

MODELAGEM TÉRMICA DE UM INVERSOR FOTVOLTAICO CONECTADO À REDE

Aryston Luiz Perin – aryston@projctum.com.br

César Wilhelm Massen Prieb – cprieb@ufrgs.br

Arno Krenzinger – arno.krenzinger@ufrgs.br

LABSOL - Laboratório de Energia Solar UFRGS

PROMEC – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Escola de Engenharia - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Resumo. A vida útil e a confiabilidade de equipamentos eletrônicos são fortemente dependentes da sua temperatura de operação. No caso dos inversores, a temperatura de operação está relacionada principalmente ao seu carregamento, à sua eficiência e às condições ambientais. Este trabalho faz parte de um estudo maior, que trata da influência da temperatura sobre o desempenho de inversores fotovoltaicos conectados à rede, avaliando tipos de estratégias de gerenciamento térmico e proteção de uso corrente em inversores comerciais. Nesta fase inicial estão sendo realizados ensaios experimentais para a determinação dos parâmetros térmicos de um inversor trifásico de 50 kW, a fim de caracterizar o seu comportamento térmico e desenvolver um modelo preditivo da temperatura de operação em regime transiente. Para estas avaliações térmicas e elétricas foi montada no Laboratório de Energia Solar da UFRGS uma bancada de testes para ensaios elétricos e térmicos de inversores para conexão à rede. O modelo preditivo de temperatura de operação e os parâmetros térmicos determinados experimentalmente serão então implementados em software de simulação de sistemas fotovoltaicos possibilitando a estimativa das perdas anuais de desempenho energético decorrentes das rotinas de gerenciamento térmico, dos seus efeitos e das limitações impostas durante a operação de inversores fotovoltaicos conectados à rede. Resultados preliminares indicam que o modelo simplificado proposto apresenta boa concordância com medidas realizadas. Estima-se a obtenção de melhores resultados de concordância após inclusão no modelo dos efeitos térmicos decorrentes de recirculações de ar no interior do inversor.

Palavras-chave: temperature derating, gerenciamento térmico, inversores fotovoltaicos conectados à rede.

1. INTRODUÇÃO

Inversores de sistemas fotovoltaicos são equipamentos de eletrônica de potência que, quando em operação, aumentam sua temperatura. Este aumento de temperatura é indesejável, porém é inerente ao seu funcionamento.

Equipamentos eletrônicos possuem um limite seguro de temperatura, acima do qual podem ocorrer instabilidades de operação, redução da vida útil e até mesmo falhas drásticas causadas pela falência de seus componentes (Catelani *et al.*, 2012). No caso dos inversores, o superaquecimento decorrente da insuficiência de dissipação térmica para o seu arrefecimento 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 citados a temperatura ambiente elevada e o acúmulo de pó em dissipadores de calor, entre outros. 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, afastando-o do ponto de máxima potência. Fabricantes de inversores tratam deste assunto pela expressão em inglês *temperature derating* (SMA, 2010 e Mallwitz, 2010). 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 (Krenzinger, 2007).

O estudo dos diversos componentes de um sistema fotovoltaico conectado à rede permite o desenvolvimento de modelos matemáticos do desempenho energético individual destes componentes (Sorensen *et al.*, 2012 e Rampinelli, 2014). Programas de simulação utilizam estes modelos individuais de maneira acoplada para predição do desempenho energético global do sistema (Krenzinger *et al.*, 2007 e Figueiredo, 2014). De maneira geral, estas avaliações energéticas resultam na viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos conectados a rede com retorno do investimento em muitos anos. Programas de simulação com modelos muito simplificados ou ainda sem rotinas de avaliação de fatores que contribuem para redução da capacidade de sistemas fotovoltaicos podem indicar erroneamente resultados muito otimistas quanto ao tempo de retorno de investimento.

As estratégias de gerenciamento térmico para proteção de inversores podem ser classificadas em dois grupos: estratégias internas, que estão relacionadas a características intrínsecas do inversor, algoritmos de controle do inversor,

componentes, dispositivos internos; e estratégias externas, que estão relacionadas às condições físicas e ambientais de instalação de inversores. No momento em que a temperatura interna do inversor ultrapassa um limite seguro de operação, podem atuar estratégias internas de gerenciamento térmico como o acionamento de um termostato limite para alarme e bloqueio de operação do inversor ou acionamento de ventilador para aumento de dissipação térmica e redução de temperatura ou ainda pela operação fora do ponto de máxima potência do arranjo fotovoltaico. O deslocamento do ponto de operação do inversor para evitar o superaquecimento através da redução da potência convertida é forçado por uma rotina do algoritmo de controle do inversor. Estratégias externas estão relacionadas ao planejamento das instalações em condições térmicas favoráveis, como local sombreado, ventilado, limpo, seco e com distâncias adequadas para evitar “curto-circuito” de ar quente.

2. MODELAGEM DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE INVERSORES

O inversor possui vários elementos internos geradores de calor, tais como semicondutores do módulo de potência, transformador isolador, cabos, relés, indutores, componentes eletrônicos, etc. A dissipação térmica entre estes diversos elementos geradores de calor e o meio possuem formas complexas combinando mecanismos de transferência de calor em regime transiente por condução, por convecção e por radiação.

A análise de transferência de calor em regime transiente de sistemas de capacidade concentrada (Holman, 1997) é um método de avaliação do comportamento térmico transiente que considera válidas algumas hipóteses de idealização e simplificações, tais como:

- O sistema, formado pelos diversos materiais e componentes internos geradores de calor, é considerado um corpo sólido, com temperatura uniforme em toda a sua extensão, com massa concentrada em um único ponto;
- Geração de calor interna uniforme e condução de calor unidimensional;
- As propriedades térmicas dos materiais, componentes e fluidos são consideradas constantes;

Eventualmente, devido a estas e outras simplificações adotadas, pode-se esperar discrepâncias deste modelo matemático puramente teórico com as medições experimentais, porém este método é simples e conveniente para resolver problemas de condução transiente, pois possui soluções analíticas exatas para vários modelos térmicos (Incropera, 2003).

Para ilustrar este método, a Fig. 1(a) apresenta um esquema de uma situação para a qual condições térmicas no interior de um sólido podem ser simultaneamente influenciadas pela dissipação térmica para a vizinhança e pela geração interna de calor. A Fig. 1(b) representa o circuito elétrico equivalente.

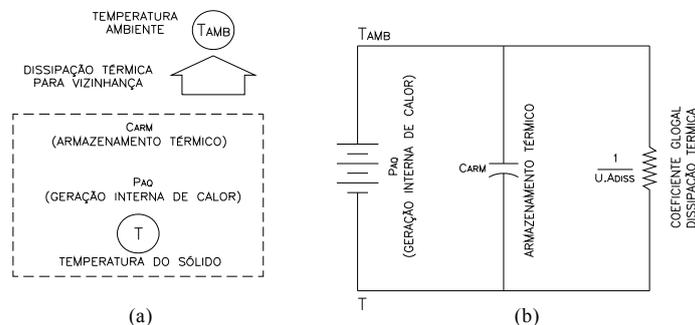


Figura 1 - Volume de controle para análise da geral da capacidade térmica concentrada (a), e circuito elétrico equivalente (b).

2.1 Modelo térmico proposto para o inversor

Na equação do balanço energético do inversor considera-se que a potência elétrica em corrente contínua P_{CC} absorvida pelo inversor é dividida em duas parcelas: a primeira parcela representa a potência elétrica útil convertida em potência elétrica em corrente alternada P_{CA} e a segunda parcela representa a potência elétrica convertida em calor e responsável pelo aquecimento interno do inversor P_{AQ} .

$$P_{CC} = P_{CA} + P_{AQ} \quad (1)$$

Considerando-se a eficiência de conversão de corrente contínua para corrente alternada η_{CONV} , tem-se:

$$P_{AQ} = P_{CC} - P_{CA} = P_{CC} \cdot (1 - \eta_{CONV}) \quad (2)$$

Neste modelo, os três mecanismos de transmissão de calor entre o inversor e o ambiente serão simplificados e concentrados em um único coeficiente equivalente, aqui denominado *coeficiente global concentrado de dissipação térmica*, U_{ADISS} .

$$P_{DISSIPADO} = P_{CONDUÇÃO} + P_{CONVECÇÃO} + P_{RADIACÃO} = UA_{DISS} \cdot (T_{INV} - T_{AMB}) \quad (3)$$

O somatório dos produtos dos diversos componentes por suas capacidades térmicas é considerado concentrado em um único coeficiente equivalente, aqui denominado *capacidade concentrada de armazenamento térmico*, C_{ARM} .

$$P_{ARMAZENADO} = \sum_m \rho_m \cdot c_m \cdot v_m \cdot \frac{dT}{dt} = C_{ARM} \cdot \frac{dT}{dt} \quad (4)$$

Para avaliação inicial, propõe-se um modelo simplificado com informações térmicas concentradas, conforme ilustrado na Fig. 1, onde o balanço energético é descrito conforme a Eq. (5).

$$P_{AQ} = UA_{DISS} \cdot (T_{INV} - T_{AMB}) + C_{ARM} \cdot \frac{dT}{dt} \quad (5)$$

A Eq. (6), solução exata da equação diferencial Eq. (5), representa o modelo matemático analítico proposto para caracterização do comportamento térmico e avaliação da temperatura do inversor em regime transiente.

$$\frac{T_{INV} - T_{AMB}}{T_{INV,0} - T_{AMB}} = \frac{1}{\exp\left(\frac{UA_{DISS}}{C_{ARM}} \tau\right)} + \frac{P_{AQ}}{UA_{DISS} (T_{INV,0} - T_{AMB})} \cdot \left[1 - \frac{1}{\exp\left(\frac{UA_{DISS}}{C_{ARM}} \tau\right)} \right] \quad (6)$$

onde:

τ é o tempo decorrido entre o tempo inicial ($t=t_i$) até o tempo final ($t=t_f$), $\tau = t_f - t_i$
 $T_{INV,0}$ é a temperatura do inversor no tempo inicial, é a temperatura $T(t=t_i)$
 T_{INV} é a temperatura do inversor no tempo final, é a temperatura $T(t=t_f)$
 T_{AMB} é a temperatura do ambiente do inversor
 P_{AQ} é a potência de aquecimento do inversor (geração interna de calor)
 UA_{DISS} é o coeficiente global concentrado de dissipação térmica entre o inversor e o ambiente
 C_{ARM} é a capacidade concentrada de armazenamento térmico do inversor.

Para a caracterização do comportamento térmico e avaliação da temperatura do inversor em regime transiente, pode-se utilizar uma equação diferencial similar à Eq. (5), com uma solução numérica iterativa explícita (Rampinelli, 2010). Rearranjando a equação diferencial Eq. (5) tem-se:

$$dT = \left[\frac{P_{AQ} - UA_{DISS} \cdot (T_{INV} - T_{AMB})}{C_{ARM}} \right] \cdot dt \quad (7)$$

Discretizando esta equação do calor pelo método de diferenças finitas de forma explícita, obtém-se a Eq. (8).

$$T^{p+1} - T^p = \left[\frac{P_{AQ} - UA_{DISS} \cdot (T^p - T_{AMB})}{C_{ARM}} \right] \cdot [t^{p+1} - t^p] \quad (8)$$

Rearranjando a Eq. (8), obtém-se à Eq. (9), um modelo matemático numérico iterativo explícito que permite a avaliação da evolução da temperatura do inversor obtida pelo avanço do tempo, utilizando intervalos de Δt .

$$T^{p+1} = T^p + \left[\frac{P_{AQ} - UA_{DISS} \cdot (T^p - T_{AMB})}{C_{ARM}} \right] \cdot \Delta t \quad (9)$$

onde:

p é o índice utilizado para denotar a dependência de tempo de T
 Δt é o intervalo de tempo entre tempo futuro t^{p+1} e tempo anterior t^p
 T^{p+1} é a temperatura do inversor no tempo futuro, $T(t=p+1)$
 T^p é a temperatura do inversor no tempo anterior $T(t=p)$.

2.2 Determinação dos coeficientes térmicos

Para utilização dos modelos matemáticos desenvolvidos, seja analítico ou numérico, se faz necessária a determinação dos parâmetros térmicos concentrados UA_{DISS} (coeficiente global concentrado de dissipação térmica entre o inversor e o ambiente) e C_{ARM} (capacidade concentrada de armazenamento térmico do inversor). Para a determinação destes parâmetros térmicos concentrados propõe-se a realização de experimentos térmicos no inversor de interesse.

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

3. BANCADA DE TESTES PARA INVERSORES CONECTADOS À REDE

Para determinação experimental dos coeficientes térmicos foi montada no LABSOL-UFRGS uma bancada de testes elétricos e térmicos de inversores (Fig. 2). Esta bancada é constituída por um *cluster* de três fontes *Regatron TopCon Quadro* de 16 kW cada, formando um simulador de arranjos fotovoltaicos com tensão de circuito aberto máxima de 600 V e corrente de curto circuito máxima de 96 A (Prieb, 2011). A potência convertida pode ser injetada diretamente na rede ou absorvida por um simulador de rede trifásico da marca *Supplier* de 50 kW. As grandezas elétricas em corrente contínua (corrente, tensão e potência) são medidas pelo sistema de aquisição de dados interno das fontes *Regatron*, enquanto que as grandezas em corrente alternada (correntes, tensões, potências ativa, reativa e aparente, fator de potência e distorção harmônica) são medidas por um analisador de potência *Yokogawa WT500*. As correntes são medidas indiretamente, através de transformadores de corrente. A Tab. 1 apresenta um resumo dos equipamentos, instrumentos, medidores e sistema de aquisição de dados da bancada, e principais variáveis medidas.

A referida bancada de testes permite a realização de ensaios elétricos e térmicos para avaliação de desempenho de inversores com potência de entrada de até 45 kW e está instalada em uma sala climatizada, o que permite a execução dos ensaios com temperatura ambiente prescrita. As temperaturas do ambiente e de diversos pontos do inversor foram medidas através de sensores Pt100 conectados a uma central de aquisição *Agilent 34972A* (Tab.1 e Fig. 3).

Tabela 1 - Configuração resumo dos componentes da bancada de testes elétricos e térmicos

| Componentes da bancada | Variáveis medidas | | Instrumentos | | Aquisição de dados |
|-----------------------------------|--|---------|-----------------------------------|-------------------------------|--------------------|
| | Descrição | Unidade | Tipo | Fabricante / modelo | Software |
| Simulador de arranjo fotovoltaico | Potência c.c. | W | Medidas internas da própria fonte | <i>Regatron TopCon Quadro</i> | <i>SASControl</i> |
| | Tensão c.c. | V | | | |
| | Corrente c.c. | A | | | |
| Temperatura do inversor | Aleta do dissipador de calor | T1 | Multímetro multiplexador | <i>Agilent 34972A</i> | <i>BenchVue</i> |
| | Entrada de ar do dissipador de calor | T2 | | | |
| | Saída de ar do dissipador de calor | T3 | | | |
| | Transformador | T4 | | | |
| | Ar ambiente sala do inversor | T5 | | | |
| | Saída de ar do inversor | T6 | | | |
| Saída do inversor | Potência ativa total c.a. (nas 3 fases) | W | Analisador de potência | <i>Yokogawa WT500</i> | <i>WTViewer</i> |
| | Potência aparente total c.a. (nas 3 fases) | VA | | | |
| | Fator de potência total (nas 3 fases) | % | | | |
| | Tensão c.a. (nas 3 fases) | V | | | |
| | Corrente c.a. (nas 3 fases) | A | | | |



(a)



(b)

Figura 2 - Vista geral da bancada e do inversor sob teste (a). Simulador de rede c.a. e fonte simuladora de arranjos fotovoltaicos (b).

4. TRABALHO EXPERIMENTAL

Para validação da bancada de ensaios desenvolvida e para planejamento da metodologia experimental foram realizados ensaios para avaliação do desempenho elétrico e térmico de um inversor trifásico de 50 kW. Este inversor possui dissipador de calor do módulo de potência instalado internamente ao invólucro, com arrefecimento forçado por ventiladores conforme a Fig. 3.

Após vários testes a bancada foi considerada apta para a realização dos ensaios elétricos e térmicos para avaliação do desempenho elétrico e avaliação do comportamento térmico de inversores.

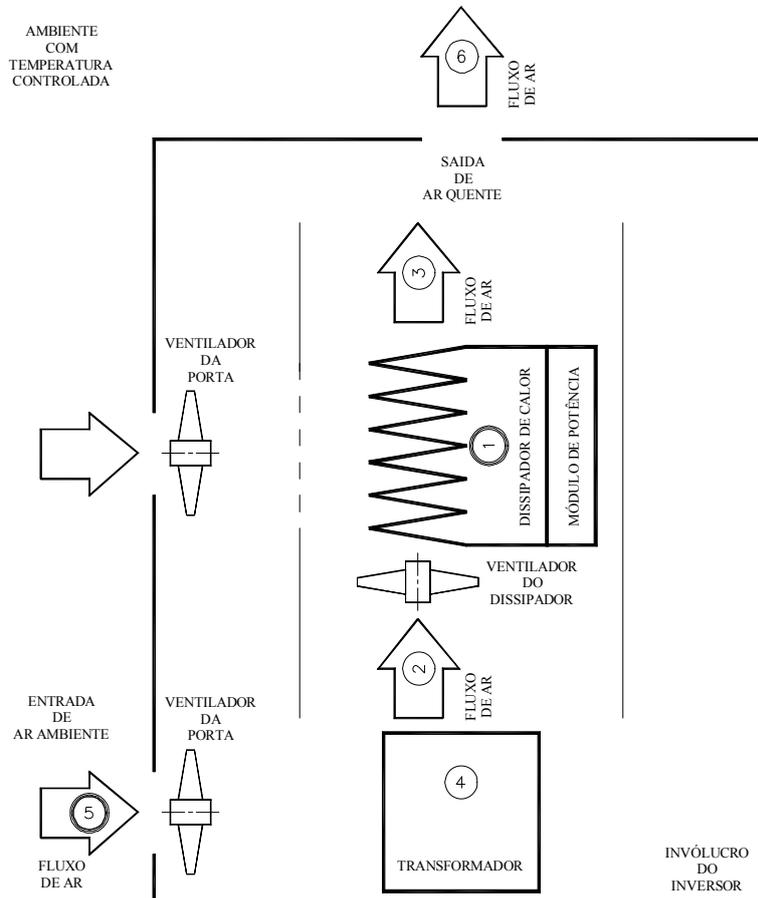


Figura 3 - Esquema do inversor e locais dos pontos de medições de temperatura do inversor.

4.1 Testes realizados – comportamento elétrico e térmico do inversor

Nestes primeiros ensaios realizados foram medidos parâmetros elétricos de desempenho e eficiência simultaneamente às medidas da variação da temperatura de alguns componentes internos do inversor, conforme variáveis descritas na Tab. 1.

Para a caracterização da temperatura do inversor foi adotada a temperatura do dissipador do módulo de potência $T1$. Para a caracterização da temperatura ambiente foi utilizada a temperatura do ar na entrada do ar de arrefecimento na porta do inversor $T5$, conforme o esquema da Fig. 3.

Assim, segue breve descrição de um destes experimentos iniciais, com duração de aproximadamente oito horas. Os condicionadores de ar da sala que abriga o inversor e a bancada foram previamente ajustados para 25 °C, temperatura inicial medida por todos os sensores de temperatura. A fonte *Regatron* foi programada para simular um arranjo fotovoltaico com potência máxima de 45.456 W, durante cinco horas. Durante este período, a potência média efetivamente absorvida pelo inversor foi de 44.932 W e a potência média entregue à rede foi de 41.779 W (aproximadamente 83,5 % da potência nominal do inversor). Os sensores de temperatura mediram a evolução das temperaturas a uma taxa de uma varredura a cada três minutos. Decorridas as cinco horas de iniciais, o simulador de arranjos foi desconectado e o inversor interrompeu o fornecimento de energia à rede. Os sensores de temperatura continuaram acompanhando o arrefecimento do inversor por mais três horas. Os parâmetros de programação, os dados medidos e as condições de operação durante os ensaios são apresentados nas tabelas Tab. 2, Tab. 3, Tab. 4, Tab. 5 e Tab. 6.

Tabela 2 - Curva de programação do ensaio – alimentação elétrica do inversor c.c. (tempos e carregamentos programados na fonte simuladora de arranjo fotovoltaico).

| Parâmetro | Unidade | Inversor ligado (aquecimento) | Inversor desligado (arrefecimento) |
|--------------------------|---------|-------------------------------|------------------------------------|
| Tempo | hora | 0h < t < 5h | 5h < t < 8h |
| Carregamento do inversor | % | 83,5 | 0 |

Tabela 3 - Dados elétricos programados – alimentação elétrica do inversor c.c. (potência c.c. disponibilizada pelo simulador de arranjo fotovoltaico).

| Parâmetro | Unidade | Inversor ligado (aquecimento) | Inversor desligado (arrefecimento) |
|-----------|----------|-------------------------------|------------------------------------|
| V_{PMP} | V (c.c.) | 499,2 | 0 |
| I_{PMP} | A (c.c.) | 91,056 | 0 |
| P_{PMP} | W (c.c.) | 45.456 | 0 |

Tabela 4 - Dados elétricos medidos - eficiência de seguimento de máxima potência (potência c.c. absorvida pelo inversor)

| Parâmetro | Unidade | Inversor ligado (aquecimento) | Inversor desligado (arrefecimento) |
|-----------------|----------|-------------------------------|------------------------------------|
| η_{SPMP} | % | 98,84 | --- |
| $P_{CC, MEDIA}$ | W (c.c.) | 44.932 | 0 |

Tabela 5 - Dados elétricos medidos - eficiência de conversão do inversor η_{CONV} (potência c.c. convertida pelo inversor e potência injetada na rede).

| Parâmetro | Unidade | Inversor ligado (aquecimento) | Inversor desligado (arrefecimento) |
|-----------------|-------------|-------------------------------|------------------------------------|
| η_{CONV} | % | 92,98 | --- |
| $P_{CA, MEDIA}$ | W (c.a.) | 41.779 | 0 |
| $P_{AQ, MEDIA}$ | W (térmico) | 3.153 | 0 |

Tabela 6 - Dados térmicos medidos e condições de operação.

| Local | Estágio | Inversor ligado (aquecimento) | Inversor desligado (arrefecimento) |
|----------|--------------------------|---|------------------------------------|
| Inversor | temperatura início / fim | 25,5/61,5 °C | 61,5/42,2 °C |
| | ventiladores | ligados | desligados |
| Ambiente | temperatura | média 23,9 °C (variando entre 22,0 e 25,5 °C) | |

4.2 Resultados obtidos - Parâmetros térmicos determinados experimentalmente

Após a realização das medidas, os resultados foram ajustados à Eq. (6) que representa o modelo analítico do comportamento térmico do inversor. Como este inversor utiliza ventilação forçada, a qual fica acionada sempre que o inversor está em funcionamento, tem-se dois coeficientes globais concentrados de dissipação térmica, um para condição de inversor/ventilação ligados e outro para a condição de inversor/ventilação desligados (Tab. 7).

Utilizando a temperatura ambiente média de 23,9 °C e potência de aquecimento 3.153 W, obteve-se o coeficiente global concentrado de dissipação térmica entre o inversor e o ambiente $UA_{DISS,VL} = 88,3$ (durante o processo de aquecimento, com ventiladores ligados) e $UA_{DISS,VD} = 3,6$ (durante o processo de arrefecimento, com ventiladores desligados). Obteve-se também a capacidade concentrada de armazenamento térmico do inversor $C_{ARM} = 16,5$.

Tabela 7 - Resultados obtidos - Parâmetros térmicos determinados experimentalmente.

| Coeficiente | | Inversor ligado (aquecimento) | Inversor desligado (arrefecimento) |
|---------------|-------------|-------------------------------|------------------------------------|
| Dissipação | UA_{DISS} | convecção forçada | convecção natural |
| | | 88,3 | 3,6 |
| Armazenamento | C_{ARM} | 16,5 | |

Substituindo parâmetros determinados UA_{DISS} e C_{ARM} na Eq. (6), que representa o modelo matemático analítico proposto, pode-se avaliar a variação da temperatura neste inversor nas duas situações de operação.

Para momentos de operação do inversor entre os tempos de 0 e 5 horas, quando inversor está ligado ($P_{AQ} \neq 0$) e os ventiladores do módulo de potência e da porta do gabinete também estão ligados, tem-se:

$$T_{INVERSOR}(t) = T_{AMBIENTE}(t) + \frac{T_{INVERSOR, inicial}(t=0) - T_{AMBIENTE}(t)}{\exp\left(\frac{88,3}{16,5}t\right)} + \frac{P_{AQ}(t)}{88,3} \cdot \left[1 - \frac{1}{\exp\left(\frac{88,3}{16,5}t\right)} \right] \quad (10)$$

Para momentos de operação do inversor entre os tempos de 5 e 8 horas, quando o inversor está desligado ($P_{AQ} = 0$), os ventiladores do módulo de potência e da porta do gabinete também estão desligados, tem-se:

$$T_{INVERSOR}(t) = T_{AMBIENTE}(t) + \frac{T_{INVERSOR, inicial}(t=0) - T_{AMBIENTE}(t)}{\exp\left(\frac{3,6}{16,5}t\right)} \quad (11)$$

Na Fig. 4, os dados medidos de temperatura do inversor e temperatura ambiente são plotados juntamente com curvas obtidas com as equações Eq. (10) e Eq.(11).

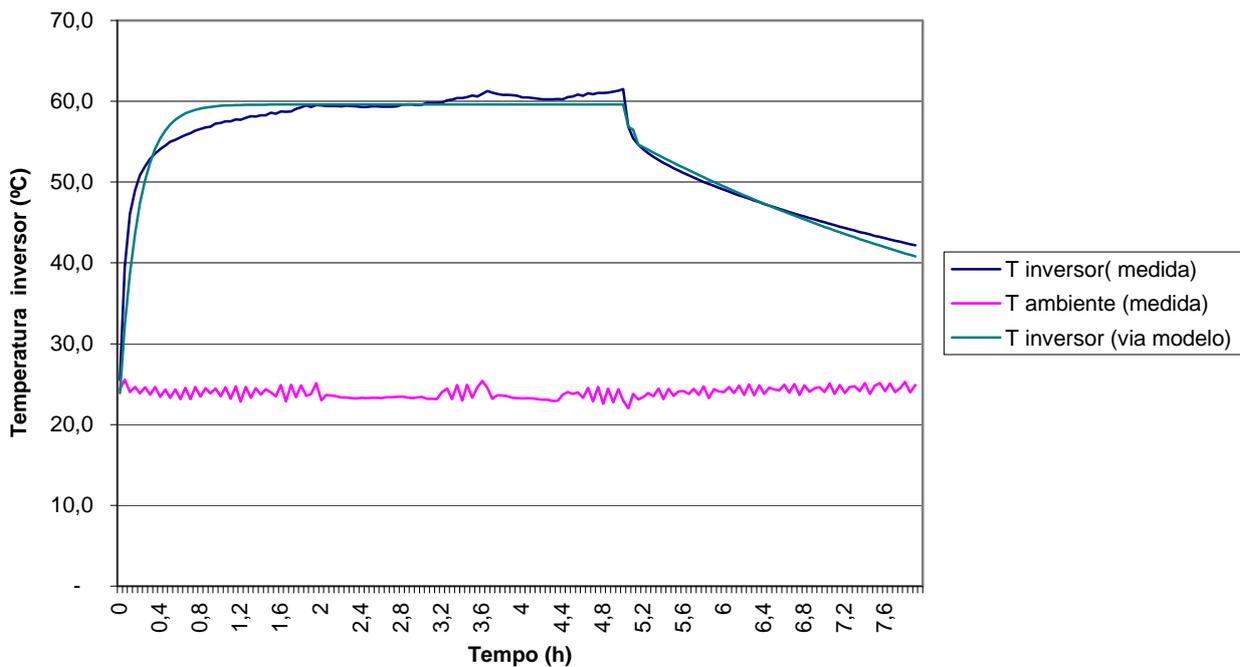


Figura 4 - Medições térmicas durante teste de inversor (medidas das temperaturas do inversor e do ambiente, e curva do modelo proposto para predição da temperatura do inversor).

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresenta um estudo sobre o comportamento térmico de um inversor fotovoltaico de média capacidade (50 kW).

Este tipo de inversor possui uma arquitetura composta por diversos componentes enclausurados em um gabinete ventilado. Apesar desta complexidade, foi proposto inicialmente um modelo simplificado analítico para avaliação do comportamento térmico e predição de temperatura de operação.

Para caracterização do desempenho e determinação de coeficientes térmicos é necessária a realização de ensaios experimentais térmicos e elétricos. Para tanto foi construída uma bancada especialmente dedicada à execução destes testes em inversores conectados à rede para potência nominal de até 45 kW.

Quando comparado às medidas experimentais preliminares realizadas ao modelo simplificado proposto, observou-se uma concordância aceitável, mesmo diante de todas as simplificações adotadas no desenvolvimento do modelo. Observando e comparando os dados obtidos estima-se que o presente modelo simplificado pode ainda ser otimizado com a inclusão dos efeitos térmicos decorrentes do aquecimento de múltiplos componentes e recirculações de ar internas do inversor.

No desenvolvimento do estudo foi possível observar também a possibilidade de melhorias quanto ao gerenciamento térmico interno, favorecendo a redução de temperatura de alguns componentes e a obtenção de maiores índices de desempenho e eficiência, e expectativa de maior durabilidade.

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

- Catelani, M., Ciani, L., Simoni, E., 2012. Photovoltaic inverter: Thermal characterization to identify critical components, XX IMEKO World Congress – Metrology for Green Growth, Busan, Republic of Korea.
- Figueiredo, G., Macêdo, W., Pinho, J. T., 2014. Computational Tool for Sizing and Assessment of Grid-connected Photovoltaic Systems. Energy Procedia, v. 57, p. 168-177.
- Holman, J. P., 1997. Heat Transfer, 8^o ed., McGraw-Hill, New York.
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., 2003. Fundamentos de Transferência de Calor e Massa, 5^o edição, LTC Editora, Rio de Janeiro.
- Krenzinger, A. et al., 2007. Simulação computacional de sistema fotovoltaico conectado à rede. I CBENS - I Congresso Brasileiro de Energia Solar. ABENS - Associação Brasileira de Energia Solar.
- Mallwitz, R., Engel, B., 2010. Solar Power Inverters, SMA Solar Technology AG, CIPS 2010, Nuremberg, Germany, paper 6.2.
- Prieb, C. W. M., 2011. Determinação da eficiência do seguimento de máxima potencia de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados a rede de distribuição, Tese de doutorado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre.
- Rampinelli, G.A. et al., 2014. Mathematical models for efficiency of inverters used in grid connected photovoltaic systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews 34, 578–587.
- Rampinelli, G. A., 2010. Estudo de características elétricas e térmicas de inversores para sistema fotovoltaico conectado a rede, Tese de doutorado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre.
- Sorensen, N., Thomas, E., Quintana, M., Barkaszi, S., Rosenthal, A., Zhang, A., Kurtz, S., 2012. Thermal study of inverter components, 37th IEEE PV Spec. Conf., Area 9.
- SMA Solar Technology AG, 2010. Temperature Derating. Technical Information, UEN 103910.

THERMAL MODELLING OF A GRID-TIE INVERTER

Abstract. *The service life and reliability of electronic equipment are heavily dependent on their operating temperature. In the case of inverters, the operation temperature is related mainly to the loading, to the efficiency and the ambient conditions. This work is part of a larger study, which deals with the influence of temperature on the performance of photovoltaic grid-tie inverters, evaluating different thermal management and protection strategies in commercial inverters. In this initial phase experimental tests are being carried out for determining the thermal parameters of a 50 kW three-phase inverter in order to characterize its thermal behavior and to develop a predictive model of the operating temperature in transient regime. For these thermal and electrical evaluations test bench was assembled at the Solar Energy Laboratory of UFRGS for electric and thermal testing of grid-tie inverters. The predictive model of operating temperature and the thermal parameters experimentally determined will then be implemented in simulation software of photovoltaic systems making it possible to estimate the annual losses of energy resulting from the effects and the limitations imposed by thermal management routines during operation of PV grid-tie. Preliminary results indicate that the simplified model proposed shows good agreement with measurements. Better agreement is to be expected after the inclusion to the model of the thermal effects of the air recirculation inside the inverter.*

Key words: *temperature derating, thermal management, grid-tie inverter.*