

## **MONTAGEM DE BANCADA PARA ENSAIOS ELÉTRICOS E TÉRMICOS DE INVERSORES FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE**

**Aryston Luiz Perin, César Wilhelm Massen Prieb, Arno Krenzinger**

UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, LABSOL - Laboratório de Energia Solar,  
PROMEC – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica  
e-mail: aryston@projatum.com.br, cprieb@ufrgs.br, arno.krenzinger@ufrgs.br

*Recibido 11/08/16, aceptado 09/10/16*

**RESUMO:** Este trabalho descreve a construção de uma bancada de ensaios elétricos e térmicos de inversores conectados à rede no Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Equipamentos eletrônicos possuem um limite seguro de temperatura de operação, acima da qual podem ocorrer instabilidades de operação, redução da vida útil ou até mesmo falha drástica. O conhecimento da eficiência de conversão elétrica e das perdas responsáveis pelo aquecimento é importante para o adequado dimensionamento de inversores quando aplicados em sistemas fotovoltaicos conectados à rede, assim como para o desenvolvimento do inversor como produto. A bancada construída possibilita a determinação dos parâmetros elétricos e térmicos necessários para modelagem e simulação dos inversores. O modelo elétrico avalia a produção de energia elétrica, enquanto que o modelo térmico permite prever a temperatura interna do inversor e estimar perdas de energia relacionadas às estratégias internas do inversor para arrefecimento e proteção contra superaquecimento.

**Palavras-chave:** eficiência, inversores fotovoltaicos conectados à rede, energia solar, gerenciamento térmico.

### **INTRODUÇÃO**

A vida útil e a confiabilidade de equipamentos eletrônicos de potência são fortemente afetadas pela sua temperatura de operação. Com a utilização em massa de sistemas fotovoltaicos conectados à rede faz-se necessário o conhecimento aprofundado sobre estes sistemas quanto à segurança de operação, confiabilidade e desempenho energético. Dentre os diversos componentes destes sistemas os inversores são os componentes mais complexos, mais frágeis e mais suscetíveis a falhas. Por esta razão, nos últimos anos os inversores vêm sendo constantemente aprimorados. O conhecimento das condições de operação de inversores auxilia na definição de prioridades de melhorias no produto, sejam elas relacionadas à configuração eletrônica, à construção mecânica ou às rotinas internas de controle (operação, supervisão de segurança e gerenciamento térmico).

O superaquecimento, no caso dos inversores, é decorrente da insuficiência de dissipação térmica para o seu arrefecimento e pode ter diversas causas, tanto internas como externas. A operação acima da potência nominal e o projeto térmico inadequado são exemplos de causas internas. Como causas externas podem ser citadas, entre outras, a temperatura ambiente elevada e o acúmulo de pó em dissipadores de calor.

Para a proteção do equipamento, aumento da sua vida útil, maior confiabilidade, maior estabilidade e maior segurança de operação, os inversores possuem rotinas em seus algoritmos de controle com estratégias automatizadas dedicadas ao gerenciamento térmico. Estas rotinas, quando acionadas, tendem a reduzir a capacidade de conversão de potência do inversor, seja pelo acionamento de ventiladores auxiliares, seja pelo deslocamento do ponto de operação na seção de entrada do inversor, afastando-o do ponto de máxima potência. Fabricantes de inversores tratam deste assunto pela expressão em inglês *temperature derating*.

Com o conhecimento destas características térmicas em operação é possível o desenvolvimento de modelos de simulação dinâmica capazes de estimar perdas anuais de desempenho energético decorrentes das rotinas de gerenciamento térmico.

Testes elétricos e térmicos para avaliação do comportamento e desempenho em inversores monofásicos de pequeno porte já vêm sendo realizados no Laboratório de Energia Solar (LABSOL-UFRGS) há alguns anos (Rampinelli, 2010; 2014; Prieb, 2011; Prieb e Krenzinger, 2012; 2014). Com esta nova bancada será possível realizar ensaios de eficiência elétrica, qualidade de energia e comportamento térmico de inversores conectados à rede em diferentes condições de operação previamente programadas, conforme metodologia recomendada por normas nacionais e internacionais relacionadas a ensaios de inversores como EN50530 (2010), IEC 62116 (2013), ABNT 16149 (2013), ABNT 16150 (2013).

## CONFIGURAÇÃO GERAL DA BANCADA DE ENSAIOS ELÉTRICOS E TÉRMICOS

A Figura 1 mostra uma vista parcial da bancada durante realização de testes iniciais de validação com um inversor trifásico de 50 kW a fim de caracterizar o seu comportamento térmico e desenvolver um modelo preditivo da temperatura de operação do inversor em regime transiente. A Figura 2 apresenta um diagrama de blocos com fluxos de energia entre os principais elementos da bancada de testes, enquanto que a Figura 3 apresenta um esquema de interligações elétricas da bancada de testes.



Figura 1: Vista parcial da bancada de testes de inversores.

¡Error! No hay tema especificado.

Figura 2: Diagrama de blocos da bancada de testes de inversores.

¡Error! No hay tema especificado. Figura 3: Esquema da bancada de testes de inversores – medidas elétricas e térmicas de um inversor trifásico de 50 kW.

A seguir são descritos os equipamentos e componentes principais da bancada de testes de inversores.

### Simulador de arranjos de painéis fotovoltaicos.

Para a simulação da energia elétrica em corrente contínua fornecida por painéis fotovoltaicos foi utilizada uma fonte programável, modelo *TopCon Quadro*, fabricada na Suíça por *Regatron AG*. Esta fonte (na verdade um gerador de funções de potência) tem a função específica de sintetizar uma curva característica *I-V* típica de dispositivos fotovoltaicos. Esta curva é definida através da parametrização da fonte com características elétricas de um arranjo de módulos fotovoltaico de interesse, teórico ou medido. Uma vez conectada à entrada do inversor, esta fonte comporta-se exatamente como um

arranjo fotovoltaico real, inclusive respondendo a variações dinâmicas de irradiância e temperatura de célula. A fonte possui um *software* de controle proprietário chamado *SASControl*, que permite programar ações de teste, verificar e registrar em tempo real o comportamento elétrico da entrada dos inversores, comportando a realização de ensaios estáticos com parâmetros fixos ou ensaios dinâmicos com parâmetros variáveis no tempo. Três fontes *Regatron TopCon Quadro*, com potências individuais de 16 kW foram associadas em paralelo, formando um *cluster* com potência nominal de 48 kW, permitindo simular curvas de arranjos com potência de até 45 kW, corrente de curto-circuito de 96 A e tensão de circuito aberto de 600 V. A Figura 4 apresenta a fonte simuladora de arranjos fotovoltaicos e o simulador de rede.



Figura 4: Simulador de rede CA (à esquerda) e fonte simuladora de arranjos fotovoltaicos (à direita).

#### *Simulador de rede CA.*

O simulador de rede CA fornece, de forma programável, tensão trifásica senoidal com baixa distorção harmônica. Possibilita programação de variações de tensão e frequência em ampla faixa, além da programação de distúrbios e de harmônicas. Este simulador, modelo FCATQ 5000-44-15, é fabricado pela *Supplier*, de Joinville-SC, com potência nominal de 50 kW. A bancada permite escolher, através de chave seletora, a ligação à rede de corrente alternada de duas formas, conectando a saída do inversor ao simulador de rede ou diretamente à rede externa da concessionária. Quando ligado diretamente à rede da concessionária o inversor fica limitado à condição real de operação. Quando conectado ao simulador de rede é possível simular de forma controlada situações de defeitos na rede a fim de estudar o comportamento do inversor e qualidade de energia em situações adversas.

#### *Carga RLC (resistiva - indutiva – capacitiva).*

Para realização de outros ensaios elétricos, tais como anti-ilhamento, é utilizada uma carga RLC modelo PV-RLC385-15K, fabricada pela *Parwa* (China) capaz de conectar à saída do inversor cargas resistivas de até 15 kW, cargas indutivas de até 15 kvar e cargas capacitiva de até 15 kvar. Há ainda a possibilidade conectar uma combinação de cargas resistivas adicionais de até 50 kW.

#### *Caixa de conexões e proteções elétricas.*

Para facilitar a conexão do inversor sob teste à bancada é utilizada uma caixa de conexões com bornes, disjuntores de proteção e chaves de manobra que permitem seleção das conexões necessárias a cada tipo de teste.

#### *Sistema de controle e aquisição de dados.*

Os equipamentos e simuladores têm portas de comunicação e *softwares* que permitem programação de ações, acompanhamento de medidas em tempo real e armazenamento de dados de forma sincronizada no tempo para posterior análise. A Tabela 1 apresenta um resumo da configuração do sistema de controle e aquisição de dados, assim como os principais tipos de medidas de grandezas diretas que podem ser adquiridas na bancada com respectivos instrumentos medidores.

### Sistema de controle de temperatura ambiente.

Para avaliar o efeito da temperatura ambiente sobre o desempenho dos inversores é necessário controlar a temperatura da sala, submetendo os inversores em teste a níveis pré-determinados de temperatura por um longo período durante a realização dos ensaios elétricos e térmicos. O controle da temperatura ambiente da sala da bancada é feito por um sistema de climatização permitindo variação de temperatura ambiente na faixa de 20 °C a 50 °C. Este sistema de climatização tem potência frigorífica nominal de 4 TR (14 kW), e potência de aquecimento de 17 kW.

## GRANDEZAS MEDIDAS PELA BANCADA

### Tipos de medidas.

A bancada de testes permite a realização de ensaios elétricos, estáticos e dinâmicos, para avaliação de eficiência e desempenho de inversores monofásicos e trifásicos conectados à rede. Permite também realizar medidas de temperatura para avaliação do comportamento térmico do inversor.

As medidas de grandezas elétricas em corrente contínua CC e em corrente alternada CA (respectivamente na entrada e na saída do inversor), assim como medidas de temperatura em seis pontos do inversor (conforme Tabela 1 e Figura 5), são armazenadas para pós-processamento.

Após a realização das medições, os dados elétricos e térmicos armazenados podem ser utilizados para determinar medidas indiretas, como eficiência de conversão elétrica CC/CA, elaborar gráficos de eficiência em diversas condições controladas, elaborar gráficos da evolução da temperatura dos componentes internos do inversor, entre outros. Também é possível determinar parâmetros térmicos dos modelos de predição de temperatura do inversor.

Grandezas medidas principais				Instrumento		Controle e aquisição de dados		
Tipo / local	Descrição	Unid.	Tipo	Fabricante / modelo	Comunicação	Software	Computador	
Entrada do inversor	Potência CC (PMP)	W	Simulador de arranjo fotovoltaico (medidas internas da própria fonte)	Regatron / TopCon Quadro	Porta serial RS232	SASControl	1	
	Tensão elétrica CC (PMP)	V						
	Corrente elétrica CC (PMP)	A						
	Tensão elétrica CC (circuito aberto)	V						
	Corrente elétrica CC (curto circuito)	A						
	Eficiência do seguimento de máxima potência	%						
Saída do inversor	Tensão (fases R, S, T)	V	Analisador de energia	Yokogawa / WT500	Porta serial USB	WTViewer	1	
	Corrente (fases R, S, T)	A						
	Potência ativa (fases R, S, T, total)	W						
	Potência aparente (fases R, S, T, total)	VA						
	Fator de potência (fases R, S, T, total)	%						
	Frequência	Hz						
	Distorção Harmônica Total	%						
Pontos de medidas de temperatura no inversor (Fig. 4)	Aleta do dissipador de calor	T1	Multímetro multiplexador	Agilent / 34972 A	Porta serial USB	BenchVue	2	
	Entrada de ar do dissipador de calor	T2						
	Saída de ar do dissipador de calor	T3						
	Transformador	T4						
	Ar ambiente	T5						
	Saída de ar do inversor	T6						

Tabela 1: Configuração resumo do sistema de medição e aquisição de dados elétricos e térmicos.

¡Error! No hay tema especificado.

Figura 5: Pontos de medição de temperatura no inversor.

### Programação e planejamento de testes.

A bancada permite a programação prévia do tempo de teste e dos diversos parâmetros de teste.

A Tabela 2 apresenta os parâmetros e as respectivas faixas de operação que podem ser selecionados na programação prévia dos ensaios.

Parâmetro de operação	Faixa nominal ajustável
Carregamento de potência de entrada corrente contínua (CC)	0 a 45 kW
Tensão de entrada corrente contínua (CC)	0 a 600 V
Cargas na rede de corrente alternada (CA) (resistivas, indutivas, capacitivas)	0 a 15 kVA
Cargas na rede de corrente alternada (CA) (resistiva adicional)	0 a 50 kW
Tensão na rede de corrente alternada (CA)	0 a 440 V
Frequência de rede	15 a 150 Hz
Temperatura ambiente da sala	20 a 50 °C
Tempo entre varreduras subsequentes	elétrica > 2 s, térmica > 30 s

Tabela 2: Parâmetros programáveis para realização de ensaios.

Pode-se assim simular algumas condições de operação como: sombreamento parcial do arranjo fotovoltaico (simulando a passagem de nuvens), flutuações da rede CA (aumento ou queda de tensão na rede CA), variações de cargas resistivas, indutivas e capacitivas na rede CA (para teste de anti-ilhamento), operação em temperatura ambiente acima de 40 °C (avaliação da redução de capacidade e limitações de potência impostas pelas rotinas de proteção e gerenciamento térmico).

Para caracterização térmica do inversor inicialmente a bancada permite a instalação de sensores de temperatura em seis pontos de interesse no inversor (Tabela 1 e Figura 5).

#### EFICIÊNCIA E PERDAS NOS INVERSORES

*Eficiência de conversão:* A eficiência de conversão CC/CA de inversores é definida como a razão entre a energia em corrente alternada entregue à rede e a energia em corrente contínua efetivamente absorvida na entrada do inversor, como em (1).

$$\eta_{INV, CONV} = \frac{\int_0^{T_M} P_{CA}(t) \cdot dt}{\int_0^{T_M} P_{CC}(t) \cdot dt} \quad (1)$$

onde:

- $\eta_{INV, CONV}$  - eficiência de conversão do inversor;
- $P_{CC}$  - potência CC absorvida pelo inversor;
- $P_{CA}$  - potência CA entregue à rede pelo inversor;
- $T_M$  - período de integração considerado.

*Eficiência do seguimento do ponto de máxima potência:* O seguimento do ponto de máxima potência é um processo de controle executado, de forma contínua ou intermitente, pelo módulo de comando do inversor para forçar a polarização do arranjo fotovoltaico na tensão correspondente à sua tensão de máxima potência, de forma a maximizar a transferência de potência do gerador para o inversor. A eficiência do seguimento de máxima potência é definida como a razão entre a energia efetivamente absorvida pelo inversor em corrente contínua e a energia máxima disponível no arranjo fotovoltaico como em (2).

$$\eta_{INV,SPMT} = \frac{\int_0^{T_M} P_{CC}(t) \cdot dt}{\int_0^{T_M} P_{CC,PMP}(t) \cdot dt} \quad (2)$$

onde:

- $\eta_{INV,SPMP}$  - eficiência do seguimento do ponto de máxima potência;
- $P_{CC}$  - potência CC absorvida pelo inversor;
- $P_{CC,PMP}$  - potência CC no ponto de máxima potência da curva característica do arranjo fotovoltaico;
- $T_M$  - período de integração considerado.

Prieb (2011) apresenta um trabalho extensivo sobre métodos para determinação da eficiência do seguimento de máxima potência. Esta grandeza tem sua determinação facilitada pelo simulador de arranjo fotovoltaico, pois permite estabelecer com precisão a curva característica  $I-V$  sobre a qual o arranjo trabalha.

*Eficiência total:* A eficiência total do inversor é definida pela equação (3).

$$\eta_{INV,TOTAL} = \eta_{INV,CONV} \cdot \eta_{INV,SPMP} \quad (3)$$

onde:

- $\eta_{INV,TOTAL}$  - eficiência de total do inversor;
- $\eta_{INV,CONV}$  - eficiência de conversão do inversor;
- $\eta_{INV,SPMP}$  - eficiência de seguimento do ponto de máxima potência;
- Perdas de energia e aquecimento de inversores.*

Na equação do balanço energético do inversor (4) considera-se que a potência elétrica em corrente contínua, absorvida pelo inversor é dividida em duas parcelas: a primeira parcela representa a potência elétrica útil convertida em corrente alternada, e a segunda parcela representa a potência elétrica perdida, convertida em calor e responsável pelo aquecimento interno do inversor.

$$P_{AQ} = P_{CC} - P_{CA} = P_{CC} \cdot (1 - \eta_{INV,CONV}) \quad (4)$$

- $P_{AQ}$  - potência de aquecimento (potência elétrica perdida, responsável pelo aquecimento do inversor);
- $P_{CC}$  - potência CC absorvida pelo inversor;
- $P_{CA}$  - potência CA entregue à rede na saída do inversor;
- $\eta_{INV,CONV}$  - eficiência de conversão do inversor.

*Modelo térmico proposto para o inversor.*

Para a predição de temperatura do inversor em regime transiente foi proposto um modelo térmico analítico simplificado baseado no método da análise de transferência de calor em regime transiente de sistemas de capacidade concentrada, conforme equação (5).

$$T_{INV} = T_{AMB} + \frac{T_{INV,i} - T_{AMB}}{\exp\left(\frac{UA_{DISS}}{C_{ARM}} t\right)} + \frac{P_{AQ}}{UA_{DISS}} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{\exp\left(\frac{UA_{DISS}}{C_{ARM}} t\right)} \right] \quad (5)$$

onde:

- $t$  - tempo decorrido entre o tempo inicial ( $\tau=i$ ) até o tempo final ( $\tau=t+i$ );
- $T_{INV}$  - temperatura do inversor no tempo final, é a temperatura  $T(\tau=t+i)$  ;
- $T_{INV,i}$  - temperatura do inversor no tempo inicial, é a temperatura  $T(\tau=i)$ ;
- $T_{AMB}$  - temperatura do ambiente do inversor;
- $P_{AQ}$  - potência de aquecimento;
- $UA_{DISS}$  - coeficiente global concentrado de dissipação térmica entre o inversor e o ambiente;
- $C_{ARM}$  - capacidade de armazenamento térmico concentrada do inversor ambiente.

Para utilização deste modelo de predição de temperatura do inversor é necessária a determinação experimental dos parâmetros térmicos  $C_{ARM}$  e  $UA_{DISS}$ .

## **METODOLOGIA UTILIZADA NOS ENSAIOS**

Os primeiros testes para validação da bancada estão sendo realizados. A seguir são apresentados alguns resultados e comentários preliminares.

### *Aferição inicial da bancada.*

Primeiramente realizou-se uma aferição com outros medidores de grandezas elétricas de alta precisão. O sistema de medição de temperatura foi calibrado em banho térmico em diversas temperaturas. Foram verificados os valores e a sincronização no tempo dos dados armazenados e medidos.

### *Inversor utilizado nos testes iniciais da bancada.*

Os primeiros ensaios estão sendo realizados com inversor trifásico com potência nominal de 50 kW a fim de caracterizar seu desempenho elétrico e seu comportamento térmico para desenvolver um modelo preditivo da temperatura de operação em regime transiente.

Este tipo de inversor possui uma arquitetura composta por diversos componentes enclausurados em um gabinete ventilado, conforme esquema da Figura 5.

### *Medidas diretas e indiretas.*

A bancada permite medidas diretas de parâmetros conforme apresentados na Tabela 1. Medidas elétricas foram realizadas e armazenadas a cada dois segundos. Medidas térmicas foram realizadas e armazenadas a cada 30 segundos.

Medidas indiretas podem ser obtidas após processamento dos dados armazenados, como por exemplo, a eficiência, através da integração numérica da equação (1), e as perdas responsáveis pelo aquecimento do inversor como em (4).

### *Experimentos para determinação da eficiência.*

A eficiência de conversão elétrica e a eficiência de seguimento do ponto de máxima potência foram obtidas de acordo com a norma EN50530 “*Overall Efficiency of Grid Connected Photovoltaic Inverters*”. As eficiências foram determinadas em oito pontos de carregamento.

### *Experimentos para determinação dos coeficientes térmicos do modelo analítico.*

Para utilização do modelo matemático analítico desenvolvido faz-se necessária a determinação experimental dos parâmetros térmicos concentrados  $UA_{DISS}$  (coeficiente global concentrado de dissipação térmica entre o inversor e o ambiente) e  $C_{ARM}$  (capacidade de armazenamento térmico concentrada do inversor).

Internamente o inversor possui muitos componentes que contribuem para o seu aquecimento global. Para a caracterização térmica geral do inversor é necessário definir um componente interno característico para representar a *temperatura concentrada do inversor*. Para este fim, será assumida a temperatura do dissipador de calor do módulo de potência como sendo a temperatura do inversor  $T_{INV}$ .

Com os dados elétricos determina-se a potência de aquecimento  $P_{AQ}$  como em (4). Com os dados térmicos armazenados, pode-se desenhar a curva da variação da temperatura com o tempo, e ajustar esta curva experimental ao modelo proposto (5), determinando assim os coeficientes térmicos  $UA_{DISS}$  e  $C_{ARM}$ .

*Programação do simulador de arranjo fotovoltaico.*

Alimentação CC fornecida durante três horas (22,7 kW na primeira hora, 45,4 kW na segunda hora e 22,7 kW na terceira hora), inversor desligado nas próximas três horas. Duração do teste de 6 h, conforme Figura 6. As medidas elétricas foram feitas e armazenadas a cada dois segundos durante as primeiras três horas do teste.

**¡Error! No hay tema especificado.**

Figura 6: Perfil de geração programado no simulador de arranjos fotovoltaicos.

**RESULTADOS OBTIDOS**

A Figura 7 mostra a temperatura de vários pontos internos do inversor obtidos durante os ensaios térmicos do inversor. Estas medidas de temperatura foram realizadas e armazenadas a cada 30 segundos durante as seis horas de teste, onde pode-se observar que a temperatura  $T_{INV}$  (T1 - temperatura do dissipador) atingiu o máximo de 57,5 °C (em  $t \approx 2$  horas), a temperatura  $T_{AMB}$  (T5 - temperatura ambiente) permaneceu quase constante, próxima a 22,2 °C (variando entre 21,1 e 23,6 °C). A temperatura máxima encontrada (73,3 °C) ocorreu no transformador (T4) ao final da segunda hora de teste.

A Tabela 3 apresenta um resumo dos parâmetros medidos e os coeficientes térmicos determinados necessários à modelagem térmica do inversor ( $UA_{DISS}$  e  $C_{ARM}$ ).

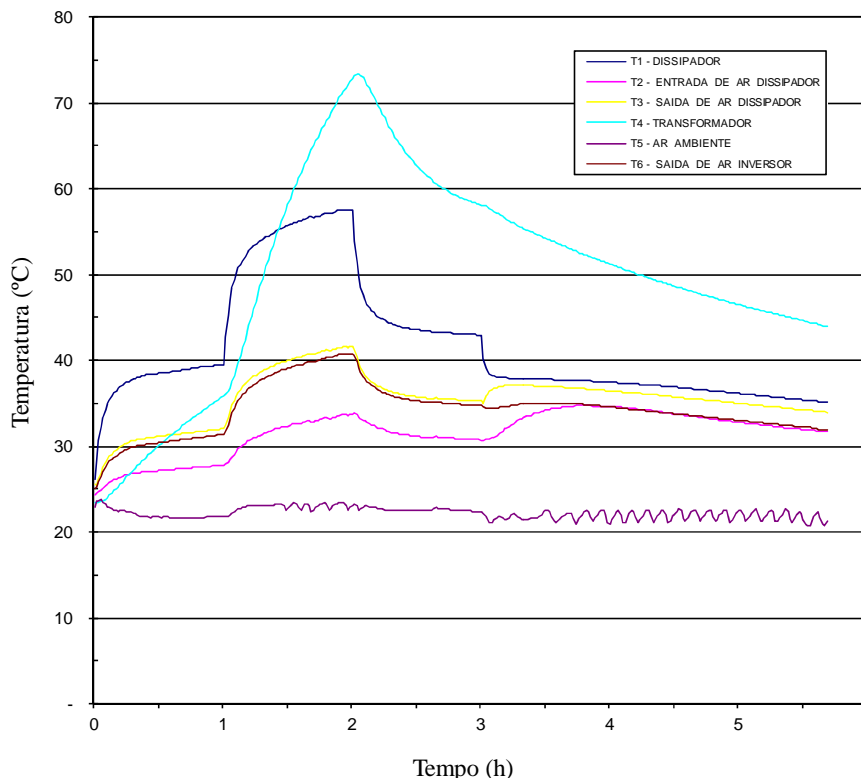


Figura 7: Curva da variação da temperatura com o tempo durante experimentos nos seis pontos de medição indicados na Figura 6.



Parâmetro	Unidade	A	B	C	D
Tempo	hora	$0 < t < 1$	$1 < t < 2$	$2 < t < 3$	$3 < t < 6$
Carregamento	%	41,2	82,5	41,2	0
$V_{PMP}$	V (CC)	499,2	499,2	499,2	0
$I_{PMP}$	A (CC)	45,5	91,1	45,5	0
$P_{PMP}$	W (CC)	22728	45456	22728	0
$\eta_{SPMP}$	%	98,1	98,9	98,1	---
$P_{CC, MEDIA}$	W (CC)	22298	44974	22304	0
$\eta_{CONV, CC, CA}$	%	91,7	93,9	91,7	---
$P_{CA, MEDIA}$	W (CA)	20444	41868	20454	0
$\eta_{GLOBAL}$	%	89,9	92,9	89,9	---
Inversor (temperatura T1)	processo	ligado	ligado	ligado	desligado
	início/fim °C	26,1/42,7	42,7/57,5	57,5/42,9	42,9/35,1
$T_{AMB}$ (temperatura T5)	°C	média 22,2 °C (variando entre 21,1 e 23,6°C)			
$UA_{DISS}$	convecção	forçada	forçada	forçada	natural
		92			1,2
$C_{ARM}$	armazenamento	14			

Tabela 3: Resultado resumo do teste de exemplo.

A Figura 8 mostra as curvas de eficiência obtidas em diferentes condições de carregamento do inversor.

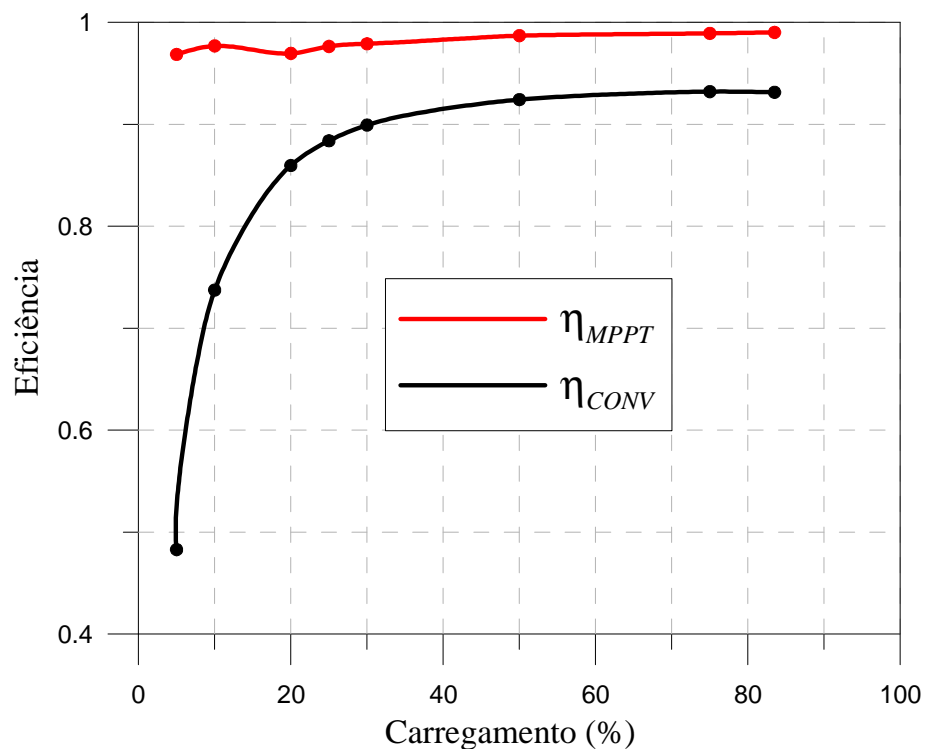


Figura 8: Curvas de eficiência de seguimento do ponto de máxima potência (linha vermelha) e eficiência de conversão (linha preta) determinadas em diferentes condições de carregamento de acordo com a norma EN50530.

## CONCLUSÕES

Este trabalho descreve o projeto e montagem de uma bancada de ensaios elétricos e térmicos para inversores conectados à rede, trifásicos e monofásicos.

Testes iniciais para validação demonstram que esta bancada está apta a realizar testes previstos em normas técnicas aplicáveis.

Medidas de eficiência e medidas de temperatura simultâneas permitiram a determinação experimental de coeficientes térmicos do modelo analítico do comportamento térmico do inversor.

Na comparação entre as medidas experimentais preliminares realizadas e os resultados do modelo analítico simplificado proposto para o comportamento térmico observou-se uma razoável concordância, mesmo diante de todas as simplificações adotadas no desenvolvimento do modelo.

Este tipo de inversor possui uma arquitetura composta por diversos componentes enclausurados em um gabinete ventilado. Para configuração de inversores deste tipo espera-se a obtenção de melhores resultados após avaliação e inclusão no modelo dos efeitos térmicos decorrentes do aquecimento de múltiplos componentes e recirculações de ar internas do inversor.

No desenvolvimento do estudo inicial foi possível observar também a existência de oportunidades de melhorias quanto gerenciamento térmico interno, favorecendo a redução de temperatura de alguns componentes e a obtenção de maiores índices de desempenho, além de maior vida útil do equipamento.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem à Companhia Estadual de Energia Elétrica do Rio Grande do Sul e ao CNPq pelo apoio financeiro. O estudo aqui apresentado faz parte da pesquisa P&D ANEEL/CEEE intitulado "Inserção da Geração Solar Fotovoltaica Urbana Conectada à Rede em Porto Alegre". O LABSOL é um laboratório associado ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Energias Renováveis e Eficiência Energética da Amazônia, INCT-EREEA.

## **REFERÊNCIAS**

- Norma técnica EN50530 European Standard (2010). "Overall Efficiency of Grid Connected Photovoltaic Inverters".
- Norma técnica ABNT NBR IEC 62116 (2012). "Procedimentos de Ensaio Anti-ilhamento".
- Norma técnica ABNT NBR 16150 (2013). "Sistemas Fotovoltaicos (FV) – Características da Interface de Conexão com a Rede Elétrica de Distribuição – Procedimentos de Ensaio de Conformidade".
- Norma técnica ABNT NBR 16149 (2013). "Sistema Fotovoltaicos (FV) – Características da Interface de Conexão com a Rede Elétrica de Distribuição".
- Prieb, C. W. M. (2011). "Determinação da Eficiência do Seguimento de Máxima Potência de Inversores para Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede de Distribuição", Tese de doutorado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre.
- Rampinelli, G. A. (2010). "Estudo de Características Elétricas e Térmicas de Inversores para Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede", Tese de doutorado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre.
- Prieb, C. W. M. e Krenzinger, A. (2012). "Determinação Experimental da Eficiência de Inversores para SFCR com o Uso de Simuladores de Arranjos Fotovoltaicos", IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferência Latino-Americana da ISES – São Paulo.
- Prieb, C. W. M. e Krenzinger, A. (2014). "Determinação da Eficiência Dinâmica de Seguimento do Ponto de Máxima Potência de Inversores para SFCR", V Congresso Brasileiro de Energia Solar - Recife.
- Rampinelli, G. A., Krenzinger, A. e Chenlo, F. (2014). "Mathematical Models for Efficiency of Inverters Used in Grid Connected Photovoltaic Systems", Renewable and Sustainable Energy Reviews 34, 578–587.

## **ABSTRACT**

## **ELECTRICAL AND THERMAL SYSTEM FOR TESTING OF GRID CONNECTED PV INVERTERS**

This paper describes the assembly of a testing system for grid connected inverters at the Solar Energy Laboratory of the Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Any electronic equipment has a safe operating temperature range above which instabilities may occur, reducing its operational life or even causing a drastic failure. The knowledge of the conversion efficiency of an inverter and the associated thermal losses is important for the proper sizing in a photovoltaic system, as well as for its development as a product. The described testing system allows the determination of the thermal and electrical parameters needed for modeling and simulating the behavior of PV inverters. The electrical model evaluates the electricity production, while the thermal model predicts the internal temperature of the inverter and losses associated to the intrinsic strategies for cooling and overheating protection.

**Keywords:** grid-tie inverters, inverter efficiency, thermal management.