

## **Grupo de Estudo de Sistemas de Distribuição-GDI**

### **Uma Revisão Completa da Normatização Nacional e Internacional para a Conexão de Geração Distribuída Fotovoltaica à Rede de Energia**

**LEONADO HENRIQUE DE MELO LEITE(1); JOHNNY MAFRA(1); LUCAS DE GODOI TEIXEIRA(1); PEDRO MACHADO ALESSI(2); FITec(1);CEB(2);**

#### RESUMO

A demanda por sistemas de Geração Distribuída, da qual a Geração Fotovoltaica é a mais representativa em termos de quantidade de sistemas e potência instalada, está em uma rampa exponencial de subida atualmente no Brasil. Isto motivou as entidades normalizadoras e regulatórias nacionais a acompanhar um movimento já feito internacionalmente de elaborar as normas adequadas para a interconexão da Geração Distribuída na rede de distribuição, com atenção especial à rede de baixa tensão. Parâmetros como regulação de tensão, fator de potência, qualidade de energia, proteção e segurança foram contemplados nessa normatização. Este trabalho faz um levantamento completo das normas nacionais e internacionais de maior relevância e faz uma comparação entre elas. Isso permite uma visão geral das diversas nuances envolvidas na conexão de Geração Distribuída na rede, incluindo os requisitos técnicos, procedimentos e impactos.

#### PALAVRAS-CHAVE

Geração Fotovoltaica, Geração Distribuída, Normatização, Códigos de Rede e Interconexão

#### 1.0 - INTRODUÇÃO

A crescente demanda por sistemas fotovoltaicos em todo mundo tem sido motivada pela necessidade de diversificação da matriz energética global, pela maior consciência do consumidor na utilização de energias renováveis e pelos incentivos financeiros e fiscais oferecidos por alguns países para fomentar o uso de energias menos poluentes. Essa demanda acarreta o aumento em escala da produção de componentes dos sistemas fotovoltaicos, provocando a diminuição dos custos de implantação e manutenção das plantas de geração. Em adição à redução de custos, o aumento da demanda provoca esforços contínuos para aumentar a confiabilidade dos componentes, dos projetos e das instalações de sistemas fotovoltaicos.

Esse cenário favorável, impulsionado pela redução de custos e aumento da confiabilidade dos sistemas fotovoltaicos, tem possibilitado uma expressiva penetração de Geração Distribuída Fotovoltaica (GDFV) conectada às redes de distribuição das concessionárias de energia elétrica em vários países do mundo.

A conexão dos sistemas de geração distribuída, que podem variar de poucos kW a dezenas de MW, às redes de distribuição devem estar de acordo com uma série de requisitos técnicos e regulatórios, a fim de minimizar os impactos causados, e garantir a segurança e a qualidade do fornecimento de energia elétrica e de seus operadores.

Tipicamente, normas regulatórias locais impostas pelos operadores de rede são aplicadas em vários países. Entretanto, há um esforço global para normatização de requisitos mínimos para a conexão desses sistemas às redes de energia, que possam ser utilizados como referência no mundo, respeitando as especificidades das redes de energia de cada país e do modo como são operadas.

Das normas internacionais, as mais amplamente reconhecidas e utilizadas são a IEEE 1547 (1) e IEC 61727 (2). O padrão IEEE 1547 inclui especificações técnicas e testes para a interligação de recursos distribuídos com potência inferior a 10 MVA. A IEC 61727 aplica-se a interligação de sistemas fotovoltaicos com capacidade nominal abaixo de 10 kVA, à redes de baixa tensão. Outro padrão internacional, IEEE 929 (3), foi desenvolvido especificamente para sistemas fotovoltaicos. Ele fornece orientações práticas para a operação de sistemas compatíveis de pequeno porte, abaixo de 10 kW, quando conectado a um sistema de energia, abrangendo a segurança pessoal, a proteção do equipamento, qualidade de energia e a operação da rede de distribuição (4). A

Alemanha, devido ao seu estágio avançado de fabricação, instalação e operação de sistemas de geração fotovoltaicos conectados à rede, é o país que apresenta um código de rede mais completo e atualizado, servindo como referência para vários estudos em todo o mundo. O código de rede alemão VDE-AR-N 4105 (5) sumariza os aspectos essenciais que devem ser levados em consideração para a conexão de sistemas de geração de energia à rede de baixa tensão. Esse código tem sido adotado por provedores de energia em todo mundo por flexibilizar a atuação dos equipamentos inversores, possibilitando que a fonte de geração distribuída exerça funções auxiliares visando garantir a estabilidade da rede.

No Brasil, a conexão de fontes de geração distribuída, em especial as fontes fotovoltaicas, tem sido disciplinada pela ANEEL através dos Procedimentos de Rede (PRODIST) e resoluções, com destaque para as resoluções ANEEL 482/12 (6) e 687/15 (7). A ABNT 16149 (8) estabelece as recomendações específicas e os requisitos técnicos para a interface de conexão entre os inversores dos sistemas fotovoltaicos e a rede de distribuição de energia elétrica. Baseado nessas resoluções e padronizações, as próprias concessionárias de energia têm estabelecido as suas normas de distribuição, com o esclarecimento dos requisitos necessários ao acesso dos geradores distribuídos às suas respectivas redes de energia.

Esse trabalho apresenta uma visão geral da normatização nacional e internacional sobre as regras de conexão das fontes de geração distribuída, em especial às fontes fotovoltaicas, ao sistema elétrico de potência e faz uma análise comparativa dos principais requisitos de conexão entre as normas usualmente empregadas.

## 2.0 - NORMATIZAÇÃO GDFV

### 2.1 Normatização Internacional

#### 2.1.1 IEEE 1547 - *Interconnection of Distributed Generation*

A IEEE 1547 é a única norma a nível sistêmico dos Estados Unidos para a interconexão de geração distribuída e é recomendado o seu uso no *Energy Policy Act* de 2005 pelo governo federal (9). Ela trata da especificação do sistema de interconexão e dos seus requisitos de teste com relação à regulação de tensão, aterramento, desconexões, monitoramento, ilhamento, variação de frequência, sincronização, EMI (*Electromagnetic Interference*), resistência a surtos, injeção de corrente contínua, harmônicos e reconexão. A IEEE 1547 é composta de uma série de normas:

- ✓ IEEE 1547 2018 – *Standard for interconnecting distributed resources with electric power systems*. É agnóstica em relação à tecnologia de geração distribuída, apresentando as especificações de desempenho, operação, teste, considerações sobre segurança e manutenção da interconexão. Também inclui respostas a condições anormais, qualidade de energia, ilhamento, além de requisitos para projeto, instalação, avaliação, comissionamento e testes periódicos. Se aplica às conexões de 10 MVA ou menos, em tensões de distribuição primárias ou secundárias.
- ✓ IEEE 1547.1 2005 – *Standard for conformance tests procedures for equipment interconnecting distributed resources with electric power systems*. Apresenta a especificação de testes de conformidade, produção, comissionamento e testes periódicos. Os testes contemplam estabilidade com temperatura, resposta a condições anormais de tensão e frequência, sincronização, integridade da interconexão, limite de injeção de CC para inversores sem transformadores de interconexão, ilhamento não intencional, potência reversa para ilhamento não intencional, fase aberta, reconexão após abertura devido a condições anormais, harmônicos e flicker.
- ✓ IEEE 1547.2 2008 – *Application guide for IEEE 1547 standard for interconnecting distributed resources with electric power systems*. Fornece subsídios para os requisitos da IEEE 1547 através de dicas, técnicas e regras práticas. Ela inclui um racional para os requisitos da 1547 e fornece descrições técnicas, esquemáticos, guias de aplicação e exemplos de interconexão para facilitar o uso da 1547.
- ✓ IEEE 1547.3 2007 – *Guide for monitoring information exchange, and control of distributed resources with electric power systems*. Define uma interface e fornece um modelo de troca de informação para suporte das comunicações e interoperabilidade. Usa uma abordagem de sistemas abertos e fornece também casos de uso e exemplos, como despacho de geração distribuída, manutenção, serviços auxiliares e fornecimento de reativo. Usa o UML (Unified Modeling Language) como formato para o modelo de informação e o modelo OSI (Open System Interconnection) para os protocolos.
- ✓ IEEE 1547.4 2011 – *Guide for design, operation and integration of distributed resources island systems with electric power systems*. Fornece soluções e boas práticas para o projeto, operação e integração de microgrids ou sistemas autônomos (*stand alone* ou *off grid*), interconectados com a rede de distribuição. Esta norma especifica a desconexão e reconexão à rede de distribuição enquanto é fornecida energia para os consumidores adjacentes. Ela foi especialmente desenvolvida para mitigar a falta de informação acerca de ilhamentos intencionais.
- ✓ IEEE 1547.6 2011 – *Recommended practice for interconnecting distributed resources with electric power systems distribution secondary networks*. Fornece as práticas recomendadas para redes de distribuição secundárias, que não estão no escopo da 1547. Apresenta uma visão geral do projeto de sistemas de rede de distribuição secundária, seus componentes e operação. Descreve considerações para a

interconexão da geração distribuída com a rede e fornece soluções em potencial para essa interconexão. Esta norma se aplica para circuitos de baixa tensão apenas e não contempla a proteção da GD (Geração Distribuída) do consumidor.

- ✓ IEEE 1547.7 2013 – *Guide to conducting distribution impact studies for distributed resource interconnection*. Apresenta critérios para estudos sobre o impacto de GD na rede de distribuição. Tradicionalmente os sistemas de potência não foram projetados para acomodar geração no nível da distribuição. No entanto, o aumento da adoção de GD resulta na necessidade de avaliar este impacto.

### 2.1.2 IEC 61727 - Characteristics of Utility Interface

Essa norma aplica-se à GDFV com potência de até 10 kVA interconectado à rede de energia através de inversores estáticos com função anti-ilhamento. Estabelece requisitos relativos aos limites de variação de tensão e frequência, flicker, injeção de componente de corrente contínua, distorção harmônica e fator de potência. Além disso, estabelece requisitos relacionados à segurança pessoal e proteção de equipamentos: contingência na rede de distribuição, proteção anti-ilhamento, proteção contra sub e sobre tensão, aterramento, proteção contra curto circuito e isolamento da fonte fotovoltaica.

### 2.1.3 EN 50438 - Requirements for the connection of micro-generators in parallel with public low-voltage distribution systems

Esta norma foi publicada em 2001 e a revisão mais recente é de 2013. Determina os requisitos técnicos para conexão e operação de qualquer micro gerador de até 50 kW nos sistemas de distribuição de baixa tensão. A sua vantagem principal é que qualquer tipo de micro gerador fabricado e testado de acordo com ela estará apto a acessar o sistema de baixa tensão. Ela apresenta os requisitos para conexão, qualidade de energia, operação, segurança e comissionamento (10).

### 2.1.4 Código de Rede Alemão VDE-AR-N 4105

A Alemanha, devido ao seu estágio avançado de fabricação, instalação e operação de sistemas de geração fotovoltaicos conectados à rede, é o país que apresenta um código de rede mais completo e atualizado, servindo como referência para vários estudos em todo o mundo. O código de rede alemão VDE-AR-N 4105 – “*Power generation systems connected to the low-voltage distribution network - Technical minimum requirements for the connection to and parallel operation with low-voltage distribution networks*” – como já dito, sumariza os aspectos essenciais que devem ser levados em consideração para a conexão de sistemas de geração de energia à rede de baixa tensão. Esse código também tem sido adotado por flexibilizar a atuação dos equipamentos inversores, possibilitando que a fonte de geração distribuída exerça funções auxiliares visando garantir a estabilidade da rede. Também limita a aplicação aos níveis de tensão até 1 kV e potência de até 100 kVA. Os principais requisitos para a interconexão de GDFV são a determinação do ponto de conexão de geradores distribuídos, os níveis de variação de tensão e frequência, os níveis de componentes harmônicas e CC, a reação das fontes de geração distribuída frente a oscilações na rede de distribuição (desconexão x resiliência), os princípios de suporte à rede baseado em fluxo de potência reativa e a proteção e sincronismo com a rede.

## 2.2 Normatização Nacional

### 2.1.5 Resoluções Normativas ANEEL – Micro e Mini Geração Distribuída

A Resolução Normativa n° 482, de 17/04/2012 foi o marco regulatório que possibilitou o acesso de micro e mini geradores aos sistemas nacionais de distribuição de energia, criando as regras que compensam o consumidor pela energia elétrica injetada na rede pelas suas fontes de geração distribuída. Posteriormente, em 24/11/2015, essa resolução foi atualizada pela resolução N° 687, impactando diretamente sobre o mercado de energia elétrica para os micro e mini geradores distribuídos, a partir da criação de novos nichos de consumidores e possibilidades de negócios. A Tabela 1 resume as principais características que disciplinam as fontes de GD.

Tabela 1- Características Gerais dos Sistemas de GD – Resoluções Aneel 482/12 e 687/15

Característica	Definição
Tecnologia de GD	Hídrica, solar, eólica, biomassa e cogeração qualificada
Potência do Sistema de GD	Microgeração: $P < 75 \text{ kW}$ Minigeração: $75 \text{ kW} < P < 5 \text{ MW}$
Sistema de compensação	Net metering
Prazo para utilização dos créditos de energia	60 meses

Modalidade de Compensação de Créditos de Energia	Autoconsumo Autoconsumo remoto Empreendimento com múltiplas unidades consumidoras Geração Compartilhada
Período para aprovação do sistema de Geração junto à concessionária	34 dias
Limite Potência do Sistema de Geração	Calculado pelo valor da capacidade de corrente do disjuntor geral pela tensão nominal, disponíveis no ramal de entrada da UC

### 2.1.6 ABNT NBR 16149

A ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) através da norma NBR 16149 estabelece as recomendações específicas e os requisitos técnicos para a interface de conexão entre os sistemas fotovoltaicos e a rede de distribuição de energia elétrica no Brasil, dentre eles:

- ✓ Faixas operacionais de tensão e frequência no ponto de conexão
- ✓ Limites de Cintilação (flicker)
- ✓ Proteção de injeção de componente de corrente contínua na rede elétrica
- ✓ Harmônicos e distorção da forma de onda da potência injetada na rede
- ✓ Fator de potência e injeção/demanda de potência reativa no ponto de conexão
- ✓ Segurança pessoal e proteção do sistema fotovoltaico
- ✓ Controle externo do sistema fotovoltaico
- ✓ Requisitos de suportabilidade a subtensões decorrentes de faltas na rede (FRTC - Fault Ride Through Capability)

### 2.1.7 Procedimentos da Distribuição (PRODIST)

O objetivo do Módulo 3 do PRODIST (11) é estabelecer os requisitos técnicos, operacionais e informativos para acessos aos sistemas de distribuição. Para a aprovação da solicitação do acesso ao sistema elétrico é necessário respeitar os estágios propostos pelo regimento.

O módulo 8 do PRODIST (12) estabelece os indicadores e metas de qualidade relativos ao fornecimento de energia elétrica para agentes distribuidores, sendo subdividido em duas partes: Qualidade do Produto (QP) e Qualidade do Serviço (QS).

O segmento de Qualidade do Produto é caracterizado basicamente pela forma de onda de tensão dos componentes de um sistema trifásico. Para a unidade consumidora acessante (GD), os padrões deverão seguir a determinação estabelecida no regimento da rede a qual se deseja conectar em termos de: Tensão em Regime Permanente, Fator de Potência (FP), Distorções Harmônicas, Desequilíbrio de Tensão, Flutuação de Tensão, Variação de Frequência e Variação de Tensão de Curta Duração.

O segmento de Qualidade de Serviço aborda as questões relacionadas à continuidade de fornecimento, lidando basicamente com as interrupções no sistema elétrico, sendo elas ocasionadas por falhas elétricas ou por atividades de manutenção programada. No que se refere às fontes de GD, estas não devem interferir na qualidade de serviço da rede na qual estão conectadas, com especial atenção aos possíveis impactos nos indicadores de continuidade, relacionados à duração e frequência da interrupção do suprimento de energia nas unidades consumidoras. Na presença de distúrbios na rede, os geradores conectados através de inversores devem, via de regra, se desconectar do sistema até que a contingência seja mitigada.

## 3.0 - REQUISITOS GERAIS PARA A INTERCONEXÃO COM A REDE

### 3.1 Desvio de Tensão

O desvio de tensão tem como referência a tensão nominal no ponto de conexão da fonte de GD à rede de distribuição. O inversor é o responsável pelo contínuo sensoriamento das condições da rede, provocando a desconexão ou a reconexão do sistema de GD. O tempo de desconexão refere-se ao tempo entre a ocorrência da condição anormal na rede e a interrupção do fornecimento de energia pelo inversor a essa mesma rede. Quando a tensão da rede de distribuição sai da faixa de operação especificada na Tabela 2, o sistema fotovoltaico deve parar de fornecer energia à rede, dentro do limite de tempo especificado.

Tabela 2- Limites de Variação de Tensão

IEEE 1547	IEC 61727	VDE-AR-N 4105	ABNT 16149
-----------	-----------	---------------	------------

Faixa de Tensão (% VN)	Tempo de Desc. (seg.)	Faixa de Tensão (% VN)	Tempo de Desc. (seg.)	Faixa de Tensão (% VN)	Tempo de Desc. (seg.)	Faixa de Tensão (% VN)	Tempo de Desc. (seg.)
$V < 50$	0,16	$V < 50$	0,10	$V < 80$	0,10	$V < 80$	0,4
$50 \leq V \leq 88$	2,00	$50 \leq V \leq 85$	2,00	$V \geq 110$	0,10	$V \geq 110$	0,2
$110 < V < 120$	1,00	$110 < V < 135$	2,00				
$V \geq 120$	0,16	$V \geq 135$	0,05				

### 3.2 Desvio de Frequência

A variação de frequência é um problema comum que afeta o sistema de potência causado principalmente pelo desbalanceamento da relação entre a produção de energia e o consumo. A Tabela 3 apresenta os requisitos para a desconexão da GD na ocorrência de desvio de frequência na rede.

Tabela 3- Limites de Variação de Frequência

IEEE 1547		IEC 61727		VDE-AR-N 4105		ABNT 16149	
Faixa de Frequência (Hz)	Tempo de Desc. (seg.)	Faixa de Frequência (Hz)	Tempo de Desc. (seg.)	Faixa de Frequência (Hz)	Tempo de Desc. (seg.)	Faixa de Frequência (Hz)	Tempo de Desc. (seg.)
$f < 59,3$	0,16	$f < f_n - 1$	0,2	$f < 47,5$	0,2	$f < 57,5$	0,2
$f > 60,5$		$f > f_n + 1$		$f > 51,5$		$f > 62$	

### 3.3 Reconexão após Trip

Após a desconexão causada pela ocorrência de um evento anormal de tensão ou corrente, o inversor poderá estabelecer a reconexão da planta de GD, desde que atendidas as condições estabelecidas na

Tabela 4- Limites de Variação de Frequência

IEEE 1547	IEC 61727	VDE-AR-N 4105	ABNT 16149
$88 < V < 110 (\%)$	$85 < V < 110 (\%)$	$85 < V < 110 (\%)$	$80 < V < 110 (\%)$
$59,3 < f < 60,5 (Hz)$	$f_n - 1 < f < f_n + 1 (Hz)$	$47,5 < f < 50,05 (Hz)$	$57,5 < f < 60,1 (Hz)$
	Tempo mínimo de 3 min.	Tempo mínimo de 5 seg.	Tempo mínimo de 20 seg.

### 3.4 Qualidade de Energia

#### 3.4.1 Injeção de Corrente Contínua

A injeção de corrente contínua na rede de distribuição introduzida pela GD pode causar a saturação de transformadores, causando sobreaquecimento devido à injeção de harmônicos e até mesmo desconexões indesejadas. Esse problema é minimizado nos sistemas fotovoltaicos tradicionais com isolamento galvânica, porém requer atenção para as novas tecnologias de inversores sem transformadores. Os limites de injeção de corrente contínua são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5- Limites de Injeção de Corrente Contínua

IEEE 1547 ( $I_{dc}$ )	IEC 61727 ( $I_{dc}$ )	VDE-AR-N 4105 ( $I_{dc}$ )	ABNT 16149 ( $I_{dc}$ )
$\leq 0,5\% I_{RMS}$	$\leq 1\% I_{RMS}$	Não especificado	$\leq 0,5\% I_{RM}$

#### 3.4.2 Flutuação de Tensão

Flutuações de tensão são variações aleatórias, repetitivas ou esporádicas do valor eficaz da tensão, causadas principalmente por partida de motores e chaveamentos de cargas industriais de maior potência, operação de laminadores e de fornos a arco para produção de aço. Os efeitos nos sistemas elétricos são oscilações de

potência e do torque das máquinas elétricas, queda de rendimento dos equipamentos eletroeletrônicos, interferência nos sistemas de proteção e cintilação luminosa ou flicker. O Módulo 8 do PRODIST estabelece como referência para a flutuação de tensão os valores apresentados na Tabela 6.

Tabela 6- Valores de Referência para Limites de Flutuação de tensão

Valor de Referência	PstD95%)	PltS95%
Adequado	< 1 p.u. / FT	< 0,8 p.u. / FT
Precário	1 p.u. – 2 p.u. / FT	0,8 – 1,6 p.u. / FT
Crítico	> 2 p.u. / FT	> 1,6 p.u. / FT

Em que:

Pst: Severidade de Curta Duração.

Plt: Severidade de Longa Duração.

PstD95%: Valor diário do indicador Pst que foi superado em apenas 5 % dos registros obtidos no período de 24 hs.

PltS95%: Valor semanal do indicador Plt que foi superado em apenas 5 % dos registros obtidos no período de sete dias completos e consecutivos.

FT: Fator de Transferência calculado pela relação entre o valor do PltS95% do barramento do sistema de distribuição e o valor do PltS95% do barramento da tensão secundária de baixa tensão de distribuição eletricamente mais próximo.

### 3.4.3 Harmônicos

Sistemas Fotovoltaicos são conectados aos sistemas elétricos por meio de inversores, causando distorção harmônica. Embora a distorção não seja significativa em todas as correntes harmônicas, este fenômeno ainda pode afetar a qualidade de energia dos sistemas de distribuição. Neste critério, as normas disponíveis são similares. A Tabela 7, Tabela 8 e TABELA 9 apresentam os limites de corrente harmônica referentes aos requisitos das normas IEEE 1547, IEC 61727, VDE-AR-N 4105 e ABNT 16149, respectivamente.

Tabela 7- Limites de Corrente Harmônica - IEEE 1547 e IEC 61727

Harmônicos de Ordem Impar	h < 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 < h	THD (%)
%	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5

Tabela 8- Limites de Corrente Harmônica VDE-AR-N 4105

Harmônicos	Corrente Harmônica Máxima baseada na Corrente de Curto Circuito [A/MVA]
3	3
5	1,5
7	1
9	0,7
11	0,5
13	0,4
17	0,3
19	0,25
23	0,2
25	0,15
25 ≤ h < 40	0,15 x 25/h
Pares	1,5 /h

TABELA 9 - LIMITES DE CORRENTE HARMÔNICA ABNT 16149

Harmônicos	Limite de Distorção
Ímpares	Limite
3 <sup>a</sup> . a 9 <sup>a</sup> .	< 4 %
11 <sup>a</sup> . a 15 <sup>a</sup> .	< 2 %
17 <sup>a</sup> . a 21 <sup>a</sup> .	< 1,5 %
23 <sup>a</sup> . a 33 <sup>a</sup> .	< 0,6 %

Pares	Limite
2ª. a 8ª.	< 1,0 %
10ª. a 32ª.	< 0,5 %

### 3.4.4 Fator de Potência (FP)

A maioria dos documentos normativos internacionais requer que o FP exceda 0,9, e que a potência de saída do sistema deve ser maior que 50% da potência nominal do inversor, conforme relatado na IEC 61727 e na IEEE 1547.

No cenário nacional, a norma brasileira ABNT 16149 apresenta requisitos específicos para o ajuste de injeção/demanda de potência reativa pelos sistemas FV. Em geral, quando a potência ativa injetada na rede for superior a 20% da potência nominal do inversor, o sistema fotovoltaico deve ser capaz de operar dentro das faixas de fator de potência determinadas, de acordo com a capacidade do sistema. Este critério é baseado na norma VDE-AR-N4105.

Para sistemas fotovoltaicos com potência nominal menor ou igual a 3 kW o fator de potência pode ter tolerância de trabalho na faixa de 0,98 indutivo até 0,98 capacitivo. Para sistemas com potência nominal superior a 3 kW, o inversor deve apresentar, como opcional, a possibilidade de operar de acordo com a curva da Figura 1 - (a), e com fator de potência ajustável de 0,95 indutivo e 0,95 capacitivo. Para sistemas fotovoltaicos com potência nominal maior de 6 kW, além da curva apresentada anteriormente com fator de potência ajustável de 0,9 indutivo a 0,9 capacitivo, o inversor deve apresentar, como opcional, a possibilidade de operar com o controle de potência reativa (var) de acordo com a curva da Figura 1 - (b).

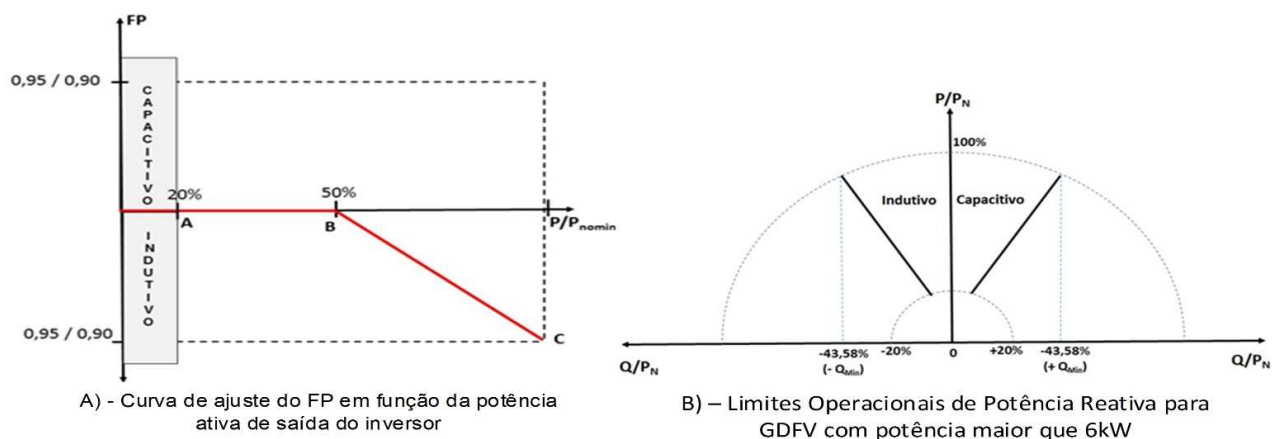


Figura 1 - Curvas de ajuste do fator de potência

## 4.0 - CONCLUSÃO

A inserção de geração distribuída fotovoltaica na rede de distribuição tem crescido nos últimos anos, impulsionada pelos avanços na indústria fotovoltaica e consequente redução de preços dos sistemas, pelas políticas regulatórias mais favoráveis e a conscientização dos próprios consumidores pelo uso de energia de fontes renováveis. Contudo, cenários de inserção em larga escala de sistemas fotovoltaicos pode acarretar em impactos técnicos adversos na qualidade da energia, na coordenação da proteção, na regulação de tensão e nas perdas técnicas, representando grandes desafios na operação das redes de distribuição.

Centros de pesquisa, a indústria e as próprias concessionárias de energia têm buscado aperfeiçoar a padronização e os códigos de rede aplicado à conexão de recursos distribuídos. Algumas normas internacionais como a IEEE 1547 e IEC 61727 têm sido adotadas como referência para a concepção das normas e procedimentos locais, as quais exigem adaptações face à topologia da rede e a natureza dos problemas enfrentados por diferentes países.

No Brasil, embora a inserção da GDFV seja ainda incipiente, a projeção é que sejam inseridos cerca de 3,5 GWp até 2026, o que tem motivado a discussão dos potenciais impactos dessas fontes, a necessidade de regras de conexão bem definidas e os possíveis métodos de mitigação frente a impactos adversos. A utilização dos inversores das fontes de GDFV para suporte aos serviços ancilares também é um assunto que está sendo investigado.

As normas de interconexão, em geral, apresentam as especificações e os requisitos relacionados à qualidade de energia, proteção da rede e segurança dos operadores e usuários. Esse estudo apresentou uma revisão sumarizada e objetiva das normas nacionais e internacionais mais relevantes e uma comparação dos principais

requisitos para interconexão com a rede, servindo como uma referência para o desenvolvimento e aperfeiçoamento das normas e códigos de rede a serem adotados pelas distribuidoras.

## 5.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores desse trabalho agradecem a Companhia Energética de Brasília - CEB Distribuição, a FITec – Fundação para Inovações Tecnológicas e a ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, por proverem as informações e os recursos necessários para a realização desse trabalho.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) IEEE 1547-2018 - Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems. New York.. 15, February, 2018.
- (2) IEC 61727- Photovoltaic (PV) Systems – Characteristics of the utility Interface. Switzerland: IEC – International Electrotechnical Commission, 2004.
- (3) IEEE 929-2000 - IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems, 2000.
- (4) YUAN-KANG. Standards and Guidelines for Grid-Connected Photovoltaic Generation Systems: A Review and Comparison. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 53, NO. 4, JULY/AUGUST 2017.
- (5) VDE AR-N 4105 - Power generation systems connected to the low-voltage distribution network - Technical minimum requirements for the connection to and parallel operation with low-voltage distribution networks, 2011.
- (6) Resolução Normativa ANEEL 482/2012. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Brasília, 2012.
- (7) Resolução Normativa ANEEL 687/2015. (2015). Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Brasília, 2015.
- (8) NBR ABNT 16149 - Sistema Fotovoltaicos (FV) - Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013.
- (9) Basso, T. IEEE 1547 and 2030 Standards for Distributed Energy Resources Interconnection and Interoperability with the Electricity Grid. NREL - National Renewable Energy Laboratory. Denver: NREL, 2014.
- (10) EN 50438. (2007). REQUIREMENTS FOR THE CONNECTION OF MICROGENERATORS IN PARALLEL WITH PUBLIC LOW-VOLTAGE DISTRIBUTION SYSTEMS. CENELEC: European Committee for Electrotechnical Standardization, Brussel, Belgium, 2007.
- (11) Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Módulo 3 – cesso ao Sistema de Distribuição. Revisão 7, 01/06/2017.
- (12) Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. Revisão 10, 01/01/2018

## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



utor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG – Engenharia Elétrica (UFMG – 2005). Graduação em Engenharia Elétrica (UFMG – letricista Sênior da FITec – Fundações para Inovações Tecnológicas – há 18 anos, denador Técnico de diversos projetos no campo da Engenharia Elétrica em ergia e empresas do setor. Professor do Curso de Pós Graduação da PUC-MG. Áreas o: Geração Distribuída de Energia, Redes Inteligentes de Energia (*Smart Grids*), nováveis, Automação de Sistemas Elétricos de Potência, Co-Simulação de Sistemas unicações.



**Johnny Mafra:** Graduação em Engenharia Elétrica pela UFMG (1988) e Mestrado em Engenharia Elétrica pela USP (1992). Consultor Técnico Sênior na FITec com 30 anos de experiência em P&D e em Gestão e Planejamento. Engenharia de produtos eletrônicos, incluindo EMI e EMC, projetos para o setor de energia elétrica, Smart Cities e IoT em conjunto com parceiros no Brasil, Estados Unidos, Europa e China. Membro de Grupos de Trabalho da ABNT e Inmetro.

**Lucas Teixeira:** Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG – junho/2019). Possui Graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP – Campus João Monlevade 2017). Atualmente é Especialista em Engenharia de Sistemas na FITec - Fundação para Inovações Tecnológicas. Atua e tem interesse em Sistemas Reais de Distribuição de Energia, Redes Inteligentes e Recursos Energéticos Distribuídos.

**Pedro Machado Alessi:** Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU 2008). Possui MBA em Gestão de Projetos pela Fundação Getúlio Vargas (2019). Engenheiro Eletricista da CEB – Companhia Energética de Brasília, desde 2010, onde atua no Gerenciamento do Planejamento Elétrico.