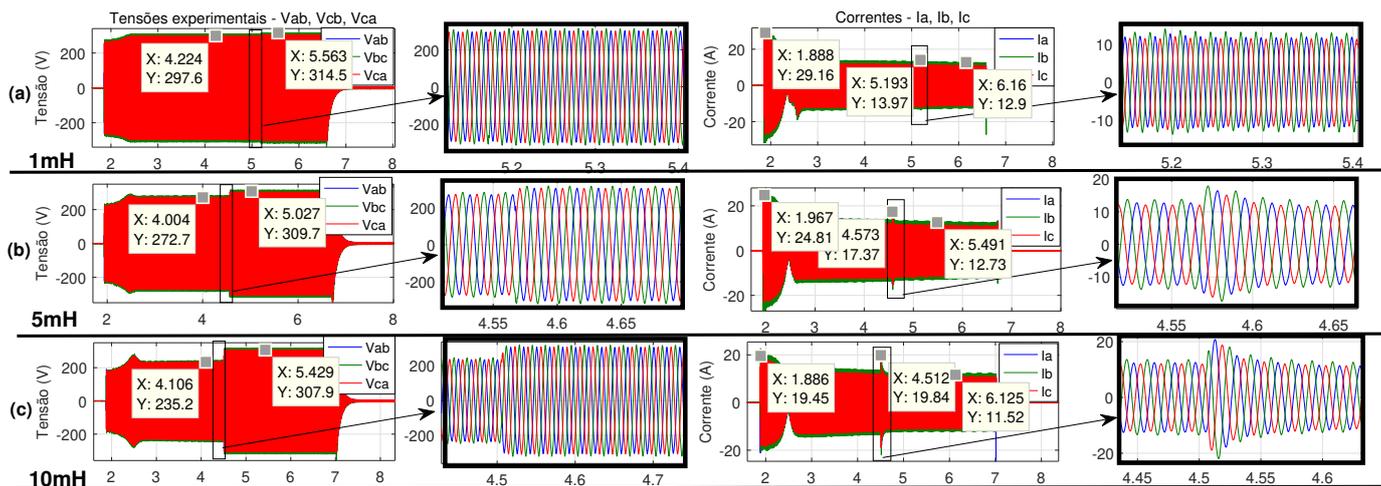


Figura 6. Ensaio experimental 2: Tensões e correntes no GIRGE; (a) terminal de 1mH; (b) terminal de 5mH; (c) terminal de 10mH.

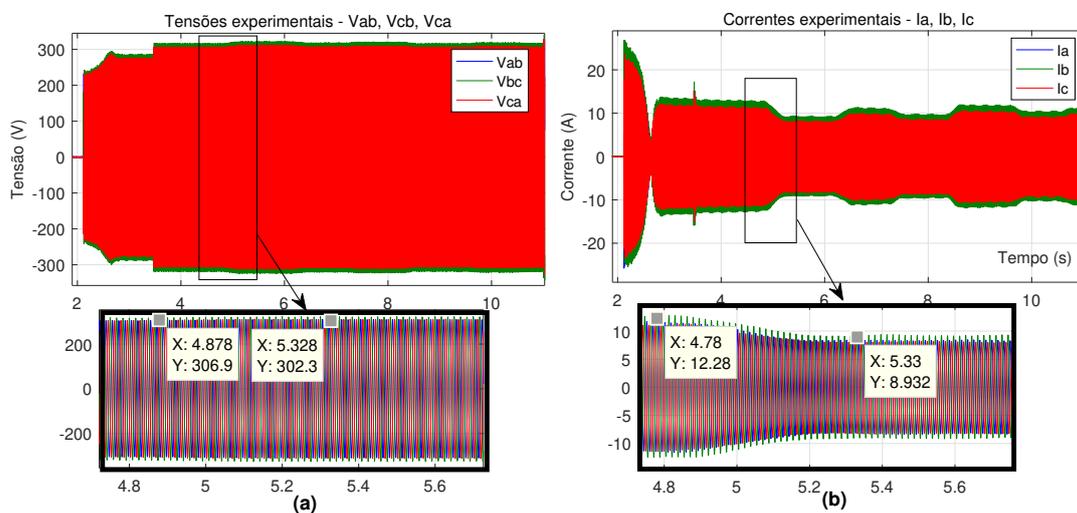


Figura 7. Ensaio experimental 3: Afundamento de 0,2pu; (a) Tensões trifásicas no GIRGE; (b) Correntes trifásicas no GIRGE.

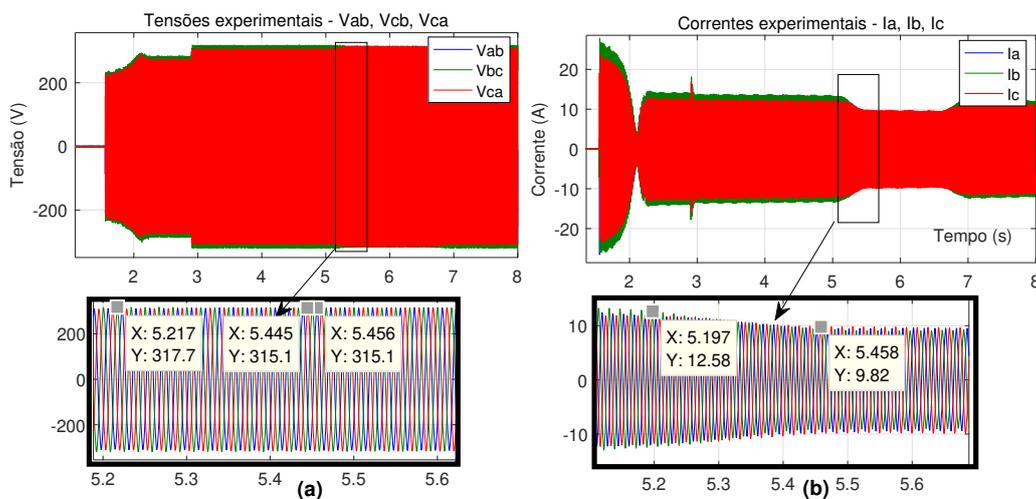


Figura 8. Ensaio experimental 4: Afundamento de 0,4pu na fase  $V_{ab}$ ; (a) Tensões trifásicas no GIRGE; (b) Correntes trifásicas no GIRGE.

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma estratégia de compensação de afundamentos momentâneos de tensão por meio da conexão de um gerador de indução em série com terminais de indutâncias à rede elétrica. Ainda, foi realizada a recuperação de energia armazenada na forma cinética em volantes inerciais para sistemas que utilizam máquinas elétricas para acionar cargas de alto teor inercial.

Os dados foram analisados no domínio do tempo sob diferentes estados de operação para análise de comportamento e resposta. Assim, foram utilizados indutores com terminais de 1mH, 5mH, 10mH ligados em série com o GIRGE. Nesse contexto, observa-se uma redução de até 45% da corrente transitória com a utilização dos indutores.

O emprego do volante inercial em situações de afundamentos de tensão mostrou-se satisfatório, conforme os ensaios experimentais, que apresentaram eficácia da conservação energética para efeitos de afundamentos de até 0,2pu no alimentador trifásico e 0,4pu por fase.

Segundo dados publicados no EPE (2021), as estratégias de armazenamento de energia em volantes inerciais podem ser utilizadas em conjunto com mecanismos de geração, por exemplo, na compensação da intermitência de geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis não despacháveis, tais quais a energia solar e a eólica.

Adicionalmente, de acordo com Choudhury (2022); Miyamoto (2017), os volantes inerciais destacam-se por algumas características: i) possuem elevada densidade do material construtivo e de potência armazenada; ii) o estado da energia pode ser medido desde que se conheça a velocidade da rotação; iii) não degrada independentemente da carga e descarga de energia cinética; iv) possui taxas reduzidas de manutenções periódicas e v) baixo impacto ambiental.

Em virtude dos fatos mencionados, comprova-se a eficácia do método para amortização de transitórios de corrente e para a compensação de afundamentos momentâneos de tensão. Adicionalmente, destaca-se as contribuições para eficiência energética em sistemas com cargas inercias, e um viés ambiental através da aplicação de volantes inerciais como tecnologia de armazenamento de energia. Esse sistema possui rápida dinâmica e flexibilidade de operação.

## AGRADECIMENTOS

Ao apoio financeiro da Fundação Araucária de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Paraná (Processo No. 06/56093-3), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (Processo No. 474290/2008-5, 473576/2011-2, 552269/2011-5) e a WEG Equipamentos Elétricos S.A.

## REFERÊNCIAS

Abas, N., Dilshad, S., Khalid, A., Saleem, M.S., and Khan, N. (2020). Power quality improvement using dynamic voltage restorer. *IEEE Access*, 8, 164325–164339.

ANEEL, P.d.D. (2016). Revisão 2018. elétrica no sistema elétrico nacional–prodist: Módulo 8-qualidade de energia elétrica.

Aredes, M., Encarnação, L.F., Moor Neto, J., Reis, M., Monteiro, L.F.C., Siqueira, M.J.V., and Sanches, C.C. (2009). Regulador de tensão com comutador eletrônico de taps para a compensação de variações de tensão de curta duração. In *VIII CBQEE-Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica*, 1–5.

Arredondo, F., Ledesma, P., and Castronuovo, E.D. (2019). Optimization of the operation of a flywheel to support stability and reduce generation costs using a multi-contingency tscopf with nonlinear loads. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 104, 69–77.

Bolund, B., Bernhoff, H., and Leijon, M. (2007). Flywheel energy and power storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(2), 235–258.

Choudhury, S. (2022). Review of energy storage system technologies integration to microgrid: Types, control strategies, issues, and future prospects. *Journal of Energy Storage*, 48, 103966.

Döşoğlu, M.K. (2021). Enhancement of new rotor resistance unit for doubly fed induction generator-based wind turbines. *Computers & Electrical Engineering*, 90, 106954.

EPE, E.d.P.E. (2021). Plano nacional de energia 2050: Ano base 2020.

Gee, A.M., Robinson, F., and Yuan, W. (2017). A superconducting magnetic energy storage-emulator/battery supported dynamic voltage restorer. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 32(1), 55–64.

Ghanbari, T., Farjah, E., and Naseri, F. (2018). Power quality improvement of radial feeders using an efficient method. *Electric Power Systems Research*, 163, 140–153.

Ghosh e Kamalasadana, Sudipta, S. (2017). An energy function-based optimal control strategy for output stabilization of integrated dfig-flywheel energy storage system. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 8(4), 1922–1931.

Hu, J., Marinelli, M., Coppo, M., Zecchino, A., and Bindner, H.W. (2016). Coordinated voltage control of a decoupled three-phase on-load tap changer transformer and photovoltaic inverters for managing unbalanced networks. *Electric Power Systems Research*, 131, 264–274.

Li e Palazzolo, Xiaojun, A. (2022). A review of flywheel energy storage systems: state of the art and opportunities. *Journal of Energy Storage*, 46, 103576.

Miyamoto, R.K. (2017). *Conexão à rede elétrica de um gerador de indução com rotor em gaiola de esquilo acoplado a um volante inercial*. Master's thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Ong, C.M.M.O. (1998). *Dynamic simulation of electric machinery using Matlab/Simulink*. Prentice-Hall PTR.,

Simões e Farret, M Godoy, F.F.A. (2014). *Modeling and Analysis with Induction Generators*. CRC Press.

Wen, Z., Fang, P., Yin, Y., Królczyk, G., Gardoni, P., and Li, Z. (2022). A novel machine learning model for safety risk analysis in flywheel-battery hybrid energy storage system. *Journal of Energy Storage*, 49, 104072.