

# ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE MÉTODOS PASSIVOS DE PROTEÇÃO ANTI-ILHAMENTO APLICADOS À SISTEMAS FOTOVOLTAICOS MONOFÁSICOS

Leonardo Severo, Roberto F. Coelho, Denizar C. Martins

Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC

Departamento de Engenharia Elétrica

Instituto de Eletrônica de Potência, INEP

Florianópolis, SC, Brasil

e-mails: [lsevero@inep.ufsc.br](mailto:lsevero@inep.ufsc.br); [roberto@inep.ufsc.br](mailto:roberto@inep.ufsc.br); [denizar@inep.ufsc.br](mailto:denizar@inep.ufsc.br)

**Resumo** - Este artigo apresenta uma síntese da implementação de métodos passivos de detecção de ilhamento por frequência e tensão e, detecção por salto de fase da tensão, em um sistema fotovoltaico monofásico de 1kW. O processador eletrônico empregado utiliza uma estrutura ponte-completa convencional operando em modo de injeção de corrente na rede elétrica. É realizado um estudo detalhado sobre sua modelagem, assim como executado a montagem de um protótipo de laboratório e, conseqüentemente, os respectivos testes de detecção de ilhamento de acordo com a norma IEEE Std 929-2000.

**Palavras-Chave** - Tecnologia Fotovoltaica, Conversor CC-CA, Anti-Ilhamento.

## STUDY AND IMPLEMENTATION OF PASSIVE ANTI-ISLANDING PROTECTION SCHEMES APPLIED TO SINGLE-PHASE PV SYSTEMS

**Abstract** - This paper provides an overview of implementation of frequency and voltage passive method for anti-islanding protection with passive detection voltage phase jump in a 1kW single-phase PV system. The electronic processor uses a full-bridge structure operating in the conventional mode of injection current in the utility grid. Detailed study is made of its modeling, as well as the assembly of a laboratory prototype, and consequently their anti-islanding protection tests according to IEEE Std 929-2000.

**Keywords** - PV Technology, DC-AC Converters, Anti-islanding.

### NOMENCLATURA

$Q_f$	Fator de qualidade da carga de teste.
$F_{nom}$	Frequência nominal do sistema elétrico.
$F_{max}$	Sobrefrequência da rede elétrica.
$F_{min}$	Subfrequência da rede elétrica.
$V_{nom}$	Tensão nominal do sistema.
$V_{max}$	Sobretensão da rede elétrica.
$V_{min}$	Subtensão da rede elétrica.
$\Delta P$	Variação de potência ativa no PCC.
$\Delta Q$	Variação de potência reativa no PCC.

$P_{inv}$	Potência ativa injetada pelo conversor.
$Q_{inv}$	Potência reativa injetada pelo conversor.
$P_{carga}$	Potência ativa consumida pela carga de teste.
$Q_{carga}$	Potência reativa da carga de teste.
$\Delta P/P$	Incompatibilidade de potência ativa.
$\Delta Q/P$	Incompatibilidade de potência reativa.

## I. INTRODUÇÃO

O sistema elétrico atual possui sua filosofia de fornecimento de energia centralizada, em que somente uma fonte de energia principal (planta de potência) fornece energia para certos centros consumidores. Tais fontes de energia são tradicionais e correspondem, no Brasil, às grandes centrais hidrelétricas, termoeletricas, etc. Essa estratégia de fornecimento é antiga e foi concebida numa época em que as fontes renováveis de energia e os Sistemas de Geração Distribuídos (SGD) ainda não tinham despertado o interesse dos grandes investidores em geração e distribuição de energia e, não havia novas formas de geração de energia elétrica em grande escala.

Com o advento das fontes alternativas de energia e, sua conexão no sistema elétrico de potência (SEP), a estratégia de fornecimento têm sido lentamente adaptada para um abastecimento mais distribuído. Essas duas filosofias de abastecimento são ilustradas na Fig. 1 [1].

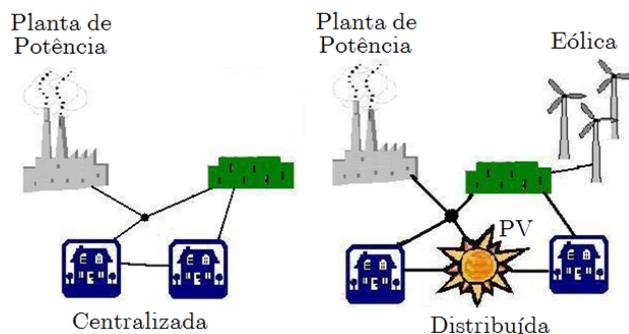


Fig. 1. Filosofia de abastecimento centralizada e distribuída.

Por outro lado, a mudança da estratégia de abastecimento vem acompanhada de alguns problemas e dificuldades que antigamente não eram contabilizados. Essas dificuldades ocorrem porque o SEP foi originalmente projetado para operar de forma centralizada, e não distribuída como no futuro, provavelmente, virá a se tornar. Um desses inconvenientes é a formação de ilhas no

sistema elétrico que ocorrem no desligamento do fornecimento da energia elétrica [1]. Tal evento é ilustrado na Fig. 2.

O propósito deste artigo é aplicar os métodos passivos de detecção de ilhamento por tensão e frequência e, detecção por salto de fase da tensão, no intuito de atender aos requisitos do projeto listado a seguir.

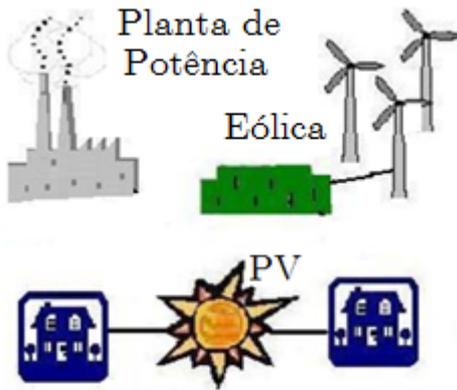


Fig. 2. Formação de ilhas no Sistema Elétrico de Potência.

- O método de detecção de ilhamento não pode distorcer a corrente de saída do conversor. Atualmente, o sistema elétrico já possui considerável nível de ruídos e distorções presentes no fornecimento de sua energia. O método de detecção de ilhamento não deve contribuir negativamente com esse cenário;
- O método de detecção de ilhamento deve operar, harmoniosamente, com os demais métodos de detecção instalados em outros SGD conectados na mesma linha de distribuição. Com o crescimento do uso das fontes alternativas, a instalação de vários SGD, em uma mesma linha, tem sido cada vez mais frequente;
- O método de detecção de ilhamento será instalado em um conversor monofásico com potência nominal de 1kW.

A justificativa de realização deste trabalho é justamente averiguar até quando esses métodos podem ser utilizados com segurança e confiabilidade. Uma investigação de sua eficiência é realizada de acordo com os procedimentos de testes recomendados pelas normas internacionais.

## II. MÉTODOS PASSIVOS DE PROTEÇÃO ANTI- ILHAMENTO

São caracterizados por observarem desvios nos parâmetros do SEP em que o conversor está conectado. Baseado em limites estabelecidos pelas normas, cessa a conversão de energia no instante em que os parâmetros monitorados ultrapassam esses limites. De acordo com a literatura, os principais parâmetros do SEP utilizados para realizar a detecção de Ilhamento são: amplitude da tensão da rede, frequência da tensão da rede, detecção de harmônicos e deslocamentos de fase entre a tensão e a corrente [2, 3].

## II.1. MÉTODO PASSIVO DE DETECÇÃO POR TENSÃO E FREQUÊNCIA

A Zona de Não-Detecção (ZND), gerada pela operação deste método, é deduzida por um simples circuito mostrado na Fig. 3. Se a potência do inversor for igual à potência da carga  $\Delta P = \Delta Q = 0$  existe grande probabilidade de formação de ilha quando o interruptor  $S_1$  abrir [3, 4].

Por outro lado, se a potência do inversor não for exatamente igual à potência da carga, a tensão e a frequência no PCC irão saltar para novos valores depois do bloqueio de  $S_1$ . Se as variações de  $\Delta P$  e  $\Delta Q$  forem suficientes, a tensão e a frequência no PCC serão deslocadas para fora dos limites estabelecidos. Com isso, o método poderá detectar o ilhamento e desligar o inversor [3].

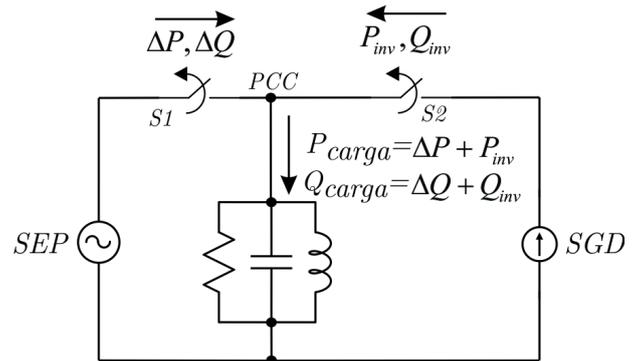


Fig. 3. Circuito de um sistema genérico usado para teste de métodos de Ilhamento.

Para encontrar a ZND deste método são calculados os limites de tensão e frequência de acordo com as recomendações da norma, apresentadas na Tabela I [4].

**TABELA I**  
**Parâmetros utilizados para o cálculo da ZND**

Proteções por software (*) – IEEE Std 929-2000	Valor
Fator de qualidade	2,0
Tensão nominal do sistema	220Vac
Frequência nominal do sistema	60Hz
Sobretensão da rede elétrica	1,10pu = 242Vac*
Subtensão da rede elétrica	0,88pu = 194Vac*
Sobrefrequência da rede elétrica	60,5Hz*
Subfrequência da rede elétrica	59,3Hz*

Tal gráfico tem como objetivo ilustrar graficamente a incompatibilidade de potências no instante do ilhamento. Suas deduções são apresentadas na literatura e repetidas nas equações (1) e (2) [5-7].

$$\left(\frac{V_{nom}}{V_{max}}\right)^2 - 1 \leq \frac{\Delta P}{P} \leq \left(\frac{V_{nom}}{V_{min}}\right)^2 - 1 \quad (1)$$

$$Q_f \cdot \left(1 - \left(\frac{F_{nom}}{F_{min}}\right)^2\right) \leq \frac{\Delta Q}{P} \leq Q_f \cdot \left(1 - \left(\frac{F_{nom}}{F_{max}}\right)^2\right) \quad (2)$$

Baseado nos valores da Tabela I é calculado, através expressões (3) e (4), os limites para a área da ZND.

$$-17,35\% \leq \frac{\Delta P}{P} \leq 28,60\% \quad (3)$$

$$-4,7\% \leq \frac{\Delta Q}{P} \leq 3,29\% \quad (4)$$

Uma vez calculado os limites é possível encontrar a ZND para o método, ilustrada na Fig. 4. Os eixos representam a incompatibilidade de potências que irá conter a ZND do método. O eixo das abscissas ( $\Delta P/P$ ) representa a porcentagem entre a variação de potência ativa no instante do ilhamento e a potência ativa utilizada no teste de Ilhamento. Já o eixo das ordenadas ( $\Delta Q/P$ ) representa a porcentagem entre a variação de potência reativa e potência ativa utilizada no ensaio [3, 8].

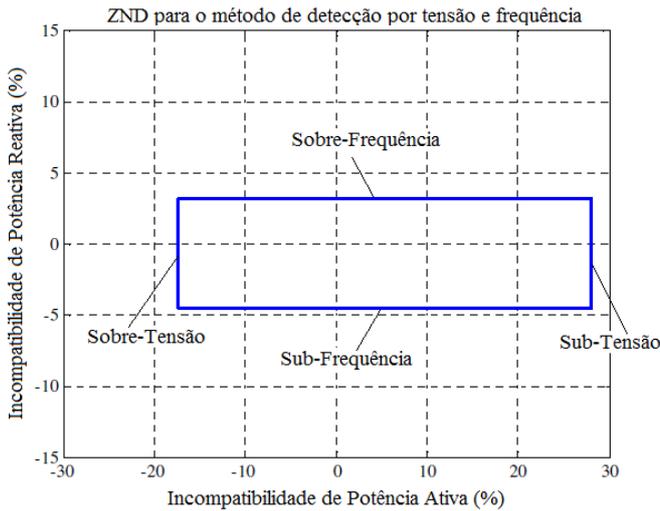


Fig. 4. ZND para o método passivo de detecção por tensão e frequência.

De acordo com a norma IEEE 1547.2-2008 todos os conversores interligados na rede elétrica devem ter proteções de frequência e tensão. Com base na Fig. 4 quatro casos podem ser identificados [3, 12]:

1)  $\Delta P > 0$ : A potência ativa do conversor é menor que a potência ativa da carga. Depois da desconexão, quando  $\Delta P = 0$ , a tensão no PCC irá decrescer. Se a queda de tensão for suficiente, a proteção de subtensão irá atuar desligando o inversor.

2)  $\Delta P < 0$ : A potência ativa do conversor é maior que a potência ativa da carga. Depois da desconexão, quando  $\Delta P = 0$ , a tensão no PCC irá crescer fazendo atuar a proteção de sobre tensão, desligando o conversor.

3)  $\Delta Q > 0$ : A carga possui característica indutiva, o que resulta num fator de potência atrasado. Depois da desconexão, quando  $\Delta Q = 0$ , a frequência no PCC irá aumentar no intuito de diminuir a parcela indutiva e aumentar a parcela capacitiva. Essa mudança de frequência irá continuar até que  $Q_{carga} = 0$ . Se o aumento da frequência for suficiente, a proteção de sobre frequência irá atuar desligando o inversor.

4)  $\Delta Q < 0$ : A carga possui característica capacitiva, o que resulta num fator de potência adiantado. Depois da desconexão, quando  $\Delta Q = 0$  e assumindo  $Q_{inv} = 0$ , a frequência no PCC irá decrescer até  $Q_{carga} = 0$ . Se o decréscimo da frequência for suficiente, a proteção de sub frequência irá atuar desligando o conversor.

## II.2. MÉTODO DE DETECÇÃO POR SALTO DE FASE DA TENSÃO

Também chamado de *Phase Jump Detection (PJD)*, o método de detecção por salto de fase da tensão baseia-se no monitoramento da fase entre a tensão e a corrente de saída do conversor. Isto visa que possíveis saltos de fase na tensão possam ser detectados para sinalização da formação de ilha. Baseado no ângulo limite  $\theta_{PJD}$ , o método decide se houve, ou não, ilhamento no ciclo anterior da tensão da rede, como ilustra a Fig. 5.

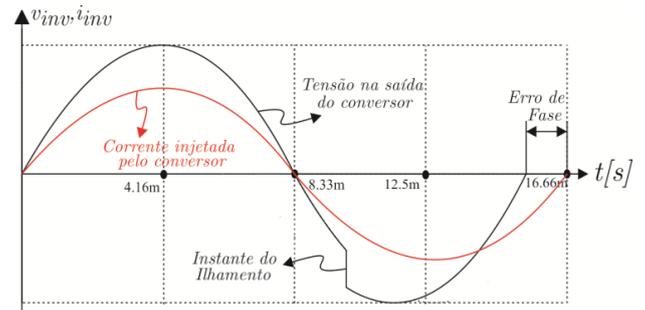


Fig. 5. Método passivo para detecção por salto de fase da tensão.

Seu gráfico de incompatibilidade de potências é gerado pela expressão (5) e ilustrado na Fig. 6. O ângulo  $\theta_{PJD}$  indica o máximo salto de fase da tensão para detecção do ilhamento [5-7].

$$\left| \arctan \left( \frac{\Delta Q/P}{1 + \Delta P/P} \right) \right| \leq \theta_{PJD} \quad (5)$$

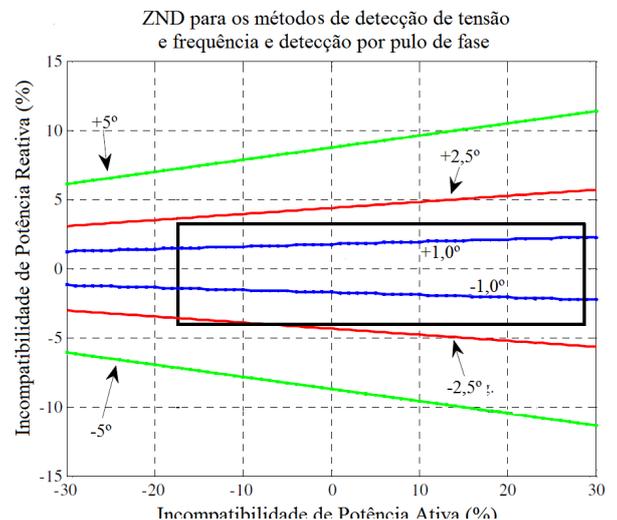


Fig. 6. ZND para o método de detecção de tensão e frequência e detecção por pulso de fase.

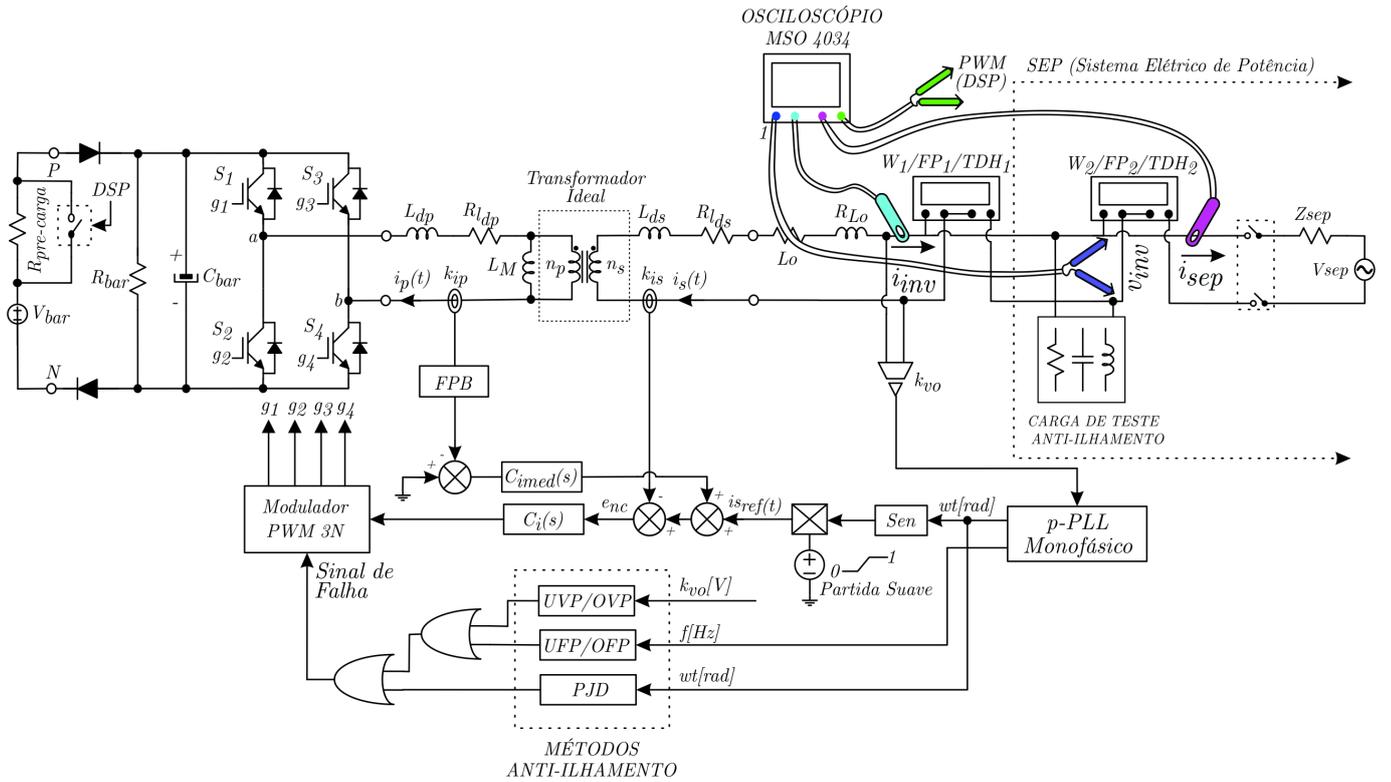


Fig. 7. Diagrama de blocos do sistema completo.

### III. PROJETO DAS MALHAS DE CONTROLE

O diagrama de blocos do sistema completo é ilustrado na Fig. 7. Foi utilizada fonte de tensão contínua para simular o barramento CC; logo, não houve necessidade de implementar malha de controle da tensão do barramento. Basicamente, foram desenvolvidos via software os seguintes blocos da estrutura.

- Malha de controle da corrente de saída;
- Malha de controle da corrente média no primário do transformador;
- Malha de travamento de fase (PLL);
- Proteções de sub e sobre tensão CA da rede elétrica;
- Proteções de sub e sobre frequência da tensão da rede elétrica;
- Proteções de sub e sobre tensão CC do barramento;
- Proteção de sobre corrente no secundário do transformador;
- Proteção de salto de fase da tensão da rede elétrica;
- Rotina de partida suave do conversor;
- Rotina de inicialização e sincronismo do conversor.

#### III.1. MALHA DE CONTROLE DA CORRENTE DE SAÍDA

Para que o conversor trabalhe com fator de potência unitário, a corrente injetada pelo mesmo na rede elétrica deve ter formato senoidal e, estar em fase com a tensão imposta pelo SEP. Para isso, deverá ser implementada uma

malha de controle da corrente de saída. Tal controle é concebido a partir de uma referência (fundamental da tensão da rede) e da medição da corrente injetada, como ilustra a Fig. 8.

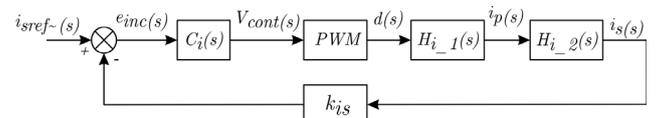


Fig. 8. Malha de controle da corrente de saída.

As funções de transferência (FT)  $H_{i-1}$  e  $H_{i-2}$  determinam o comportamento dinâmico do transformador de potência, que tem por finalidade isolar o conversor da rede elétrica e, elevar a sua tensão. Essas FTs são ilustradas nas equações (6) e (7).

$$H_{i-1} = \frac{\hat{i}_p(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{k_1 s + k_2}{k_3 s^2 + k_4 s + k_5} \quad (6)$$

$$\begin{cases} k_1 = V_{cc} [N_T^2 (L_{ds} + L_o) + L_M] \\ k_2 = V_{cc} N_T^2 (R_{Lds} + R_{Lo}) \\ k_3 = N_T^2 L_{dp} (L_{ds} + L_o) + L_{dp} L_M + N_T^2 L_M (L_{ds} + L_o) \\ k_4 = N_T^2 R_{Ldp} (L_{ds} + L_o) + R_{Ldp} L_M + N_T^2 (R_{Lds} + R_{Lo}) (L_{dp} + L_M) \\ k_5 = N_T^2 R_{Ldp} (R_{Lds} + R_{Lo}) \end{cases}$$

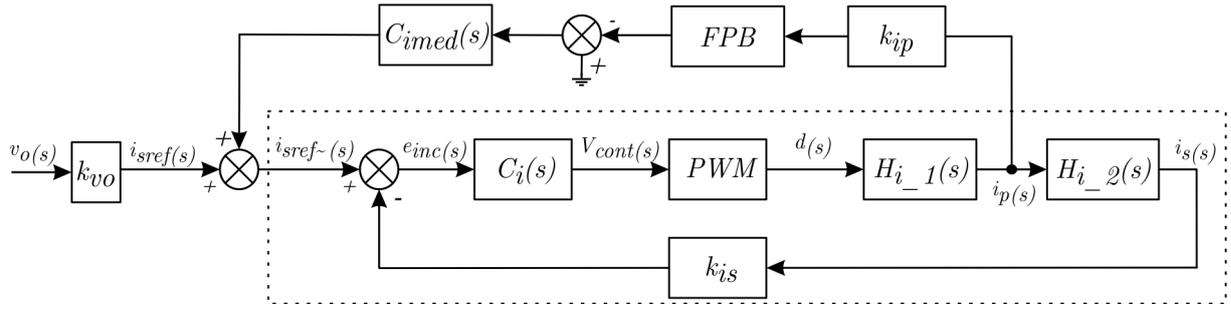


Fig. 9. Diagrama de blocos do sistema completo.

$$H_{i_2}(s) = \frac{\hat{i}_s(s)}{\hat{i}_p(s)} = \frac{sN_T L_M}{s[N_T^2(L_{ds} + L_o) + L_M] + N_T^2(R_{Lds} + R_{Lo})} \quad (7)$$

A resposta em frequência de  $H_{i_2}$  é ilustrada pela Fig. 10, que relaciona o transformador, em termos de entrada e saída, através das correntes primárias e secundárias. Observa-se, que na frequência da rede elétrica, 377 rad/s, o defasamento entre as correntes primárias e secundárias é próximo de zero.

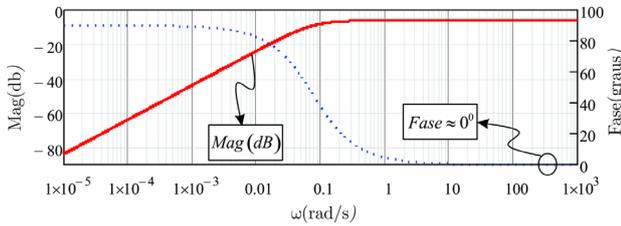


Fig. 10. Resposta em frequência da FT  $H_{i_2}(s)$ .

Para o projeto do compensador  $C_i(s)$  é necessário determinar a FT do modulador PWM senoidal de três níveis. Baseado na Fig. 11 e analisando as portadoras  $v_{tri1}(t)$  e  $v_{tri2}(t)$  com a moduladora  $v_{cont}(t)$  é possível encontrar a FT pela tensão de saída do conversor  $v_{ab}(t)$ , chegando assim à equação (8) [9].

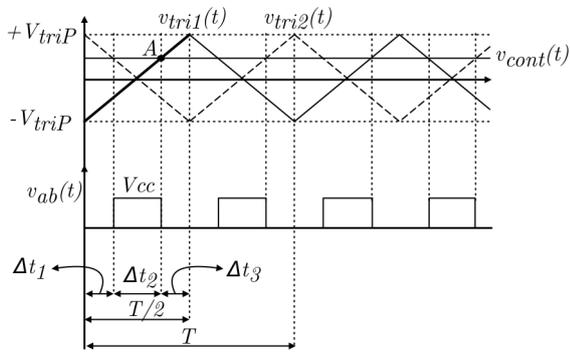


Fig. 11. Modulação Senoidal PWM de 3 níveis.

$$PWM(s) = \frac{\hat{d}(s)}{v_{cont}(s)} = \frac{1}{V_{triP}} \quad (8)$$

Determinando a FT de laço aberto da malha, segundo a expressão (9), é possível determinar  $C_i(s)$  para uma

frequência de cruzamento de 2kHz e margem de fase de  $M\varphi = 60^\circ$ , resultando na expressão (10).

$$FTLA_{i_c}(s) = C_i(s) \cdot PWM \cdot H_{i_1}(s) \cdot H_{i_2}(s) \cdot k_{is} \quad (9)$$

$$C_i(s) = \frac{17.06(s + 7257)}{s} \quad (10)$$

### III.2. MALHA DE CONTROLE DA CORRENTE MÉDIA NO PRIMÁRIO DO TRANSFORMADOR

Devido às discrepâncias paramétricas presente nos interruptores da ponte de potência é possível o surgimento de uma componente média de corrente no primário do transformador, uma vez que a estrutura é conectada em um barramento CC.

Se essa componente não for atenuada por meio de uma malha extra de controle, a mesma pode levar o transformador à saturação, provocando a queda da indutância magnetizante. A malha de controle da corrente média no primário do transformador é ilustrada na área superior da Fig. 9, juntamente com a malha de controle da corrente de saída em destaque.

Simplificando a malha de controle da corrente de saída em destaque, por um único bloco, encontra-se seu diagrama de blocos simplificado, cuja função de transferência em malha fechada (FTMF) é apresentada em (11) e ilustrada na Fig. 12 [9].

$$FTMF(s) = \frac{i_p(s)}{i_{sref-}(s)} = \frac{C_i(s) \cdot PWM \cdot H_{i_1}(s)}{1 + C_i(s) \cdot PWM \cdot H_{i_1}(s) \cdot H_{i_2}(s) \cdot k_{is}} \quad (11)$$

O filtro passa-baixa (FPB) é de segunda ordem, para proporcionar considerável atenuação na faixa de frequência da rede elétrica. Assumindo um coeficiente de amortecimento de  $\zeta = 0,707$  e frequência de corte de  $\omega_c = 1\text{Hz} \Rightarrow 6,28\text{rad/s}$  encontra-se o FPB(s) equacionado em (12).

$$FPB(s) = \frac{\omega_c^2}{s^2 + 2\zeta\omega_c s + \omega_c^2} = \frac{39,4}{s^2 + 8,88s + 39,4} \quad (12)$$

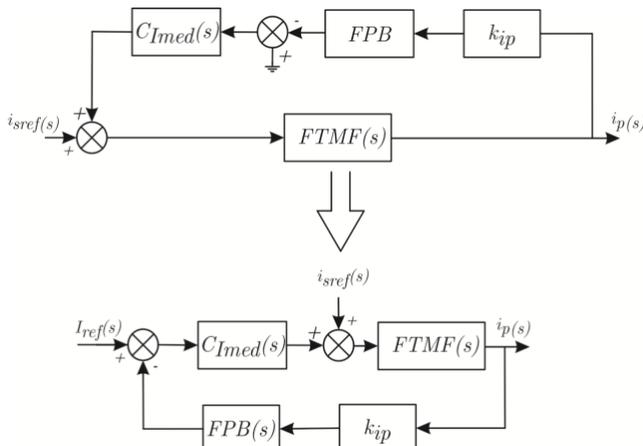


Fig. 12. Diagrama de blocos das malhas de controle de corrente.

A FT de laço aberto não compensada desta malha pode ser determinada pela expressão (13). Assumindo uma frequência de cruzamento de  $f_c = 1\text{Hz} \Rightarrow 6,28\text{rad/s}$  e uma margem de fase de  $M\varphi = 60^\circ$  para o compensador da malha de controle da corrente primária  $C_{Imed}(s)$  encontra-se sua FT ilustrada na expressão (14) [9].

$$FTLA_{Imed\_nc}(s) = k_{ip} \cdot FTMF(s) \cdot FPB(s) \quad (13)$$

$$C_{Imed}(s) = 1.23 \frac{(s + 3.56)}{s} \quad (14)$$

### III.3 MALHA DE TRAVAMENTO DE FASE (PLL)

Para este trabalho é implementado o PLL numa configuração monofásica, para que o mesmo consiga reproduzir o sincronismo de acordo com a tensão monofásica presente na saída do conversor. A Fig. 13 ilustra, em diagrama de blocos, o PLL implementado. A Tabela II mostra as principais características do modelo linearizado utilizado para o PLL [10].

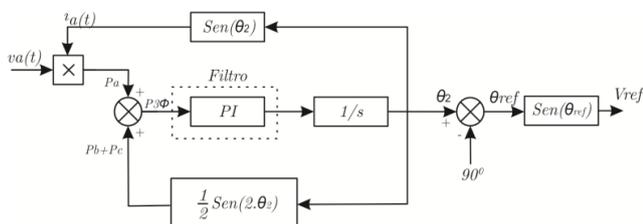


Fig. 13. Circuito PLL monofásico simplificado.

**TABELA II**

#### Informações do modelo linearizado do PLL

Parâmetro	Valor
Frequência de cruzamento do PLL	12Hz
Margem de fase	60°
Atenuação de 120Hz	21,22dB
Tempo de subida – resposta ao degrau	0,017ms
Sobressinal máximo – resposta ao degrau	24,3%
Tempo de estabelecimento (2%) - resposta ao degrau	0,125s

## IV. EXPERIMENTAÇÃO PRÁTICA

Foi utilizado o módulo SKS 50F B6U+B2CI 10 V6 da SEMIKRON para realização dos ensaios experimentais, operando na frequência de 20kHz. Este módulo é composto de um retificador trifásico e um inversor monofásico Full-Bridge, interligados por um barramento CC. Tal barramento possui um banco de capacitores de  $6 \times 680\mu\text{F}$ , totalizando uma capacitância de barramento de  $4080\mu\text{F}$ , com tensão máxima de operação de  $350V_{cc_{max}}$ .

Para a implementação do software foi utilizado o DSP de ponto flutuante TMS320C28335 da TEXAS Inc. Este DSP possui muitas características interessantes para o sucesso dos testes experimentais, entre elas: conversor A/D de alta resolução, velocidade e alta capacidade de processamento. A Fig. 14 mostra uma foto do conversor eletrônico de potência implementado em laboratório.

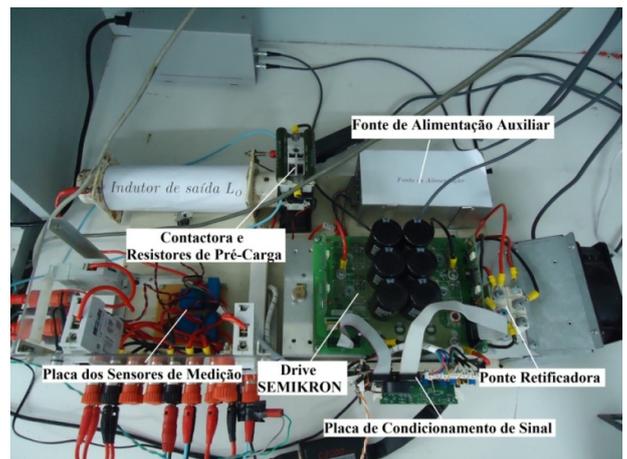


Fig. 14. Conversor eletrônico de potência.

Inicialmente foram realizados testes na estrutura para a potência nominal, no intuito de validação da malha de controle da corrente de saída, modulação PWM, partida suave e rastreamento da frequência da rede elétrica pelo PLL. A Fig. 15 ilustra uma visão panorâmica das formas de onda da corrente e da tensão na saída do conversor nos momentos da partida suave e regime permanente. Vale a pena salientar que a partida suave opera com uma rampa de 7,0s. Uma vez realizada a partida suave o conversor opera em seu regime nominal injetando 1kW de potência em uma rede elétrica de  $220V_{ac_{rms}}$ .

A Fig. 16 ilustra as formas de onda da corrente e da tensão na saída do conversor na potência nominal de 1kW em  $220V_{ac_{rms}}$ . Verifica-se uma baixa TDH na corrente de saída (1,35%) e um fator de potência praticamente unitário (0,9996). Os testes de detecção de ihamento foram realizados conforme a norma IEEE Std 929-2000. Os valores das cargas de teste são ilustrados na Tabela III e na Fig. 19.

**TABELA III**

#### Cargas recomendadas pela norma

#### IEEE Std 929-2000

Carga	Potência	R	L	C	Qf	Fo
RLC	400W	126R	152,3mH	40μF	2,04	64,5Hz
	700W	71,5R	95mH	81,2μF	2,10	57,3Hz

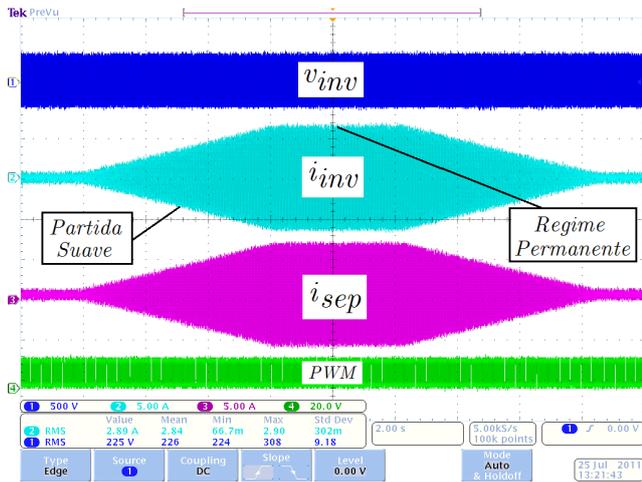


Fig. 15. Visão geral da Partida Suave do conversor.

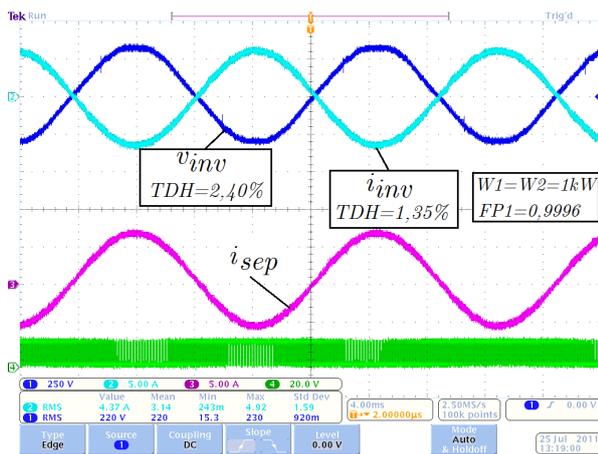


Fig. 16. Formas de onda em Regime Permanente (depois da Partida Suave).

Na Fig. 17 e Fig. 18 são mostrados os resultados obtidos para a detecção de ilhamento nas potências de 412W e 717W. Para o teste de 412W observa-se que o ilhamento foi detectado em 6,13ms pela proteção de sobrefrequência. Já para o ensaio de 717W o ilhamento foi detectado em 4,59ms pela proteção de subfrequência. Os tempos estão abaixo do máximo recomendado pela norma IEEE Std 929-2000, que é de 100ms para desvios de frequência e 2,0s para desvios de tensão.

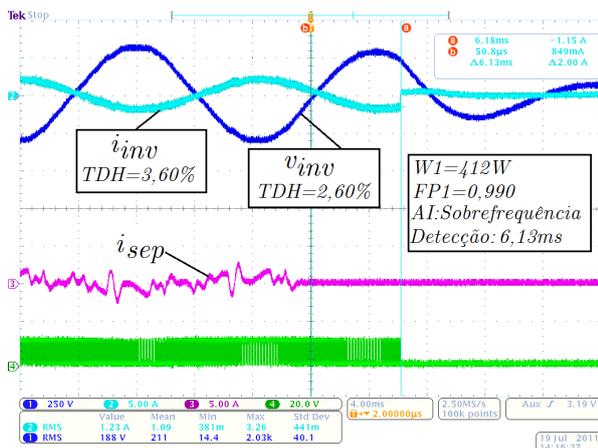


Fig. 17. Teste de detecção de ilhamento para  $W_1=412W$ .

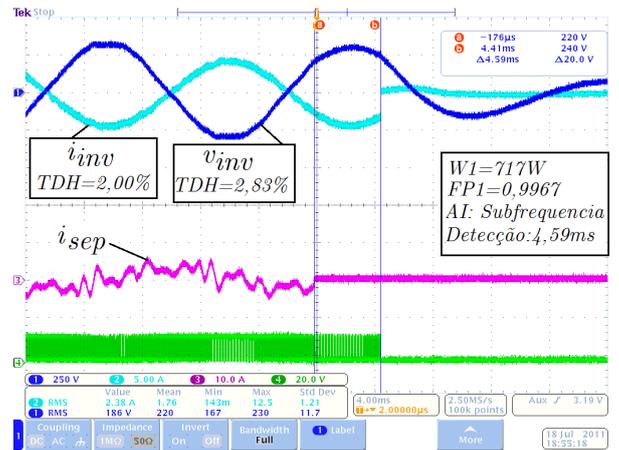


Fig. 18. Teste de detecção de ilhamento para  $W_1=717W$ .

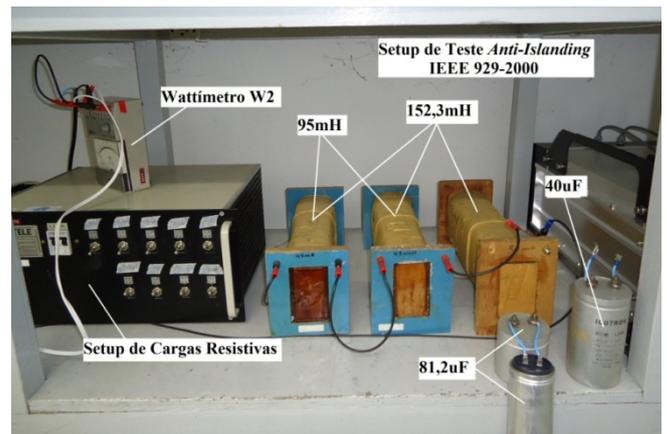


Fig. 19. Cargas utilizadas nos ensaios de detecção de Ilhamento.

Segue abaixo na Tabela IV uma lista de características implementadas no projeto e enquadradas nas recomendações das normas IEEE Std 929-2000 e IEEE Std 519-1992. Essas características ilustram o sucesso do desenvolvimento do projeto [10] [11].

TABELA IV  
Características atendidas

Parâmetro	Norma	Prática
Sobretensão da Rede Elétrica	1,10pu*	1,10pu
Subtensão da Rede Elétrica	0,88pu*	0,88pu
Sobrefrequência da Rede Elétrica	60,5Hz*	60,5Hz
Subfrequência da Rede Elétrica	59,3Hz*	59,3Hz
Fator de Potência em 10% da nominal	>0,85*	0,88
TDH da corrente de saída nominal	<5,0%**	1,35%
Atuação das proteções de tensão	<2,0s*	—
Atuação das proteções de frequência	<100ms*	6,13ms
Injeção de corrente CC na Rede Elétrica	<0,5%*	zero
Implementação de Partida Suave	Sim*	Sim

## CONCLUSÕES

A implementação dos métodos passivos de detecção de tensão e frequência e, de detecção de salto de fase, proporcionaram ótimo desempenho na detecção de ilhamento do conversor estático. A aplicação desses métodos foi suficiente para detectar desvios de tensão e frequência em

cargas RLC com fator de qualidade de  $Q_f = 2,0$  e frequência de ressonância próximo de 60Hz.

Vale a pena salientar que as cargas RLC, utilizadas para os ensaios, modelam as cargas conectadas no sistema elétrico na ilha em potencial, ou seja, não fazem parte do sistema do conversor. Tendo isso em vista, cargas RLC com  $Q_f = 2,0$  representam cargas do sistema elétrico com FP = 0,45.

Na maioria dos casos o fator de potência em sistemas elétricos, operando em regime permanente, permanece na faixa de 1,0 até 0,75. Em alguns casos mais específicos o fator de potência pode estar abaixo de 0,75.

Tendo isso em mente, conclui-se que a aplicação do método passivo de detecção por frequência e tensão, juntamente com o método passivo de salto de fase da tensão, realiza a detecção do ilhamento para a maioria dos casos encontrados em aplicações práticas.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos Engs. Marcelo Maccarini e Márcio S. Ortmann e, também, ao Prof. Samir A. Mussa, por todo suporte na pesquisa e elaboração deste artigo. Agradecem ainda ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e à FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos) pelo importante apoio financeiro

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] T. N. Thacker, "Control of Power Conversion Systems for the Intentional Islanding of Distributed Generation Units". Virgínia. 2005 – CPES, Virgínia Tech.
- [2] A. Moallem; D. Yazdani, "An anti-islanding protection scheme for grid-connected distributed power generation systems", International conference on Power, Control and Embedded Systems (ICPES), 2010, pg.1-5.
- [3] I. K. Hobbs, "Evaluation and Implementation of Anti-Islanding Methods for Converter-Fed Distributed Generation". StellenBosch, Africa do Sul. 2009 – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Stellen Bosch.
- [4] G. Hernandez-Gonzalez, R. Irvani, "Current Injection for Active Islanding Detection of Electronically-Interfaced Distributed Resources", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 21, No. 3, Pg. 1698-1705, 2006.
- [5] P. Du, R. Walling, "Evaluation of Anti-Islanding Schemes Based on Non Detection Zone Concept", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 19, No. 5, Pg. 1171-1176, 2004.
- [6] T. R. Ricciardi, W. F. Filho, "Análise do Impacto da Proteção Antilhamento na Estabilidade de Geradores Conectados Via Inversores". Campinas/Brasil. 2010 – Dissertação de Mestrado - Departamento de Sistema de Energia, UNICAMP.

- [7] P. C. M. Meira, W. F. Filho, "Análise da Proteção Antilhamento de Geradores de Indução Conectados em Redes de Distribuição de Energia Elétrica". Campinas/Brasil. 2010 – Dissertação de Mestrado - Departamento de Sistemas de Energia, UNICAMP.
- [8] H. Sun, Z. Luo, "Analysis and Comparison of Islanding Detection Methods Using a New Load Parameter Space", *30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2004.
- [9] R. F. Coelho, T. B. Lazzarin, D. C. Martins, "Modelling and Control of the Single-Phase DC-AC PWM Converter for Grid-Connected Applications Including a Loop for Average Primary Current Controlling". in *Proc. of COBEP 2011*, September 2011, Natal, RN.
- [10] 929-2000, "IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems", IEEE Standards Coordinating Committee 21 on Fuel Cells, Photovoltaics, Dispersed Generation, and Energy Storage, EUA, 2000.
- [11] 519-1992, "IEEE Recommended Practice and Requirements for harmonic Control in Electrical Power Systems", IEEE Standard, EUA, 1992.
- [12] 1547.2-2008, "IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems", IEEE Standard, EUA, 2009.

#### DADOS BIOGRÁFICOS

**Leonardo Severo**, nascido em Soledade/RS é engenheiro eletricitista (2009) pelo Centro Universitário de Jaraguá do Sul/SC, mestre (2011) pelo Instituto de Eletrônica de Potência (INEP) da Universidade Federal de Santa Catarina. Suas áreas de interesse são: eletrônica de potência, conversores fotovoltaicos e métodos de proteção *Anti-Islanding* aplicados a Sistemas de Geração Distribuídos (SGD).

**Roberto Francisco Coelho**, Engenheiro Eletricista e Mestre em Engenharia Elétrica formado pela Universidade Federal de Santa Catarina, em 2007 e 2008, respectivamente. Atualmente mantém em andamento seu curso de doutorado, com foco na utilização da energia alternativa, atuando principalmente nos seguintes temas: geração fotovoltaica e eólica, conversores estáticos, modelagem matemática de módulos fotovoltaicos, técnicas de rastreamento de máxima potência e sistemas híbridos interligados à rede elétrica.

**Denizar Cruz Martins**, nascido em São Paulo, SP em 24 de abril de 1955. Recebeu os graus de Engenheiro Eletricista e Mestre em Engenharia Elétrica em 1979, 1981 respectivamente, pela Universidade Federal de Santa Catarina. Concluiu seu Doutorado em Engenharia Elétrica no Instituto Politécnico Nacional de Toulouse, França em 1986. Atualmente é Professor Titular no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.