



**XXIV SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GPC/27

22 a 25 de outubro de 2017  
Curitiba - PR

**GRUPO - V**

**GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO, CONTROLE E AUTOMAÇÃO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA-GPC**

**CARACTERÍSTICAS DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO DAS PRINCIPAIS TECNOLOGIAS MODERNAS DE GERAÇÃO**

**Kelyn R. Botina Trujillo (\*)  
UNICAMP**

**Fernanda C. L. Trindade  
UNICAMP**

**RESUMO**

Este trabalho investiga as características da corrente de curto-circuito e propõe o uso de modelos simplificados para a representação das quatro principais tecnologias de geradores distribuídos em estudos de cálculo de curto-circuito: síncrono, indução, fotovoltaico (FV) e gerador de indução duplamente alimentado (do inglês, DFIG). Maior ênfase é dada ao gerador FV e o DFIG uma vez que a informação disponível sobre os geradores equipados com avançados sistemas de controle é limitada. Esta investigação é importante para entender os efeitos dessas tecnologias sobre as correntes de curto-circuito. Além disso, os modelos propostos seguem a lógica das principais normas de cálculos, IEC e ANSI/IEEE, as quais definem fatores multiplicativos para uma impedância equivalente ou para a magnitude de uma fonte de tensão ou corrente. Simulações de transitório eletromagnético são utilizadas para validar as características da contribuição de corrente de curto-circuito e os modelos propostos.

**PALAVRAS-CHAVE**

Cálculo de curto-circuito, geradores distribuídos, modelos simplificados.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Há alguns anos, geradores de pequeno e médio porte de variadas tecnologias têm sido conectados em diferentes pontos das redes de distribuição de média e baixa tensão (MT e BT). Estes geradores são designados comumente como geradores distribuídos (GDs), e no Brasil podem atingir uma potência de até 5 MW (1). Apesar dos múltiplos benefícios relacionados à conexão de GDs, existem também problemas que comprometem a qualidade da energia fornecida, a segurança e a confiabilidade da rede (2). Destacam-se os problemas associados com sobretensão, desequilíbrio e proteção. Em particular, os sistemas de proteção são sensivelmente afetados, pois durante curtos-circuitos (ou faltas), a contribuição dos GDs altera os valores das correntes de falta que circulam através de disjuntores, religadores e fusíveis, elevando o nível de curto-circuito da rede (3). Este aumento não previsto pode afetar os ajustes e a coordenação dos equipamentos de proteção de sobrecorrente, na prática dimensionados a partir dos valores do transitório e de regime da corrente de curto-circuito. De fato, em decorrência do aumento dos níveis de curto-circuito, há uma maior probabilidade de se exceder os limites de operação dos equipamentos de proteção, ocasionando problemas no funcionamento desses equipamentos, especialmente na capacidade de interromper faltas. Tipicamente, a capacidade de interrupção dos dispositivos de proteção é um limitante para a conexão de GDs, isso porque em todos os sistemas existem locais em que as proteções operam nos seus limites, ou seja, apenas suportam a contribuição fornecida pela subestação. Contudo, poucos trabalhos têm pesquisado os efeitos da conexão de novas tecnologias de geração distribuída sobre a corrente de curto-circuito, isto devido principalmente à escassa informação disponível sobre as características da corrente de falta de alguns dos GDs mais populares, tais como: o gerador FV e o DFIG, cujo comportamento sob curtos-circuitos é influenciado pelos seus respectivos sistemas de controle.

Neste contexto, este trabalho investiga as características da corrente de curto-circuito e propõe o uso de modelos simplificados para a representação das quatro principais tecnologias de GDs em estudos de cálculo de curto-circuito:

síncrono, indução, FV e DFIG. Embora a contribuição dos principais tipos de GDs já tenha sido caracterizada nas normas IEC (4) e ANSI/IEEE (5), conceitos análogos são empregados neste trabalho para representar todas as principais tecnologias de GDs. Tais conceitos são baseados em fatores multiplicativos aplicados à magnitude da fonte e/ou à impedância de um circuito equivalente, que simplifica o cálculo do valor da corrente de falta e permite obter resultados com aceitável exatidão. Simulações de transitório eletromagnético são utilizadas para validar as características da contribuição de corrente de curto-circuito e os modelos propostos.

Este trabalho está dividido como segue. Na seção 2, descrevem-se as características de contribuição de corrente de curto-circuito dos GDs estudados. A seção 3 apresenta os modelos simplificados propostos para serem empregados em estudos de curtos-circuitos. Na seção 4 descreve-se a metodologia empregada para o teste dos modelos. Na seção 5 os resultados de validação dos modelos são apresentados, seguidos pelas conclusões na seção 6.

## 2.0 - CARACTERÍSTICAS DE CONTRIBUIÇÃO DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO DOS GDS

A seguir, apresenta-se uma breve descrição das características de contribuição de corrente de curto-circuito correspondentes às tecnologias de GDs estudadas neste trabalho.

### 2.1 Gerador Síncrono

Durante um curto-circuito, a corrente alternada (CA) nos terminais dos geradores síncronos apresenta um comportamento assimétrico e decrescente durante os primeiros ciclos após ocorrida a falta. A assimetria resulta da presença de uma componente de corrente contínua (CC) que decai exponencialmente em função da relação entre reatância e resistência ( $X/R$ ) no ponto da falta. A diminuição da amplitude CA, procede da variabilidade crescente dos valores da reatância da máquina ao longo de três períodos de tempo: subtransitório, transitório e em regime. Salienta-se que o comportamento qualitativo do perfil da falta é igual tanto para os curtos-circuitos equilibrados, quanto para os desequilibrados.

### 2.2 Gerador de Indução

No caso dos geradores de indução com rotor tipo gaiola de esquilo, o comportamento da corrente de curto-circuito também é dividido conforme três períodos de tempo: subtransitório, transitório e em regime (5). Porém, estes geradores não fornecem corrente de falta de forma sustentada durante curtos-circuitos trifásicos em seus terminais – situação decorrente do fato de que não possuem dispositivos externos para manter a excitação do campo magnético, e, portanto, após a ocorrência do distúrbio os transitórios da sua corrente decaem a zero rapidamente. Em contrapartida, frente a curtos-circuitos desequilibrados, correntes de curto-circuito sustentadas podem surgir, pois as fases que não estão envolvidas na falta mantêm a magnetização da máquina, e o gerador contribui à corrente de falta até que um dispositivo de proteção seja ativado.

### 2.3 Gerador FV

A contribuição de um gerador FV à corrente de curto-circuito é consideravelmente diferente da fornecida pelos geradores síncronos e de indução, principalmente pelo fato dele estar conectado à rede via inversor e por não possuir inércia mecânica ou circuitos magnéticos significativos. O inversor tipicamente limita a corrente de curto-circuito que pode fluir do gerador diante da ocorrência de uma falta para evitar que ocorram danos nos elementos que compõem o circuito do inversor. Porém, a limitação vem principalmente do sistema de controle presente no inversor, e não da relação  $X/R$  acumulada até o local do curto-circuito. Isto porque de acordo com (6) é possível ignorar a parcela indutiva de um inversor FV, pois tipicamente estes equipamentos têm uma relação  $X/R$  muito pequena, que varia em uma faixa de valores de 0,02 a 0,05. O inversor de um gerador FV pode empregar dois esquemas de controle: controle por tensão ou controle por corrente. A resposta de ambos os controles, durante os primeiros ciclos após ocorrido o distúrbio (período transitório), é uma corrente crescente que atinge um valor limite máximo e logo após decresce rapidamente até o valor de regime. No esquema de controle por tensão, a corrente de falta é rapidamente estabelecida no valor de regime, porém alcança valores de pico elevados (*overshoot*) durante os primeiros ciclos. Em contrapartida, no esquema de controle por corrente, os valores de pico são menores e a ação do controle atua um pouco mais devagar (7). De acordo com (8), a efetiva resposta do sistema de controle permite atingir rapidamente um valor de corrente de regime, portanto, o período transitório é de curta duração (da ordem dos milissegundos) e pode ser desconsiderado. Além disso, caso a falta permaneça mais tempo que o esperado, os inversores comumente possuem um circuito de proteção que atua para desconectar o gerador FV da rede, a fim de garantir a segurança e, preservar os dispositivos eletrônicos que o compõem (8) **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Por fim, o comportamento da contribuição de corrente de curto-circuito do gerador FV depende diretamente do tipo de controle utilizado e da atuação dos circuitos de proteção eventualmente presentes no inversor.

O comportamento da contribuição de corrente de curto-circuito é qualitativamente igual tanto para as faltas equilibradas quanto para as desequilibradas. No entanto, os geradores FVs conectados via inversores trifásicos à rede podem ser considerados como uma fonte de corrente de sequência positiva, pois segundo (9) e (10), sob curtos-circuitos desequilibrados, o controle do inversor é configurado para fornecer apenas corrente de sequência positiva, ou seja, as correntes de sequência negativa e zero são nulas. Isso porque o controle desses sistemas é projetado para suprir correntes trifásicas balanceadas independentemente do desequilíbrio de tensão.

Já o comportamento quantitativo da contribuição depende principalmente do tipo falta. Os resultados de vários dos testes de curto-circuito realizados com inversores reais, apresentados em (11), (12) e (13), mostram que os inversores tipicamente utilizados em sistemas FVs conectados às redes de média tensão (MT) fornecem correntes de falta praticamente constantes, de um valor da ordem de 1,5 e 2 vezes sua corrente nominal para curtos-circuitos desequilibrados e equilibrados, respectivamente. Estes valores de regime também são atingidos por inversores de menor potência, usualmente conectados em redes de baixa tensão (BT), porém estes inversores atingem, durante um período transitório curto, um valor de pico inicial que pode exceder a corrente nominal por um fator de 2 a 5 vezes para faltas equilibradas, e um fator de 1,1 a 2 vezes para faltas desequilibradas.

## 2.4 DFIG

O DFIG é uma máquina de indução com rotor bobinado, em que os enrolamentos do estator e do rotor são ligados à rede de distribuição. O circuito do estator é ligado diretamente, e o circuito do rotor utiliza como interface de ligação um conversor de frequência bidirecional constituído por dois conversores de tensão ou VSCs (do inglês, *Voltage Source Converters*) acoplados via um elo-CC. Um dos VSCs é conhecido como conversor do lado do rotor ou RSC (do inglês, *Rotor Side Converter*), já que é conectado via anéis deslizantes aos enrolamentos do rotor. O outro VSC é denominado conversor do lado da rede ou GSC (do inglês, *Grid Side Converter*), pois é conectado via um indutor *choke* à rede. Mais informações sobre a os sistemas de controle dos VSCs podem ser consultadas em (14).

Durante curtos-circuitos, elevadas correntes fluem nos enrolamentos do estator e do rotor devido à desmagnetização da máquina. Tipicamente, as altas correntes que circulam no rotor induzem sobretensões no elo-CC, excedendo os seus valores nominais e causando eventualmente uma ruptura térmica nos conversores. A solução mais popular para este problema consiste em usar um circuito de proteção *crowbar*, composto por um conjunto de resistências de elevado valor, controlado por dispositivos de eletrônica de potência, e conectado em série com os enrolamentos do rotor. Neste trabalho, considera-se que o *crowbar* se mantém conectado até que a falta seja eliminada, segundo as descrições apresentadas em (15) e (16). Consequentemente, a corrente de falta nos terminais do DFIG é determinada pela dinâmica da máquina de indução, os sistemas de controle dos VSCs e o circuito *crowbar* (17) - (18). Além disso, seu perfil de corrente de curto-circuito pode ser caracterizado por dois períodos de tempo: o transitório associado com a dinâmica da máquina, e o de regime que depende majoritariamente dos VSCs. Portanto, sob condições de curto-circuito trifásico franco, os transitórios da corrente de falta do DFIG são qualitativamente próximos aos produzidos por uma máquina de indução convencional, e a corrente de regime não é nula para todo o período de duração da falta, pois o GSC pode fornecer corrente de curto-circuito consumindo a energia armazenada no capacitor do elo-CC (19)-(21). No caso de faltas monofásicas, as fases que não estão envolvidas no curto-circuito mantêm magnetizada a máquina, permitindo que o DFIG forneça correntes de falta sustentadas (22) - (23).

## 3.0 - MODELOS SIMPLIFICADOS DE GDS PARA CÁLCULOS DE CURTO-CIRCUITO

Para representar as tecnologias de GDs em estudos de cálculo de curto-circuito trifásico e monofásico, propõe-se o uso de modelos simplificados baseados em uma fonte equivalente de tensão/corrente, conforme ilustrado na Figura 4.1. Este trabalho apresenta como ajustar os valores de  $E_{Geq}$ ,  $Z_{Geq}$  e  $I_{Geq}$  para cada tecnologia de GD.

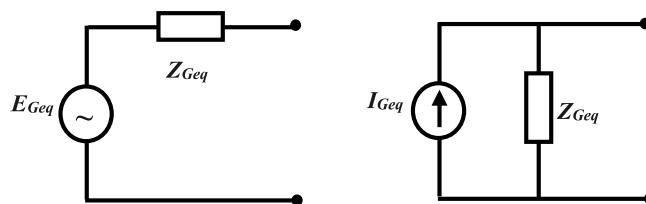


FIGURA 1 – Modelo simplificado de geradores distribuídos para o cálculo de curto-circuito

A seguir, apresentam-se detalhes para ajustar os valores de  $E_{Geq}$ ,  $Z_{Geq}$  e  $I_{Geq}$  para cada tecnologia de GD. Os subscritos *nom* e *r* são usados para se referir aos valores nominais da rede e dos equipamentos, respectivamente. Os geradores síncrono e de indução são modelados segundo as orientações da norma IEC. Embora os modelos de cálculo de curto-circuito associados com as máquinas convencionais sejam detalhados na norma, são apresentados brevemente neste trabalho, a fim de contextualizar e entender os modelos propostos para o gerador FV e o DFIG. Destaca-se que os modelos permitem calcular os valores da corrente associados com os quatro ciclos de trabalho definidos na norma IEC (4) e listados na Tabela 1.

Tabela 1 – Ciclos de trabalho da corrente de curto-circuito [2]

Ciclo de Trabalho	Nome	Tipo de Valor	Símbolo
1	Corrente simétrica de primeiro ciclo	<i>rms</i>	$I_k^s$
2	Corrente de pico	<i>pico</i>	$i_p$
3	Corrente de interrupção	<i>rms</i>	$I_b$
4	Corrente de regime	<i>rms</i>	$I_k$

### 3.1 Gerador Síncrono

De acordo com a norma IEC, utiliza-se um modelo baseado em uma fonte equivalente de tensão para calcular a contribuição de corrente de curto-circuito do gerador síncrono durante os quatro ciclos de trabalho definidos na Tabela 1. Os valores finais equivalentes da fonte de tensão,  $E_{Geq}$ , e da impedância,  $Z_{Geq}$ , são obtidos aplicando um conjunto de fatores multiplicativos aos valores base de tensão,  $E_G$ , e de impedância,  $Z_G$ . Um resumo do modelo simplificado proposto para representar os geradores síncronos durante curtos-circuitos trifásicos e monofásicos é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Modelo simplificado do gerador síncrono

Ciclo de Trabalho	Fonte Equivalente		Magnitude da Fonte		Magnitude da Impedância		
	3φ	1φ	3φ	1φ	3φ	1φ	
						Sequência +	Sequência 0
1	Fonte de tensão		$cE_G$	$3cE_G$	$K_G \cdot Z_G$	$K_G \cdot Z_G$	Valores típicos ou fornecidos pelo fabricante*
2			$\sqrt{2} cE_G$	$3\sqrt{2} cE_G$	$K_G \cdot Z_G$	$K_G \cdot Z_G$	
3			$\mu cE_G$	$3cE_G$	$K_G \cdot Z_G$	$K_G \cdot Z_G$	
4			$\sqrt{3} \lambda cE_G$	$3cE_G$	$Z_{rG}$	$K_G \cdot Z_G$	

\* NOTA: Se o GD é conectado via um transformador a impedância varia segundo o respectivo modelo na teoria das componentes simétricas

A magnitude da fonte de tensão base  $E_G$ , Independe do local da falta, e é obtida aplicando [1], em que,  $U_{nom}$  corresponde à tensão nominal no local da falta.

$$E_G = U_{nom} \cdot (1/\sqrt{3}) \quad [1]$$

O fator  $c$  é definido em função da tensão nominal ( $U_{nom}$ ) no local da falta, e do tipo de corrente a ser calculada. Os procedimentos e equações para obter a impedância base ( $Z_G$ ), o fator de correção ( $K_G$ ), e os fatores multiplicativos  $\kappa$ ,  $\mu$ , e  $\lambda$  podem ser consultados em maior detalhe em (4). Destaca-se ainda que a impedância base ( $Z_G$ ) depende do ciclo de trabalho. Nos ciclos de trabalho 1, 2 e 3 obtêm-se a partir do valor da reatância subtransitória do gerador,  $x''_d$ , e da resistência do estator,  $R_G$ . No ciclo de trabalho 4 corresponde ao valor de impedância síncrona do gerador,  $Z_{rG}$ . Entretanto, para faltas monofásicas, as impedâncias de sequências positiva e negativa são iguais e correspondem ao valor calculado no ciclo 1 para faltas trifásicas, enquanto a impedância de sequência zero corresponde a um valor típico ou ao fornecido pelo fabricante.

### 3.2 Gerador de Indução

A abordagem que a norma IEC faz das máquinas assíncronas é aplicada para modelar os geradores de indução. Um resumo do modelo simplificado para representar os geradores de indução durante curtos-circuitos trifásicos e monofásicos, é apresentado na Tabela 3. O valor base da magnitude da fonte de tensão ( $E_G$ ) é calculado aplicando-se [1]. A impedância de curto-circuito equivalente ( $Z_{Geq}$ ) corresponde ao valor base,  $Z_G$ , que é obtido a partir da tensão nominal do gerador e a corrente de rotor bloqueado da máquina. Valores típicos da corrente de rotor bloqueado são disponibilizados pela norma em função da potência e da tensão nominais da máquina. Também é necessário obter os fatores  $c$ ,  $\kappa$ ,  $\mu$ , e  $q$  para calcular a corrente de falta nos três primeiros ciclos de trabalho. Os respectivos procedimentos e equações são descritos em (4). Destaca-se ainda que sob condições de curto-circuito trifásico, a impedância no ciclo 4 tende a infinito, pois a contribuição do gerador no regime é nula ou praticamente desprezível. A impedância equivalente para calcular os valores da corrente de curto-circuito decorrentes de uma falta monofásica, é calculada utilizando a teoria das componentes simétricas, da mesma forma como é definido no modelo para geradores síncronos.

Tabela 3 – Modelo simplificado do gerador de indução

Ciclo de Trabalho	Fonte Equivalente		Magnitude da Fonte		Magnitude da Impedância		
	3φ	1φ	3φ	1φ	3φ	1φ	
						Sequência +	Sequência 0
1	Fonte de tensão		$cE_G$	$3cE_G$	$Z_G$	$Z_G$	Valores típicos ou fornecidos pelo fabricante*
2			$\sqrt{2} cE_G$	$3\sqrt{2} cE_G$			
3			$\mu cE_G$	$3cE_G$			
4			$cE_G$	$3cE_G$			

\* NOTA: Se o GD é conectado via um transformador a impedância varia segundo o respectivo modelo na teoria das componentes simétricas

### 3.3 Gerador Fotovoltaico (FV)

Os testes de curto-circuito em inversores de geradores FVs de diferentes fabricantes, apresentados em (11), (12) e (13), mostram que a corrente de falta pode ser estimada através da aplicação de fatores multiplicativos, e que a duração máxima do período transitório é curta, até 10 ciclos para faltas trifásicas e 1 ciclo para faltas monofásicas, portanto, podem ser desconsiderados. Consequentemente, propõe-se como modelo simplificado para representar este tipo de gerador, uma fonte equivalente de corrente,  $I_{Geq}$ , com impedância  $Z_{Geq}$  infinita. A fonte de corrente assume magnitudes que variam de acordo com o tipo de curto-circuito e a corrente nominal do inversor.

Baseados nos valores de regime atingidos pelo inversor durante curtos-circuitos equilibrados e desequilibrados, descritos na seção 2.3, sugere-se um modelo em que a fonte de corrente equivalente,  $I_{Geq}$ , é igual, respectivamente, a 2 e 1,5 vezes a corrente nominal do gerador FV para o cálculo de curto-circuito trifásico e monofásico; e a impedância,  $Z_{Geq}$ , tende a infinito. O resumo do modelo simplificado é apresentado na Tabela 4, em que,  $I_G$  corresponde à corrente nominal do gerador FV.

Tabela 4 – Modelo simplificado do gerador fotovoltaico

Ciclo de Trabalho	Fonte Equivalente		Magnitude da Fonte		Magnitude da Impedância		
	3φ	1φ	3φ	1φ	3φ	1φ	
						Sequência +	Sequência 0
1	Fonte de corrente		$2 I_G$	$1,5 I_G$	$\infty$	$\infty$	$\infty$
2							
3							
4							

### 3.4 Gerador de Indução Duplamente Alimentado (DFIG)

Para estimar a contribuição durante faltas trifásicas e monofásicas, propõe-se modelar o DFIG nos estudos de cálculo de curto-circuito como uma fonte de tensão em série com uma impedância. A fonte de tensão equivalente,  $E_{Geq}$ , obtém-se aplicando fatores multiplicativos à fonte base  $E_G$ , calculada utilizando a equação [1]. A impedância equivalente,  $Z_{Geq}$ , depende do caminho da corrente até o curto-circuito e seu valor é igual para todos os ciclos de trabalho. As equações e os fatores utilizados no modelo simplificado são descritos a seguir. Segundo o proposto em (24), no ciclo de trabalho 2 a impedância de curto-circuito do DFIG,  $Z_G$ , é obtida aplicando-se [2], em que,  $x_d''$  corresponde à reatância subtransitória, e  $R_{CB}$  é a resistência de *crowbar*.

$$Z_G = jx_d'' + R_{CB} \quad [2]$$

Em (25), se estabelece que a magnitude da corrente de curto-circuito de um DFIG é diretamente afetada pelo escorregamento. No DFIG, diferentemente dos geradores de indução convencionais, o escorregamento não permanece próximo de zero e pode variar até cerca de 20% dependendo de suas características. De acordo com o autor, tal influência pode ser modelada multiplicando-se a impedância equivalente,  $Z_{Geq}$ , pelo fator (1-s), em que s corresponde ao valor pré-falta do escorregamento. No entanto, a fim de manter a coerência com os modelos simplificados dos outros GDs, define-se para a tensão base,  $E_G$ , o fator multiplicativo  $\gamma$ , calculado como o valor inverso do fator (1-s).

Portanto, no modelo proposto os fatores multiplicativos associados com a fonte de tensão base,  $E_G$ , são  $c$ ,  $\gamma$ ,  $\mu$  e  $q$ . O fator  $c$  definido pela norma IEC multiplica  $E_G$  em todos os ciclos de trabalho. O fator  $\gamma$  multiplica  $E_G$  apenas nos ciclos de trabalho 1 e 3. Os fatores  $\mu$  e  $q$  empregam-se para obter a tensão no ciclo 3, e são calculados segundo o definido pela norma IEC para geradores de indução. Também, para os ciclos 1 e 2, empregam-se como fatores multiplicativos, respectivamente as constantes, 0,9 e  $1,8\sqrt{2}$  definidas de acordo com o definido pela norma IEC e o modelo proposto em (24). Esses dois fatores são utilizados apenas nos cálculos de curto-circuito trifásico. Para faltas monofásicas empregam-se os definidos pela norma IEC. Em particular, no ciclo de trabalho 4, empregam-se os fatores  $\alpha$  e  $\rho$ . O fator  $\alpha$  é um valor múltiplo da corrente nominal que corresponde ao máximo valor de corrente de curto-circuito do DFIG pode fornecer. O fator  $\rho$  é o valor em pu da impedância  $Z_G$ , garante a corrente nominal no ciclo 4. A impedância equivalente para estudos de cálculo de curtos-circuitos monofásicos, é calculada segundo o definido na teoria de componentes simétricas, portanto, a impedâncias de sequências positiva e negativa são iguais, e seu valor corresponde ao valor calculado para faltas trifásicas, entretanto, a impedância de sequência zero corresponde a valores típicos ou fornecidos pelo fabricante, contudo, de acordo com (26) os DFIGs cuja fonte primária é uma turbina eólica não contribuem com corrente de falta de sequência zero, pois usualmente são conectados em uma configuração estrela não aterrada. Um resumo do modelo simplificado para estimar a contribuição de corrente de curto-circuito do DFIG durante faltas trifásicas próximas da geração é apresentado na Tabela 5.

TABELA 5 – Modelo simplificado do gerador de indução duplamente alimentado

Ciclo de Trabalho	Fonte Equivalente		Magnitude da Fonte		Magnitude da Impedância		
	3φ	1φ	3φ	1φ	3φ	1φ	
						Sequência +	Sequência 0
1	Fonte de tensão		$0,9c\gamma E_G$	$3 cE_G$	$Z_G$	$Z_G$	Valores típicos ou fornecidos pelo fabricante*
2			$1,8\gamma\sqrt{2} cE_G$	$3\gamma 2\sqrt{2} cE_G$			
3			$0,9\gamma\mu q cE_G$	$3 cE_G$			
4			$\rho\alpha cE_G$	$3 cE_G$			

\* NOTA: Se o GD é conectado via um transformador a impedância varia segundo o respectivo modelo na teoria das componentes simétricas

## 4.0 - METODOLOGIA

Empregam-se simulações de transitório eletromagnético realizadas no SimPowerSystems do Matlab (27) para verificar as características mais relevantes da corrente de curto-circuito dos GDs e validar os modelos simplificados

propostos. Porém, apresentam-se unicamente os resultados para o gerador FV e o DFIG, pois os perfis e características da corrente de falta dos geradores síncrono e de indução são amplamente conhecidas. Além disso, a fim de avaliar a exatidão dos modelos simplificados, para cada tecnologia de GDs, realiza-se a comparação entre os valores de contribuição de corrente de curto-circuito calculados a partir do respectivo modelo simplificado e os obtidos desde as simulações de transitório eletromagnético de uma rede elétrica real.

O diagrama unifilar do sistema teste utilizado nas simulações é apresentado na Figura 2. O sistema corresponde a uma rede distribuição de 25 kV alimentada diretamente por um equivalente externo, com nível de curto-circuito de 305 MVA, e relação X/R igual a 58,57. O sistema tem uma carga total de 16,39 MW, e, 7,26 MVar. Na barra 50, é instalada uma tecnologia de GD através de um transformador abaixador conectado em  $\Delta:Y_g$ . Maiores detalhes da rede podem ser consultados em (28).

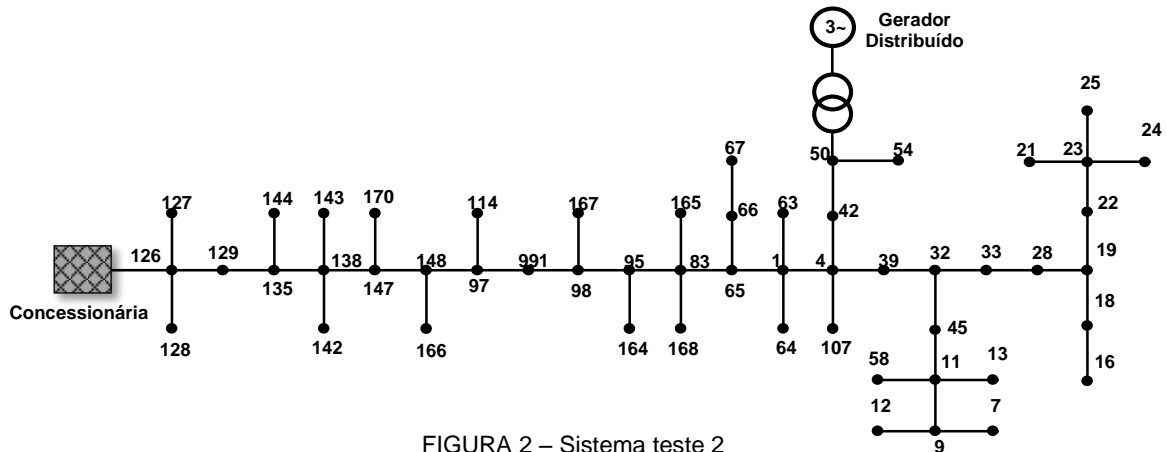
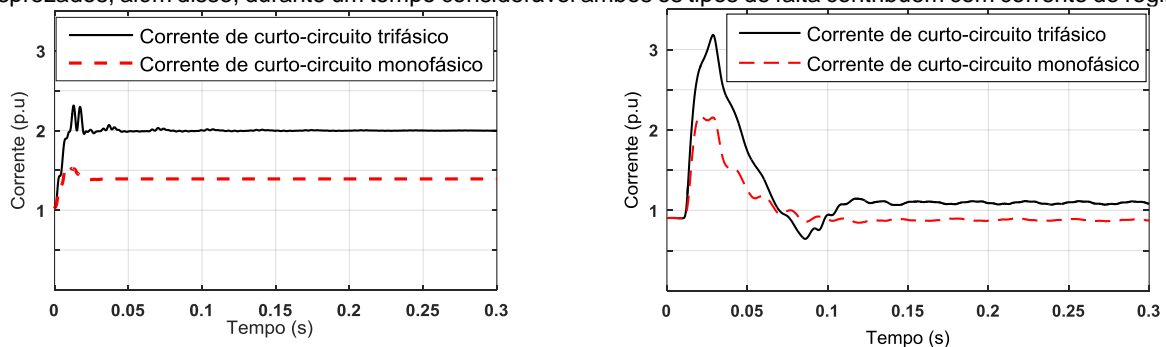


FIGURA 2 – Sistema teste 2

O DFIG e os geradores síncrono e de indução estão conectados em configuração estrela não aterrada (Y), portanto, durante curtos-circuitos monofásicos não há circulação de corrente de sequência zero pelo gerador. Para a conexão do gerador FV à rede de distribuição, utiliza-se um transformador trifásico de conexão  $Y_g:Y_g$  e tensão nominal 2,4 kV/0,26 kV. O uso da conexão  $Y_g$  nos dois lados do transformador é adequado para conectar geradores FVs à rede de distribuição pois reduz as sobretensões que podem surgir em decorrência de faltas à terra (8). Além disso, o controle dos geradores FVs é ajustado para que eles não contribuam com corrente de sequência zero. Os parâmetros dos geradores síncrono e de indução foram extraídos do exemplo *power\_machine*. Já os do painel FV e do inversor foram baseados no exemplo *power\_PVarray\_grid\_avg*. Os parâmetros do DFIG correspondem aos empregados no exemplo *power\_wind\_dfig\_det*. Todos os exemplos estão disponíveis no Matlab. As potências nominais dos geradores síncrono, de indução, FV e DFIG são, respectivamente, 3,125 MVA, 1,678 MVA, 0,10 MVA e 1,67 MVA. A contribuição de cada gerador é avaliada de forma independente, ou seja, os GDs não são conectados simultaneamente. Avaliam-se curtos-circuitos trifásicos e monofásicos, não simultâneos, e de resistência próxima de zero, aplicados às barras 129 e 25 do sistema teste da Figura 2.

## 5.0 - RESULTADOS

Verificam-se as características mais relevantes da corrente de curto-circuito derivada da aplicação de faltas trifásicas e monofásicas, não simultâneas, nos terminais do gerador FV e o DFIG. O comportamento da corrente de curto-circuito do gerador FV é ilustrado na Figura 3(a), em que as curvas mostram que para ambos os tipos de falta, os transitórios são rápidos e podem ser desprezados, sendo predominante uma corrente constante praticamente durante todo o período de duração da falta. Apresenta-se também na Figura 3(b) o comportamento da corrente de curto-circuito do DFIG. As curvas mostram que os transitórios são significativos, portanto, não podem ser desprezados, além disso, durante um tempo considerável ambos os tipos de falta contribuem com corrente de regime.



a) Gerador FV

b) DFIG

FIGURA 3 – Contribuição de corrente de curto-circuito dos geradores.

Por outra parte, a fim de avaliar a exatidão dos modelos simplificados, para cada tecnologia de GDs, apresenta-se a comparação entre os valores de contribuição de corrente de curto-circuito calculados a partir do respectivo modelo e os obtidos desde as simulações de transitório eletromagnético da rede elétrica testada. Os resultados são sumarizados para faltas trifásicas e monofásicas, na Tabela 6 e na Tabela 7, respectivamente. Apresentam-se também os erros relativos do modelo, o erro A e o erro B são dados pela equação [3] e [4], respectivamente.

$$ErroA = \frac{I_{ccG}(\text{Modelo}) - I_{ccG}(\text{Simulação})}{I_{ccG}(\text{Simulação})} \quad [3]$$

$$ErroB = \frac{I_{ccG}(\text{Modelo}) - I_{ccG}(\text{Simulação})}{I_{ccTotal}(\text{Simulação})} \quad [4]$$

Tabela 6 – Contribuição dos GDs à corrente de curto-circuito trifásico

Tecnologia de GF	Ciclo de Trabalho	Local da Falta									
		Barra 129					Barra 25				
		Modelo (A)	Simulação (A)	IccTotal (A)	Erro A (%)	Erro B (%)	Modelo (A)	Simulação (A)	IccTotal (A)	Erro A (%)	Erro B (%)
Gerador Síncrono	1	312,84	308,32	5.059,35	1,47	0,09	308,62	308,37	2.051,32	0,08	0,01
	2	788,88	772,00	11.770,00	2,19	0,14	611,07	607,20	3.662,00	0,64	0,10
	3	250,02	248,17	5.027,88	0,75	0,03	241,57	241,03	1.872,42	0,22	0,03
	4	243,40	241,83	4.939,49	0,65	0,03	234,71	234,66	1.847,32	0,02	0,00
Gerador de Indução	1	224,20	203,84	5.808,88	9,99	0,35	208,59	179,60	1.727,82	16,14	1,68
	2	555,23	408,50	11.370,00	35,92	1,29	412,92	346,80	3.346,00	19,07	1,98
	3	87,99	47,21	4.852,87	86,38	0,84	91,12	54,81	1.685,74	66,25	2,15
	4	Contribuição desprezível					Contribuição desprezível				
Gerador FV	1	4,62	4,57	4.979,41	1,09	0,00	4,62	4,59	1.689,38	0,65	0,00
	2			11.010,00					3.095,00		0,00
	3			48.18,93					1.651,80		0,00
	4			48.18,93					1.651,80		0,00
DFIG	1	83,96	75,38	4.890,76	11,38	0,18	85,98	85,31	1.715,78	0,79	0,78
	2	237,49	213,20	11.190,00	11,39	0,22	243,18	186,80	3.226,00	30,18	1,75
	3	43,77	28,75	4.828,13	52,24	0,31	40,78	20,25	1.644,38	101,38	1,25
	4	32,90	28,75	4.828,13	14,43	0,09	33,69	20,25	1.644,38	66,37	0,82

Os resultados apresentados mostram que em geral o modelo fornece valores mais elevados que os obtidos da simulação, caracterizando uma análise conservadora. No entanto, há erros que merecem maior atenção. Os maiores erros apresentam-se para o gerador de indução, porém eles são coerentes com os reportados por outros estudos de cálculo de curto-circuito realizados sob as orientações da norma IEC (29) - (30). Outro erro mais significativo é o apresentado para o DFIG para faltas monofásicas a jusante (barra 25). Contudo, comparativamente, considerando o valor da corrente de curto-circuito total, tal diferença não é prejudicial ao cálculo de curto-circuito.

Tabela 7 – Contribuição dos GDs à corrente de curto-circuito monofásico

Tecnologia de GF	Ciclo de Trabalho	Local da Falta									
		Barra 129					Barra 25				
		Modelo (A)	Simulação (A)	IccTotal (A)	Erro A (%)	Erro B (%)	Modelo (A)	Simulação (A)	IccTotal (A)	Erro A (%)	Erro B (%)
Gerador Síncrono	1	162,36	160,09	4.238,79	1,42	0,05	117,92	111,84	1.258,69	5,44	0,48
	2	381,78	365,67	9.045,00	4,41	0,18	230,45	220,51	2.388,00	4,51	0,42
	3	162,36	132,45	4.148,95	22,58	0,72	117,92	104,43	1.258,65	12,92	1,07
	4	162,36	132,45	4.143,29	22,58	0,72	117,92	104,43	1.256,88	12,92	1,07
Gerador de Indução	1	160,54	101,01	4.083,90	58,93	1,46	84,00	78,30	1.187,93	7,28	0,48
	2	375,74	140,90	8.810,00	166,67	2,67	166,22	108,30	2.237,00	53,48	2,59
	3	160,54	85,91	4.030,16	86,87	1,85	84,00	57,20	1.176,63	46,85	2,27
	4	160,54	58,65	4.014,60	173,73	2,5380	84,00	54,71	1.169,55	53,54	2,5044
Gerador FV	1	3,46	2,94	3.992,68	17,69	0,01	3,46	2,95	1.065,19	17,29	0,05
	2			8.677,00					2.166,00		0,02
	3			3.987,02					1.152,88		0,04
	4			3.986,44					1.152,23		0,04
DFIG	1	66,44	66,43	1.968,99	0,02	0,03	38,32	40,12	1.147,98	-4,42	0,04
	2	187,90	143,40	8.757,00	31,03	0,01	90,30	106,50	2.213,00	-15,21	0,02
	3	66,44	66,43	1.968,99	0,02	0,03	38,32	40,12	1.147,98	-4,42	0,04
	4	66,44	66,43	1.968,99	0,02	0,03	38,32	40,12	1.147,98	-4,42	0,04

## 6.0 - CONCLUSÕES

Este trabalho investigou as características de contribuição de corrente de curto-circuito e o uso de modelos simplificados baseados em uma fonte equivalente de tensão/corrente, para representar as principais tecnologias de


GDs em estudos de curto-circuito. As quatro tecnologias investigadas foram: geradores síncrono, de indução, FVs e DFIGs. Simulações de transitório eletromagnético foram realizadas para analisar a contribuição de corrente de curto-circuito e validar os modelos propostos. Os resultados mostram que em geral, a contribuição dos GDs poder ser estimada a partir dos modelos simplificados com aceitável exatidão. Contudo, destaca-se que os modelos são conservativos e a contribuição do gerador FV e o DFIG é altamente condicionada pelos seus sistemas de controle.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉCTRICA - ANEEL. **Resolução normativa nº. 687**. 2015.
- (2) JENKINS, N. A., R. CROSSLEY, P. K., D. STRBAC, G. **Embedded generation**. 1 ed. Institute of Electrical Engineers, 2000.
- (3) BOLJEVIC, S., CONLON, M. F. The contribution to distribution network short-circuit current level from the connection of distributed generation. **Universities Power Engineering Conference, 2008. UPEC 2008. 43rd International**. IEEE, p. 1-6. 2008.
- (4) Standard IEC 60909-2001. Short-Circuit Currents in Three-Phase AC Systems Part 0: Calculation of Currents. **Norma. Ginebra, Suíça**, p. 17-19, 2001.
- (5) Standard ANSI/IEEE C37.010. Application Guide for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis, **Norma**. 2005.
- (6) ADVANCED ENERGY. **Neutral connections and effective grounding**, 2013.
- (7) BARAN, M.; EI-MARKABY, I. Fault analysis on distribution feeders with distributed generators. **IEEE Power Engineering Society General Meeting**, 2006.
- (8) MOZINA, C. Impact of green power inverter-based distributed generation on distribution systems. em: **Protective Relay Engineers, 2014 67th Annual Conference for**. p. 264-278. 2014.
- (9) NEUMANN, T., ERLICH, I. Short circuit current contribution of a photovoltaic power plant. **IFAC Proceedings Volumes**, v. 45, n. 21, p. 343-348, 2012.
- (10) MULJADI, E. et al. Dynamic model validation of PV inverters under short-circuit conditions. em: **Green Technologies Conference, 2013 IEEE**. p. 98-104. 2013.
- (11) KELLER, James; KROPOSKI, Benjamin David. **Understanding fault characteristics of inverter-based distributed energy resources**. National Renewable Energy Laboratory, 2010.
- (12) BRAVO, R. J. **Transformerless solar pv inverters test report**. California, 2013.
- (13) BRAVO, R. J.; YINGER, R.; ROBLES, S. Three phase solar photovoltaic inverter testing. em: **Power and Energy Society General Meeting (PES), 2013 IEEE**. p. 1-5, 2013.
- (14) PEÑA, R., CARDENAS, R., ASHER, G. Overview of control systems for the operation of DFIGs in wind energy applications. **IECON 2013-39th Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society**. 2013. p. 88-95.
- (15) RAHIMI, M.; PARNIANI, M. Efficient control scheme of wind turbines with doubly fed induction generators for low-voltage ride-through capability enhancement. **IET Renewable Power Generation**, v. 4, p. 242-252, 2010.
- (16) SEMAN, S. et al. Analysis of a 1.7 MVA doubly fed wind-power induction generator during power systems disturbances. **Proceedings of NORPIE 2004**, p. 1-6, 2004.
- (17) SULLA, F.; SVENSSON, J.; SAMUELSSON, O. Symmetrical and unsymmetrical short-circuit current of squirrel-cage and doubly-fed induction generators. **Electric Power Systems Research**, v. 81, n. 7, p. 1610-1618, 2011.
- (18) ERLICH, I.; WREDE, H.; FELTES, C. Dynamic behavior of DFIG-based wind turbines during grid faults. em: **Power Conversion Conference, 2007. PCC'07. IEEE**. 2007. p. 1195-1200.
- (19) NASSIF, A., Assessing the Effectiveness of Feeder Overcurrent Protection with Large Penetration of Distributed Generation. em: **Proc. IEEE Electrical Power and Energy Conf**.
- (20) COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD, Integración de proyectos eólicos en sistemas eléctricos de potencia, **CIGRÉ – Comité Nacional Mexicano**, Irapuato – México. 2010.
- (21) STREZOSKI, L., PRICA, M., LOPARO, K. A. Generalized  $\Delta$ -Circuit Concept for Integration of Distributed Generators in Online Short-Circuit Calculations. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2016.
- (22) GEVORGIAN, V.; SINGH, M.; MULJADI, E. Symmetrical and unsymmetrical fault currents of a wind power plant. **2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting**. p. 1-8. 2012.
- (23) MULJADI, E.; GEVORGIAN, V. Short-circuit modeling of a wind power plant. **2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting**. p. 1-9. 2011.
- (24) MORREN, J.; DE HAAN, S. W. H. Short-circuit current of wind turbines with doubly fed induction generator. **IEEE Transactions on Energy conversion**, v. 22, n. 1, p. 174-180, 2007.
- (25) NASSER, D. T. **Power System Modelling and Fault Analysis**, 2008.
- (26) WALLING, R. A.; GURSOY, Ekrem; ENGLISH, B. Current contributions from Type 3 and Type 4 wind turbine generators during faults. em: **Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE**. p. 1-6. 2011.
- (27) MATHWORKS®, **SimPowerSystems: Model and Simulate Electrical Power Systems**. 2015.
- (28) TRINDADE, F. C. L.; DO NASCIMENTO, K. V.; VIEIRA, J. C. M. Investigation on voltage sags caused by DG anti-islanding protection. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 28, n. 2, p. 972-980, 2013.
- (29) CASTELLI-DEZZA, F.; SILVESTRI, A.; ZANINELLI, D. The IEC 909 standard and dynamic simulation of short-circuit currents. **International Transactions on Electrical Energy Systems**, v. 4, n. 3, p. 213-221, 1994.
- (30) BERIZZI, A. et al. Short-circuit current calculation: a comparison between methods of IEC and ANSI standards using dynamic simulation as reference. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 30, n. 4, p. 1099-1106, 1994.



## 8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

	<p>Kelyn B. Trujillo, nasceu na Colômbia em 1988, graduou-se em 2011 como engenharia em automação industrial na Universidade do Cauca (Colômbia), atualmente é estudante de Mestrado em Engenharia Elétrica na Universidade Estadual de Campinas. Tem experiência com engenharia de projetos na área de automação industrial, e como docente nas áreas de mecânica, elétrica e instrumentação industrial.</p>
	<p>Fernanda C. L. Trindade, nasceu em Bauru-SP, Brasil, em 1984, graduou-se em 2006 em engenharia elétrica pela Universidade Estadual Paulista (UNESP), campus Ilha Solteira. Obteve os títulos de mestrado e doutorado em engenharia elétrica, em 2009 e 2013, respectivamente, pela Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação (FEEC), da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). Desde 2015 é docente da FEEC/Unicamp e atualmente é bolsista produtividade CNPq - Nível 2, com 7 artigos publicados em revistas internacionais de elevado impacto e 25 artigos em congressos nacionais e internacionais. Tem colaboração internacional com o Departamento de Engenharia Elétrica e Computação da Universidade de Alberta, Canadá, e o grupo do Prof. Dr. Luis Ochoa, na Universidade de Melbourne. Entre as áreas de interesse da docente, está a integração de fontes renováveis aos sistemas de distribuição de energia elétrica, proteção e automação de sistemas de distribuição de energia elétrica, perdas não técnicas.</p>