

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE ARREFECIMENTO
NO DESEMPENHO E DURABILIDADE DE INVERSORES
DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE

por

Aryston Luiz Perin

Tese para obtenção do Título de
Doutor em Engenharia

Porto Alegre, Dezembro de 2016

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE ARREFECIMENTO
NO DESEMPENHO E DURABILIDADE DE INVERSORES
DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE

por

Aryston Luiz Perin
Mestre em Engenharia Mecânica

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC,
da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos
requisitos necessários para obtenção do Título de

Doutor em Engenharia

Área de Concentração: Energia

Orientador: Prof. Dr. Arno Krenzinger

Aprovado por:

Profª. Dra. Adriane Prisco Petry (UFRGS / PROMEC)

Prof. Dr. Giuliano Arns Rampinelli (UFSC)

Prof. Dr. Mario Henrique Macagnan (UNISINOS)

Prof. Dr. Jakson Manfredini Vassoler
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 22 de Dezembro de 2016

A minha família

Ary e Cecilia

Branca e Anna

Áurea, Anderson, Arylton

AGRADECIMENTOS

Ao meu professor e orientador Dr. Arno Krenzinger pelos conhecimentos recebidos, pela paciência, incentivo e constante dedicação para que este trabalho tivesse um excelente resultado.

Ao Dr. César W. M. Prieb pela importante colaboração no desenvolvimento do trabalho experimental.

Aos professores da Comissão de Avaliação, Profa. Dra. Adriane Prisco Petry, Prof. Dr. Giuliano Arns Rampinelli, Prof. Dr. Mario Henrique Macagnan, por seus valiosos comentários e sugestões, que ajudaram a enriquecer este trabalho.

A todos meus professores, pelos quais tenho muito respeito e gratidão pelos conhecimentos recebidos.

A todos os funcionários da UFRGS.

Aos meus colegas de laboratório por seus comentários e sugestões.

À minha família pelo apoio e pelas horas de convívio e lazer suprimidas.

E a todos aqueles que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Inversores de sistemas fotovoltaicos são equipamentos de eletrônica de potência que fornecem energia elétrica em corrente alternada (CA) a partir de uma fonte de energia elétrica em corrente contínua (CC), no caso, os módulos fotovoltaicos. Estes inversores 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 de operação, acima do 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. Para proteção, para aumento da vida útil, para maior confiabilidade, para maior estabilidade e para maior segurança de operação de componentes, inversores possuem rotinas em seus algoritmos de controle com estratégias automatizadas dedicadas ao gerenciamento térmico. Estas rotinas de proteção e gerenciamento térmico, sempre quando acionadas, tendem a reduzir a capacidade de conversão de potência do inversor, seja pelo acionamento de um ventilador auxiliar, seja pelo deslocamento do ponto de operação em máxima potência. Fabricantes de inversores tratam deste assunto pelo termo “*temperature derating*” (em inglês). Esta tese apresenta um estudo relacionado a influência da temperatura sobre o desempenho de inversores fotovoltaicos conectados à rede. Avalia tipos de estratégias de gerenciamento térmico e proteção de uso corrente em inversores comerciais. Apresenta resultados de ensaios experimentais para determinação de parâmetros térmicos característicos dos inversores. Descreve um modelo preditivo da temperatura de operação em regime transiente. A partir da determinação experimental de parâmetros térmicos, o modelo preditivo de temperatura de operação foi implementado no software de simulação dinâmica para dimensionamento e avaliação de sistemas fotovoltaicos *FVCONNECT*, desenvolvido no LABSOL/UFRGS, estando o mesmo apto para simular a operação e estimar 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. Um dos resultados da simulação é a evolução da temperatura do inversor, permitindo avaliar a frequência e amplitude dos ciclos térmicos ao qual o inversor é submetido e, conseqüentemente, determinar uma estimativa para durabilidade do inversor.

Palavras-chave: *Temperature derating*; Influência da temperatura; Gerenciamento térmico; Inversores; Sistemas fotovoltaicos conectados à rede.

ABSTRACT

Photovoltaic inverters are electronic power devices that provide electrical energy in alternating current (AC) from a source of electrical energy in direct current (DC) - a photovoltaic generator, in this case. Inverters increase their temperature when in operation. This rise in temperature is not desirable, but inherent to its operation. Any electronic equipment has a safe operating temperature limit. When this limit is surpassed, operating instability, life reduction or even drastic failure may occur. The knowledge of the electrical conversion efficiency and the losses responsible for the heating is important for the proper sizing of grid-tie inverters in photovoltaic systems, as well as for the development of the inverter as a product. In order to increase the useful life of the device and its components, for greater reliability, safety, stability and security of operation, inverters have routines in their algorithms of control with automated strategies dedicated to the thermal management. These protection and thermal management routines, whenever activated, tend to reduce the power conversion capacity of the inverter, either by the activation of an auxiliary fan or by the displacement of the operating point at maximum power. Inverter manufacturers address this issue by the term "temperature derating". This thesis presents a methodology to evaluate the influence of the performance of different strategies to avoid excessive temperature of the inverter components on its performance and durability. It is also made an evaluation of different thermal management strategies and protection used in commercial inverters. Results of experimental tests for determination of thermal parameters characteristic of the inverters are presented. A predictive model of transient operating inverter temperature is also described. From the experimental determination of thermal parameters, the predictive model of operating temperature was implemented to the FVCONECT, a dynamic simulation software for sizing and evaluation of photovoltaic systems developed in LABSOL / UFRGS. With this modification, the software was able to simulate the operation and estimate losses of energy due to the thermal management routines, their effects and the limitations imposed during the operation of grid-tie inverters. One of the results of the simulation is the evolution of the inverter temperature, allowing to evaluate the frequency and amplitude of thermal cycles to which the inverter is subjected and, as a consequence, an estimate of durability of the inverter.

Keywords: Temperature derating; Temperature influence; Thermal management; Inverters; grid-connected photovoltaic systems.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Inversores para energia solar fotovoltaica	2
1.2	Geração de energia elétrica no Brasil	3
1.3	Geração elétrica distribuída	4
1.4	Sistemas geradores de energia elétrica solar fotovoltaica conectados à rede ..	5
1.5	Uso em larga escala de geradores solares fotovoltaicos conectados à rede ...	6
1.6	Motivação	6
1.7	Objetivo geral	7
1.8	Objetivos específicos	7
1.9	Escopo e organização desta Tese	8
2	INVERSORES	11
2.1	Inversores para Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR)	12
2.2	Confiabilidade e vida útil de inversores	13
2.2.1	Vida útil e gerenciamento térmico de inversores	15
2.3	Ferramentas de projeto, modelos, simulações, experimentos e monitoramento	16
2.4	Histórico sobre desenvolvimento de inversores de média potência	17
2.4.1	Avanços na tecnologia de inversores	18
2.4.2	Montagem eletromecânica de inversores	19
2.4.3	Histórico evolutivo sobre montagem de inversores	19
3	SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE (SFCR)	21
3.1	Configuração eletromecânica geral de sistemas fotovoltaicos conectados à rede	21
3.1.1	Configuração de SFCR quanto aos arranjos de módulos fotovoltaicos	23
3.1.2	Configuração de SFCR quanto aos tipos de inversores	23
3.1.3	Configuração de SFCR quanto à interligação à rede de distribuição	24
3.2	Módulo fotovoltaico	24
3.2.1	Curva característica I-V do módulo fotovoltaico	25
3.2.2	Arranjo fotovoltaico - Curva característica “I - V” e ponto de máxima potência	25
3.2.3	Efeito da temperatura sobre o módulo fotovoltaico	26
3.2.4	Efeito da radiação solar sobre o módulo fotovoltaico	26
3.2.5	Efeito da temperatura e irradiação sobre o ponto de máxima potência	27
3.2.6	Informações técnicas típicas de um módulo fotovoltaico	28
3.2.7	Ensaio de desempenho e normas técnicas aplicáveis a módulos fotovoltaicos	29
3.3	Caracterização de inversores e seus componentes	30
3.3.1	Características gerais de inversores – Tipos, configurações e parâmetros funcionais .	30
3.3.2	Características gerais de inversores – Componentes internos	31
3.3.3	Topologia de inversores	33
3.3.4	Ensaio de desempenho e normas técnicas aplicáveis a inversores fotovoltaicos	34
3.4	Modelagem do desempenho elétrico de inversores	34
3.4.1	Fatores que influenciam a eficiência de inversores	35
3.4.1.1	Carregamento de inversores	35
3.4.1.2	Seguimento do ponto de máxima potência	36
3.5	Ensaio e experimentos de desempenho	37
3.6	Eficiência de inversores	39
3.6.1	Eficiência do seguimento do ponto de máxima potência (SPMP)	39
3.6.2	Eficiência de conversão CC-CA	40

3.6.3	Eficiência total	40
3.6.4	Eficiência média ponderada	41
3.6.4.1	Eficiência média ponderada californiana	41
3.6.4.2	Eficiência média ponderada européia	41
3.6.4.3	Eficiência média ponderada brasileira	42
3.6.5	Eficiência máxima	42
3.6.6	Modelos de eficiência do inversor	42
3.7	Fator de dimensionamento do inversor	43
4	GERENCIAMENTO TÉRMICO DE INVERSORES	44
4.1	Aquecimento de inversores de sistemas fotovoltaicos	44
4.2	Problemas relacionados ao aquecimento de inversores	45
4.3	Estratégias de gerenciamento térmico para proteção de inversores	45
4.3.1	Estratégias internas de gerenciamento térmico	46
4.3.1.1	Dissipador térmico passivo (sem ventilação forçada)	46
4.3.1.2	Dissipador térmico ativo (com ventilação forçada)	47
4.3.1.3	Termostato limite liga/desliga (TLD)	47
4.3.1.3.1	Termostato limite – alarme e bloqueio manual	48
4.3.1.3.2	Termostato limite – desligamento automático	48
4.3.1.4	Rotina de redução parcial de potência para evitar superaquecimento (RPT)	48
4.3.2	Efeito das estratégias de arrefecimento sobre potência de saída do inversor	51
4.3.3	Estratégias externas de gerenciamento térmico	53
4.3.3.1	Instalação em local com características favoráveis a boa dissipação térmica	53
4.3.3.2	Arrefecimento da casa de máquinas	54
4.3.3.3	Instalação de inversores em eletrocentros	54
4.3.4	Outras considerações sobre gerenciamento térmico	55
4.3.4.1	Fatores que ativam a rotina de redução de potência para evitar superaquecimento	55
4.3.4.2	Aperfeiçoamento de estratégias para gerenciamento térmico	57
4.3.4.3	Considerações de projeto relacionadas à redução de potência por superaquecimento	58
5	MODELAGEM DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE INVERSORES	61
5.1.1	Transferência de calor em regime transiente em sistemas de capacidade concentrada	61
5.1.2	Desenvolvimento do modelo térmico para o inversor	63
5.1.2.1	Modelo térmico analítico proposto para o inversor	64
5.1.2.2	Modelo térmico numérico para o inversor	67
5.1.3	Simplificações adotadas	68
6	ANÁLISE DE CONFIABILIDADE E DURABILIDADE DO INVERSOR	69
6.1	Modelos para estimativa de durabilidade	69
6.1.1	Modelo para predição de falhas relacionadas à temperatura	70
6.1.2	Caracterização dos ciclos térmicos	73
6.1.2.1	Ciclos térmicos uniformes	73
6.1.2.2	Ciclos térmicos não-uniformes	74
6.1.2.3	Contagem de ciclos não uniformes – método rainflow	74
6.1.3	Limitações do método apresentado	81
6.2	Testes de envelhecimento acelerados por temperatura	82
7	METODOLOGIA PARA SIMULAÇÃO DE SFCR	84
7.1	Programas de simulação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede	85
7.1.1	Modelos de dados climáticos e arranjos fotovoltaicos	85

7.1.2	Modelos de inversores	86
7.1.3	Modelos de simulação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede	87
7.2	Avanços em modelos de simulação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede	88
7.2.1	Resumo de etapas e modelos	90
7.2.2	Modelo do comportamento térmico	91
7.2.2.1	Determinação experimental de coeficientes térmicos	91
7.2.3	Modelo para análise comparativa de durabilidade	92
7.2.4	Utilização do modelo térmico do inversor	92
7.2.5	Metodologia do programa de simulação	93
8	BANCADA DE ENSAIOS ELÉTRICOS E TÉRMICOS	96
8.1	Local da bancada de testes	96
8.2	Características gerais da bancada de testes de inversores	96
8.3	Descrição dos principais componentes da bancada	97
8.3.1	Simulador de arranjos de módulos fotovoltaicos	99
8.3.2	Simulador de rede CA externa	100
8.3.3	Simulador de carga RLC (carga resistiva - indutiva – capacitiva)	100
8.3.4	Caixa de conexões e proteções elétricas	101
8.3.5	Sistema de controle e aquisição de dados	101
8.3.6	Sistema de controle de temperatura ambiente	102
8.4	Medição, programação e aquisição de dados	102
8.4.1	Grandezas medidas pela bancada de testes	102
8.4.2	Programação e planejamento de testes	102
8.4.3	Medições de grandezas elétricas e térmicas	105
8.4.3.1	Medição de grandezas elétricas - corrente contínua (CC)	105
8.4.3.2	Medição de grandezas elétricas – corrente alternada (CA)	105
8.4.3.3	Medição de temperatura	107
8.4.4	Sistema de controle, aquisição de dados e pós-processamento	109
8.4.4.1	Sistema de controle da bancada de teste de inversores	109
8.4.4.2	Sistema de aquisição de dados	109
8.4.4.3	Pós-processamento de variáveis medidas	110
8.4.5	Sistema de controle de temperatura ambiente	110
9	RESULTADOS DE EXPERIMENTOS E SIMULAÇÕES	111
9.1	Resultados experimentais – comportamento elétrico e térmico do inversor	112
9.1.1	Medidas realizadas no ensaio 1	112
9.1.1.1	Modelo térmico resultante no ensaio 1	116
9.1.2	Modelo térmico adotado	117
9.1.2.1	Modelo térmico resultante no ensaio 2	119
9.1.3	Resultados obtidos quanto à eficiência do inversor	121
9.1.4	Outras considerações sobre estes ensaios	122
9.2	Resultados de simulações de SFCR	123
9.2.1	Dados utilizados para simulações	124
9.2.2	Combinações de fatores nas simulações realizadas	125
9.2.3	Resultados quanto à produção de energia	125
9.2.4	Resultados obtidos quanto à estimativa de durabilidade do inversor	129
9.3	Comentários sobre resultados obtidos	131
10	CONCLUSÕES	133
10.1	Sugestões de trabalhos futuros e continuidade do trabalho	135

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137
Referências bibliográficas citadas no texto	137
Bibliografia complementar	139
APÊNDICE A Exemplos de módulos fotovoltaicos	144
APÊNDICE B Estratégias de gerenciamento térmico do inversor On-Grid Trifásico da CP Eletrônica / Schneider Electric	145

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Esquema de interligações básicas de sistemas fotovoltaicos conectados à rede – SFCR (fluxograma de energia: solar - elétrica CC - elétrica CA)	11
Figura 2.2	Diagrama esquemático funcional de um inversor fotovoltaico conectado à rede .	13
Figura 2.3	Análise de falhas em equipamentos eletrônicos de potência: (a) distribuição de falhas entre os principais componentes, (b) distribuição das principais fontes de falhas [adaptado de Blaabjerg et al., 2013]	14
Figura 2.4	Eventos de manutenção ocorridos durante 5 anos de operação de uma usina fotovoltaica de 3,5 MW conectada à rede: (a) Ocorrência de manutenção por subsistema, (b) Custo de manutenção por subsistema [adaptado de Blaabjerg et al., 2013]	14
Figura 3.1	SFCR de 4,8 kW _{pico} – Laboratório de Energia Solar – LABSOL – UFRGS – RS	21
Figura 3.2	Exemplos de SFCR: (a) esquema de uma instalação residencial, (b) uma grande central, (c) sistemas fotovoltaicos urbanos	22
Figura 3.3	Esquema de diferentes configurações de sistemas fotovoltaicos conectados à rede (a) inversor central, (b) inversor <i>string</i> , (c) Módulo AC, (d) inversor multi- <i>string</i> [adaptada de Prieb, 2011]	23
Figura 3.4	Módulos fotovoltaicos	24
Figura 3.5	Curvas características típicas do módulo fotovoltaico <i>I-V</i> e <i>P-V</i>	25
Figura 3.6	Curva característica de arranjos fotovoltaicos: (a) efeito da temperatura sobre a curva “tensão x corrente”, (b) efeito da temperatura sobre o ponto de máxima potência	26
Figura 3.7	Curva característica de arranjos fotovoltaicos (a) efeito da irradiância solar sobre a curva “tensão x corrente”, (b) efeito da irradiância solar sobre o ponto de máxima potência	27
Figura 3.8	Efeito da variação de temperatura sobre curvas características <i>I-V</i> e <i>P-V</i>	28
Figura 3.9	Esquema de um inversor trifásico	32
Figura 3.10	Esquemas de configurações eletroeletrônicas de inversores de SFCR	33
Figura 3.11	Curvas de eficiência de um inversor fotovoltaico, para diferentes tensões CC e diferentes carregamentos (fabricante SMA)	36

Figura 3.12	Rotina de controle do rastreamento do ponto de máxima potência (etapas simplificadas)	38
Figura 4.1	Curvas de dados medidos de um inversor durante um dia – evolução da “Potência CC” e da “Tensão CC” [adaptado de Rampinelli, 2010]	50
Figura 4.2	Rotina de estratégia de arrefecimento do inversor pelo método da redução de potência para evitar superaquecimento (etapas simplificadas)	51
Figura 4.3	Gráficos “potência CA x tempo” e “temperatura x tempo” para diferentes estratégias de arrefecimento	52
Figura 4.4	Exemplos de agrupamentos de inversores recomendáveis conforme o tipo de arrefecimento interno com convecção (a) natural, (b) forçada com fluxo vertical, (c) forçada com fluxo misto	54
Figura 4.5	Curva típica da redução de potência na saída de inversores , ilustrando efeito da temperatura ambiente (<i>temperature derating</i>) e da tensão CC, sobre a potência de saída. [adaptado do catálogo do inversor modelo SB 3000 do fabricante SMA]	56
Figura 4.6	O abastecimento de energia relacionado com a faixa de potência do gerador fotovoltaico (exemplo Freiburg em Breisgau, Alemanha) [adaptado de SMA, 2012]	59
Figura 4.7	Eficiência de conversão CC/CA de um inversor, quando potência nominal do inversor é 90% a 100% da potência nominal do arranjo fotovoltaico [adaptado de SMA, 2012]	60
Figura 4.8	Eficiência de conversão CC/CA de um inversor, quando potência nominal do inversor maior que 100% da potência nominal do arranjo fotovoltaico [adaptado de SMA, 2012]	60
Figura 5.1	Volume de controle para análise da geral da capacidade térmica concentrada (a), e circuito elétrico equivalente (b)	62
Figura 5.2	Volume de controle e circuito elétrico equivalente para análise da geral da capacidade térmica concentrada: (a) modelo completo e (b) modelo simplificado proposto	64
Figura 6.1	Exemplo de gráfico representando ciclos de temperatura uniformes	73
Figura 6.2	Exemplo de ciclos não uniformes (medidas de temperatura)	75
Figura 6.3	Exemplo de ciclos não uniformes (medidas de temperatura em um dia típico).	77

Figura 6.4	Exemplo de resultados de testes de envelhecimento acelerados por temperatura. Curva T_{max} (°C) x t (h), para $FA=1$. (b) Curva Nf x ΔT , para diferentes temperaturas máximas [adaptado de Bryant et al, 2008]	83
Figura 7.1	Diagrama de blocos principais de um programa de simulação de SFCR	84
Figura 7.2	Esquema funcional de programa de simulação de arranjos fotovoltaicos.	85
Figura 7.3	Esquema funcional de programa de simulação de inversores	87
Figura 7.4	Modelos de simulação de SFCR (a) modelos usuais, (b) modelo desenvolvido nesta tese	89
Figura 7.5	Diagrama de blocos principais para novo programa de simulação de SFCR	90
Figura 8.1	Vista parcial da bancada de teste de inversores	96
Figura 8.2	Diagrama de blocos da bancada de testes dos inversores – Medidas e fluxos de energia	97
Figura 8.3	Esquema da bancada de testes de inversores – Medições de grandezas térmicas e elétricas	98
Figura 8.4	Simulador de rede CA (à esquerda) e fonte simuladora de arranjos fotovoltaicos (à direita)	99
Figura 8.5	(a) Simulador de carga RLC; (b) painel de ligações da carga resistiva adicional; (c) bateria de resistências da carga resistiva adicional	100
Figura 8.6	Vista interna caixa de conexões e proteções elétricas	101
Figura 8.7	Locais dos pontos de medições de temperatura do inversor	104
Figura 8.8	Medição de tensão CC, corrente elétrica CC e potência CC; (a) esquema de ligação; (b) resistor shunt; (c) multímetros	106
Figura 8.9	Medição de grandezas elétricas CA nas três fases (tensão, corrente, potência, fator de potência): (a) transformadores de corrente; (b) analisador de energia WD500	107
Figura 8.10	(a) Banho termostático com controle eletrônico de temperatura para aferição de sensores de temperatura, fabricante Lauda, aberto desligado; (b) bloco de alumínio, (c) Banho termostático, fechado em operação, termômetro adicional de mercúrio, calibrando sensores dentro de bloco de alumínio, dentro de banho maria, com multímetro multiplexador; (d) cartão de conexões da placa de aquisição de dados	108
Figura 9.1	Vistas internas e externas de um inversor trifásico de 50 kW (a) Vista geral externa do inversor (gabinete, painel de comando e ventiladores), (b) Vista geral interna do inversor (módulo de potência, ventiladores, módulo de comando,	

	transformador), (c) Vista traseira interna (capacitores), (d) Vista traseira interna (transformador, indutores, ventiladores)	111
Figura 9.2	Curva de planejamento do ensaio de inversor (patamares, tempos, carregamentos, características de operação do inversor, medições elétricas e térmicas)	113
Figura 9.3	Curva da variação da temperatura com o tempo durante primeiro ensaio (medidas nos seis pontos do inversor, conforme Figura 8.7)	113
Figura 9.4	Medições térmicas durante teste de inversor – gráfico temperatura x tempo (medidas de temperatura do inversor, medidas da temperatura ambiente, curva obtida via modelo proposto para avaliação da variação da temperatura)	117
Figura 9.5	Curva de planejamento do ensaio de inversor (patamares, tempos, carregamentos, características de operação do inversor, medições elétricas e térmicas)	118
Figura 9.6	Medições térmicas durante teste de inversor – medidas das temperaturas do inversor e ambiente, e curva do modelo proposto para predição da temperatura do inversor	120
Figura 9.7	Curvas de eficiência de seguimento de máxima potência (linha superior) e eficiência de conversão (linha inferior) determinadas em diferentes condições de carregamento de acordo com a norma EN50530	121
Figura 9.8	Curvas de estimativas de produção de energia elétrica injetada na rede para SFCR com diferentes fatores FDI, com estratégias de arrefecimento RPT, TLD com $dT=5^{\circ}C$	127
Figura 9.9	Curvas de estimativas de produção de energia elétrica injetada na rede para $FDI=0,7$, com estratégias de arrefecimento RPT, TLD com $dT=5^{\circ}C$ e TLD com $dT=15^{\circ}C$	127
Figura 9.10	Curvas de eficiência global do inversor para um SFCR com $FDI=0,7$, $FDI=0,8$, $FDI=0,93$, $FDI=1,12$ simulados para cidade de Porto Alegre – RS	128
Figura 9.11	Desempenho relativo global anual do inversor, com diferentes valores de histerese (dT), estimado para operação do inversor em Porto Alegre – RS . .	129
Figura 9.12	Resultado da análise de durabilidade relacionado às simulações de SFCR para cidade de Porto Alegre – RS, relativos à temperatura limite de operação $55^{\circ}C$. .	130
Figura 9.13	Resultado da análise de durabilidade relacionado às simulações de SFCR para cidades de (a) Curitiba – PR e (b) Rio de Janeiro - RJ, relativos à temperatura limite de operação de $55^{\circ}C$	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Configuração geral de sistemas fotovoltaicos conectados à rede – SF	11
Tabela 2.2	Tendências gerais na tecnologia de inversores [adaptada de Mallwitz, 2010].	11
Tabela 2.3	Desenvolvimento de projeto de inversores	20
Tabela 3.1	Classificação geral de sistemas fotovoltaicos	21
Tabela 3.2	Resumo de componentes e elementos internos de inversores	32
Tabela 4.1	Exemplos de fatores que contribuem para aquecimento de inversores	57
Tabela 6.1	Dados de medidas de temperatura (conforme Figura 6.2)	76
Tabela 6.2	Número de ocorrências de meio-ciclos combinando pares de $T_{m\acute{a}x}$ e ΔT (conforme Tabela 6.1)	77
Tabela 6.3	Dados de medidas de temperatura (conforme da Figura 6.3)	78
Tabela 6.4	Número de ocorrências de meio-ciclos combinando pares de $T_{m\acute{a}x}$ e ΔT (conforme valores apresentados na Tabela 6.3)	78
Tabela 6.5	Estimativa do número de ciclos para falhar $(N_f)_{i,j}$ individual para cada meio ciclo, combinando pares de $T_{m\acute{a}x}$ e ΔT	79
Tabela 6.6	Estimativa da quantidade de defeito por meio-ciclo $(qdpmc)_{i,j}$ individual para cada meio-ciclo, combinando pares de $T_{m\acute{a}x}$ e ΔT	79
Tabela 6.7	Comparativo de proporcionalidade do dano causado em cada meio-ciclo combinando pares de $T_{m\acute{a}x}$ e ΔT	80
Tabela 6.8	Defeitos acumulados individuais para cada combinação de $T_{m\acute{a}x}$ e ΔT	81
Tabela 6.9	Alguns tipos de testes para equipamentos eletrônicos	83
Tabela 8.1	Configuração resumo do sistema de medição e aquisição de dados elétricos e térmicos	103
Tabela 8.2	Parâmetros programáveis para realização de ensaios	104
Tabela 9.1	Curva de programação do ensaio 1 – alimentação elétrica do inversor CC (patamares, tempos e carregamentos programados na fonte simuladora de arranjo fotovoltaico)	114
Tabela 9.2	Dados elétricos programados – alimentação elétrica do inversor CC (energia CC disponibilizada pela fonte simuladora de arranjo fotovoltaico)	114
Tabela 9.3	Dados elétricos medidos - eficiência de seguimento de máxima potência (energia CC nominal fornecido pela fonte para energia CC capturado pelo inversor)	114

Tabela 9.4	Dados elétricos medidos - eficiência de conversão do inversor (CC capturado pelo inversor para CA injetado na rede)	114
Tabela 9.5	Dados elétricos medidos - eficiência de global do inversor (energia CC disponível no arranjo fotovoltaico e energia de saída CA para rede)	114
Tabela 9.6	Dados térmicos medidos e condições de operação	115
Tabela 9.7	Resultados obtidos - Parâmetros térmicos determinados experimentalmente no ensaio 1	116
Tabela 9.8	Curva de programação do ensaio 2 – alimentação elétrica do inversor CC (tempos e carregamentos programados na fonte simuladora de arranjo fotovoltaico)	118
Tabela 9.9	Dados elétricos programados – alimentação elétrica do inversor CC (potência CC disponibilizada pelo simulador de arranjo fotovoltaico)	118
Tabela 9.10	Dados elétricos medidos - eficiência de seguimento de máxima potência (potência CC absorvida pelo inversor)	118
Tabela 9.11	Dados elétricos medidos - eficiência de conversão do inversor η_{CONV} (potência CC convertida pelo inversor e potência injetada na rede)	119
Tabela 9.12	Dados térmicos medidos e condições de operação	119
Tabela 9.13	Parâmetros térmicos médios determinados a partir dos ensaios 1 e 2	121
Tabela 9.14	Dados característicos dos arquivos climáticos utilizados	125
Tabela 9.15	Resumo de resultados das simulações realizadas – Porto Alegre – RS	126
Tabela A.1	Características técnicas gerais de alguns módulos fotovoltaicos [adaptado de catálogos comerciais de fabricantes]	144
Tabela B.1	Exemplos de especificações técnicas de inversores	146

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
A	Área	$[m^2]$
C	Capacidade térmica	$[J/K]$
c	Calor específico	$[J/(kg.K)]$
C_{ARM}	Capacidade de armazenamento térmico concentrada do inversor	$[J/K]$
CI	Coefficiente de temperatura sobre corrente do módulo fotovoltaico	$[%/K]$
CP	Coefficiente de temperatura sobre potência do módulo fotovoltaico	$[%/K]$
CV	Coefficiente efeito da temperatura sobre tensão do painel fotovoltaico	$[%/K]$
dT	Derivada da temperatura	
dt	Derivada do tempo	
E	Energia	$[J]$
f	Frequência	$[Hz]$
FA	Fator de aceleração de falhas	[adimensional]
FR	Taxa de falhas	[adimensional]
I	Corrente elétrica,	$[A]$
k_B	Constante de Boltzman	$[eV/K]$
k	Condutividade térmica	$[W/(m.K)]$
L	Comprimento	$[m]$
Ld	Carregamento do inversor	[adimensional]
M	Coefficiente estatístico de ajuste para modelo de confiabilidade	
N	Número de ciclos	[ciclos/hora]
P	Potência elétrica	$[W]$
Q	Energia térmica (calor)	$[J]$
q	Taxa de transferência de energia (potência térmica)	$[W]$
q''	Fluxo de calor (taxa de transferência de energia por unidade de área)	$[W/m^2]$
R	Resistência térmica	$[1/m^2]$
t	Tempo	[s] ou [h]
T	Temperatura	[K] ou $[^{\circ}C]$
U	Coefficiente global de transferência de calor	$[W/(m^2 K)]$
UA_{DISS}	Coefficiente concentrado de dissipação térmica entre o inversor e o ambiente	$[W/K]$

V	Tensão elétrica	[V]
v	Volume	[m ³]
w_m	Incerteza do mensurando "m"	[adimensional]
t	Tempo	[s]
Δt	Intervalo de tempo entre tempo futuro t^{p+1} e tempo anterior t^p	[s]
ΔT	Variação de temperatura	[K] ou [°C]
η	Eficiência	[adimensional]
ρ	Massa específica	[kg/m ³]
τ	Tempo	[s] ou [h]

LISTA DE SUB-ÍNDICES

Sub-índice	Descrição
a	Ativação
A	Amostra
AF	Arranjo fotovoltaico
AMB	Ambiente
AQ	Aquecimento
ARM	Armazenamento
BR	Ponderado conforme Brasileira
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CEC	<i>California Energy Commission</i>
$CONV$	Conversão
DIN	Dinâmica
$DISS$	Dissipação
EST	Estática
EU	Europeia
i	Inicial
INV	Inversor
f	Final, ou falha
FV	Fotovoltaico
g	Geração interna
$GLOBAL$	Global

MP	Máxima potência
<i>m</i>	Medido
<i>max</i>	Máximo
<i>n</i>	Número de itens e componentes
NOCT	<i>Nominal Operating Cell Temperature</i> (Temperatura nominal de operação da célula)
OC	<i>Open Circuit</i> (circuito aberto)
PF	Painel fotovoltaico
PMP, MP	Ponto de máxima potência
SC	<i>Short Circuit</i> (curto circuito)
SPMP	Seguimento do ponto de máxima potência
STC	<i>Standard Test Conditions</i> (Condições de teste padronizadas)
TOTAL	Total
VIZ	Vizinhança
VD	Ventilador desligado
VL	Ventilador ligado
∞	Ambiente, infinito
Δ	Variação de determinada variável

LISTA DE SOBRE-ÍNDICES

Sobre-índice	Descrição
<i>p, p+1</i>	Índice de avanço no tempo (tempo anterior “p”, tempo futuro “p+1”)

LISTA DE ABREVIACÕES

Abreviação	Descrição
CEC	<i>California Energy Commision</i>
DISME	Distrito de Meteorologia
EPW	<i>EnergyPlus Weather File</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
RPT	Redução de potência por temperatura
SAM	<i>System Adviser Model</i>
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede

SWERA *Solar and Wind Energy Resouse Assessment*
TLD Termostato liga e desliga

1 INTRODUÇÃO

Com a utilização em massa de sistemas fotovoltaicos conectados à rede se faz 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 mais complexos e mais susceptíveis 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).

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 ambientes. 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*.

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.

1.1 Inversores para energia solar fotovoltaica

Sistemas de energia solar fotovoltaica geram energia elétrica em corrente contínua com tensão e correntes variáveis a todo o momento, pois dependem da variação da intensidade da radiação solar e da temperatura.

De maneira geral a utilização de energia elétrica se dá em corrente alternada, de onda senoidal, com valores fixos de tensão e frequência. No Brasil, usualmente a energia elétrica é fornecida aos consumidores finais através de redes elétricas com três fases e um neutro. Usualmente em capitais e grandes centros urbanos, com tensão entre fase e neutro de 127 V em corrente alternada com frequência 60 Hz, e em cidades do interior, com tensão entre fase e neutro de 220 V em corrente alternada com frequência 60 Hz.

Para fazer o acoplamento dos sistemas geradores de energia em corrente contínua (com valores de tensão e corrente variáveis) às redes elétricas de corrente alternada (com valores de tensão e frequência fixos) são utilizados equipamentos conversores. Estes conversores são equipamentos eletrônicos de potência comumente chamados de inversores.

Equipamentos conversores de energia de qualidade superior possuem como características desejáveis altos valores para eficiência de conversão da energia elétrica em corrente contínua para energia elétrica em corrente alternada, forma de onda senoidal, alta durabilidade e alta confiabilidade de operação.

Para obtenção de equipamentos conversores de boa qualidade são utilizados componentes internos de boa qualidade interligados conforme um bom projeto eletrônico, gerenciados por um software de controle interno com rotinas otimizadas, montados e acoplados fisicamente conforme um bom projeto mecânico.

Dentre outros fatores o projeto mecânico deve garantir boa dissipação térmica para redução de temperatura dos componentes internos. Equipamentos eletrônicos operando com dissipação térmica deficiente podem apresentar falhas prematuras, pois a temperatura elevada em componentes eletrônicos ocasiona alterações nos parâmetros de funcionamento eletrônico como ganhos, fugas de corrente, queda de tensão e variação de resistência. Em casos extremos de temperatura elevada pode ocorrer falha drástica por fusão dos componentes. Ciclos e variações de temperatura também podem resultar em falhas prematuras como ruptura por fadiga decorrente de tensões mecânicas geradas por dilatações térmicas de diferentes materiais que estão acoplados de forma rígida (colados e soldados) .

Além destas variações de temperatura inerentes ao funcionamento de circuitos eletrônicos de potência, inversores de uso corrente em sistemas de energia solar fotovoltaica

estão sujeitos também a ciclos de variações de temperatura decorrentes do meio externo, nas mais diversas condições climáticas. Estas solicitações acentuam-se quando os inversores são utilizados diretamente expostos ao tempo, em clima seco e quente (deserto), clima frio (neve), clima úmido (chuva, névoa). Em locais com excesso de partículas suspensas com poeira e areia, pode ocorrer diminuição da eficiência de dissipadores térmicos devido ao acúmulo de sujeira.

Para obtenção de equipamentos eletrônicos robustos de alto desempenho e alta confiabilidade faz-se necessário um gerenciamento térmico efetivo, garantindo aos componentes eletrônicos a operação em níveis de temperatura adequados dentro de faixas aceitáveis e seguras. Este gerenciamento térmico de equipamentos eletrônicos pode ser feito de maneira estática e/ou ativa. Estático quando utiliza dissipadores térmicos fixos trocando calor com o meio externo por convecção natural. Ativo quando utiliza estratégias de dissipação térmica variável como por exemplo o acionamento de um ventilador para aumento de dissipação térmica instantânea por circulação de ar forçado sobre determinado componente caso este ultrapasse o limite de temperatura segura de operação.

1.2 Geração de energia elétrica no Brasil

Atualmente o Brasil possui um sistema de geração de energia elétrica com total de 4511 empreendimentos em operação, totalizando 142,9 GW de potência instalada [ANEEL, 2016]. Deste total, 70,9 % da potência instalada é proveniente de energias renováveis (sendo 64,8% na modalidade hidrelétrica e 6,1% na modalidade eólica).

Quanto à geração de energia elétrica solar fotovoltaica, tem-se 39 usinas em operação, totalizando atualmente 22,9 MW de potência instalada. Está prevista para os próximos anos a construção de mais 70 usinas a partir de módulos solares fotovoltaicos, correspondendo a uma adição de 1966 MW. Pequenas unidades geradoras classificadas como microgeradores (até 75 kW) somam quase 3000 unidades [ANEEL, 2016].

O fato do Brasil possuir majoritariamente a geração de energia a partir de fontes renováveis parece ser bastante favorável, pois são consideradas de baixo impacto ambiental, porém com as mudanças climáticas que vêm sendo observadas nos últimos anos pode-se esperar algum tipo de efeito e mudança na disponibilidade de energia, relacionados ao local de ocorrência e frequência das chuvas e ventos.

1.3 Geração elétrica distribuída

A Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) criou no Brasil o Sistema de Compensação de Energia Elétrica, permitindo que o consumidor instale pequenos geradores (tais como módulos fotovoltaicos e microturbinas eólicas, entre outros) em sua unidade consumidora e troque energia com a distribuidora local com o objetivo de reduzir o valor da sua fatura de energia elétrica. A Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015, apresenta alterações e aprimoramentos, em relação à Resolução Normativa nº 482, que ampliam possibilidades para micro e minigeração distribuída. Dentre outras facilidades e inovações apresentadas pode-se citar a possibilidade de instalação de geração distribuída em condomínios (empreendimentos de múltiplas unidades consumidoras), onde a energia gerada pode ser repartida entre os condôminos em porcentagens definidas pelos próprios consumidores. Criou-se ainda a figura da “geração compartilhada”, possibilitando que diversos interessados se unam em um consórcio ou em uma cooperativa, instalem uma microgeração ou uma minigeração distribuída e utilizem a energia gerada para redução de faturas dos consorciados ou cooperados.

A Resolução Normativa nº 687, entrou em vigor a partir de 1º de março de 2016. A ANEEL prevê que até 2024 cerca de 1,2 milhões de unidades consumidoras passem a produzir a própria energia, totalizando 4,5 GW de potência instalada.

Diante deste cenário, a geração distribuída com a utilização de energia solar passa a ser uma das alternativas de solução estratégica viáveis para ampliação da geração e distribuição de energia elétrica no país, através de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Podem-se ainda citar sistemas solares térmicos para geração de água quente para banho que resultariam em alívio da rede elétrica, lembrando que no Brasil grande parte dos sistemas residenciais para aquecimento de água para banho são feitos através de chuveiros elétricos.

A implantação de geração distribuída com sistemas fotovoltaicos e térmicos é racional e ambientalmente aceitável, pois permite a instalação dentro dos próprios centros urbanos. A perda da energia devido à distribuição é mínima, pois é distribuída junto aos pontos de consumo. O impacto ambiental local é mínimo por serem sistemas de construção limpa e operação silenciosa.

1.4 Sistemas geradores de energia elétrica solar fotovoltaica conectados à rede

Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCCR) podem ser distribuídos nos telhados dos prédios nas regiões centrais das grandes cidades, assim como sobre telhados de residências e indústrias próximas a pontos de alto consumo elétrico. Por exemplo, novos e grandes empreendimentos como *Shopping Centers* e aeroportos podem incorporar sistemas solares fotovoltaicos no seu próprio prédio, assim como em prédios vizinhos diminuindo seu impacto local sobre a rede elétrica das comunidades onde se instala.

Sistemas fotovoltaicos possuem certas características favoráveis ao seu uso, como:

- Ilimitada fonte de energia;
- Disponível em todas partes do mundo;
- Silencioso e não polui (quando em operação produzindo energia não produz ruído, não emite poluentes no ar e não produz resíduos);
- O sistema é rápido de instalar e fácil de manusear;
- É modular e expansível;
- Não possuem partes móveis;
- Baixa manutenção;
- Possui alta confiabilidade e pode produzir energia por um longo período, 30 anos ou mais [EPIA, 2016];
- Pico de potência elétrica produzida coincide com pico de consumo elétrico relativo a sistemas de climatização. Em dias de verão, quentes e ensolarados, sistemas fotovoltaicos tendem a operar próximo ao ponto de maior capacidade de geração combinando com a maior demanda ocasionada pela utilização em massa de sistemas de climatização para conforto.

O custo dos sistemas de captação de energia solar continua sendo o maior obstáculo à utilização desta modalidade em larga escala, porém pode-se observar que vem constantemente sofrendo redução, principalmente com a chegada ao Brasil de componentes e equipamentos fabricados na China. Estima-se assim que em futuro próximo as implantações destes sistemas passam a ter maior viabilidade econômica, principalmente considerando benefícios decorrentes do custo evitado referente às tarifas de energia para o usuário.

1.5 Uso em larga escala de geradores solares fotovoltaicos conectados à rede

Diante deste potencial e da possibilidade eminente da utilização em massa de sistemas solares fotovoltaicos é importante o profundo conhecimento destes sistemas e seus componentes. O entendimento do seu comportamento operacional, de suas características de desempenho, de suas limitações e dos fatores que afetam a sua eficiência de conversão de energia é imprescindível para o planejamento de futuras implantações e para o correto dimensionamento destes sistemas geradores elétricos solares fotovoltaicos.

O conhecimento das características operacionais e da eficiência será importante ferramenta para a seleção dos componentes, assim como para o desenvolvimento e otimização dos sistemas fotovoltaicos para geração de energia elétrica.

1.6 Motivação

O estudo dos diversos componentes do sistema fotovoltaico conectado à rede permite o desenvolvimento de modelos matemáticos do desempenho energético individual. Softwares de dimensionamento e simulação dinâmica utilizam estes modelos individuais de maneira acoplada para predição do desempenho energético global do sistema. De maneira geral estas avaliações energéticas permitem determinar a viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos conectados à rede.

Alguns fatores como redução de capacidade do sistema devido ao aumento de temperatura de módulos fotovoltaicos já são bastante conhecidos. Modelos matemáticos que consideram o efeito da temperatura sobre o desempenho energético dos módulos fotovoltaicos são de uso corrente em softwares de simulação. Contudo usualmente não consideram o efeito da temperatura sobre o desempenho de inversores.

Esta tese apresenta um estudo sobre o efeito da temperatura sobre os inversores e a redução de desempenho energético devido às eventuais limitações.

É desenvolvido um modelo geral que permite calcular a evolução da temperatura no interior de inversores.

O modelo utiliza parâmetros que são determinados experimentalmente. Para esta tese foram determinados os parâmetros de um inversor específico que será utilizado em uma usina fotovoltaica a ser instalada no município de Porto Alegre, RS.

Futuramente este modelo será validado por um longo período, durante a operação da usina, através da comparação em tempo real entre os valores previstos pelo modelo com as condições reais de operação.

Para análise do comportamento de sistemas fotovoltaicos podem ser utilizados programas de simulação computacional como o *FVCONNECT* (UFRGS/LABSOL), o *EnergyPlus* (NREL), *SAM* (NREL) entre outros.

O programa *FVCONNECT* está em desenvolvimento no LABSOL – UFRGS. Os programas *EnergyPlus* e *SAM* são distribuídos pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos da América.

O melhor entendimento sobre o comportamento térmico de inversores, além de aprimorar programas de simulação computacional utilizados no dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, pode também contribuir para melhorias dos sistemas de arrefecimento do próprio inversor para aumento de eficiência e da durabilidade.

1.7 Objetivo geral

Esta tese tem por objetivo avaliar a influência da temperatura e de diferentes estratégias de arrefecimento no desempenho e durabilidade de inversores, desenvolvendo para isto uma metodologia e um modelo, a ser implementado em software de simulação computacional, capaz de reproduzir o comportamento térmico e o desempenho de conversão elétrica de inversores e estimar o efeito do gerenciamento de temperatura na produção de energia e na durabilidade do inversor.

1.8 Objetivos específicos

Para atingir este objetivo pretende-se, durante o desenvolvimento desta tese, realizar-se as seguintes atividades:

- Desenvolver um modelo térmico do inversor, capaz de prever sua temperatura durante a operação;
- Desenvolver um modelo para avaliação do efeito da temperatura sobre a durabilidade do inversor;
- Montar uma bancada de testes para ensaios elétricos e térmicos de inversores comerciais (trifásicos e monofásicos);

- Realizar ensaios em bancada experimental, a fim de simular a operação de inversores em condições extremas de temperatura observando possíveis limitações, reduções e até mesmo interrupções na conversão de energia;
- Processar dados experimentais com ênfase na análise de desempenho e caracterização do comportamento térmico de inversores fotovoltaicos conectados em rede;
- Estudar a influência da temperatura e das estratégias de gerenciamento térmico interno sobre o funcionamento, desempenho e confiabilidade de operação de inversores fotovoltaicos conectados à rede;
- Caracterizar o comportamento térmico de inversores e o efeito sobre a eficiência;
- Determinar parâmetros de operação para aprimoramento de software de simulação e dimensionamento de sistemas fotovoltaicos *FVCONNECT* em desenvolvimento no LABSOL - UFRGS.

1.9 Escopo e organização desta Tese

O desenvolvimento desta tese iniciou por uma revisão bibliográfica, baseando-se no estudo de publicações científicas disponíveis na literatura, em informações técnicas de fabricantes e normas técnicas a respeito de inversores de sistemas fotovoltaicos.

Avaliou-se o efeito da temperatura sobre o desempenho de inversores comerciais e estratégias usuais de proteção para evitar superaquecimento. Para esta avaliação realizaram-se ensaios experimentais preliminares para caracterização dos inversores e desenvolvimento de modelos de eficiência e de modelos de comportamento térmico.

Definiu-se um modelo associado a estas estratégias de gerenciamento térmico para futura implementação de rotina de avaliação em software de simulação dinâmica *FVCONNECT*.

Foi construída uma bancada de teste de inversores para realização de ensaios elétricos e térmicos. Realizaram-se medições diversas iniciais para avaliação e caracterização de um protótipo de inversor produzido, em Porto Alegre, RS pela *Schneider Electric* / CP Eletrônica.

Cada um destes inversores tem potência nominal de 50 kW, e faz parte de um lote piloto de 11 inversores que serão utilizados em uma usina solar fotovoltaica de 550 kWpico. Esta usina solar fotovoltaica será construída em Porto Alegre, e faz parte de um projeto de pesquisa que junta esforços de várias entidades como a Companhia Estadual de Energia

Elétrica do Rio Grande do Sul (CEEE), o Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LABSOL/UFRGS) e a Universidade Federal de Santa Maria.

No capítulo 2 apresenta-se uma revisão bibliográfica com a estrutura desta tese. Mostra o tema central, assim como uma visão panorâmica geral dos conceitos e assuntos que serão abordados. Ao final do capítulo são descritos alguns trabalhos semelhantes, já realizados em outros centros de pesquisa, relacionados à análise do desempenho, modelagem do comportamento térmico e confiabilidade de equipamentos eletrônicos de potência.

No capítulo 3 apresenta-se uma revisão das características gerais e configurações de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, assim como conceitos básicos fundamentais da rede elétrica de corrente alternada. Apresentam-se informações técnicas típicas de módulos fotovoltaicos e o efeito da temperatura sobre o desempenho dos mesmos. Apresentam-se também as características gerais de inversores e seus componentes. Apresenta-se um resumo sobre a eficiência de inversores e os diversos fatores relacionados.

O capítulo 4 trata do gerenciamento térmico de inversores. Apresentam-se problemas relacionados ao aquecimento de inversores e um conjunto de estratégias usuais de arrefecimento e proteção térmica de inversores.

O capítulo 5 trata sobre a modelagem proposta para o inversor, quanto à eficiência e comportamento térmico. Apresenta-se o desenvolvimento do modelo do comportamento térmico, assim como os conceitos básicos de transferência de calor adotados.

O capítulo 6 apresenta um método para avaliação do efeito da temperatura sobre a durabilidade de inversores, considerando diferentes perfis de operação e ciclos térmicos aleatórios. Este método permite a estimativa de indicadores comparativos de durabilidade.

O capítulo 7 trata sobre programas de simulação de SFCR. Apresenta metodologias usuais, acoplamento de modelos e avanços propostos. Apresenta oportunidades e benefícios esperados a partir da inclusão de rotinas de avaliação do comportamento térmico nos programas de simulação.

O capítulo 8 trata sobre o projeto e construção de bancada de ensaios elétricos e térmicos para caracterização do comportamento do inversor. Apresentam-se as características construtivas, os componentes, seus instrumentos principais e o sistema de aquisição de dados, assim como os parâmetros operacionais mensuráveis. Esta bancada permite a determinação de parâmetros térmicos do inversor necessários à simulação do SFCR.

O capítulo 9 apresenta a metodologia e os resultados de experimentos realizados para determinação de parâmetros térmicos do inversor. Apresenta também resultados de simulações de inversores realizadas em diferentes configurações e em diferentes climas.




Mostram-se comparações entre estimativas de durabilidade e produtividade resultantes de simulações nestas diferentes condições de operação. Por fim, apresenta-se uma análise dos resultados obtidos com comentários, conclusões e sugestões para continuidade do trabalho.

No capítulo 10 apresentam-se as conclusões desta Tese.

2 INVERSORES

Inicialmente pode-se apresentar uma configuração básica típica quanto à montagem eletromecânica de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Esta configuração é intuitiva e de simples entendimento, podendo ser dividida em três partes principais: módulos fotovoltaicos, inversores e a rede elétrica local, conforme apresentado na Tabela 2.1 e na Figura 2.1.

Tabela 2.1 - Configuração geral de sistemas fotovoltaicos conectados à rede – SFCR.

Partes	1	2	3
Componentes principais	Arranjo de módulos solares fotovoltaicos	Inversores	Conexão à rede elétrica externa
Função principal	Captura da energia solar e conversão em energia elétrica CC	Conversão CC/CA, máxima potência, ajustes, proteções, sincronia com a rede	Entrega da energia elétrica CA à rede local
Características gerais	Módulos fotovoltaicos instalados expostos ao sol	Instalado preferencialmente em ambiente interno protegido de intempéries	Elementos de medição e de manobra, conexões e proteções externas adicionais
Foto ilustrativa			

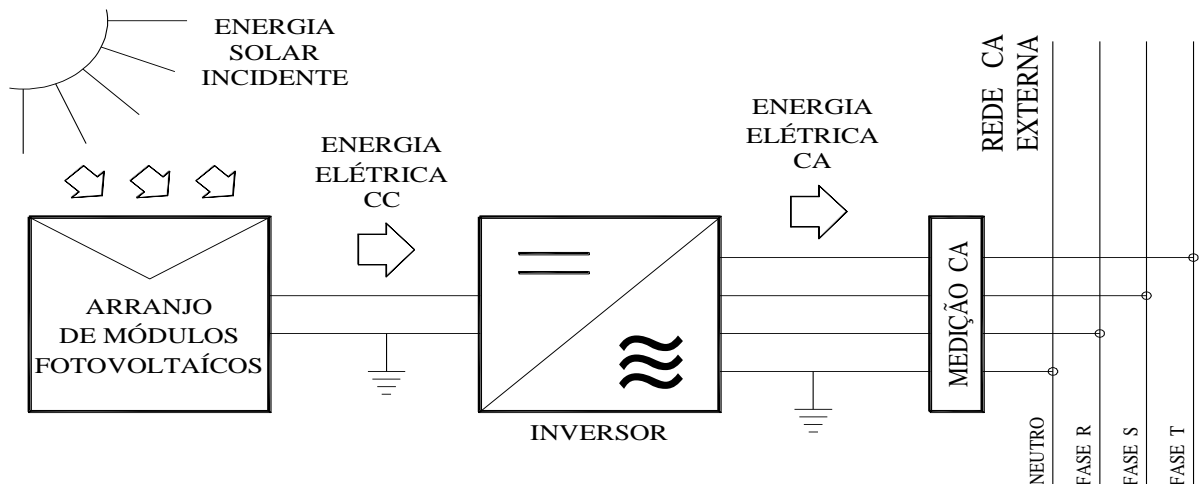


Figura 2.1 – Esquema de interligações básicas de sistemas fotovoltaicos conectados à rede – SFCR (fluxograma de energia: solar - elétrica CC - elétrica CA).

Todos estes componentes dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede são de simples instalação eletromecânica. A operação é simples e automatizada sem necessidade de intervenção continuada do operador.

Apesar desta simplicidade de montagem e operação, este sistema possui uma rotina interna de funcionamento bastante complexa para que a energia elétrica seja entregue à rede de forma padronizada e segura.

A captura de energia solar e conversão em energia elétrica através dos módulos fotovoltaicos variam a todo o momento, devido à variação de intensidade da radiação solar incidente e a variação de temperatura dos módulos fotovoltaicos.

Cabe ao inversor monitorar estas condições variáveis, acoplar-se de forma eficiente e rápida a estas condições variáveis impostas pelos módulos fotovoltaicos, extrair a máxima potência elétrica em corrente contínua, converter em corrente alternada, entregar à rede de forma segura e nos padrões da rede elétrica da concessionária local (boa qualidade, senoidal, alto fator de potência). Para que todo este processamento e gerenciamento realizado pelo inversor sejam feitos de forma contínua, automatizada e com alta eficiência é necessário um processador eletrônico rápido, com rotinas de controle e estratégias internas otimizadas, características construtivas robustas e gerenciamento térmico otimizado para operação com alta durabilidade e alta confiabilidade.

A conexão do inversor à rede elétrica deve ser feita com dispositivos de proteções e medição conforme normas técnicas da concessionária local.

2.1 Inversores para Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR)

Este trabalho trata sobre inversores fotovoltaicos, os quais tem aplicação específica em sistemas de energia solar fotovoltaica conectados à rede. Estes inversores fotovoltaicos recebem a energia elétrica em corrente contínua proveniente de arranjos de módulos fotovoltaicos e convertem em energia elétrica de corrente alternada padronizada com frequência e tensão fixas, conforme a rede elétrica da concessionária local, a que se pretende conectar, conforme esquema apresentado na Figura 2.2.

Inversores utilizados em sistemas fotovoltaicos têm como objetivo principal converter a energia elétrica em corrente contínua para energia elétrica em corrente alternada. Muitos são os fatores envolvidos nesta conversão para que esta seja feita de forma eficiente e segura. Conversão eficiente por se tratar de fonte energética com baixa intensidade e segura por estar manipulando tensões elétricas elevadas, tanto em CC como em CA.

Inversores fotovoltaicos possuem um módulo de monitoramento e controle interno com algoritmos de alta velocidade, realimentado por sensores e medidores internos (de corrente, de tensão e de temperatura). Este sistema interno possui um algoritmo de alta velocidade com rotinas avançadas para controle das diversas operações (controle dos semicondutores chaveadores, gerenciamento de carga, rastreamento do ponto de máxima potência, sincronia com a rede, gerenciamento térmico, proteção anti-ilhamento, entre outras).

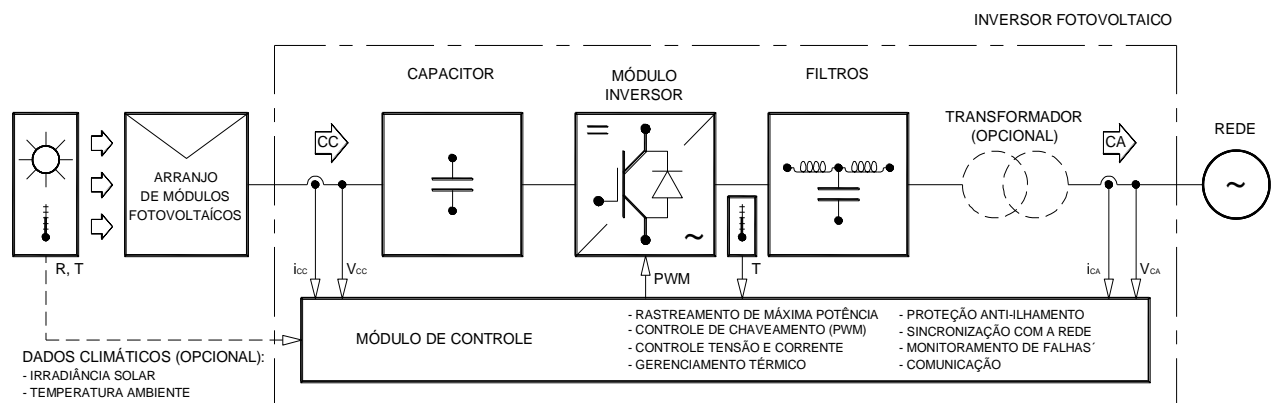


Figura 2.2 – Diagrama esquemático funcional de um inversor fotovoltaico conectado à rede.

2.2 Confiabilidade e vida útil de inversores

Aplicações na área da energia, na área aeroespacial e na área automotiva têm apresentado requerimentos muito rigorosos quanto à confiabilidade e segurança de operação de equipamentos de eletrônica de potência.

Um resumo sobre confiabilidade de equipamentos de eletrônica de potência pode ser visto em Blaabjerg et al., 2013, onde se apresenta um histórico evolutivo, desafios e oportunidades de melhorias, conceitos e métodos de projeto aplicáveis ao desenvolvimento de equipamentos com maior confiabilidade. Citam-se exemplos de estudos realizados sobre falhas de equipamentos: em 1980 o programa de integridade da Força Aérea Norte Americana (*US Air Force*) conduziu uma investigação sobre fontes de falhas em equipamentos eletrônicos de potência, conforme apresentado na Figura 2.3, que indicou a temperatura como principal parâmetro causador de falhas; um estudo de caso [Moore e Post, 2008] onde foram

avaliadas em campo as falhas ocorridas durante cinco anos de operação de uma usina fotovoltaica de 3,5 MW conectada à rede, conforme Figura 2.4.

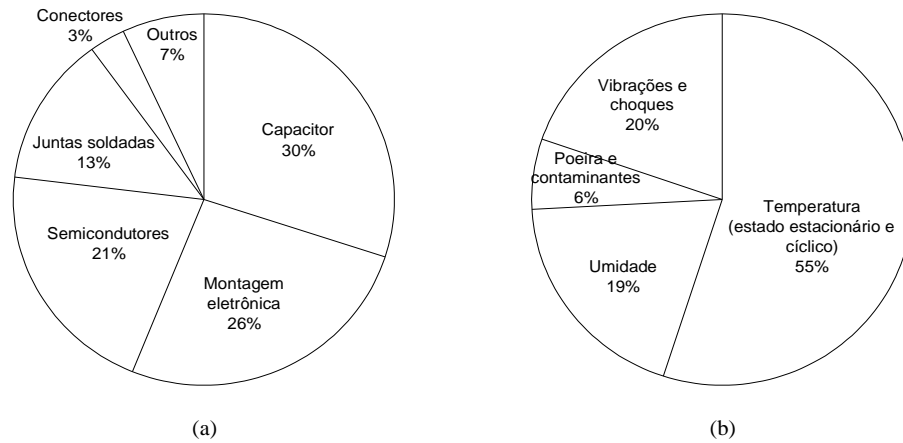


Figura 2.3 – Análise de falhas em equipamentos eletrônicos de potência: (a) distribuição de falhas entre os principais componentes, (b) distribuição das principais fontes de falhas.

[adaptado de Blaabjerg et al., 2013]

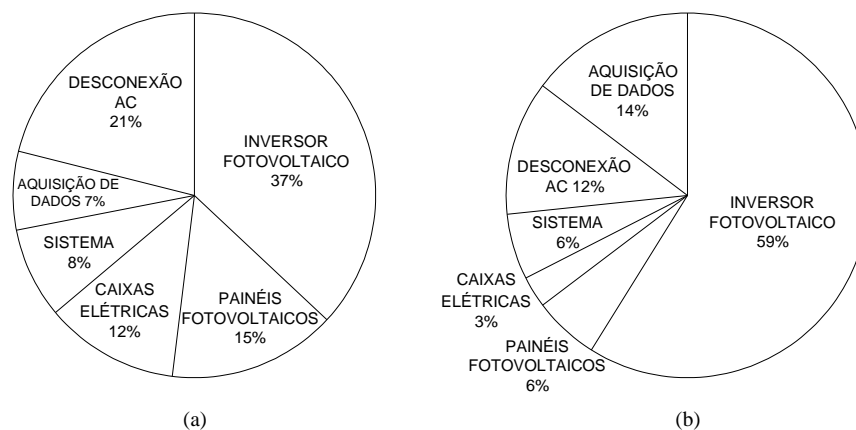


Figura 2.4 – Eventos de manutenção ocorridos durante 5 anos de operação de uma usina fotovoltaica de 3,5 MW conectada à rede: (a) Ocorrência de manutenção por subsistema, (b) Custo de manutenção por subsistema. [adaptado de Blaabjerg et al., 2013]

A confiabilidade, a durabilidade e o desempenho de equipamentos eletrônicos de potência, especialmente em termos de eficiência e densidade de potência, vem sendo continuamente aumentado pelo esforço continuado na pesquisa intensa e no desenvolvimento

avançado de topologias de circuitos, esquemas de controle, semicondutores, componentes passivos, processamento de sinais digitais e integração de sistemas.

Predição de confiabilidade é uma importante ferramenta para quantificar a vida útil de inversores, taxa de falhas e projeto de robustez baseados em dados e modelos de predição. Alguns modelos estatísticos de predição de confiabilidade podem ser vistos em Connor e Kleyner, 2012, Bryant et al., 2008 e Cui, 2005.

Yang et al., 2013 e Yang, 2014 apresentam um estudo sobre a durabilidade e vida útil de inversores considerando os efeitos dos parâmetros de operação, como irradiância solar, temperatura ambiente e ciclos de temperatura. Avaliam também o desempenho térmico de inversores com diferentes topologias de inversores.

Wang et al., 2013 citam que o estado-da-arte de procedimentos de projeto de equipamentos de eletrônica de potência como inversores fotovoltaicos devem ser baseados no conhecimento do perfil de trabalho (temperatura ambiente e irradiância solar), *PoF (Physics-of-Failure)* e *DFR (Design for Reliability)*.

Abordagem através da *PoF (Physics-of-Failure)* é uma metodologia baseada na análise da causa raiz dos mecanismos de falhas, nos materiais, nos defeitos e fatores críticos na confiabilidade [Pecht e Dasgupta, 1995].

DFR (Design for Reliability) é um método de desenvolvimento de produtos para melhoramento da confiabilidade através da utilização combinada de técnicas de análise como *DFMEA (Design Failure Modes and Effect Analysis)* e *RBD (Reliability Block Diagram Modeling)*.

2.2.1 Vida útil e gerenciamento térmico de inversores

No caso dos inversores podem-se esperar falhas simples como temperatura excessiva acima de limite funcional, fadiga por ciclos térmicos (esquenta e esfria, dia e noite) ou ainda falha drástica como temperatura excessiva acima do ponto de fusão.

Mais informações sobre a importância do gerenciamento térmico podem ser vistas em Liu, 2012, onde são apresentadas recomendações de projeto a respeito de materiais e configurações mecânicas, análise de confiabilidade e predição de falhas devido ao aquecimento excessivo.

A geração fotovoltaica vem aumentando sua participação no mercado de energia. Os sistemas fotovoltaicos tipicamente caracterizam-se por um longo período para retorno do investimento (*pay-back*), portanto, confiabilidade, tempo entre falhas e vida útil são

parâmetros fundamentais que devem ser analisados em detalhes. A redução no desempenho geral do sistema fotovoltaico devido a falha no inversor depende de vários fatores, tais como características de confiabilidade do inversor, configuração do inversor e tempo de reparo.

O inversor ainda é considerado o elo mais fraco dos sistemas fotovoltaicos modernos. Falhas de inversores podem ser classificadas em três categorias principais: defeitos de fabricação e problemas de controle de qualidade; projeto de produto inadequado e falha elétrica de um componente.

Pelas razões acima apresentadas, Catelani et al., 2012, ressaltam a importância do tema e propõem um estudo aprofundado, do ponto de vista térmico, dos componentes críticos de um inversor fotovoltaico. Em particular, a análise térmica do inversor é apresentada e uma série de testes térmicos foi realizada a fim de individualizar os componentes mais críticos. O objetivo é otimizar o projeto do inversor e, portanto, seu rendimento energético levando em conta as condições operativas reais quando é instalado no campo. Esta análise térmica operacional também é importante para otimizar a concepção do sistema de diagnóstico do inversor fotovoltaico. Finalmente, por meio dos dados obtidos com este estudo também é possível melhorar a política de manutenção do inversor fotovoltaico, conseqüentemente, a sua vida útil.

2.3 Ferramentas de projeto, modelos, simulações, experimentos e monitoramento

O aumento da popularidade e a demanda crescente da utilização de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, e ainda sendo a temperatura e ciclos térmicos os fatores mais críticos causadores de falhas de inversores fotovoltaicos, reforçam a importância e a necessidade do conhecimento do comportamento térmico de inversores fotovoltaicos, através da modelagem, simulação, experimentação, monitoramento e geração de banco de dados.

Rampinelli, 2010 apresenta uma tese com um estudo teórico e experimental sobre características elétricas e térmicas de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Apresenta um modelo numérico para simulação de inversores, avaliando a eficiência elétrica e o comportamento térmico em regime transiente. Mostra resultados de ensaios experimentais, de diversos inversores, relacionados à determinação de eficiência e parâmetros térmicos. Alguns resultados apresentados em Rampinelli, 2010 serviram de base para a proposta desta tese.

Anthon et al., 2016 apresentam uma avaliação sobre perdas e desempenho térmico do conjunto dissipador e semicondutor chaveador com duas topologias diferentes, SiC MOSFET e Hybrid-NPC.

Andresen et al., 2015 realizaram experimentos sobre gerenciamento térmico ativo para semicondutores chaveadores em topologia H-Bridge empregando controle de frequência, com objetivo de evitar o não arrefecimento excessivo dos semicondutores, reduzindo quantidade e amplitude de ciclos térmicos.

Andresen et al., 2014 apresentam técnicas de controle térmico ativo em módulos de potência para aumento de vida útil.

Cao et al., 2014 desenvolveram um modelo para estimativa da temperatura de MOSFETs em tempo real considerando efeitos de envelhecimento acelerado por aquecimento.

Gulur et al., 2015a e 2015b desenvolveram um modelo térmico do gabinete de inversores em estado estacionário (sem considerar a capacidade térmica dos componentes). O modelo permite estimar a distribuição de temperatura do dissipador de calor dos IGBTs (componentes ativos) e a temperatura do ar no interior do gabinete. Apresenta também um método de avaliação térmica de componentes passivos como capacitores e indutores.

Bennion e Kelly, 2009 descrevem um método desenvolvido para avaliação térmica da combinação de diferentes tecnologias de arrefecimento e diferentes configurações de empacotamento de componentes eletrônicos.

Zhou et al., 2008 descrevem um modelo para avaliação térmica de um inversor trifásico.

Bryant et al., 2008 avaliam a confiabilidade de um inversor usando um modelo compacto para simulação eletro-térmica. O modelo permite a estimativa da evolução da temperatura em regime transiente, e a estimativa do acúmulo de danos ocorridos na montagem dos componentes eletrônicos, devido aos ciclos e a fadiga térmica.

2.4 Histórico sobre desenvolvimento de inversores de média potência

Os primeiros inversores de produção seriada para sistemas fotovoltaicos (SFCR) foram lançados em 1991 [Mallwitz, 2010]. Estes inversores tinham eficiência ao redor de 90% e baixa potência, podendo ser utilizados com um ou poucos módulos fotovoltaicos. Em 1995 iniciou-se a fabricação de inversores *string* (potência até 700 W). A segunda geração de inversores foi lançada em 2004, caracterizando-se por arrefecimento térmico otimizado com

gabinetes dedicados e integrados. Os inversores da terceira geração foram lançados a partir de 2007 e caracterizavam-se por alta eficiência (até 98%), maiores potências (cerca de 5 kW), e nova topologia eletro-mecânica. Com contínuo esforço de pesquisa e desenvolvimento, em 2009 apresentou-se uma versão melhorada destes inversores. Novos inversores trifásicos eram bastante diferentes de inversores de famílias anteriores na potência e na complexidade.

2.4.1 Avanços na tecnologia de inversores

Os mais importantes indicadores para caracterizar o avanço nas tecnologias de inversores são: custos dos inversores, eficiências e perdas, confiabilidade (tempo médio entre falhas, *MTBF*). A Tabela 2.2 ilustra a tendência evolutiva de inversores quanto ao preço, eficiência de conversão e expectativa de vida útil.

Tabela 2.2 - Tendências gerais na tecnologia de inversores. [adaptada de Mallwitz, 2010]

Ano	1990	2009	2015
Preço específico	1 Euro/W	0,3 Euro/W	0,2 Euro/W
Eficiência	90 %	96 a 98 %	97 a 99 %
Confiabilidade, serviço (<i>MTBF</i>)	100.000 h (11 anos)	500.000 h (57 anos)	1.000.000 h (114 anos)
Benefícios adicionais	---	Novas funções, melhor qualidade de energia	

A redução dos custos específicos de inversores foi possível devido ao contínuo esforço no reprojeto dos inversores (*design-for-cost*), no aumento de potência por inversor, produção flexível, aumento das quantidades de produção.

A eficiência foi aumentando gradualmente reduzindo assim as perdas, reduzindo também a geração de calor. A eficiência foi melhorada devido a combinação de novas topologias e novos materiais (elementos semicondutores e magnéticos).

Maior confiabilidade e maior expectativa de vida útil foram obtidas pela melhoria contínua de projeto, aumentando a funcionalidade, aprimorando a integração e montagem de componentes (*design-for-assembly*). Menor número de componentes reduz o custo de material e fabricação. Reduz perdas elétricas e reduz conexões mecânicas entre elementos o que resulta em redução de taxa de falhas, aumentando a confiabilidade e a vida útil.

2.4.2 Montagem eletromecânica de inversores

O planejamento da montagem eletromecânica de componentes eletrônicos em dispositivos de eletrônica de potência (em inglês *Power Electronic Packaging, PEP*), o projeto do gerenciamento térmico, o processo de fabricação e a seleção de componentes eletrônicos de alta qualidade são os principais fatores responsáveis pela alta eficiência, pela alta confiabilidade, e pela longa expectativa de vida dos inversores fotovoltaicos (maior que 20 anos). O desafio é permanente e a fabricação deve ser rápida e simples.

Componentes com aquecimento elevado como semicondutores e bobinas magnéticas são conectadas termicamente ao sistema de arrefecimento, o qual é conectado ou integrado ao gabinete.

2.4.3 Histórico evolutivo sobre montagem de inversores

Segundo Mallwitz, 2010, na primeira geração de inversores todos componentes internos eram discretos e de uso geral. O gabinete era uma caixa metálica de aço. Os demais componentes como transformadores, indutores, capacitores independentes, dispositivos chaveadores semicondutores eram fixados a um dissipador térmico de alumínio. Eram necessárias muitas conexões elétricas com parafusos entre componentes, as quais são as maiores causas de falhas. O arrefecimento térmico era feito sem ventiladores para evitar consumo próprio. Todos os componentes eram montados e fixados em um gabinete único (caixa metálica) classe IP65 para proteção dos componentes eletrônicos.

Na segunda geração, o aumento da potência elétrica resultou também em aumento da dissipação térmica, requerendo assim um novo conceito para gerenciamento térmico do inversor, o qual dividia o inversor em dois compartimentos: um compartimento frontal selado para proteção dos componentes eletrônicos, e outro compartimento com ventilação forçada com os componentes que necessitam maior dissipação térmica, como o integrado magnético composto pelo transformador, indutor e capacitor.

Bons projetos utilizavam gabinetes injetados em alumínio, com design dedicado a facilidade de montagem, incorporando funções múltiplas como: invólucro de proteção, separação entre compartimento frontal selado e compartimento traseiro, blindagem eletromagnética, dissipador de calor, elementos de fixação, local de instalação de um ou dois ventiladores.

Na terceira geração, o compartimento frontal foi dividido em três sub-compartimentos. Chaveadores semicondutores e demais componentes eletrônicos ficam no primeiro destes compartimentos selados da umidade e da poeira classe IP65. No segundo compartimento têm-se os conectores CC, e no terceiro compartimento frontal têm-se os conectores CA e comunicação. Esta separação CC e CA aumenta a segurança durante a instalação, manutenção e serviços.

Podem-se observar na Tabela 2.3 algumas estratégias adotadas na evolução de inversores, descritos em Mallwitz, 2010.

Tabela 2.3 - Desenvolvimento de projeto de inversores. [adaptada de Mallwitz, 2010]

Área de projeto	Estratégia adotada	Motivação e benefícios obtidos
Projeto dedicado a fabricação e montagem <i>Design for manufacturing and assembly (DFMA)</i>	Projeto com aperfeiçoamento contínuo	
	Menor número de componentes	<ul style="list-style-type: none"> ○ facilidade de fabricação ○ menor custo de produção
	Integração de componentes	<ul style="list-style-type: none"> ○ organização intuitiva
	Gabinete com múltiplos compartimentos	<ul style="list-style-type: none"> ○ maior segurança ○ facilidade de manutenção ○ proteção IP65 para componentes eletrônicos sensíveis a umidade e a poeira ○ conexões CC e AC ○ ventilação forçada para componentes de maior dissipação térmica
Gerenciamento térmico	Gabinete incorporando funções (dissipação térmica, fixações, etc)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Maior confiabilidade ○ Menor fadiga térmica ○ Maior vida útil ○ Maior tempo entre falhas
	Menor número de conexões elétricas	
	Compartimento com proteção IP65 para componentes eletrônicos sensíveis a umidade e a poeira	
	Compartimento com ventilação forçada para componentes de maior dissipação térmica	
Segurança	Compartimentos separados para conexões CC e AC para maior segurança	
	Projeto com aperfeiçoamento contínuo dedicado a integração de componentes, facilidade de fabricação, segurança	

3 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE (SFCR)

Como visto anteriormente, sistemas fotovoltaicos conectados à rede são formados basicamente por três conjuntos de componentes: arranjo fotovoltaico, inversor, dispositivos de conexão à rede, podendo estes conjuntos e componentes ser agrupados em diversas configurações elétricas e mecânicas.

3.1 Configuração eletromecânica geral de sistemas fotovoltaicos conectados à rede

Na Tabela 3.1 se apresenta a classificação geral de sistemas fotovoltaicos quanto ao tipo, ao local, ao tamanho e a aplicação de inversores.

Tabela 3.1 - Classificação geral de sistemas fotovoltaicos.

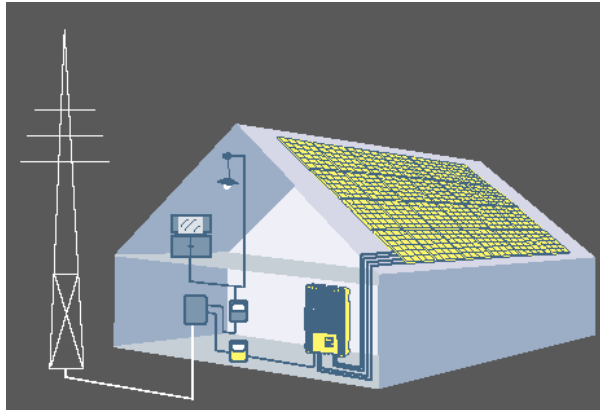
	Tipo	Localização	Tamanho	Exemplos de aplicação
Sistemas fotovoltaicos	Conectados à rede	Urbana	Pequenos (baixa potência)	Residenciais
		Urbana	Médios (média potência)	Aeroportos, prédios comerciais, estacionamentos
		Fora de perímetro urbano	Grandes (grande potência)	Usinas, grandes áreas, fazendas
	Isolados	Locais afastados da rede elétrica	Individuais	Edificação isolada, floresta
			Minirede	Pequenos condomínios, vilarejos

A Figura 3.1 mostra um SFCR que está em operação desde o ano 2004, em Porto Alegre – RS. Os módulos fotovoltaicos foram montados sobre o prédio. Os inversores, os medidores, as proteções e os elementos de conexão à rede foram instalados no interior do prédio.



Figura 3.1 – SFCR de 4,8 kWpico – Laboratório de Energia Solar – LABSOL – UFRGS - RS.

A Figura 3.2 mostra um esquema de um sistema fotovoltaico conectado à rede de uma instalação residencial e de uma grande central. Apresenta também exemplos de pequenos sistemas fotovoltaicos instalados próximos aos locais de consumo. Os SFCR são adequados para a instalação em grandes centros urbanos pela facilidade com que se adaptam as arquiteturas e aos telhados dos prédios e das residências.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.2 – Exemplos de SFCR: (a) esquema de uma instalação residencial, (b) uma grande central, (c) sistemas fotovoltaicos urbanos.

3.1.1 Configuração de SFCR quanto aos arranjos de módulos fotovoltaicos

Arranjos fotovoltaicos podem ser definidos como um conjunto de módulos fotovoltaicos agrupados. Estes arranjos podem ser classificados conforme suas combinações e suas interligações elétricas, em série e em paralelo. A associação de diversos módulos em série é chamada usualmente de *string* (fileira). A quantidade de módulos em série (*string*) é definida pela tensão de trabalho do inversor. A quantidade de *strings* em paralelo é definida pela corrente de operação do inversor.

3.1.2 Configuração de SFCR quanto aos tipos de inversores

Pode-se ainda classificar a instalação quanto ao tipo de interligação dos módulos fotovoltaicos aos inversores. A Figura 3.3 apresenta algumas destas configurações:

- Inversor central;
- Inversor string;
- Inversor individual módulo AC;
- Inversor multi-string;

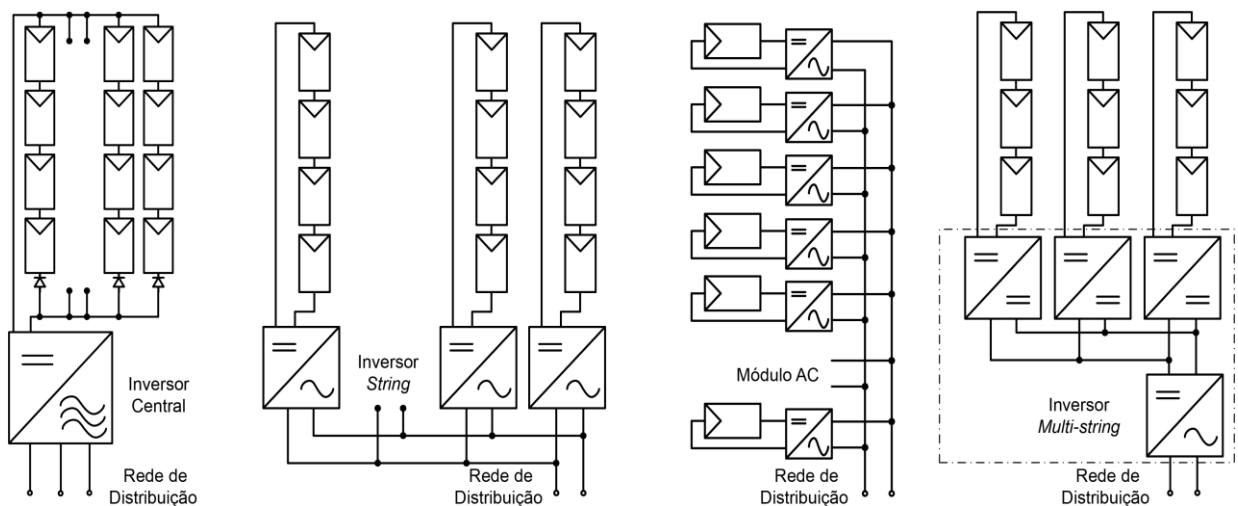


Figura 3.3 - Esquema de diferentes configurações de sistemas fotovoltaicos conectados à rede
(a) inversor central, (b) inversor *string*, (c) Módulo AC, (d) inversor multi-*string*.

[adaptada de Prieb, 2011]

Pode-se ainda classificar a instalação quanto ao tipo de saída de energia elétrica dos inversores:

- Inversor monofásico;
- Inversor trifásico;
- Inversor sem transformador;
- Inversor com transformador.

3.1.3 Configuração de SFCR quanto à interligação à rede de distribuição

Pode-se ainda classificar a instalação quanto ao tipo de interligação elétrica à rede de distribuição da concessionária local.

- Conexão em baixa tensão: Conexão direta à rede baixa tensão (por exemplo, 127/220 V)
- Conexão em média tensão: Conexão à rede de média tensão através de transformador elevador (por exemplo, 13600 V)

3.2 Módulo fotovoltaico

O módulo fotovoltaico é formado por uma associação de células fotovoltaicas encapsuladas, geralmente com um vidro na sua face frontal e um filme plástico na parte traseira. O conjunto é protegido mecanicamente por uma moldura de alumínio. As células fotovoltaicas são interligadas eletricamente em série/paralelo. A Figura 3.4 mostra alguns módulos fotovoltaicos de diferentes tamanhos.



Figura 3.4 - Módulos fotovoltaicos.

3.2.1 Curva característica $I-V$ do módulo fotovoltaico

O módulo fotovoltaico possui uma curva característica “ $I-V$ ” de “corrente x tensão” e uma curva “ $P-V$ ” de “potência x tensão”, ambas representadas na Figura 3.5.

Nestas curvas podem-se visualizar três pontos característicos: Tensão de circuito aberto V_{OC} , corrente de curto circuito I_{SC} e ponto de máxima potência P_{MP} .

As curvas características destes módulos fotovoltaicos, quando em operação normal (expostos ao Sol e conectados à inversores), sofrem variações a todo momento, conforme variações das condições de operação do módulo fotovoltaico (variação da radiação solar incidente e variação da temperatura do módulo).

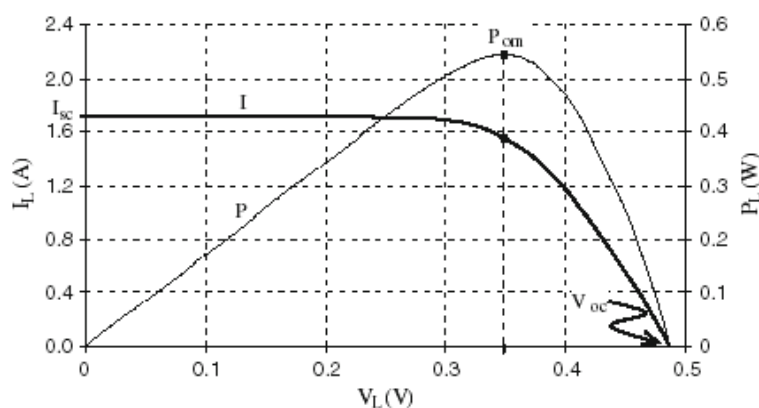


Figura 3.5 - Curvas características típicas do módulo fotovoltaico $I-V$ e $P-V$.

3.2.2 Arranjo fotovoltaico - Curva característica “ $I - V$ ” e ponto de máxima potência

Arranjos fotovoltaicos podem ser definidos como um conjunto de módulos fotovoltaicos agrupados. Podem-se classificar estes arranjos conforme as combinações e interligações elétricas em série e em paralelo. A associação de diversos módulos em série é chamada usualmente de *string* (fileira). A quantidade de módulos em série é definida pela tensão de trabalho do inversor. A quantidade de *strings* em paralelo é definida pela corrente de operação do inversor.

Assim como os módulos fotovoltaicos, os arranjos de módulos fotovoltaicos têm curva característica de operação “ $I-V$ ” (tensão x corrente), conforme curva típica apresentado na Figura 3.5. Sobre esta curva característica existe um ponto (um par “ $I-V$ ”) onde é possível extrair a máxima potência elétrica do arranjo fotovoltaico. Este ponto é chamado de ponto de máxima potência.

3.2.3 Efeito da temperatura sobre o módulo fotovoltaico

A Figura 3.6 mostra o efeito causado pela variação de temperatura do módulo fotovoltaico no seu desempenho. A Figura 3.6.a mostra a curva característica $I-V$ onde é possível observar que com aumento de temperatura ocorre uma redução da tensão de circuito aberto V_{OC} e um aumento da corrente de curto-circuito I_{SC} . A Figura 3.6.b mostra a curva $P-V$ onde é possível observar este efeito resultante, do aumento de temperatura, sobre o ponto de máxima potência do módulo fotovoltaico.

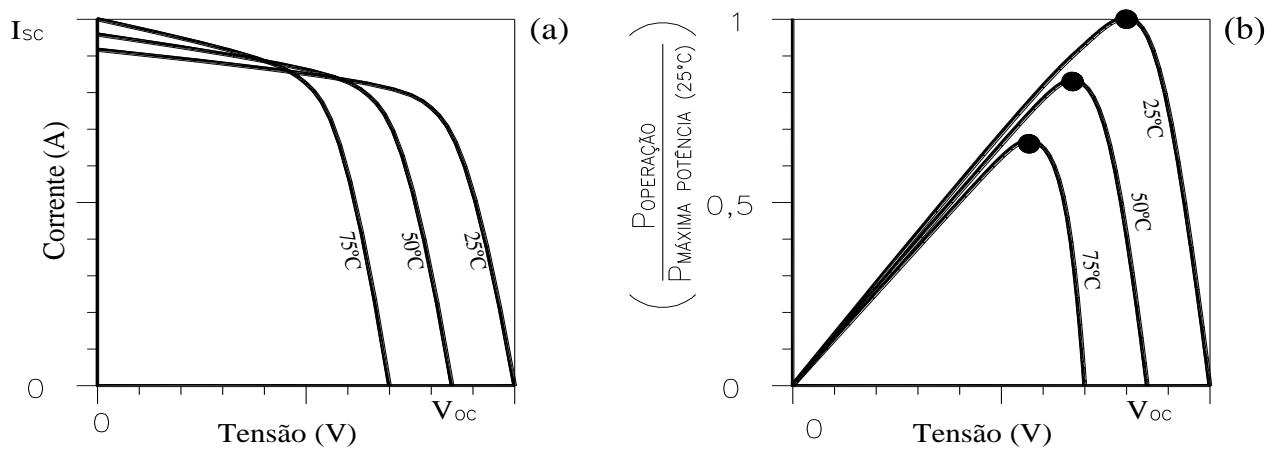


Figura 3.6 - Curva característica de arranjos fotovoltaicos: (a) efeito da temperatura sobre a curva “tensão x corrente”, (b) efeito da temperatura sobre o ponto de máxima potência.

3.2.4 Efeito da radiação solar sobre o módulo fotovoltaico

A Figura 3.7 mostra o efeito sobre a curva característica do módulo fotovoltaico causado pela variação da radiação solar incidente, onde é possível observar que ocorre uma redução na corrente de curto-circuito I_{SC} proporcionalmente à redução da radiação solar.

Na Figura 3.7.a é possível observar as curvas características “ $I-V$ ” para diferentes condições de radiação solar incidente sobre o arranjo de módulos fotovoltaicos, e na Figura 3.7.b apresenta-se o efeito resultante destes diferentes valores de irradiância solar sobre o ponto de máxima potência.

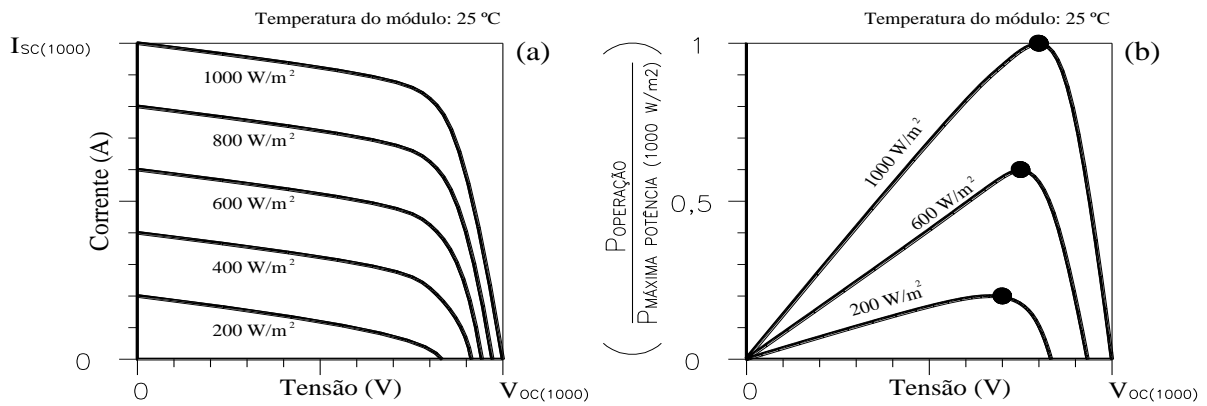


Figura 3.7 - Curva característica de arranjos fotovoltaicos (a) efeito da irradiância solar sobre a curva “tensão x corrente”, (b) efeito da irradiância solar sobre o ponto de máxima potência.

Variações de irradiância solar ocorrem a todo o momento devido ao horário do dia, sombreamentos parciais, nuvens, fumaça, sujeira, aves e obstáculos próximos (prédios e árvores). Variações de temperatura dos módulos ocorrem também a todo o momento devido às variações da temperatura ambiente, do vento, assim como da irradiância solar.

Sendo assim a combinação destas variações de temperatura e de irradiância solar resulta na contínua variação da curva característica de operação, assim como do seu respectivo ponto de máxima potência.

3.2.5 Efeito da temperatura e irradiação sobre o ponto de máxima potência

A potência elétrica produzida pelo módulo fotovoltaico é representada pelo produto “tensão x corrente” do ponto de operação dentro da curva característica $I-V$. O ponto de máxima potência corresponde ao par $I-V$ que produz o máximo valor de potência, é o ponto desejável de operação.

A potência no ponto de máxima potência é representada pela Equação 3.1

$$P_{MP} = V_{MP} I_{MP} \quad (3.1)$$

A Figura 3.5 mostra uma curva característica $I-V$ e uma curva $P-V$, onde é possível observar que o local típico do ponto de máxima potência fica próximo ao “joelho” da curva $I-V$

V. O ponto de máxima potência muda de posição a todo momento devido ao efeito combinado resultante das variações de temperatura e das variações de irradiância. No caso de redução de irradiância solar sobre o módulo ocorre uma diminuição da máxima potência disponível no mesmo. A Figura 3.8 mostra que, com o aumento de temperatura do painel solar fotovoltaico, também ocorre uma diminuição da máxima potência disponível no painel.

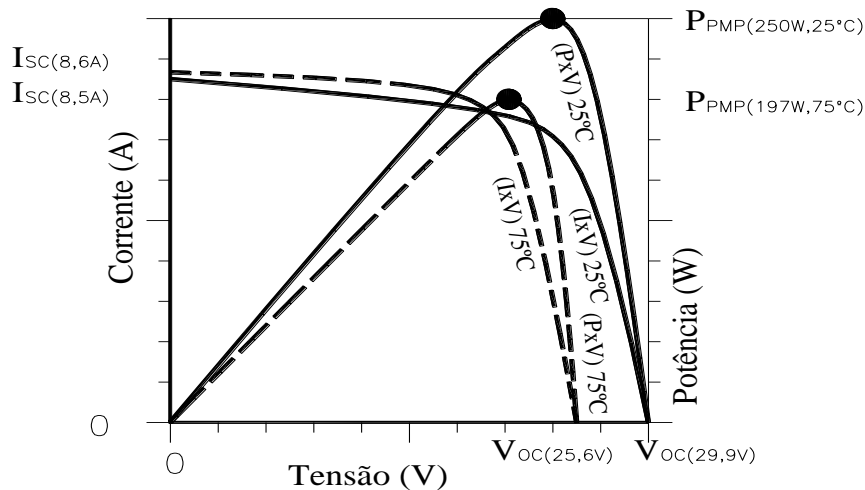


Figura 3.8 - Efeito da variação de temperatura sobre curvas características I - V e P - V .

3.2.6 Informações técnicas típicas de um módulo fotovoltaico

Para simulação, projeto e dimensionamento de sistemas fotovoltaicos conectados à rede é necessário o conhecimento de características operacionais de todos os componentes do sistema (painéis solares, inversores, elementos de interligação à rede).

Módulos fotovoltaicos possuem uma lista de parâmetros operacionais que normalmente são informados em catálogos técnicos de fabricantes.

Estes parâmetros podem ser divididos em parâmetros operacionais elétricos e parâmetros mecânicos. Para dimensionamento físico da instalação são necessários os parâmetros mecânicos como dimensões, peso, materiais de construção, proteções, conectores. Para dimensionamento energético é necessário o conhecimento de parâmetros operacionais elétricos como tensão de circuito aberto V_{OC} , corrente de curto circuito I_{SC} , potência P_{MP} , tensão V_{MP} e corrente I_{MP} .

Usualmente os parâmetros operacionais elétricos são apresentados nos catálogos conforme suas condições de temperatura.

Em um primeiro grupo característico, os parâmetros elétricos são apresentados conforme condições padrão de testes *STC* (*Standard Test Conditions*) que avalia os módulos nas seguintes condições: irradiância 1000 W/m^2 ; espectro solar correspondente à massa de ar 1,5; temperatura da célula $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Em um segundo grupo característico, os parâmetros são apresentados conforme condições correspondentes à temperatura nominal de operação *NOCT* (*Nominal Operating Cell Temperature*) que avalia os módulos nas seguintes condições: irradiação 800 W/m^2 ; espectro solar correspondente à massa de ar 1,5; velocidade do vento 1 m/s ; temperatura ambiente $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Nas condições de teste *NOCT*, os parâmetros elétricos apresentados consideram as condições mais próximas da operação real da célula fotovoltaica em campo, já considerando o efeito combinado do aumento de temperatura e redução da irradiação em relação a condição *STC*. Também são apresentados coeficientes térmicos que indicam o efeito da temperatura sobre o desempenho da célula fotovoltaica permitindo a determinação dos parâmetros elétricos em outras condições de temperatura diferente das condições padronizadas *STC* e *NOCT*.

No Apêndice A, a Tabela A.1 apresenta características de alguns módulos fotovoltaicos comerciais.

3.2.7 Ensaios de desempenho e normas técnicas aplicáveis a módulos fotovoltaicos

No Brasil, módulos fotovoltaicos para uso comercial devem ser certificados conforme “Programa de Brasileiro de Etiquetagem” do Inmetro. Esta recomendação vale tanto para os módulos fabricados no Brasil como para os fabricados no exterior.

O Laboratório de Energia Solar da UFRGS (LABSOL) é um laboratório designado pelo Inmetro para realização de ensaios de desempenho necessários à caracterização e certificação de módulos fotovoltaicos. O certificado emitido resultante destes ensaios apresentam dados de desempenho, conforme características gerais apresentadas na Tabela A.1.

A portaria do Inmetro número 004/2011 recomenda que os referidos ensaios de desempenho de módulos fotovoltaicos devem seguir as seguintes normas técnicas.

- IEC 61215 *Crystalline Silicon Terrestrial Photovoltaic (PV) Modules – Design Qualification and Type Approval*.

- IEC 61646 *Thin-film Terrestrial Photovoltaic (PV) Modules – Design Qualification and Type Approval*.
- ABNT 11704:2008 – Sistemas fotovoltaicos – Classificação.

3.3 Caracterização de inversores e seus componentes

Muitas são as combinações de parâmetros operacionais e características desejáveis a serem observados no momento da seleção de inversores. O inversor faz o acoplamento dos arranjos fotovoltaicos na rede de distribuição elétrica.

De forma geral são esperadas características construtivas de alta qualidade e segurança, rotinas de controle otimizadas para gerenciamento de energia e gerenciamento térmico, alta eficiência de conversão e seguimento de máxima potência, flexibilidade e inteligência de comunicação. Em resumo, inversores são dispositivos de alta complexidade incorporando componentes de eletrônica de potência e componentes de eletrônica computacional.

As características de entrada e saída do inversor devem ser compatíveis com os arranjos fotovoltaicos e a rede elétrica da concessionária. Espera-se da entrada de energia em corrente contínua maior facilidade de acoplamento do inversor ao SFCR. As características de entrada são mais flexíveis, pois estes arranjos fotovoltaicos podem ser agrupados conforme disponibilidade de módulos fotovoltaicos. As características de saída de tensão são mais rígidas, pois dependem das características da rede da concessionária, as quais são rigidamente padronizadas quanto aos parâmetros de tensão e frequência, e ainda quanto à qualidade mínima exigida relacionada às distorções, forma de onda senoidal, proteções, anti-ilhamento, rotinas de controle e segurança.

3.3.1 Características gerais de inversores – Tipos, configurações e parâmetros funcionais

Para caracterização e seleção de inversores são necessários dados conforme segue:

Identificação inicial com fabricante (país de origem, pós-venda, suporte técnico local), tipo de aplicação: conectado à rede ou autônomo com baterias, eficiência de conversão CC/CA, eficiência ponderada regional (européia, californiana, brasileira), tipo de arranjo fotovoltaico (disponível ou definido em projeto), conceito construtivo (frequência, transformador, topologia).

Características elétricas da entrada CC, potência, corrente, faixa de tensão CC de operação (máxima e mínima), faixa de tensão CC do SPMP (máxima e mínima), número de entradas CC.

Características elétricas da entrada CA, potência, corrente, número de fases, frequência de rede, fator de potência, com ou sem transformador isolador, injeção de corrente CC, consumo interno noturno.

Proteções incorporadas como anti-ilhamento, bloqueio circuito CC e CA (contator, chave), curto circuito CC e CA (disjuntor, fusível), filtros e indutores. Sistema de gerenciamento térmico para evitar superaquecimento (estratégias de arrefecimento: passivo por convecção natural, ativo fixo por convecção forçada, controle avançado de redução de potência).

Características mecânicas gerais como dimensões, tipo de gabinete, grau de proteção IP, acesso de manutenção, tipo/local de instalação (externa na rua ou interna, na parede ou no chão), facilidade de acesso e manutenção, caixa de conexões, comando, comunicação (wi-fi, ethernet, modbus), condições de operação (temperatura, umidade, altitude), durabilidade (vida útil).

No Apêndice B, a Tabela B.1 apresenta um exemplo destas especificações técnicas de inversores conforme folha de dados de dois inversores comerciais.

3.3.2 Características gerais de inversores – Componentes internos

Internamente os inversores possuem diversos componentes e elementos conforme ilustra o resumo apresentado na Tabela 3.2. Dentre estes componentes internos apresentados, os componentes eletrônicos são os que apresentam aquecimento. Os que apresentam maior dissipação térmica e atingem maior temperatura são os semicondutores chaveadores, do módulo de potência, seguidos pelos capacitores, transformadores e indutores.

A Figura 3.9 apresenta um esquema simplificado de um inversor, mostrando componentes internos principais e interligações elétricas internas, onde “DJ” representa os disjuntores de proteção, “K” os contadores de acoplamento elétrico.

No capítulo 9, a Figura 9.1 apresenta vistas de um inversor de potência nominal CA de 50 kW, trifásico, próprio para conexão à rede, onde é possível visualizar os componentes internos principais.

Tabela 3.2 - Resumo de componentes e elementos internos de inversores.

Componentes	Elementos	Observação
Eletrônicos de potência	Semicondutores chaveadores	Módulo de potência
	Capacitores	
	Retificadores	
	Transformadores	Conjunto eletromagnético
	Indutores	
	Filtros CC e CA	
Eletrônicos computacionais	Sistema de controle e operação	Gerenciamento de segurança, Gerenciamento de energia, Seguimento de máxima potência, Gerenciamento térmico
	Interface homem-máquina, comunicação	Acionamento, alarmes
Mecânicos	Invólucro	Proteção, acesso facilitado
	Dissipadores de calor	Sistema de arrefecimento e gerenciamento térmico
	Ventiladores	
	Conectores elétricos	Para interligações externas
	Junções soldadas	
	Proteções, chaves, disjuntores	

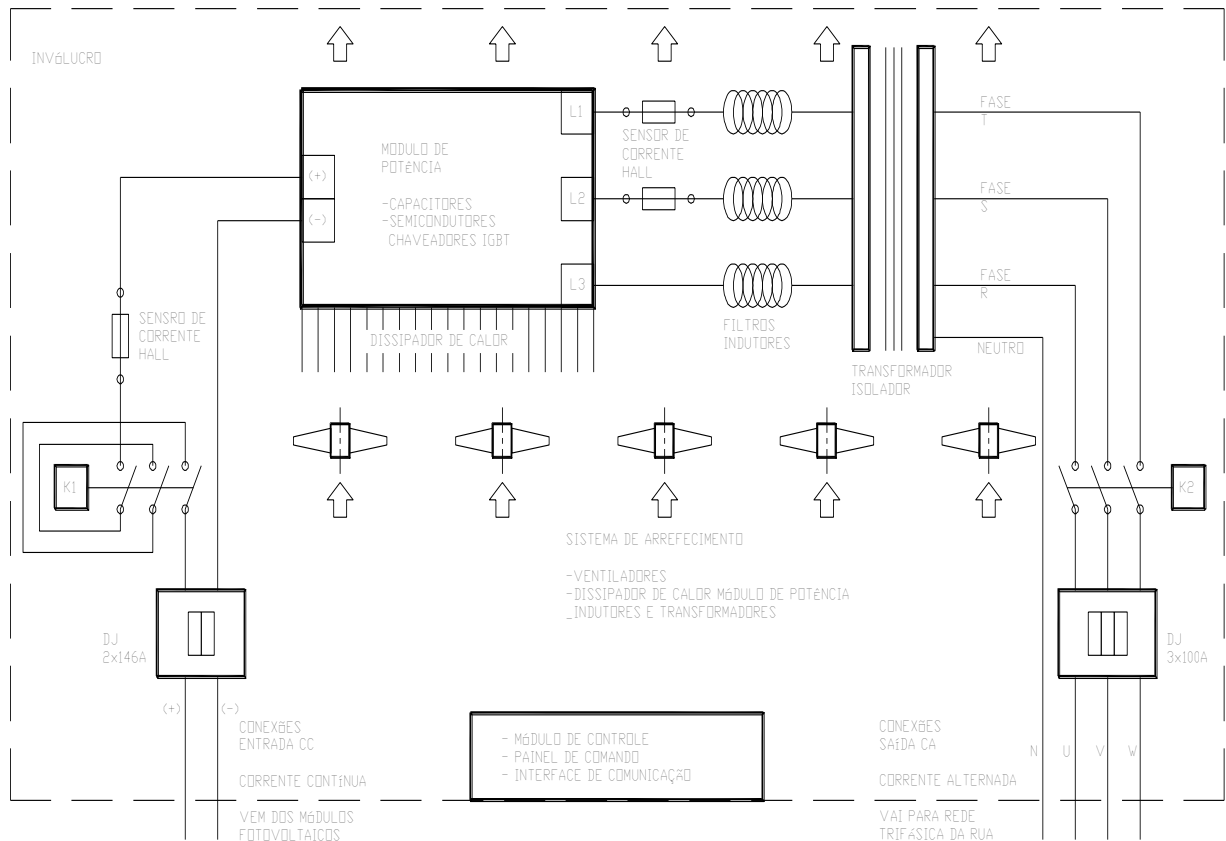


Figura 3.9 - Esquema de um inversor trifásico.

3.3.3 Topologia de inversores

Muitos são os conceitos de configuração eletrônica interna para inversores. Atualmente são adotadas em inversores comerciais mais de 40 topologias [Prieb, 2011]. A Figura 3.10 apresenta alguns exemplos de possíveis configurações eletroeletrônicas de inversores e topologias internas de módulos de potência, onde “S” representa os elementos semicondutores chaveadores do módulo de potência, “C” os capacitores, “L” os indutores, “D” diodos retificadores. Prieb, 2011 apresenta um descritivo destas configurações e topologias.

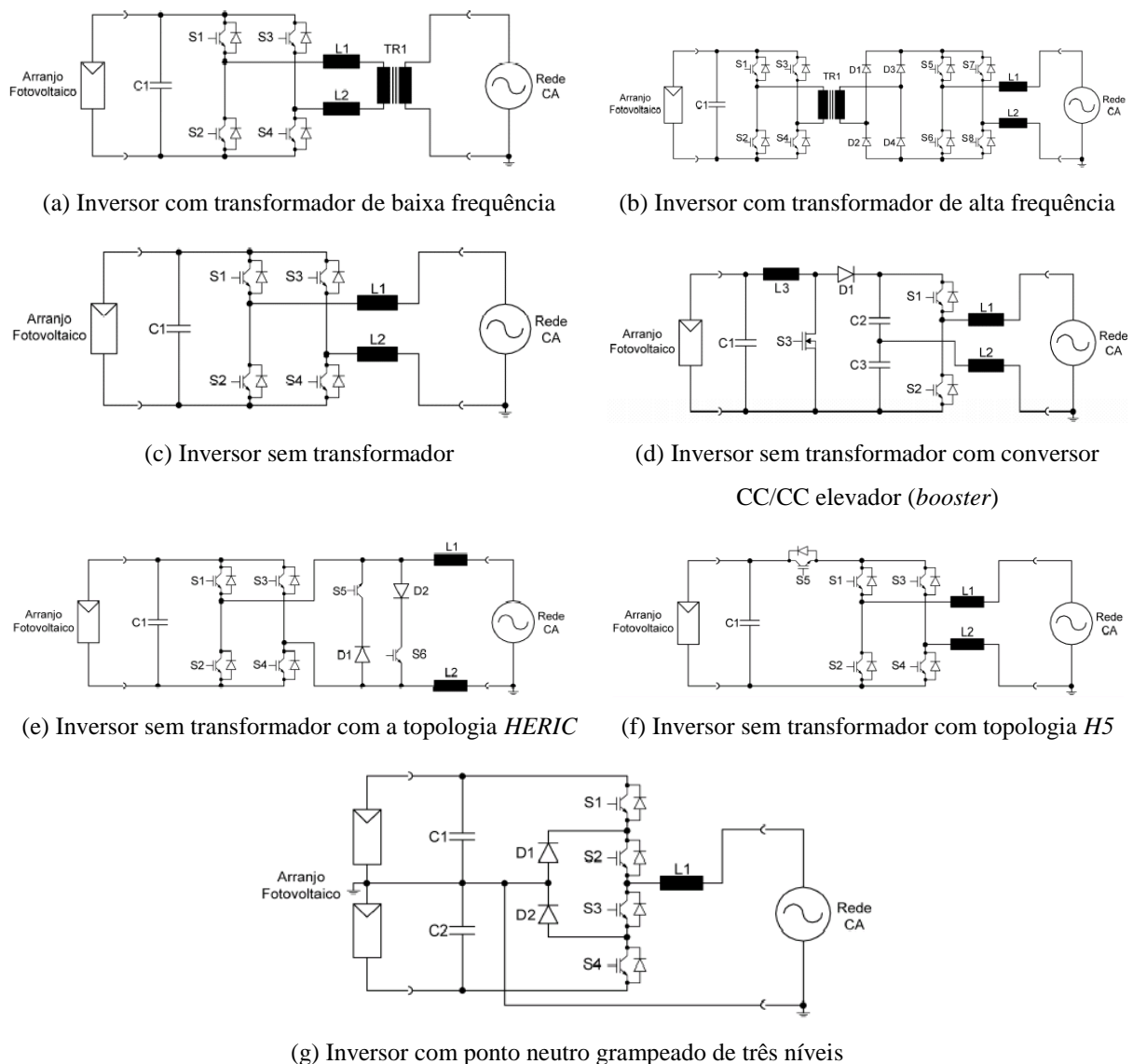


Figura 3.10 – Esquemas de configurações eletroeletrônicas de inversores de SFCR.

3.3.4 Ensaios de desempenho e normas técnicas aplicáveis aos inversores fotovoltaicos

No Brasil, inversores fotovoltaicos para uso comercial devem ser certificados conforme o “Programa Brasileiro de Etiquetagem” do Inmetro. Esta recomendação vale tanto para os inversores fabricados no Brasil como para os fabricados no exterior.

As portarias do Inmetro números 004/2011 e 357/2014 do Inmetro recomendam que os referidos ensaios de inversores para sistemas fotovoltaicos de conexão à rede devem ser realizados de forma a atender as orientações das seguintes regulamentos e normas técnicas.

- EN50530 European Standard, 2010. Overall Efficiency on Grid Connected Photovoltaics Inverters
- ABNT NBR 16149, 2014. Sistemas Fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com à rede elétrica de distribuição
- ABNT NBR 16150, 2013. Sistemas Fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição – Procedimentos de Ensaios de Conformidade
- ABNT NBR IEC 62116, 2012. Procedimentos de Ensaios anti-ilhamento
- IEC 62093, 2005. PV inverter Reliability Test Standard
- IEC 61683, 1999. Photovoltaic Systems – Power Conditioners – Procedure for Measure Efficiency

Estas normas estão relacionadas a testes de desempenho, eficiência de conversão e condições operacionais de segurança.

Uma das etapas de desenvolvimento desta tese colaborou com a construção de uma bancada de testes de inversores no Laboratório de Energia Solar da UFRGS (LABSOL), capaz de realizar ensaios de desempenho necessários para caracterização elétrica e térmica de inversores, conforme normas aplicáveis.

3.4 Modelagem do desempenho elétrico de inversores

A eficiência de conversão CC-CA pode ser definida inicialmente de forma simplificada como a razão entre energia CA entregue à rede (o efeito útil) e a energia CC absorvida do arranjo fotovoltaico.

3.4.1 Fatores que influenciam a eficiência de inversores

A eficiência de conversão é um importante critério de comparação entre inversores, porém dificilmente é bem representada por um único valor fixo, pois depende de vários fatores de operação.

A eficiência é um parâmetro de desempenho que pode ser observado por um período de tempo “ t ”, sendo que este tempo pode ser um segundo, uma hora, um dia, um mês, ou mesmo um ano.

Avaliações experimentais muitas vezes ocorrem em períodos muito curtos obtendo eficiência instantânea como eficiência no ponto de máxima potência ou em condições controladas e favoráveis de forma a não ser possível observar outros efeitos e limitações.

Durante um período de tempo mais longo, múltiplos fatores atuam de forma combinada afetando esta razão de conversão de energia que é chamada de eficiência global. Podem-se citar alguns destes fatores e condições operacionais:

- Tensão CC de entrada;
- Carregamento CA de saída (potência CA);
- Eficiência do seguimento de máxima potência;
- Tempo de resposta as variações de alimentação CC e carga CA;
- Temperatura de operação do inversor;
- Tempo considerado para avaliação eficiência global (uma hora, um dia, um mês, um ano).

3.4.1.1 Carregamento de inversores

A Equação 3.2 define o carregamento do inversor “ Ld ” (ou ainda o carregamento do inversor em operação parcial) como a razão entre a potência instantânea parcial em corrente contínua na entrada do inversor, durante a operação e a potência nominal máxima admissível em corrente contínua na entrada do inversor.

$$Ld = \frac{P_{INV,CC}}{P_{INV,CC,MAX}} \quad (3.2)$$

onde

Ld é o carregamento do inversor quando em operação,

$P_{INV,CC}$ é a potência instantânea parcial em corrente contínua na entrada do inversor, durante a operação,

$P_{INV,CC,MAX}$ é a potência nominal máxima admissível na entrada do inversor.

Na Figura 3.11 apresenta-se um gráfico e uma tabela de pontos correspondentes com valores de eficiência para um inversor, ilustrando a dependência e o efeito das condições de operação, carregamento e tensão CC, sobre a eficiência.

Os dados apresentados nas Figura 3.11 são de um inversor fabricado pela SMA, modelo SB3000, potência nominal de 3000 W, sem transformador, sem ventilador de arrefecimento, com faixa de rastreamento do ponto de máxima potência entre as tensões 268 e 480 VCC, eficiência máxima de 94,8 % e eficiência ponderada europeia de 93,6%.

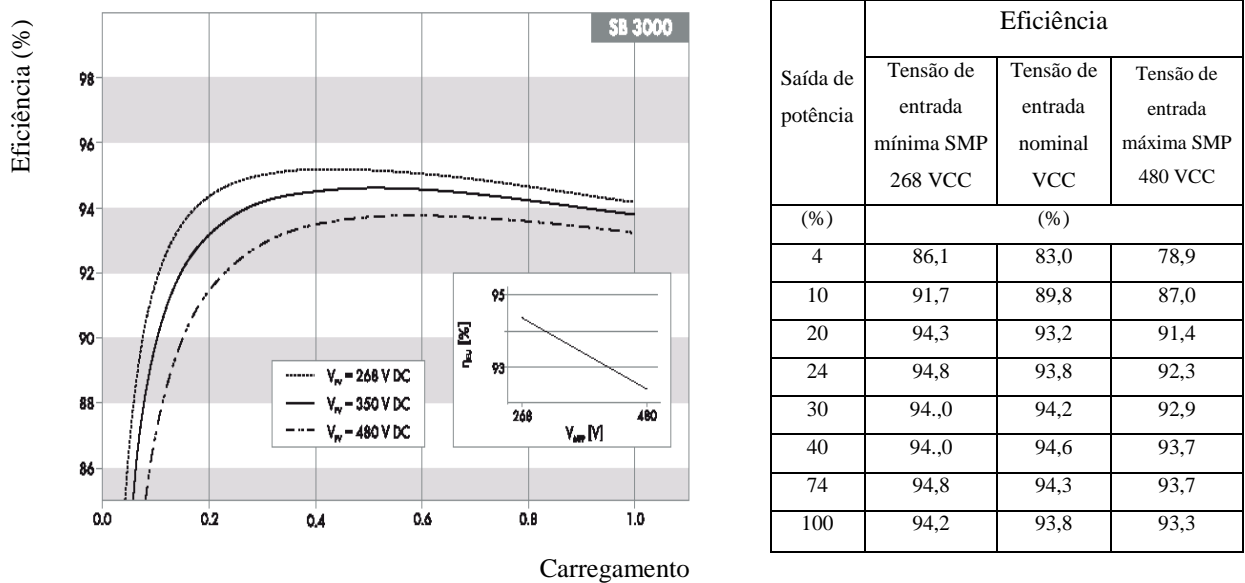


Figura 3.11 - Curvas de eficiência de um inversor fotovoltaico, para diferentes tensões CC e diferentes carregamentos (fabricante SMA).

3.4.1.2 Seguimento do ponto de máxima potência

Para que o inversor tenha um bom desempenho é desejável que o ponto de operação do inversor seja sempre no ponto de máxima potência. Para isto o inversor deve ter a habilidade de rastrear de forma contínua e ininterrupta, o ponto de máxima potência, polarizando a operação do inversor neste ponto.

Existem diversos algoritmos de controle para manter a polarização do arranjo fotovoltaico em seu ponto de máxima potência, mas o mais utilizado é chamado “perturba e observa”. De forma simplificada, este algoritmo de controle responsável pelo seguimento da máxima potência pode ser descrito conforme etapas apresentadas na Figura 3.12.

A rotina de controle dedicada ao rastreamento do ponto de máxima potência tem capacidade de variar a corrente elétrica CC na entrada do inversor, permitindo assim o “caminhar” sobre a curva característica do arranjo fotovoltaico.

Como cada ponto de corrente sobre a curva tem seu ponto correspondente de tensão, pode-se adotar que esta varredura de corrente é uma varredura de tensão. Isto facilita a compreensão das etapas apresentadas na Figura 3.13 visto que a faixa da varredura de tensão aparece no gráfico “corrente x tensão” e no gráfico “potência x tensão”.

No exemplo, a varredura de tensão será realizada inicialmente em uma faixa de varredura ampla. Inicia à esquerda e vai aumentando de forma incremental da esquerda para a direita, monitorando a potência de operação ($P = I V$). Este processo de varredura incremental vai ocorrendo passo a passo sempre comparando a potência de operação de cada passo passado com o passo presente. Quando o valor da potência do passo presente for menor que a potência do passo passado (ponto de inflexão), entende-se que o ponto de máxima potência foi ultrapassado, devendo assim a varredura de tensão dar um passo atrás.

Este processo de rastreamento fica agora oscilando em uma faixa de varredura de tensão mais estreita, em torno do ponto de máxima potência. A eficiência do seguimento de máxima potência é da ordem de 99% em bons inversores comerciais de uso corrente [Prieb, 2011]. De tempos em tempos a rotina de controle interna responsável por varrer os pontos de tensão sobre a curva do módulo fotovoltaico realiza uma varredura em faixa ampla verificando a possibilidade de outros pontos de máxima potência devido a alguma distorção (falha de células, ponto quente ou sombreamento parcial).

3.5 Ensaios e experimentos de desempenho

O inversor, por ser um equipamento de alto custo atuando com um recurso energético de baixa intensidade, requer constante aperfeiçoamento para aumento de eficiência de conversão (mesmo que inversores usualmente apresentem eficiência de conversão acima de 90%).

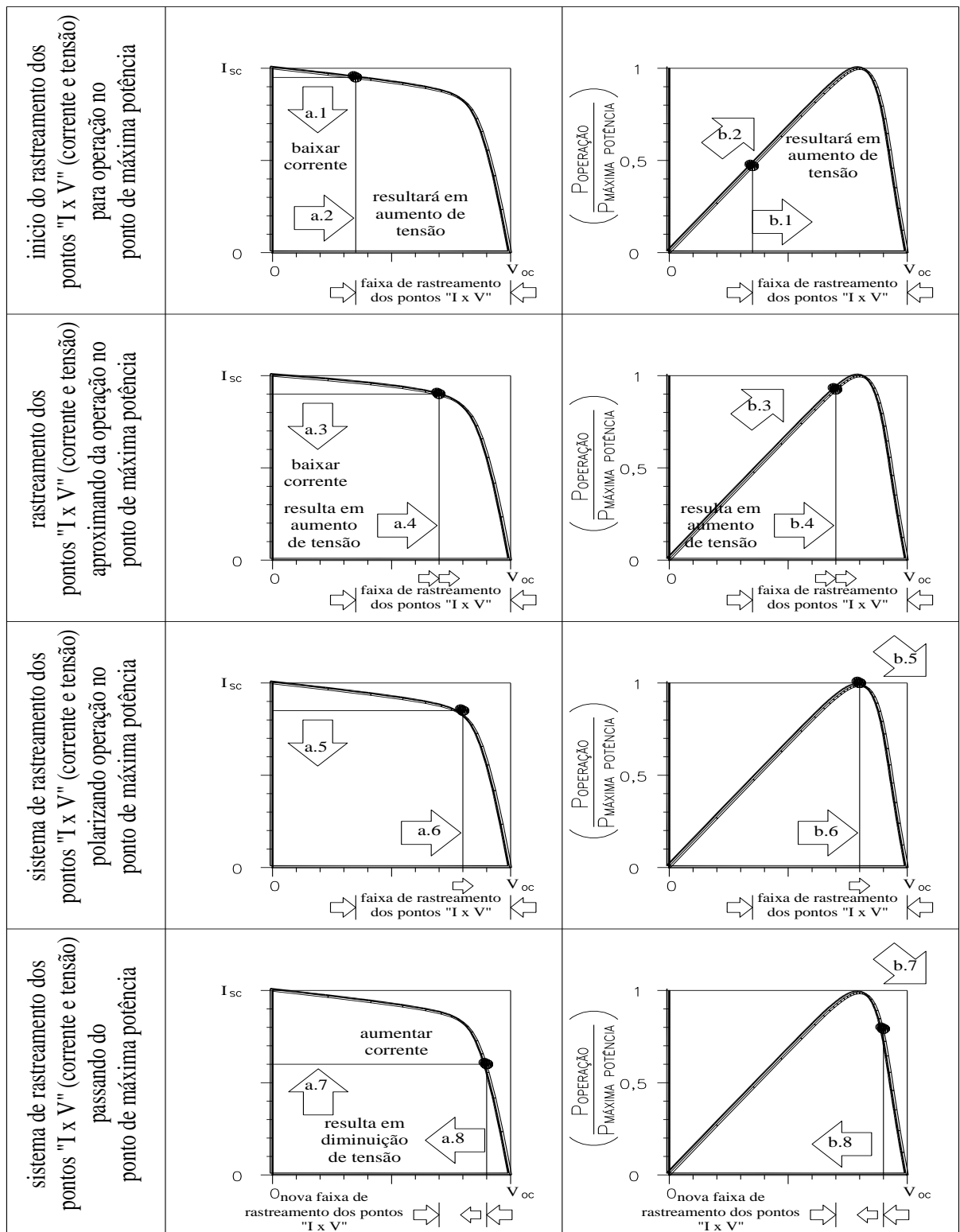


Figura 3.12 - Rotina de controle do rastreamento do ponto de máxima potência (etapas simplificadas).

Avaliações experimentais para determinação da eficiência global " η_{INV} " apresentam razoável facilidade. Os resultados obtidos combinam o efeito de todos estes fatores (efeito

dinâmico do seguimento do ponto de máxima potência, efeito dinâmico do carregamento variável, efeitos e as limitações decorrentes de altas temperaturas de operação).

Já a avaliação do efeito individual de cada um destes fatores requer cuidado especial e dificuldade adicional para manter os demais fatores sob controle enquanto se avalia o fator de interesse.

O conhecimento destes efeitos individuais é importante para determinar prioridades de ações tanto na melhoria do produto inversor através da busca de estratégias para obtenção de valores de eficiência mais elevados, assim como na determinação de modelos matemáticos mais aprimorados utilizados em simulações dinâmicas de sistemas fotovoltaicos conectados à rede.

Na literatura existem disponíveis muitos estudos com resultados sobre o efeito individual em diferentes situações de carregamento, diferentes tensões de entrada CC, e eficiência do seguimento do ponto de máxima potência.

3.6 Eficiência de inversores

3.6.1 Eficiência do seguimento do ponto de máxima potência (SPMP)

O seguimento do ponto de máxima potência é uma estratégia dinâmica de rastreamento do ponto de máxima potência dentro da curva característica do arranjo fotovoltaico. Por ser este processo de controle iterativo e contínuo, o inversor está sempre operando muito próximo a este ponto de máxima potência, mas nunca no ponto “fixo” de máxima potência.

A eficiência do seguimento do ponto de máxima potência está relacionada com a precisão e habilidade do inversor de polarizar sua operação mais próximo ao ponto de máxima potência da curva característica do arranjo fotovoltaico. Prieb, 2011 apresenta um trabalho completo sobre a determinação da eficiência do seguimento de máxima potência. A Equação 3.3 define a eficiência do seguimento de máxima potência.

$$\eta_{INV,SPMP} = \frac{E_{CC}(\text{útil absorvida pelo inversor})}{E_{CC}(\text{máxima disponível no arranjo fotovoltaico})} = \frac{\int_0^{t_m} P_{CC}(t) dt}{\int_0^{t_m} P_{CC,PMP}(t) dt} \quad (3.3)$$

onde

$\eta_{INV,SPMTP}$ é a eficiência do seguimento do ponto de máxima potência,

P_{CC} é a potência em corrente contínua efetivamente absorvida pelo inversor,

$P_{CC,PMP}$ é a potência no ponto de máxima potência disponível no arranjo fotovoltaico,

t_m é o tempo de medição (utilizado para integração da potência e determinação da energia).

3.6.2 Eficiência de conversão CC-CA

A Equação 3.4 define a eficiência de conversão CC-CA do inversor como a razão entre a energia elétrica de saída em corrente alternada “ E_{CA} ” entregue à rede, acumulada no tempo de medição “ t_m ” e a energia elétrica de entrada em corrente contínua “ E_{CC} ”, absorvida pelo inversor, acumulada no tempo de medição “ t_m ”

$$\eta_{INV,CONV} = \frac{E_{CA}(\text{entregue à rede})}{E_{CC}(\text{útil absorvida pelo inversor})} = \frac{\int_0^{t_m} P_{CA}(t) dt}{\int_0^{t_m} P_{CC}(t) dt} \quad (3.4)$$

onde

$\eta_{INV,CONV}$ é a eficiência de conversão CC-CA,

P_{CA} é a potência útil em corrente alternada entregue à rede,

P_{CC} é a potência útil em corrente contínua absorvida pelo inversor,

t_m é o tempo de medição (utilizado para integração da potência e determinação da energia).

3.6.3 Eficiência total

A Equação 3.5 define a eficiência total desta conversão do inversor como a razão entre a energia elétrica de saída em corrente alternada “ E_{CA} ” acumulada no tempo “ t_m ” e a energia elétrica de entrada em corrente contínua disponível “ E_{CC} ” acumulada no tempo “ t_m ”.

$$\eta_{INV,TOTAL} = \eta_{INV,SPMTP} \eta_{INV,CONV} = \frac{E_{CA}(\text{entregue à rede})}{E_{CC}(\text{máxima disponível no arranjo fotovoltaico})} = \frac{\int_0^{t_m} P_{CA}(t) dt}{\int_0^{t_m} P_{CC,PMP}(t) dt} \quad (3.5)$$

onde

$\eta_{INV,TOTAL}$ é a eficiência de conversão total,

P_{CA} é a potência útil em corrente alternada entregue à rede,

$P_{CC,PMF}$ é a potência no ponto de máxima potência disponível no arranjo fotovoltaico,

t_m é o tempo de medição (utilizado para integração da potência e determinação da energia).

3.6.4 Eficiência média ponderada

Diante destes múltiplos fatores que afetam a eficiência do inversor, um bom método de comparar o desempenho de diferentes inversores seria utilizar um software apropriado de simulação dinâmica para determinar o seu comportamento energético geral integrando durante um ano em diversas condições de operação (carregamento, tensão e radiação solar). Este método é efetivo, mas não permite rápida avaliação comparativa, pois requer o conhecimento de modelos matemáticos avançados de desempenho energético com capacidade de avaliação dos efeitos de diversos parâmetros de operação como carregamento, tensão de entrada CC, local de instalação (radiação solar).

A partir da observação e registro de diversas condições de operação, laboratórios, institutos de pesquisa, órgãos certificadores e entidades normativas propõem a determinação da eficiência comparativa através de uma média dos diferentes valores de eficiência, nas respectivas condições de carregamento, ponderados conforme um perfil esperado de ocorrências de radiação solar, durante um ano de operação do inversor em determinada região.

Podem-se citar três destas eficiências comparativas regionais: eficiência californiana, eficiência européia e eficiência brasileira.

3.6.4.1 Eficiência média ponderada californiana

A norma EN 50530 apresenta uma Equação para determinação da eficiência. A Comissão Californiana de Energia (*California Energy Commission*) definiu uma eficiência ponderada denominada de eficiência californiana conforme a Equação 3.6 [Norma EN50530, 2010]

$$\eta_{CEC} = (0,04 \eta_{10\%} + 0,05 \eta_{20\%} + 0,12 \eta_{30\%} + 0,21 \eta_{50\%} + 0,53 \eta_{75\%} + 0,05 \eta_{100\%}) \quad (3.6)$$

3.6.4.2 Eficiência média ponderada européia

Na Europa definiu-se uma eficiência ponderada denominada de eficiência européia conforme a Equação 3.7 [Norma EN50530, 2010]

$$\eta_{EU} = (0,03 \eta_{5\%} + 0,06 \eta_{10\%} + 0,13 \eta_{20\%} + 0,1 \eta_{30\%} + 0,48 \eta_{50\%} + 0,2 \eta_{100\%}) \quad (3.7)$$

3.6.4.3 Eficiência média ponderada brasileira

No Brasil propõe-se uma eficiência ponderada denominada de eficiência brasileira conforme a Equação 3.8 [Pinto Neto, 2012]

$$\eta_{BR} = (0,02 \eta_{10\%} + 0,02 \eta_{20\%} + 0,04 \eta_{30\%} + 0,12 \eta_{50\%} + 0,32 \eta_{75\%} + 0,48 \eta_{100\%}) \quad (3.8)$$

3.6.5 Eficiência máxima

A eficiência máxima de conversão é determinada no momento em que a combinação de todos os fatores que influenciam estão agrupados de forma mais favorável resultando assim na situação onde se tem a maior eficiência do inversor. Apesar de ser um indicador de desempenho importante, não é recomendável utilizar este parâmetro como único indicador comparativo de desempenho, pois é muito improvável que as condições mais favoráveis sejam iguais a todos inversores comparados e ainda seja muito improvável que estas condições ocorram a todo o momento.

3.6.6 Modelos de eficiência do inversor

Para modelagem da eficiência do inversor em função do carregamento podem-se utilizar equações de ajuste apresentadas por Rampinelli, 2010.

A eficiência de conversão CC/CA do inversor “ $\eta_{INV,CONV}$ ” em função do carregamento “Ld” pode ser ajustada conforme Equação 3.9.

$$\eta_{INV,CONV}(Ld) = \frac{Ld}{Ld + M_0 + M_1 Ld + M_2 Ld^2} \quad (3.9)$$

onde

$\eta_{INV,CONV}$ é a eficiência de conversão CC/CA do inversor,

Ld é o carregamento do inversor,

M_0, M_1, M_2 são coeficientes de ajuste da equação, determinados experimentalmente.

A eficiência do seguimento do ponto de máxima potência em função do carregamento “ Ld ” pode ser ajustada conforme Equação 3.10.

$$\eta_{INV,SPMP}(Ld) = \frac{Ld}{Ld + (N_0 + N_1 Ld)} \quad (3.10)$$

onde

$\eta_{INV,SPMP}$ é a eficiência do seguimento do ponto de máxima potência,

Ld é o carregamento do inversor,

N_0, N_1 são coeficientes de ajuste da equação, determinados experimentalmente.

3.7 Fator de dimensionamento do inversor

A Equação 3.11 define o fator de dimensionamento do inversor “FDI” como a razão entre a potência nominal em corrente alternada na saída do inversor e a potência nominal ou potência de pico na saída do arranjo fotovoltaico [Rampinelli, 2010]. Por exemplo, um FDI igual a 0,80 indica que a capacidade nominal do inversor é 80% da potência de pico do arranjo fotovoltaico.

$$FDI = \frac{P_{INV,CA}}{P_{FV,CC,pico}} \quad (3.11)$$

onde

FDI é o fator de dimensionamento do inversor,

$P_{INV,CA}$ é a potência nominal em corrente alternada na saída do inversor,

$P_{FV,CC,pico}$ é a potência de pico em corrente contínua na saída do arranjo fotovoltaico,

4 GERENCIAMENTO TÉRMICO DE INVERSORES

O capítulo 4 trata sobre gerenciamento térmico de inversores. Apresentam-se problemas relacionados ao aquecimento de inversores e um conjunto de estratégias utilizadas para arrefecimento e proteção térmica de inversores.

4.1 Aquecimento de inversores de sistemas fotovoltaicos

Equipamentos de eletrônica de potência como inversores fotovoltaicos tendem a aquecer quando em operação. Este aquecimento é indesejável, porém inerente ao seu funcionamento.

Este aquecimento causa aumento da temperatura que por sua vez está ligada diretamente à redução de confiabilidade de operação e redução de vida útil destes inversores. O aumento de temperatura acelera mecanismos de falha por degradação química dos componentes. Ciclos térmicos e variações de temperatura causam fadiga mecânica de soldas e componentes devido aos esforços gerados por dilatação térmica de diferentes materiais acoplados.

O inversor é um conversor de alta eficiência (usualmente eficiência acima de 90%). Por exemplo, para um inversor de potência nominal de 10 kW com eficiência de conversão de 95% considera-se que a perda elétrica de 5% (cerca de 500 W) corresponde à potência responsável pelo aquecimento do inversor.

Quanto ao gerenciamento térmico do inversor pode-se pensar na otimização de projeto do inversor com ênfase no aumento de eficiência para diminuição da geração de calor interna, assim como na facilidade de dissipação térmica para aumento de confiabilidade, combinando estas características com a viabilidade econômica do produto final.

Para aumento de eficiência e confiabilidade podem-se considerar as condições de projeto do inversor utilizando para isto rotinas eletrônicas avançadas para controle, materiais com características e propriedades eletromecânicas que gerem menos calor (materiais com maior condutividade elétrica, menor quantidade de junções e emendas, soldas com excelente contato e em número reduzido, etc), configuração mecânica e materiais que favoreçam a dissipação térmica, dissipadores ativos com ventiladores, facilidade de manutenção e limpeza, etc.

4.2 Problemas relacionados ao aquecimento de inversores

A vida útil e a confiabilidade de equipamentos eletrônicos são fortemente dependentes da temperatura de operação, a qual está relacionada às cargas e às condições ambientes.

Considerando os mecanismos de degradação ativados por temperatura pode-se determinar a distribuição tempo de falha a partir do conhecimento da energia de ativação. A energia de ativação pode ser determinada experimentalmente através de uma série de experimentos e testes de aceleração de envelhecimento por aumento de temperatura em diversas temperaturas. O modelo de exposição cumulativa considera que um incremento de degradação ocorre durante cada incremento de tempo e depende da temperatura durante este incremento de tempo.

O aumento de temperatura reduz a vida útil de componentes eletrônicos, pois favorece o fenômeno de degradação, aumentando a probabilidade de ocorrência de mecanismos de falhas.

A temperatura acelera mecanismos de falhas como: reações químicas, efeitos de difusão, ruptura de isolantes elétricos, movimentação de íons, eletromigração, deformação permanente de materiais, fadiga térmica, empenamento de placas, redução do desempenho.

Quando a temperatura excede um limite funcional, equipamentos eletrônicos não funcionam de maneira normal. A extração de calor de equipamentos eletrônicos de potência é de extrema importância. O monitoramento constante da temperatura destes componentes é prioritário evitando superaquecimento, garantindo operação com maior estabilidade e atendimento a expectativa quanto à vida útil do equipamento.

Pode-se associar o aquecimento excessivo com alguns problemas usuais relacionados a equipamentos eletrônicos: maior probabilidade de falhas, menor estabilidade de operação, menor confiabilidade de operação, menor vida útil, perdas excessivas, menor eficiência global (devido as paradas parciais de operação), parada parcial por proteção, parada total por falha drástica (fusão de componentes), fadiga térmica (microfissuras decorrentes de dilatações e contrações térmicas relacionadas aos ciclos de aquecimento e resfriamento),

4.3 Estratégias de gerenciamento térmico para proteção de inversores

Tendo em vista o aumento da probabilidade de falhas de equipamentos eletrônicos de potência com aumento da temperatura de operação, inversores de boa qualidade possuem rotinas automáticas internas com estratégias de gerenciamento térmico para proteção evitando

ultrapassar a temperatura segura de operação. Espera-se que com adoção destes métodos de proteção sejam obtidos benefícios como aumento da confiabilidade e aumento da vida útil de inversores.

Podem-se classificar estas estratégias de gerenciamento térmico para proteção de inversores em dois grupos:

- Estratégias internas, que estão relacionadas a características intrínsecas do inversor, como componentes, dispositivos internos e algoritmos de controle do inversor
- Estratégias externas, que estão relacionadas às condições técnicas de instalação de inversores

4.3.1 Estratégias internas de gerenciamento térmico

Muitas são as estratégias internas de arrefecimento que usualmente estão disponíveis para proteção térmica de inversores. Esta seção mostra as mais conhecidas, que podem ser classificadas conforme complexidade de operação.

4.3.1.1 Dissipador térmico passivo (sem ventilação forçada)

Os elementos chaveadores de potência são os componentes principais responsáveis pelo aquecimento. Nestes elementos aquecedores usualmente são acoplados dissipadores de calor passivos. Elementos passivos para dissipação de calor contam de blocos metálicos (normalmente de alumínio ou cobre) acoplados na interface entre os elementos aquecedores e o ar ambiente. Na construção dos invólucros dos inversores estes blocos metálicos dissipadores são instalados com uma face lisa para dentro do invólucro onde vão “colados” os elementos aquecedores, e outra face externa (lisa ou aletada) exposta ao ambiente para arrefecimento. Na maioria das aplicações estes blocos metálicos dissipadores possuem aletas na face externa exposta ao ambiente para aumento do potencial de transferência de calor por convecção natural e radiação.

Estes elementos dissipadores térmicos perdem calor por convecção natural e radiação e são chamados de passivos por não possuírem ventilador forçando o ar.

Quanto ao projeto destes dissipadores de calor sabe-se que quanto maior for o tamanho destes dissipadores de calor maior será a capacidade de dissipação térmica para o ambiente, porém requer um compromisso entre dimensões do dissipador, do peso e do custo garantindo a viabilidade econômica do produto.

Inversores de menor porte utilizam esta solução para arrefecimento. Dissipador passivo é a configuração mais simples, não tem partes móveis, porém possuem limitações quanto as dimensões e possibilidade de utilização em inversores de alta potência.

4.3.1.2 Dissipador térmico ativo (com ventilação forçada)

Dissipadores de calor ativos têm características semelhantes aos dissipadores passivos, porém possuem obrigatoriamente aletas e ventilador forçando o ar passar pelas aletas externas aumentando a troca de calor por convecção. Muitas vezes esta configuração de dissipador ativo, apesar do ventilador, pode apresentar custo similar ou menor em relação aos dissipadores passivos, pois permite para a mesma capacidade de dissipação térmica a utilização de dissipador com dimensões menores e menor peso.

A utilização de ventilador forçando ar resulta em uma indesejável perda de energia elétrica devido ao consumo próprio. Podem-se citar três modos quanto ao tipo de operação e acionamento do motor do ventilador:

- liga o ventilador, com rotação fixa em 100%, sempre que o inversor é ligado
- liga o ventilador, com rotação fixa em 100%, através de um termostato iniciando sua operação somente acima de uma temperatura limite segura,
- liga o ventilador com rotação variável de 0 a 100% através de um controlador proporcional iniciando sua operação acima de uma temperatura limite segura aumentando gradativamente conforme necessidade de dissipação.

A utilização destes dissipadores de calor ativos permite a fabricação de inversores com dimensões menores. Por terem partes móveis necessitam maior custo de manutenção com limpeza de aletas e substituição periódica de ventiladores. A configuração de dissipador ativo mais desejável é a com ventilador com rotação variável com acionamento proporcional de 0 a 100%, pois tende a reduzir o consumo próprio de energia.

4.3.1.3 Termostato limite liga/desliga (TLD)

Esta estratégia de gerenciamento térmico para proteção apresenta a configuração mais simples. Sempre que a temperatura interna crítica do inversor ultrapassar um limite seguro este inversor pode apresentar um alarme ou desligar automaticamente.

4.3.1.3.1 Termostato limite – alarme e bloqueio manual

Sempre que a temperatura interna crítica do inversor ultrapassar um limite seguro este inversor pode apresentar um alarme sonoro e/ou luminoso chamando a atenção do operador ou usuário para que o sistema seja desligado manualmente, aguardar o arrefecimento e ligar novamente mais tarde.

4.3.1.3.2 Termostato limite – desligamento automático

Sempre que a temperatura interna crítica do inversor ultrapassar um limite seguro este inversor é automaticamente desligado, voltando a ligar automaticamente mais tarde quando o inversor voltar a uma faixa de temperatura segura.

4.3.1.4 Rotina de redução parcial de potência para evitar superaquecimento (RPT)

Pode-se ainda citar uma destas estratégias de uso corrente em inversores comerciais de qualidade superior: redução de potência para evitar superaquecimento. A vantagem desta estratégia está na possibilidade de manter o inversor funcionando em carga parcial, sem desligar o equipamento.

Inversores fotovoltaicos são projetados para abastecer a potência máxima disponível a partir de módulos fotovoltaicos quando eles operam dentro de suas especificações de temperatura. Em diversos inversores, quando a temperatura interna do inversor excede o seu máximo nominal, o inversor começa a reduzir a sua potência de saída. Este recurso de proteção é chamado de "rotina de redução parcial de potência para evitar superaquecimento", em inglês "*temperature derating*" ou "*thermal derating*".

Esta é a estratégia interna do inversor mais avançada para proteção térmica do inversor. A redução de capacidade por temperatura protege componentes semicondutores sensíveis ao superaquecimento. Quando o componente monitorado atinge a temperatura máxima de operação o inversor aciona uma rotina de controle interna deslocando a operação do inversor para um ponto de menor potência. Durante este processo a potência é reduzida passo-a-passo. Em caso extremo o inversor pode ser desligado totalmente. Tão logo o inversor atinja valores de temperatura abaixo do valor crítico, o inversor retorna ao ponto de operação ótimo.

Como citado anteriormente, inversores de boa qualidade possuem uma rotina de controle interna responsável pelo seguimento do ponto de operação na máxima potência. Este algoritmo de controle permite a varredura dos pontos de tensão e corrente utilizando como variável de controle a medida da potência de operação do inversor.

Em condições normais de temperatura interna do inversor este algoritmo de varredura de corrente e tensão busca constantemente o ponto de operação em máxima potência, porém caso o inversor atinja uma temperatura interna acima de um valor crítico, este mesmo algoritmo de controle interno aciona uma rotina de proteção podendo agora percorrer os pontos de corrente e tensão utilizando também como variável de controle a temperatura interna do inversor.

Usualmente esta rotina de proteção do algoritmo de controle desloca o ponto de operação do inversor para região de operação afastada do ponto de máxima potência com tensões maiores que a tensão do ponto de máxima potência.

Este algoritmo de controle interno de redução da potência parte do princípio de que, com a redução da potência elétrica absorvida pelo inversor, ocorra também uma diminuição da potência térmica dissipada resultando assim em uma diminuição da temperatura interna do inversor.

Este recurso de proteção permite o gerenciamento de temperatura de componentes críticos do inversor, enquanto ao mesmo tempo continua a gerar energia. É um importante recurso para aumento de confiabilidade, pois garante que a temperatura de componentes críticos nunca excedam limites de segurança de modo que a vida útil esperada para os inversores possa ser alcançada.

É um recurso de proteção que apesar de não causar efeitos negativos ao inversor, causa uma redução da energia total anual convertida pelo inversor. Como o inversor continua a gerar energia devido a esta habilidade de gerenciar sua temperatura interna, espera-se atingir um rendimento geral mais elevado se comparado com inversores sem este recurso (como inversores protegidos apenas por termostato limite).

Em alguns inversores como o caso do inversor da linha Sunny Boy fabricado pela SMA, quando iniciado o processo de redução de capacidade este é indicado no painel de *leds* do inversor. Caso este processo de redução permaneça por mais de alguns minutos a mensagem de falha “*derating*” é indicada no display do inversor, desaparecendo no momento que o inversor normalizar sua operação.

O efeito resultante da operação da rotina de redução parcial de potência para evitar superaquecimento através do afastamento do ponto de máxima potência pode ser visto na

Figura 4.1. Esta curva apresenta o resultado de um ensaio realizado com um inversor comercial em operação real durante um dia, mostrando medidas da potência P_{CC} e a tensão V_{CC} ao longo do dia.

A curva magenta representa a potência P_{CC} (teórica PMP) e a curva azul representa a tensão V_{CC} (teórica PMP), ambas previstas em tempo real, por modelo simulando qual seria o desempenho do inversor em condições ótimas, considerando funcionamento no ponto de máxima potência, sem considerar limitações reais de operação.

A curva amarela representa a potência P_{CC} (real medida) e a curva verde representa a tensão V_{CC} (real medida). Estas curvas representam as medidas em condições reais de operação, incorporando efeitos de limitações do inversor.

Na curva amarela pode-se observar uma faixa de operação onde ocorre uma redução da potência P_{CC} (medida) em relação à potência P_{CC} (teórica PMP). Esta faixa inicia com uma limitação da potência para evitar sobrecarga (P_{CC} acima da potência nominal do inversor ~1900 W), e segue com uma limitação por temperatura reduzindo potência P_{CC} , para evitar superaquecimento. É possível observar também que esta faixa de operação onde ocorreu a redução de potência coincide com o aumento da tensão V_{CC} (medida), representado pela curva verde, indicando operação afastada do ponto de máxima potência nesta faixa.

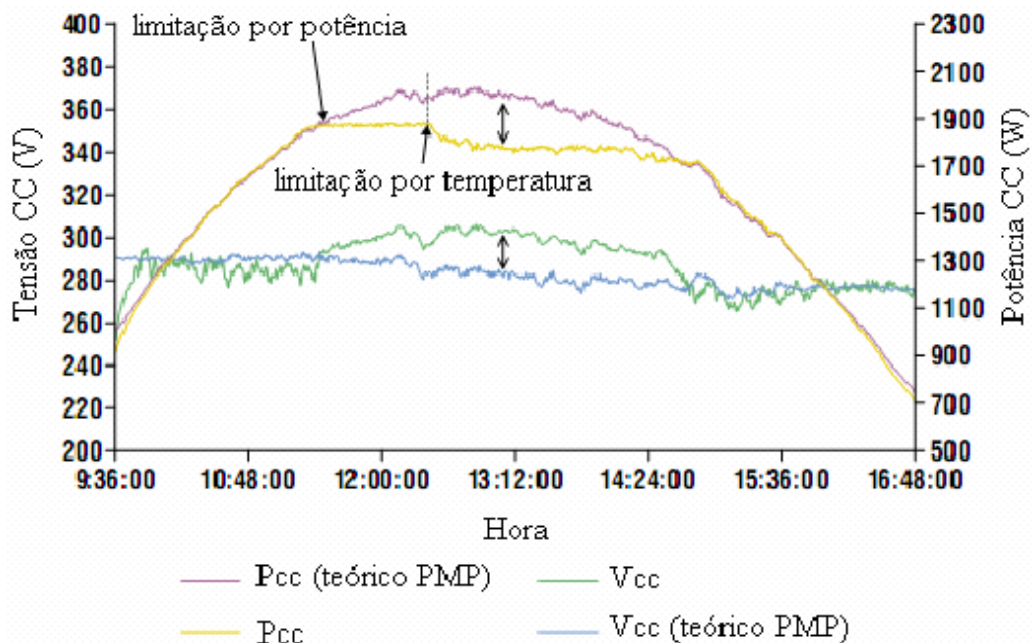


Figura 4.1 - Curvas de dados medidos de um inversor durante um dia – evolução da “Potência CC” e da “Tensão CC”. [adaptado de Rampinelli, 2010]

Esta estratégia tem modo de funcionamento semelhante à rotina de rastreamento dos pontos “ $I-V$ ” em busca de operação no ponto de máxima potência, porém agora a variável de controle é a temperatura interna do inversor. Caso o inversor esteja operando no ponto de máxima potência e apresente temperatura interna acima de um valor crítico, a rotina de rastreamento dos pontos “ $I-V$ ”, diminui a corrente, aumenta a tensão, deslocando-se para um ponto de operação com potência menor que a máxima potência. Este deslocamento para redução de potência P_{CC} ocorre de forma incremental, assim como a potência de aquecimento que vai diminuindo até que a temperatura de operação do inversor seja inferior a uma temperatura segura de operação, conforme apresentado na Figura 4.2.

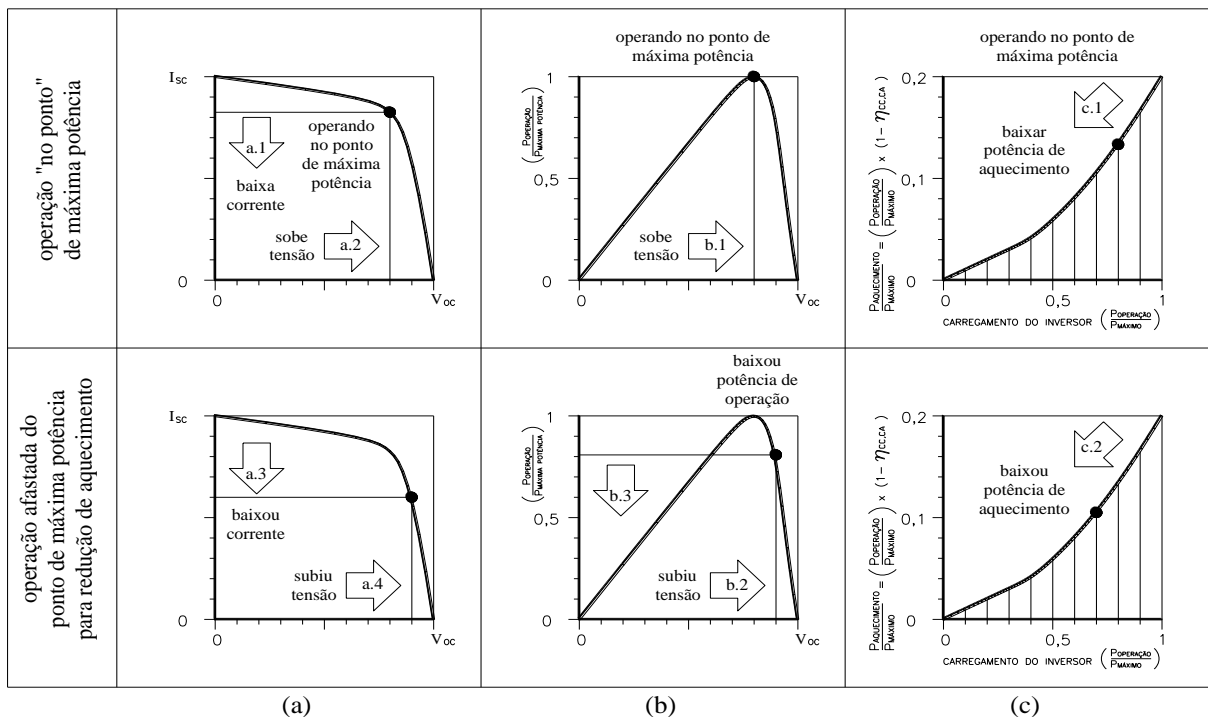


Figura 4.2. Rotina de estratégia de arrefecimento do inversor pelo método da redução de potência para evitar superaquecimento (etapas simplificadas).

4.3.2 Efeito das estratégias de arrefecimento sobre potência de saída do inversor

Na Figura 4.3 apresentam-se gráficos ilustrando o efeito esperado, simultaneamente, sobre a potência nominal de saída do inversor e sobre a temperatura interna do inversor, em decorrência do acionamento de diferentes estratégias internas de proteção térmica e arrefecimento.

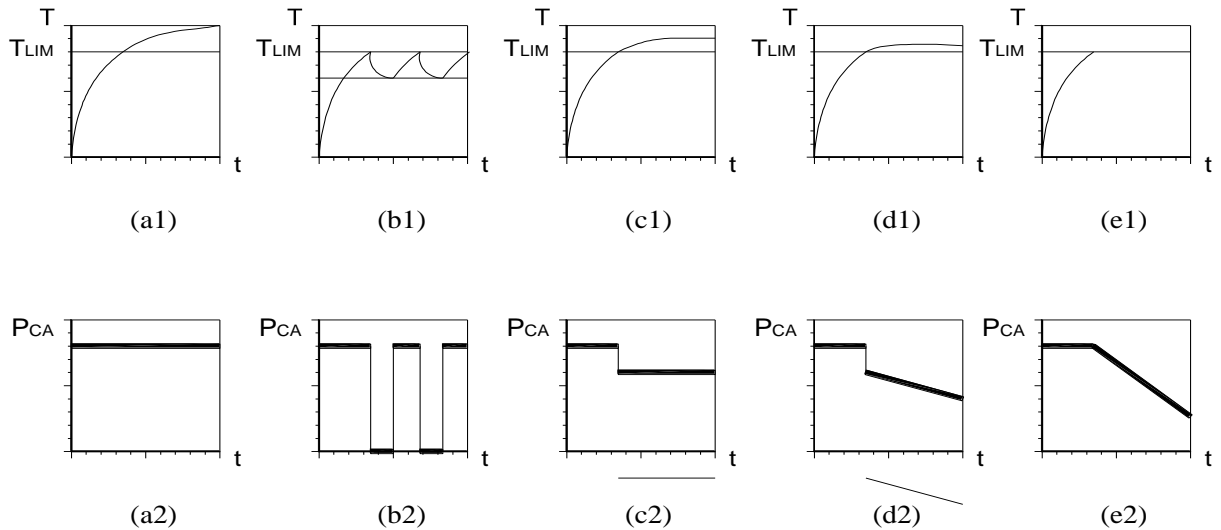


Figura 4.3 - Gráficos “potência CA x tempo” e “temperatura x tempo” para diferentes estratégias de arrefecimento.

Os gráficos (a1, a2) representam um inversor hipotético operando sem estratégias de proteção térmica e arrefecimento. Neste caso pode-se observar que a potência CA nominal de saída do inversor não é afetada porém a temperatura por estar em evolução livre pode ultrapassar a temperatura limite para operação segura do inversor, aumentando assim o risco de falha. Os demais pares de gráficos (b, c, d, e) ilustram uma tendência de perda de potência associada ao acionamento de estratégias de arrefecimento e proteção térmica.

Os gráficos (b1, b2) representam um inversor operando com estratégias de proteção térmica e arrefecimento tipo termostato-limite liga-desliga (TLD), onde se pode observar que a potência nominal de saída neste caso é afetada de forma intermitente, pois para evitar que a temperatura ultrapasse um valor limite seguro, o inversor desliga, voltando a ligar quando a temperatura atinge um valor limite inferior.

Os gráficos (c1, c2) representam um inversor operando com estratégias de proteção térmica e arrefecimento tipo ventilador atuado por termostato *on-off*, onde se pode observar que a potência nominal de saída neste caso é afetada de forma contínua devido ao consumo elétrico do ventilador, pois para evitar que a temperatura ultrapasse um valor limite seguro, um ventilador com rotação constante é ligado reduzindo a temperatura interna do inversor.

Os gráficos (d1, d2) representam um inversor operando com estratégias de proteção térmica e arrefecimento tipo ventilador atuado por controlador de temperatura com saída variável, onde se pode observar que a potência nominal de saída neste caso é afetada devido ao consumo elétrico do ventilador, pois para evitar que a temperatura ultrapasse um valor

limite seguro, um ventilador com rotação variável é ligado reduzindo a temperatura interna do inversor. Nesta configuração com ventilador variável espera-se um melhor controle de temperatura se comparado ao ventilador de rotação constante

Os gráficos (e1, e2) representam um inversor operando com estratégias de proteção térmica e arrefecimento tipo redução parcial de potência para evitar superaquecimento, onde se pode observar que a potência nominal de saída neste caso é reduzida, diminuindo simultaneamente a potência de aquecimento interna, mantendo assim a temperatura interna do inversor em valor aceitável.

4.3.3 Estratégias externas de gerenciamento térmico

Estratégias externas estão relacionadas às condições técnicas e planejamentos da instalação de inversores para obtenção de condições mais favoráveis, considerando tipo do local, acesso para manutenção, umidade, poeira, sombreamento, ventilação/climatização, entre outras.

4.3.3.1 Instalação em local com características favoráveis a boa dissipação térmica

Fabricantes de inversores apresentam algumas condições recomendáveis preferenciais a serem adotadas no momento do planejamento das instalações, podendo-se citar algumas como:

- Instalação em local arejado e ventilado;
- Instalação em local sombreado sem incidência direta de sol sobre inversor;
- Instalação em distancias adequadas entre inversores evitando curto circuito de ar;
- Instalação em ambiente limpo sem particulados excessivos como poeira, areia;
- Instalação em ambiente seco protegido da umidade excessiva, da chuva, da neve;
- Instalação em local de fácil acesso para inspeção e manutenção.

Na Figura 4.4 são apresentadas algumas configurações para agrupamento de inversores de forma a minimizar o efeito de um inversor no outro instalado próximo.

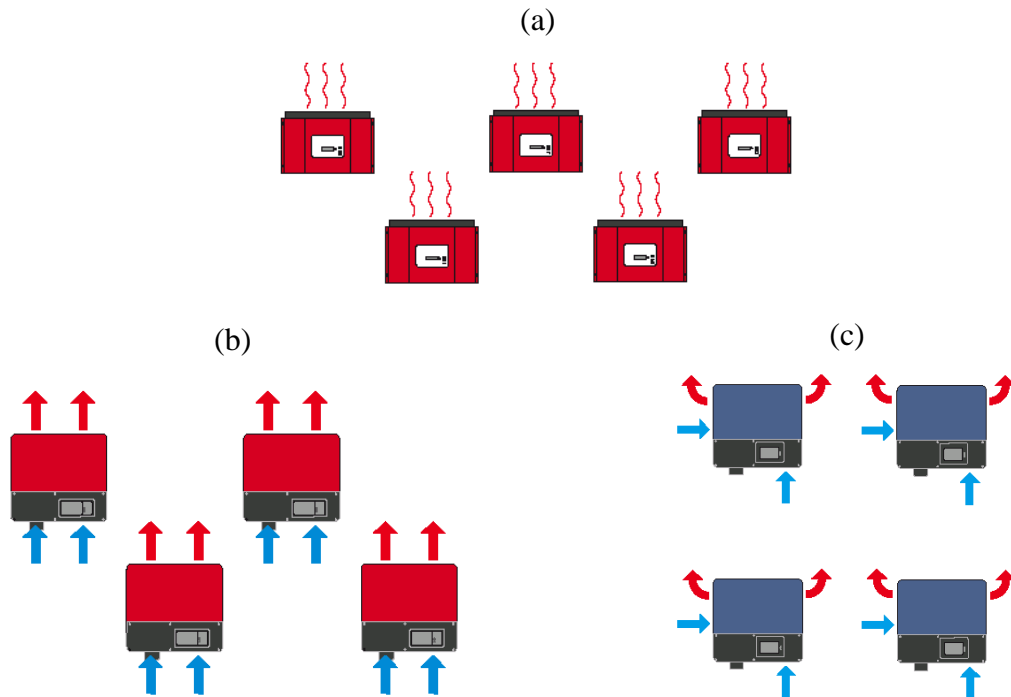


Figura 4.4 - Exemplos de agrupamentos de inversores recomendáveis conforme o tipo de arrefecimento interno com convecção (a) natural, (b) forçada com fluxo vertical, (c) forçada com fluxo misto.

4.3.3.2 Arrefecimento da casa de máquinas

Outra forma de garantir a operação de inversores em faixas de temperatura seguras (abaixo de uma temperatura interna limite) seria a utilização de resfriadores de ar controlando a temperatura da sala ambiente onde o inversor está instalado.

A temperatura de conforto de pessoas fica entre 22 °C e 26 °C. Em instalações onde não se têm pessoas trabalhando próximo aos inversores pode-se ajustar a temperatura de climatização da sala na faixa de 35 °C e 40 °C. Esta prática visa reduzir o consumo anual de energia do sistema de climatização.

4.3.3.3 Instalação de inversores em eletrocentros

Inversores de grande porte usualmente são instalados em casas de máquina “eletrocentros”. Estes eletrocentros usualmente combinam duas estratégias externas citadas acima, pois são ambientes secos, limpos, protegidos do sol e com espaço adequado para instalação de inversores, e ainda possuem sistema de climatização para controle da

temperatura ambiente. Recomenda-se que estes sistemas de climatização tenham dispositivos economizadores de energia com atuação automática, promovendo nos dias mais frios a filtragem e ventilação de ar ambiente, sem ligar o compressor do circuito de refrigeração. O sistema de climatização pode ainda conter coifas e dutos para captação do ar quente na saída dos inversores conduzindo diretamente até o climatizador, reduzindo assim o efeito do aquecimento de um inversor no próprio inversor e nos outros inversores próximos.

Esta configuração de instalação em eletrocentros é bastante favorável à operação e à confiabilidade de inversores, porém requer um consumo elétrico próprio para sistema de climatização.

Por exemplo, para uma usina fotovoltaica de 500 kWp com eficiência média de conversão de 92%, tem-se uma carga térmica de aquecimento de aproximadamente 40 kW (dissipação térmica de calor sensível no interior do eletrocentro). Somando ainda outras parcelas da carga térmica como aquecimento pelas paredes e teto pode-se estimar um sistema de climatização com potência frigorífica de aproximadamente 50 kW, com um consumo elétrico de aproximadamente 15 kW. Simulações e avaliações iniciais permitem estimar, para esta configuração, um consumo elétrico próprio para sistema de climatização com economizador de aproximadamente 3% da potência elétrica nominal dos inversores, considerando temperatura interna de controle de 35 °C.

4.3.4 Outras considerações sobre gerenciamento térmico

4.3.4.1 Fatores que ativam a rotina de redução de potência para evitar superaquecimento

Para ativar este recurso de proteção e definir a quantidade de redução parcial adequada, o inversor utiliza as seguintes entradas, a qualquer momento: a temperatura de componentes críticos internos do módulo de potência do inversor, a potência de saída, e a temperatura ambiente.

A rotina de redução parcial de potência para evitar superaquecimento definitivamente depende da temperatura ambiente (quanto maior a temperatura ambiente, maior será a dificuldade para o sistema de arrefecimento do conversor para dissipar o calor produzido durante o processo de conversão).

Na Figura 4.5 apresenta-se um gráfico de desempenho de um inversor, ilustrando a dependência e o efeito das condições de operação, temperatura ambiente e tensão CC, na

potência de saída. Mostra o comportamento do mecanismo de proteção, denominado pelo fabricante como *temperature derating*, o qual protege o inversor contra danos devido a excessos da temperatura ambiente e de altas correntes de saída. Neste exemplo da Figura 4.5 pode-se observar que até a temperatura ambiente de aproximadamente 35 °C não ocorre redução de potência por aquecimento, isto é, o inversor pode funcionar normalmente até 100% da sua capacidade. Acima de 35 °C inicia-se a operação da rotina de controle de temperatura através da redução potência. Quando a temperatura ambiente está a 60 °C a potência máxima de operação seria de aproximadamente 75% da potência nominal, isto é, espera-se uma redução de 25% a 60 °C. Este comportamento indica uma taxa de redução da potência de 25% da potência com aumento de 25 °C, cerca de 1% a cada acréscimo de 1 °C (-1 % / °C).

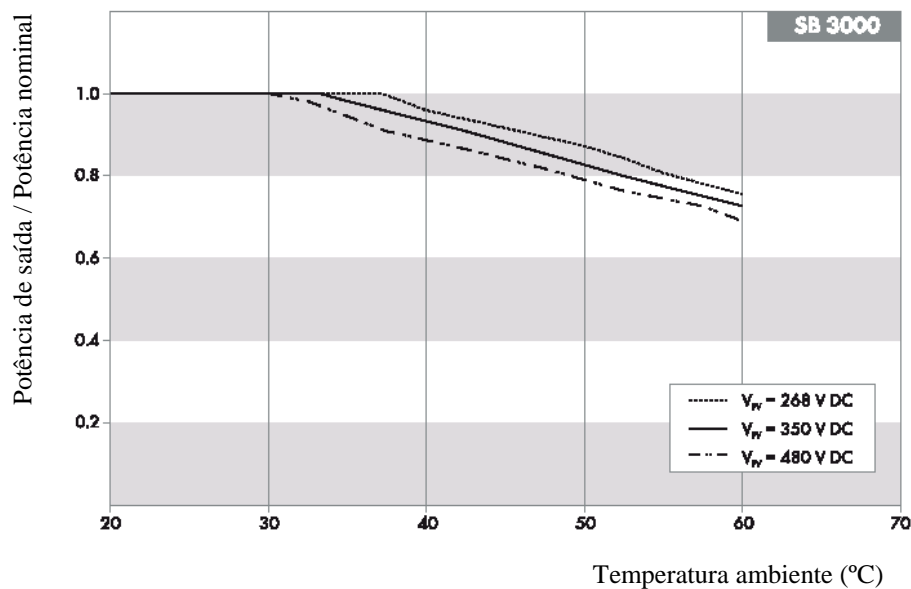


Figura 4.5 - Curva típica da redução de potência na saída de inversores, ilustrando efeito da temperatura ambiente (*temperature derating*) e da tensão CC, sobre a potência de saída.

[adaptado do catálogo do inversor modelo SB 3000 do fabricante SMA]

No entanto, a relação entre a temperatura ambiente e esta rotina pode ainda considerar outros parâmetros de operação como temperatura do módulo, tensão de entrada CC, a eficiência da conversão, sincronismo entre inversor e módulos fotovoltaicos, ou quando as condições de instalação interferem na dissipação térmica dos inversores, entre outros fatores.

Na Tabela 4.1 são apresentados alguns fatores que contribuem para aquecimento excessivo de inversores e sugestões para minimizar estes efeitos.

Tabela 4.1. Exemplos de fatores que contribuem para aquecimento de inversores.

Fatores que podem causar redução de potência por superaquecimento	Recomendações que podem evitar redução de potência por superaquecimento
Temperatura ambiente elevada	Instalar em local limpo e ventilado. Se necessário utilizar climatização.
Inversor instalado em local confinado sem ventilação	
Dificuldade de dissipação térmica por acúmulo de poeira	Limpar partes sujas. Instalar inversor em local limpo com ventilação através de filtros de ar. Se necessário utilizar climatização.
Umidade excessiva (facilidade de acúmulo de sujeira e criação de biofilme nos dissipadores de calor).	
Aquecimento por incidência direta do sol sobre inversores	Instalar inversor em local com sombra
Dimensionamento errado entre módulos fotovoltaicos e inversor	Ajustar dimensionamento de componentes. Utilizar software de dimensionamento dinâmico.
Falha do ventilador de arrefecimento	Manutenção preventiva programada
Instalação inadequada de múltiplos inversores muito próximos entre si, com descarga de ar quente de um inversor próximo ao ponto de captação de ar do outro inversor	Relocar inversores em distância adequada e/ou instalar em local ventilado. Se necessário utilizar climatização. Figura 4.5 apresenta alguns tipos de montagens de inversores.
Altitude elevada (dificuldade de dissipação térmica por ar rarefeito)	Instalar com layout favorável a dissipação térmica. Se necessário utilizar climatização.

4.3.4.2 Aperfeiçoamento de estratégias para gerenciamento térmico

O gerenciamento térmico de equipamentos eletrônicos de potência é um importante tema, sempre em evidência entre os fabricantes de inversores, pois um eficiente sistema de arrefecimento está diretamente ligado à alta eficiência e alta durabilidade de inversores.

Sistemas de geração de energia elétrica com módulos fotovoltaicos e inversores conectados à rede tem alto custo. Este alto custo justifica a busca permanente pelo aumento de eficiência e durabilidade. Aqueles fabricantes que se preocuparam em gerenciamento térmico de seus inversores vêm atingindo altos valores de eficiência e durabilidade. O esforço continuado de fabricantes de inversores no desenvolvimento de estratégias para gerenciamento térmico é uma importante ação para obtenção de inversores com maior desempenho e confiabilidade.

Em 22 de maio de 2013 o fabricante Fronius promoveu na Europa um evento com 60 fornecedores de componentes para eletrônica de potência. O tema central do encontro foi gerenciamento térmico. O evento foi conduzido pelo departamento de pesquisa e desenvolvimento da Fronius, tratando de diversos assuntos relacionados ao tema central como: “A otimização e projeto de interfaces térmicas com materiais condutores de calor”, “Componentes eletrônicos devem ter baixos níveis de dissipação térmica”, “Resfriamento eficiente”, “Preservação de recursos” [Fronius, 2013].

O fabricante Steca apresenta sua linha de inversores de baixa potência (1,8 kW a 4,2 kW) e alta eficiência (~98,6%) com a topologia, de nome comercial “*coolcept*”, a qual relaciona o resfriamento efetivo com alta eficiência, alta confiabilidade e longa vida útil ao inversor (www.steca.com).

O fabricante líder de mercado SMA [Mallwitz, 2010] relata que atingiu em 2008 a eficiência de ~99% para protótipos de inversores como resultado do desenvolvimento de nova topologia eletrônica assim como ao esforço continuado na melhoria do sistema de resfriamento de componentes (conceito de nome comercial “*opticool*”). No histórico de desenvolvimento dos inversores (1^a, 2^a, 3^a gerações) pode-se observar a contínua melhoria no sistema de arrefecimento dos inversores. Futuras melhorias no desenvolvimento de inversores estão relacionadas a integração de novos avanços em componentes eletrônicos e magnéticos e seus materiais, com a melhoria das topologias e métodos de controle, assim com ao projeto do gabinete/dissipador térmico com suporte de simulação térmica e a utilização de novos materiais de construção.

4.3.4.3 Considerações de projeto relacionadas à redução de potência por superaquecimento

O projeto correto de um sistema fotovoltaico não deve desprezar completamente a redução de energia anual relacionada à redução de potência devido a superaquecimento. Sistemas fotovoltaicos são otimizados em relação ao rendimento energético total. A energia disponível na saída do inversor é calculada a partir da energia fornecida pelo gerador fotovoltaico e a eficiência do conversor. Assim, é fundamental que o produto desses dois fatores seja tão grande quanto possível.

A Figura 4.6 apresenta o exemplo de Freiburg em Breisgau para mostrar quanta energia está disponível ao longo de um ano em diferentes áreas da faixa de potência do gerador fotovoltaico. O cálculo da frequência com que cada nível de potência ocorre já está incluído no gráfico de barras. A baixa potência de saída das faixas de cargas parciais menores

contribuem significativamente para a energia total do sistema porque ocorrem com muita frequência.

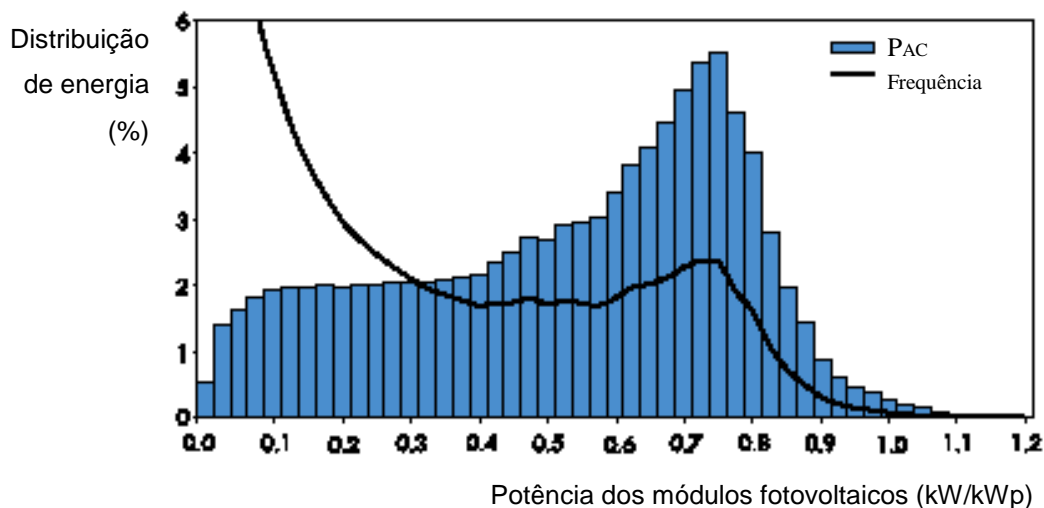


Figura 4.6 - O abastecimento de energia relacionado com a faixa de potência do gerador fotovoltaico (exemplo Freiburg em Breisgau, Alemanha) [adaptado de SMA, 2012]

A eficiência com que o inversor converte a potência fornecida pelo gerador fotovoltaico depende da sua curva de eficiência. Para um sistema fotovoltaico com ótima orientação em direção ao Sol (na Alemanha uma orientação sul e um módulo fotovoltaico com ângulo de inclinação entre 30° e 45°) é aplicável o seguinte: O rendimento é maior quando a potência nominal do inversor selecionado é de 90% a 100% da potência do gerador, fator de dimensionamento do inversor FDI entre 0,9 e 1,0 (SMA, 2012). Com esta relação de potência, picos de potência do gerador fotovoltaico acima da potência nominal podem iniciar o processo de redução de potência por superaquecimento. Por outro lado, a eficiência do conversor é mais elevada em carga parcial durante os frequentes períodos de baixa potência. Isso significa que com este ajuste a planta fotovoltaica aproveita a energia da melhor maneira a maior parte da faixa, com exceção de pequenas perdas de rendimento que raramente ocorrem por redução de potência por aquecimento, que pode ser visto nas extremidades do gráfico da Figura 4.7.

Um inversor com uma potência nominal superior a 100% da potência do gerador pode ser escolhido para evitar esta redução de potência por aquecimento durante a potência de pico do gerador fotovoltaico. No entanto, neste caso, uma parte maior da carga em rendimentos parciais ficaria em uma faixa em que o inversor tem uma eficiência relativamente baixa. As

perdas na faixa de carga parcial seriam maiores do que o ganho em períodos quando operando na potência de pico, conforme Figura 4.8.

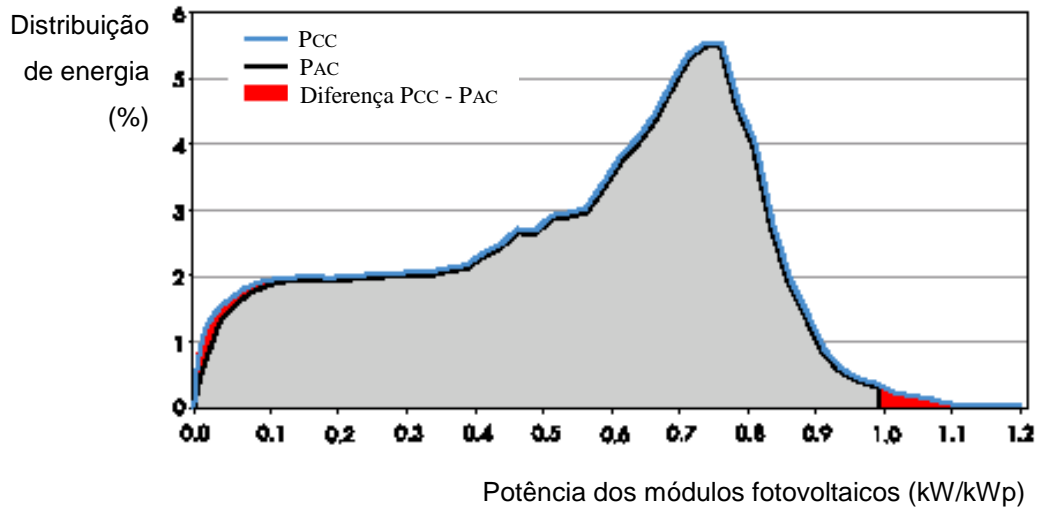


Figura 4.7 - Eficiência de conversão CC/CA de um inversor, quando potência nominal do inversor é 90% a 100% da potência nominal do arranjo fotovoltaico. [adaptado de SMA, 2012]

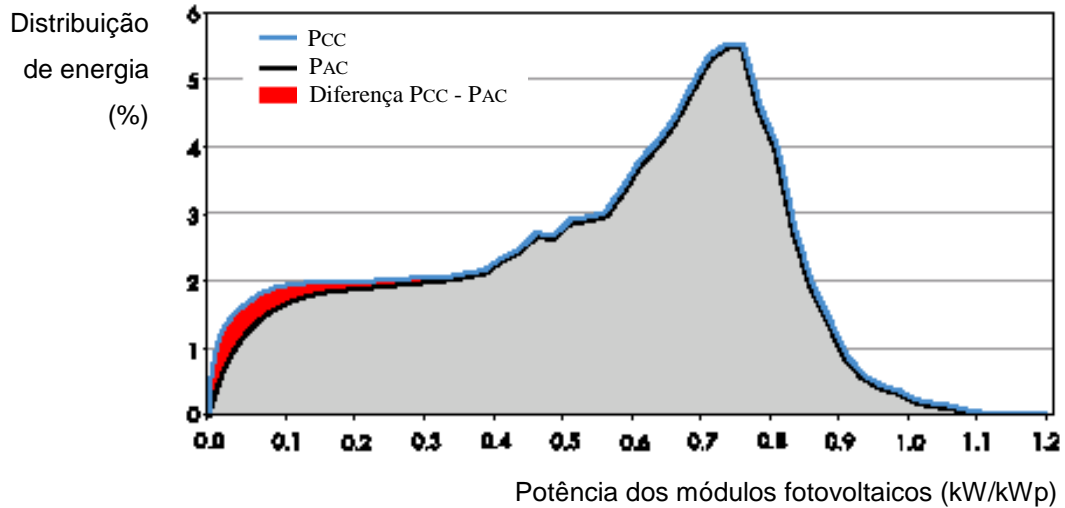


Figura 4.8 - Eficiência de conversão CC/CA de um inversor, quando potência nominal do inversor maior que 100% da potência nominal do arranjo fotovoltaico. [adaptado de SMA, 2012]

Com bom dimensionamento de inversores e geradores fotovoltaicos a redução de potência por superaquecimento raramente ocorre. A ocorrência frequente da redução de potência por superaquecimento (*derating*) mostra que a potência do inversor selecionado é muito baixa em comparação com a potência do gerador fotovoltaico.

5 MODELAGEM DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE INVERSORES

O inversor possui vários elementos internos geradores de calor como semicondutores chaveadores do módulo de potência, transformador isolador, capacitores, indutores, relés, cabos, 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.

Usualmente a temperatura do meio, isto é, a temperatura ambiente da sala de inversores também é variável, pois quando em evolução térmica livre esta é afetada pela temperatura ambiente externa e pela radiação solar incidente nas paredes da referida casa de inversores, assim como pela dissipação térmica dos inversores.

Para determinar a evolução da temperatura dos diversos componentes do inversor seria necessária a modelagem deste conjunto de elementos como componentes internos do inversor, invólucro do inversor, casa de máquina de inversores, e condição climática externa acoplada termicamente em regime transiente. Tal modelagem seria muito complexa e de difícil solução podendo inviabilizar a determinação de um modelo matemático simples para fácil inclusão desta rotina em software de simulação e dimensionamento.

Sendo assim, para avaliação da variação de temperatura dos inversores durante os ciclos diários de aquecimento e arrefecimento propõe-se o desenvolvimento de um modelo matemático simplificado baseado nos fundamentos da transferência de calor em regime transiente pelo método da capacidade térmica concentrada.

Apesar de existirem outros métodos na literatura, adotou-se este método por ser simples e de fácil aplicação. Possui soluções analíticas exatas para diferentes configurações, sendo assim, conveniente para resolver problemas de condução transiente.

5.1.1 Transferência de calor em regime transiente em sistemas de capacidade concentrada

A análise de transferência de calor em regime transiente de sistemas de capacidade concentrada 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;
- Condução de calor unidimensional;
- As propriedades térmicas dos materiais, componentes e fluidos são consideradas constantes;

Tais sistemas são obviamente idealizados, pois um gradiente de temperatura deve existir em um material se existir condução de calor no interior deste material. Em geral quanto menor o tamanho físico deste corpo, mais realista a hipótese de temperatura uniforme.

A Figura 5.1 apresenta uma situação para a qual as condições térmicas no interior de um sólido podem ser simultaneamente influenciadas pela dissipação térmica para a vizinhança e pela geração interna de calor.

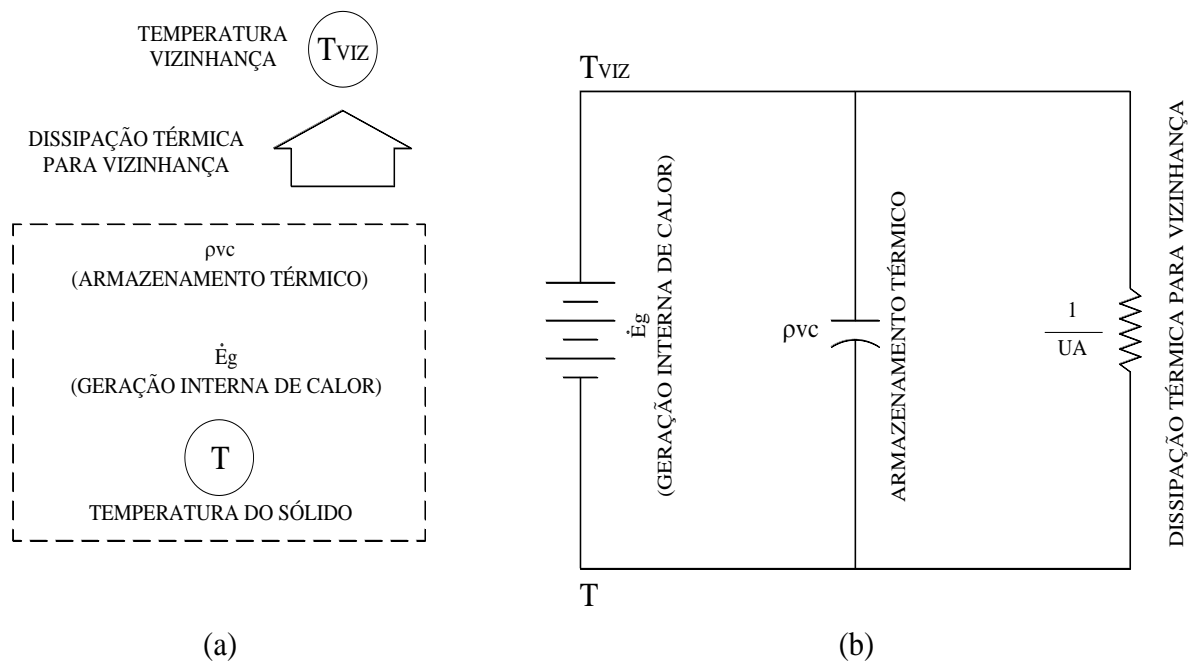


Figura 5.1 - Volume de controle para análise da capacidade térmica concentrada (a), e circuito elétrico equivalente (b).

Para avaliação da variação de temperatura de um sólido considerando simultaneamente a geração interna de calor, a variação no armazenamento de energia térmica interna e a dissipação térmica para a vizinhança, pode-se utilizar a Equação 5.1,

$$\rho v c \frac{dT}{dt} + UA (T - T_{viz}) = \dot{E}_g \quad (5.1)$$

a qual possui a solução analítica exata conforme Equação 5.2 [Incropera, 2005]

$$\frac{T - T_{viz}}{T_i - T_{viz}} = \frac{1}{\exp\left(\frac{UA}{\rho v c} \tau\right)} + \frac{\dot{E}_g}{UA(T_i - T_{viz})} \cdot \left(1 - \frac{1}{\exp\left(\frac{UA}{\rho v c} \tau\right)}\right) \quad (5.2)$$

onde

τ é o tempo decorrido entre o tempo inicial ($t=t_i$) até o tempo final ($t = t_f$),

T_i é a temperatura do sólido no tempo inicial, é a temperatura $T(t=t_i)$,

T é a temperatura do sólido no tempo final, é a temperatura $T(t = t_f)$,

T_{viz} é a temperatura da vizinhança do sólido,

\dot{E}_g é a potência da geração interna de calor,

U é o coeficiente global de transferência de calor do sólido com a vizinhança,

A é a área adequada de transferência de calor,

ρ é a massa específica,

V é o volume,

c é o calor específico,

$\rho v c$ é a capacidade de armazenamento térmico (produto massa específica x volume x calor específico),

5.1.2 Desenvolvimento do modelo térmico para o inversor

O modelo térmico proposto tem por objetivo estimar a evolução da temperatura de operação do inversor. Para sua utilização, este modelo necessita conhecer os parâmetros térmicos característicos do inversor. Para determinação destes parâmetros característicos, faz-se necessário a realização prévia de ensaios térmicos e elétricos nos inversores de interesse.

Uma vez determinados estes parâmetros térmicos do inversor, o modelo estará apto para determinar a temperatura do inversor a qualquer momento, a partir do conhecimento de alguns parâmetros de operação, como potência de entrada CC, eficiência de conversão CC/CA, temperatura ambiente, temperatura inicial do inversor.

A seguir são apresentados dois modelos para predição da temperatura do inversor: um modelo analítico e um modelo numérico.

Eventualmente, devido às simplificações adotadas, pode-se esperar discrepância deste modelo matemático puramente teórico com as medições experimentais a serem efetuadas.

5.1.2.1 Modelo térmico analítico proposto para o inversor

Para avaliação inicial foi utilizado um modelo analítico simplificado adaptado do modelo de Rampinelli, 2010.

A Figura 5.2.(a) apresenta o modelo de uma situação para a qual condições térmicas do inversor podem ser simultaneamente influenciadas pela geração interna de calor, pelo armazenamento de energia interna e pela dissipação térmica para a vizinhança por condução, por convecção e por radiação. A Figura 5.2.(b) apresenta um modelo simplificado onde os três mecanismos de transferência de calor são incorporados num único coeficiente global de transferência de calor.

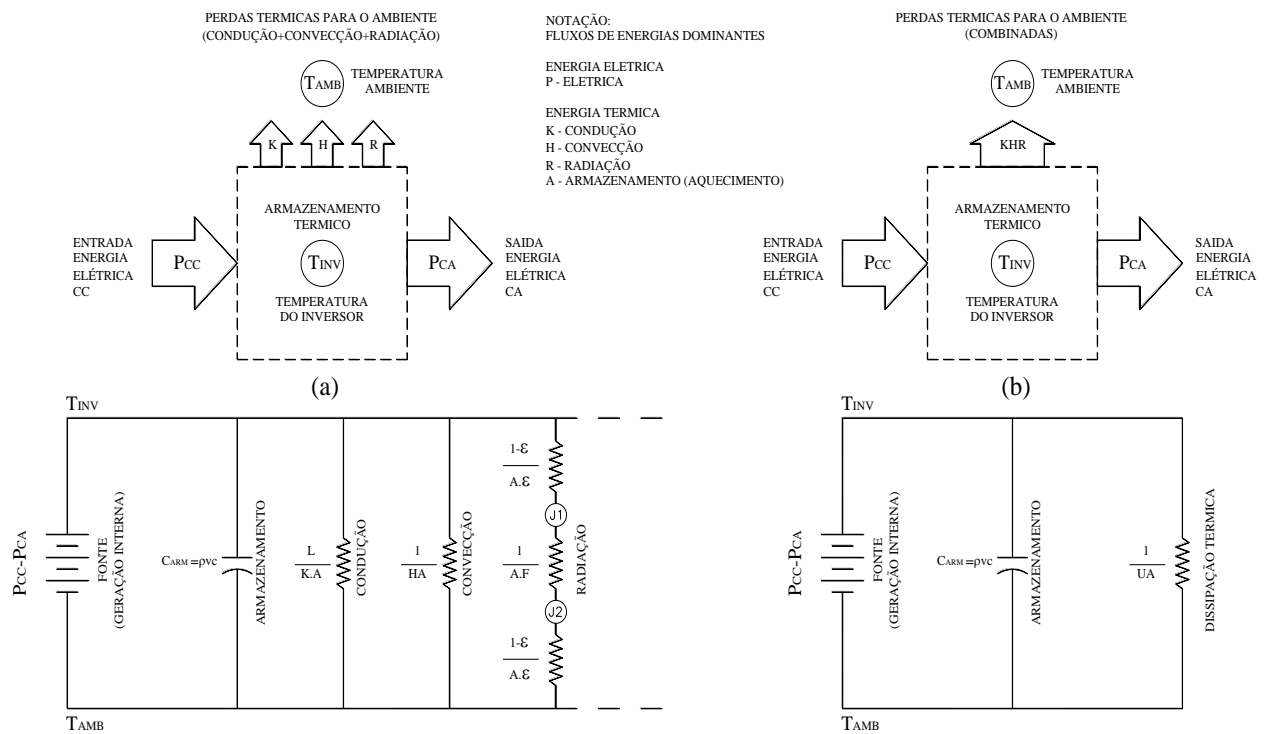


Figura 5.2 - Volume de controle e circuito elétrico equivalente para análise da geral da capacidade térmica concentrada: (a) modelo completo e (b) modelo simplificado proposto.

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} .

$$P_{CC} = P_{CA} + P_{AQ} \quad (5.3)$$

Considerando-se a eficiência de conversão de corrente contínua para corrente alternada $\eta_{INV,CONV}$, tem-se:

$$P_{AQ} = P_{CC} - P_{CA} = P_{CC} (1 - \eta_{INV,CONV}) \quad (5.4)$$

No equilíbrio, esta potência térmica, P_{AQ} , responsável pelo aquecimento do inversor pode ainda ser dividida em duas parcelas.

$$P_{AQ} = P_{ARMAZENADO} + P_{DISSIPADO} \quad (5.5)$$

A primeira parcela representa a parcela de calor armazenada em regime transiente no interior do inversor, responsável pelo aumento de temperatura.

$$P_{ARMAZENADO} = \sum_n \rho_n c_n V_n \frac{dT}{dt} \quad (5.6)$$

Neste modelo o somatório dos parâmetros que representam as capacidades térmicas dos diversos materiais e componentes internos do inversor são simplificados e concentrados em um único coeficiente equivalente, aqui denominado de “capacidade concentrada de armazenamento térmico”, C_{ARM} .

$$P_{ARMAZENADO} = C_{ARM} \frac{dT}{dt} \quad (5.7)$$

A segunda parcela representa a potência térmica dissipada para o meio pelos mecanismos de transferência de calor: condução, convecção e radiação.

$$P_{DISSIPADO} = P_{CONDUÇÃO} + P_{CONVECÇÃO} + P_{RADIAÇÃO} \quad (5.8)$$

Neste modelo estes três mecanismos de transmissão de calor entre o inversor e o ambiente, juntamente com as respectivas áreas de transferência de calor, serão simplificados e concentrados, em um único coeficiente equivalente, aqui denominado de “coeficiente concentrado de dissipação térmica”, UA_{DISS} .

$$P_{DISSIPADO} = UA_{DISS} (T_{INV} - T_{AMB}) \quad (5.9)$$

Rearranjando as equações 5.5, 5.7 e 5.9 obtém-se a Equação 5.10 a qual é a equação diferencial que representa o modelo proposto para caracterização do comportamento térmico e avaliação da temperatura do inversor em regime transiente

$$P_{AQ} = UA_{DISS} (T_{INV} - T_{AMB}) + C_{ARM} \cdot \frac{dT}{dt} \quad (5.10)$$

Comparando com as equações 5.1 e 5.2 obtém-se a Equação 5.11, que representa a solução exata da Equação diferencial da Equação 5.10.

$$\frac{T_{INV} - T_{AMB}}{T_{INV,i} - T_{AMB}} = \frac{1}{\exp\left(\frac{UA_{DISS}}{C_{ARM}} \tau\right)} + \frac{P_{AQ}}{UA_{DISS} (T_{INV,i} - T_{AMB})} \cdot \left[1 - \frac{1}{\exp\left(\frac{UA_{DISS}}{C_{ARM}} \tau\right)} \right] \quad (5.11)$$

Rearranjando esta Equação obtém-se a Equação 5.12 que representa o modelo matemático analítico proposto para caracterização do comportamento térmico e avaliação da temperatura do inversor em regime transiente,

$$T_{INV} = T_{AMB} + \frac{T_{INV,i} - T_{AMB}}{\exp\left(\frac{UA_{DISS}}{C_{ARM}} \tau\right)} + \frac{P_{AQ}}{UA_{DISS}} \cdot \left[1 - \frac{1}{\exp\left(\frac{UA_{DISS}}{C_{ARM}} \tau\right)} \right] \quad (5.12)$$

onde

τ é o tempo decorrido entre o tempo inicial ($t=t_i$) até o tempo final ($t = t_f$), $\tau = t_f - t_i$

$T_{INV,i}$ 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 constante (geração interna de calor)

UA_{DISS} é o coeficiente concentrado de dissipação térmica entre o inversor e o ambiente

C_{ARM} é a capacidade concentrada de armazenamento térmico do inversor

5.1.2.2 Modelo térmico numérico para o inversor

Rampinelli, 2010 utilizou para caracterização do comportamento térmico e avaliação da temperatura do inversor em regime transiente uma Equação diferencial similar à Equação 5.10, e propôs uma solução numérica iterativa explícita, também com informações térmicas concentradas, onde a avaliação evolutiva da temperatura em regime contínuo transiente aproximada pelo somatório das avaliações em regime estacionário sequenciadas de tempo em tempo. Rearranjando a Equação diferencial 5.10 tem-se

$$C_{ARM} \cdot \frac{dT}{dt} = P_{AQ} - UA_{DISS} \cdot (T_{INV} - T_{AMB}) \quad (5.13)$$

rearranjando novamente tem-se

$$dT = \left[\frac{P_{AQ} - UA_{DISS} \cdot (T_{INV} - T_{AMB})}{C_{ARM}} \right] \cdot dt \quad (5.14)$$

discretizando esta Equação do calor pelo método de diferenças finitas de forma explícita obtém-se

$$T^{p+1} - T^p = \left[\frac{P_{AQ} - UA_{DISS} \cdot (T^p - T_{AMB})}{C_{ARM}} \right] \cdot (t^{p+1} - t^p) \quad (5.15)$$

Rearranjando, apresenta-se na Equação 5.16 um modelo matemático numérico iterativo explícito que permite avaliação da evolução da temperatura do inversor obtida pelo avanço do tempo, utilizando intervalos de tempo Δt .

$$T^{p+1} = T^p + \left[\frac{P_{AQ} - UA_{DISS} \cdot (T^p - T_{AMB})}{C_{ARM}} \right] \cdot \Delta t \quad (5.16)$$

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 $T(t=p)$

T_{AMB} é a temperatura do ambiente do inversor

P_{AQ} é a potência de aquecimento do inversor (geração interna de calor)

U_{DISS} é o coeficiente concentrado de dissipação térmica entre o inversor e o ambiente

C_{ARM} é a capacidade concentrada de armazenamento térmico do inversor

5.1.3 Simplificações adotadas

Para o desenvolvimento do modelo analítico representado pela Equação 5.12 e do modelo numérico representado pela Equação 5.16, consideram-se válidas algumas hipóteses e simplificações utilizadas no método de análise de transferência de calor em regime transiente de sistemas de capacidade concentrada, tais como:

- Condução de calor unidimensional;
- Geração de calor interna uniforme;
- As propriedades térmicas do inversor e do ar ambiente são consideradas constantes;
- O inversor e seus diversos materiais e componentes internos geradores de calor são considerados como um corpo sólido, de massa única com temperatura uniforme em toda extensão;
- Toda energia elétrica em corrente contínua que não é convertida em energia elétrica de corrente alternada é considerada energia térmica de aquecimento do inversor.

6 ANÁLISE DE CONFIABILIDADE E DURABILIDADE DO INVERSOR

A durabilidade e a confiabilidade de inversores dependem de múltiplos fatores, podendo estes estarem relacionados às etapas de produção e às condições de uso. Quanto à produção podem-se citar alguns fatores como o projeto, as características dos materiais, a fabricação, o custo de produção. Quanto ao uso podem-se citar fatores relacionados a condições de operação como temperatura máxima, ciclos e variações de temperatura, umidade, vibrações mecânicas e radiação.

Pode-se definir a confiabilidade de um equipamento como a capacidade deste equipamento executar uma função requerida de forma satisfatória sob determinadas condições, por um determinado intervalo de tempo [ABNT NBR 5462, 1994]. A confiabilidade é uma função estatística utilizada para descrever aspectos observados em estudos e testes de durabilidade (vida útil).

A durabilidade é um aspecto particular da confiabilidade, relacionada com desempenho de um item através do tempo, normalmente definido como o mínimo de tempo antes da ocorrência de falha.

É fundamental para uma análise de confiabilidade a determinação do período de utilização do equipamento, sendo que, este período nem sempre é medido como uma grandeza temporal, mas também pode ser medido como uma distância percorrida ou ainda através de ciclos de operação [Felix, 2006].

6.1 Modelos para estimativa de durabilidade

Equipamentos podem apresentar um ou mais modos de falha. Modo de falha pode ser definido como o mecanismo pelo qual o item falha [Felix, 2006]. A experiência no trato com equipamentos possibilitou a engenharia conhecer empiricamente alguns modos de falhas, como fadiga, desgaste, corrosão, entre outros. A taxa de falhas é afetada pelos diferentes mecanismos de falhas, assim como pelas condições de fabricação, de uso e de manutenção.

Simulações, ensaios de campo e ensaios acelerados de laboratório com protótipos possibilitaram o desenvolvimento de modelos para predição de falhas.

FIDES, 2009 apresenta uma metodologia baseada na física da falha. O modelo genérico para predição de confiabilidade tem a forma da Equação 6.1

$$\lambda = \lambda_{física} \cdot \Pi_{induzido} \cdot \Pi_{componente} \cdot \Pi_{processo} \quad (6.1)$$

onde

λ é a taxa de falhas,

$\lambda_{física}$ é a taxa de falhas devido aos diferentes mecanismos de falhas,

$\Pi_{induzido}$ é a contribuição dos fatores induzidos (sobrecarga) inerentes às aplicações em campo,

$\Pi_{componente}$ é o fator relacionado à qualidade e controle técnico do fabricante dos componentes,

$\Pi_{processo}$ é o fator relacionado à qualidade e controle técnico sobre os processos de desenvolvimento, fabricação e manutenção do equipamento.

A confiabilidade de um equipamento eletrônico completo depende da confiabilidade individual de cada um dos elementos do sistema eletrônico. Quanto maior o número de componentes menor é a confiabilidade do equipamento.

6.1.1 Modelo para predição de falhas relacionadas à temperatura

Fabricantes de semicondutores utilizam o modelo de Arrhenius para comparar estimativas das taxas de falhas em diferentes temperaturas. O modelo de Arrhenius assume que a degradação do desempenho é linear no tempo, e que a taxa de degradação depende da temperatura [Kececioglu, 1991]. Usando este modelo em condições reais de operação a taxa de falhas pode ser estimada pela Equação 6.2

$$\frac{FR_1}{FR_2} = \frac{MTBF_2}{MTBF_1} = e^{\left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \right]} \quad (6.2)$$

onde

FR_1 é a taxa de falhas na temperatura T_1 (condição de teste),

FR_2 é a taxa de falhas na temperatura T_2 (condição de uso),

$MTBF_1$, $MTBF_2$ é o tempo médio entre falhas nas temperaturas T_1 e T_2 respectivamente (em inglês *Mean Time Between Failure*),

E_a é a energia de ativação (por exemplo 0,8 eV para FET transistor)

k_B é a constante de Boltzman ($8,63 \times 10^{-5}$ eV/K)

T_1 , T_2 são as temperaturas absolutas, de teste e de uso respectivamente

O modelo de Coffin-Manson modificado (Norris-Landzberg) tem sido usado com sucesso para análise de falhas relacionadas à temperatura e aos ciclos térmicos [Cui, 2005]. Este modelo, conforme apresentado na Equação 6.3, permite estimar o número de ciclos para falhar N_f considerando tipicamente três fatores relacionados à temperatura.

O primeiro fator considera a temperatura máxima (T_{max} , modelo de Arrhenius), que está relacionada à aceleração da degradação química dos materiais ocasionada por aumento de temperatura.

O segundo fator considera as variações de temperaturas (ΔT) e os mecanismos de falhas mecânicas relacionados à fadiga dos materiais em decorrência dos ciclos de tensões geradas por dilatações térmicas.

O terceiro fator considera a frequência de ocorrência destes ciclos térmicos.

Os efeitos de outros fatores e de outros mecanismos de falhas, como vibrações e umidade, são incorporados no coeficiente “M”, o qual pode ser determinado através de experimentos de confiabilidade. Uma vez determinado o coeficiente “M”, a Equação 6.3 pode ser utilizada para estimar o número de ciclos para falhar em equipamentos submetidos a ciclos térmicos uniformes com diferentes combinações de fontes de falhas, como f , $T_{m\acute{a}x}$ e ΔT .

$$N_f = M \left(\frac{1}{\Delta T} \right)^b (f)^{-a} \exp \left[\frac{E_a}{k} \frac{1}{T_{m\acute{a}x}} \right] \quad (6.3)$$

onde

N_f é o número de ciclos para falhar

ΔT é a variação de temperatura do ciclo,

f é a frequência, número de ciclos (por dia ou por hora)

$T_{m\acute{a}x}$ é a temperatura máxima absoluta do ciclo,

E_a é a energia de ativação, em eV

a é o expoente da frequência dos ciclos (tipicamente valores próximos a 1/3)

b é o expoente da variação de temperatura (tipicamente valores próximos a 2)

M é um coeficiente (que pode ser determinado experimentalmente)

A frequência “f” apresentada no modelo de Coffin-Manson (Equação 6.3) está relacionada ao tempo entre eventos.

Para comparação entre estimativas de números de ciclos para falhar em diferentes condições de operação (f , $T_{\text{máx}}$ e ΔT), sem a necessidade de determinação do coeficiente “A”, pode-se utilizar o conceito de fator de aceleração de falhas, o qual relaciona Número de ciclos para falhar em diferentes condições de operação (f , $T_{\text{máx}}$ e ΔT), conforme a Equação 6.4. Neste modelo comparativo considera-se que o coeficiente “A” é constante, sendo assim simplificado nesta divisão.

$$FA = \frac{FR_H}{FR_L} = \frac{MTBF_L}{MTBF_H} = \frac{N_{fH}}{N_{fL}} = \left(\frac{\Delta T_L}{\Delta T_H} \right)^b \cdot \left(\frac{f_H}{f_L} \right)^{-a} \cdot \exp \left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{\text{max},H}} - \frac{1}{T_{\text{max},L}} \right) \right] \quad (6.4)$$

onde

FA é o fator de aceleração de falhas

FR_H é a taxa de falhas na temperatura T_H (condição de teste, alta exigência),

FR_L é a taxa de falhas na temperatura T_L (condição de uso, baixa exigência),

$MTBF_H$, $MTBF_L$ é o tempo médio entre falhas nas temperaturas $T_{\text{max},H}$ e $T_{\text{max},L}$ respectivamente (em inglês *Mean Time Between Failure*),

N_{fL} é o número de ciclos para falhar na temperatura T_L na condição de uso (baixa exigência),

N_{fH} é o número de ciclos para falhar na temperatura T_H na condição de teste (alta exigência),

ΔT_L é a variação de temperatura dos ciclos na condição de uso (baixa exigência)

ΔT_H é a variação de temperatura dos ciclos na condição de teste (alta exigência)

f_L é a frequência, número de ciclos na condição de uso (baixa exigência)

f_H é a frequência, número de ciclos na condição de teste (alta exigência)

T_L é a temperatura máxima absoluta dos ciclos na condição de uso (baixa exigência)

T_H é a temperatura máxima absoluta dos ciclos na condição de teste (alta exigência)

E_a é a energia de ativação (pode ser determinado experimentalmente por exemplo 0,8 eV para FET transistor)

a é o expoente da frequência dos ciclos (tipicamente valores próximos a 1/3)

b é o expoente da variação de temperatura (tipicamente valores próximos a 2)

6.1.2 Caracterização dos ciclos térmicos

6.1.2.1 Ciclos térmicos uniformes

Para predição de falhas pode-se utilizar o modelo descrito pelas equações 6.3 e 6.4 os quais consideram ciclos uniformes com parâmetros constantes, isto é, a frequência “ f ” é constante, a variação de temperatura “ ΔT ” de cada ciclo é constante, e a temperatura máxima de cada ciclo também é constante. Um exemplo de ciclos uniformes pode ser visto na Figura 6.1 onde se tem um gráfico com registros de temperatura medidos de hora em hora, com frequência “ f ” constante de 4 ciclos por dia, a variação de temperatura “ ΔT ” de 40 °C, com picos e vales constantes (picos de temperatura máxima “ T_{max} ” de 60 °C e vales de temperatura mínima “ T_{min} ” de 20 °C).

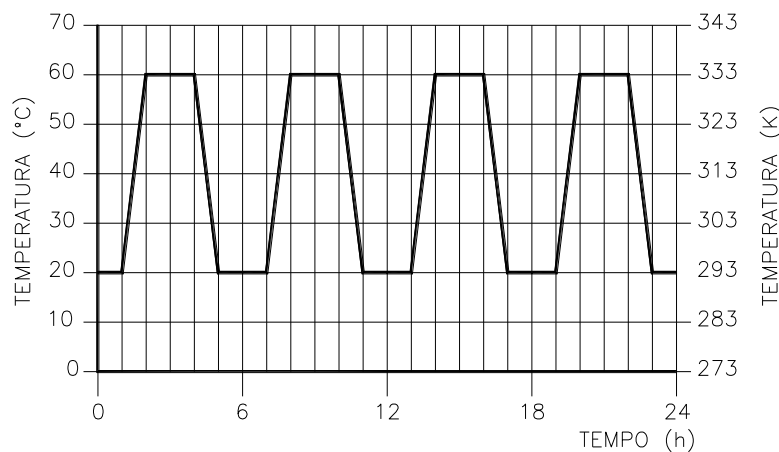


Figura 6.1 - Exemplo de gráfico representando ciclos de temperatura uniformes.

Para ciclos uniformes, pode-se definir “ q_{dpc} ” como uma quantidade de defeito por ciclo definida pela Equação 6.5

$$q_{dpc} = \frac{1}{N_f} \quad (6.5)$$

onde

q_{dpc} é a quantidade de defeito por ciclo, para diferentes combinações das fontes de falhas, temperatura máxima “ i ” e da faixa de variação de temperatura “ j ”,

N_f é o número de ciclos para falhar

6.1.2.2 Ciclos térmicos não-uniformes

Os inversores usualmente operam em condições que variam a todo momento, pois dependem da combinação de parâmetros externos e internos. Os inversores quando em operação são expostos a perfis de carregamento variáveis e aleatórios, em decorrência das variações de parâmetros externas como radiação solar, temperatura ambiente e temperatura de operação dos módulos fotovoltaicos, ou ainda de parâmetros internos como seguimento do ponto de máxima potência, proteção térmica, entre outros. Estas variações aos quais os inversores são expostos, resultam em um perfil de ciclos de temperatura interna também aleatório, isto é, os ciclos de temperatura interna não são uniformes, pois as temperaturas médias e as faixas de variação mudam a cada ciclo.

Segue a descrição da metodologia proposta para análise de durabilidade relacionada a um componente exposto a uma sequência de ciclos térmicos não-uniformes. Ao final desta análise é estimada uma quantidade de defeitos acumulados “qda” a qual servirá para comparar a durabilidade de diferentes sequências de ciclos térmicos. A sequência avaliada que apresentar maior quantidade de defeitos acumulados será a sequência considerada com menor durabilidade.

6.1.2.3 Contagem de ciclos não uniformes – método *rainflow*

Para análise destes ciclos de temperatura não uniformes propõe-se a utilização de um método originalmente desenvolvido para análise da fadiga de materiais submetidos a cargas mecânicas aleatórias e variáveis.

Este método chamado, “contagem de ciclos *rainflow*” (*rainflow counting cycles*, em inglês) é utilizado para contar e agrupar os números de ocorrências de meios-ciclos de cada combinação de faixas de variação com as respectivas temperaturas máximas de operação [ASTM E1049.85].

A Figura 6.2 mostra um gráfico com registros de temperatura medidos de hora em hora. Pode-se observar que os ciclos térmicos apresentados, nesta figura, não são uniformes, pois tem frequências variáveis entre picos e vales, variações de temperatura entre picos e vales adjacentes não são constantes e pontos de temperatura máximas (picos) e mínimas (vales) também não são constantes.

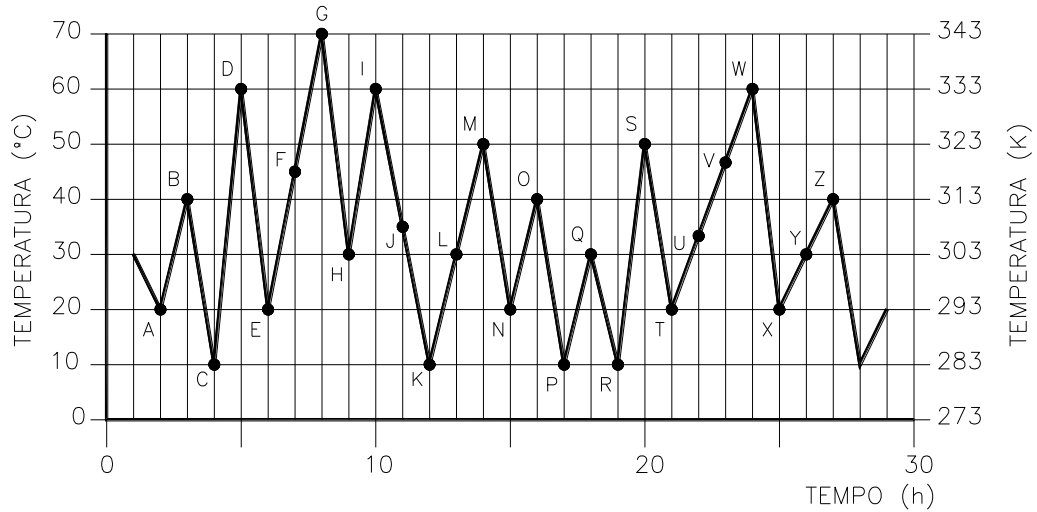


Figura 6.2 - Exemplo de ciclos não uniformes (medidas de temperatura).

Ainda para análise destes ciclos de temperatura não uniformes propõe-se a utilização do método chamado “regra de Palmgren-Miner” (*Miner’s rule*) o qual apresenta o conceito de quantidade de defeitos acumulados “qda” linearmente dependente da contribuição de diferentes combinações de fontes de falhas, temperatura média e faixa de variações [Bryant, 2008]. A Equação 6.5 pode ser adaptada para determinação da quantidade de defeito por meio-ciclo “qdpmc”, para diferentes combinações das fontes de falhas, temperatura máxima “i” e da faixa de variação de temperatura “j”, resultando na Equação 6.6

$$qdpmc_{i,j} = \frac{1}{(N_f)_{i,j}} \quad (6.6)$$

onde

$qdpmc$ é a quantidade de defeito por meio-ciclo, para diferentes combinações das fontes de falhas, temperatura máxima “i” e da faixa de variação de temperatura “j”,

$(N_f)_{i,j}$ é o número de ciclos para falhar, para diferentes combinações das fontes de falhas, temperatura máxima “i” e da faixa de variação de temperatura “j”,

A regra de Miner permite a obtenção de um único valor para estimar a quantidade de defeitos acumulados “qda”, para uma série de ciclos não uniformes, através do somatório apresentado na Equação 6.7, a qual considera o número de ocorrências de meios-ciclos para diferentes combinações das fontes de falhas, temperatura máxima “i” e da faixa de variação

de temperatura “j” e seus respectivos números de meios-ciclos para falhar. A falha ocorre quando $qda \approx 1$.

$$qda = \sum_{i,j} \frac{n_{i,j}}{(N_f)_{i,j}} \quad (6.7)$$

onde

qda é a quantidade de defeitos acumulados

$n_{i,j}$ é o número de ocorrências de ciclos de diferentes combinações das fontes de falhas, temperatura média “i” e da faixa de variação de temperatura “j”,

$(N_f)_{i,j}$ é o número de ciclos para falhar para diferentes combinações das fontes de falhas, temperatura média “i” e da faixa de variação de temperatura “j”,

Segue um exemplo com a descrição dos passos desta metodologia apresentada para análise de durabilidade.

Aplicando o “método de contagem de ciclos *rainflow*” no gráfico da Figura 6.2 obtém-se inicialmente duas tabelas típicas para contagem e agrupamento dos dados (Tabelas 6.1 e 6.2)

Tabela 6.1 - Dados de medidas de temperatura (conforme Figura 6.2).

Meio ciclo	Faixa de variação	Temperatura mínima	Temperatura máxima
	ΔT	Tmín (vales)	Tmáx (picos)
	(°C)	(°C)	(°C)
AB	20	20	40
BC	30	10	40
CD	50	10	60
DE	40	20	60
EFG	50	20	70
GH	40	30	70
HI	30	30	60
IJK	50	10	60
KLM	40	10	50
MN	30	20	50
NO	20	20	40
OP	30	10	40
PQ	20	10	30
QR	20	10	30
RS	40	10	50
ST	20	20	50
TUVW	40	20	60
WX	40	20	60
XYZ	20	20	40

Tabela 6.2 - Número de ocorrências de meio-ciclos combinando pares de $T_{m\acute{a}x}$ e ΔT (conforme Tabela 6.1).

		Temperatura máxima $T_{m\acute{a}x}$ (picos)				
		30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C
Faixa de variação ΔT	20 °C	2	3	1	---	---
	30 °C	---	2	1	1	---
	40 °C	---	---	2	3	---
	50 °C	---	---	---	2	---
	60 °C	---	---	---	---	1
Número de ocorrências de meio-ciclos combinando pares de $T_{m\acute{a}x}$ e ΔT						

A Figura 6.3 apresenta outro exemplo de aplicação do método *rainflow* considerando uma sequência de medidas de temperatura de um dia típico.

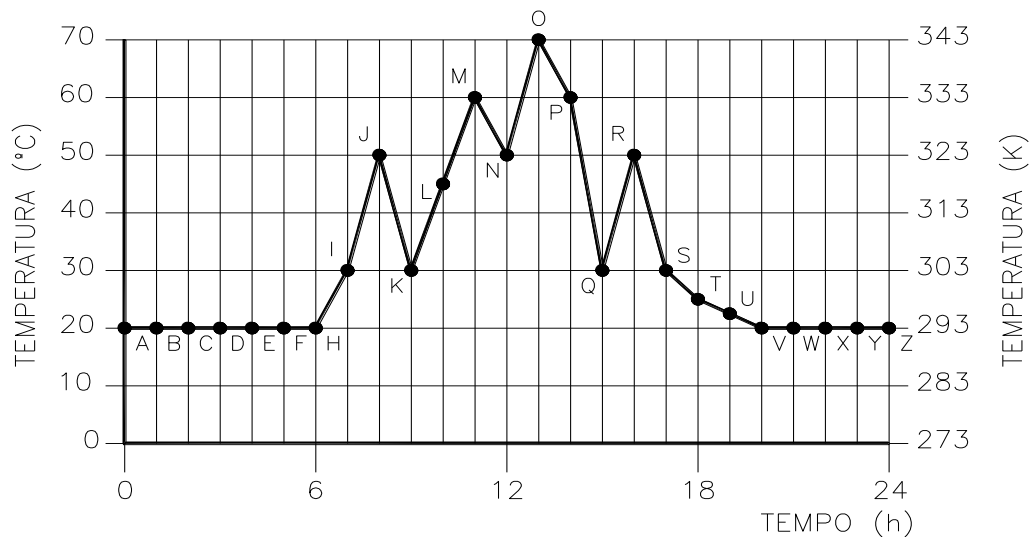


Figura 6.3 - Exemplo de ciclos não uniformes (medidas de temperatura em um dia típico).

Aplicando o “método de contagem de ciclos *rainflow*” no gráfico da Figura 6.3 obtêm-se duas tabelas típicas (Tabelas 6.3 e 6.4). Neste exemplo, a partir dos dados apresentados na Tabela 6.3 são selecionados os pontos de picos e vales conforme critérios do método de contagem *rainflow*. Obtém-se assim a Tabela 6.4 onde são apresentados os números de ocorrências de meio-ciclos combinando as respectivas fontes de falhas, $T_{m\acute{a}x}$ e ΔT .

Tabela 6.3 - Dados de medidas de temperatura (conforme da Figura 6.3).

Meio ciclo	Faixa de variação ΔT	Temperatura mínima	Temperatura máxima
		T _{mín} (vales)	T _{máx} (picos)
	(°C)	(°C)	(°C)
ABCDEFGH	0	20	20
HIJ	20	20	40
JK	10	30	40
KLM	30	30	60
MN	10	50	60
NO	20	50	70
OPQ	40	30	70
QR	20	30	50
RSTUV	30	20	50
VWXYZ	0	20	20

Tabela 6.4 - Número de ocorrências de meio-ciclos combinando pares de T_{máx} e ΔT (conforme valores apresentados na Tabela 6.3).

		Temperatura máxima T _{máx} (picos)				
		30 °C (303 K)	40 °C (313 K)	50 °C (323 K)	60 °C (333 K)	70 °C (343 K)
Faixa de variação ΔT	10 °C	---	---	---	1	---
	20 °C	---	1	2	---	1
	30 °C	---	---	2	1	---
	40 °C	---	---	---	---	1
	50 °C	---	---	---	---	---
Número de ocorrências de meio-ciclos combinando pares de T _{máx} e ΔT						
Total de ocorrências de meios-ciclos (entre picos e vales) = 8						

Reescrevendo a Equação 6.3 com valores típicos (para transistores tipo FET), $E_a = 0,8$ eV, $k_B = 8,63 \times 10^{-5}$ eV/K, expoente $a=1/3$ e $b=2$ tem-se a Equação 6.8

$$N_f = M \left(\frac{1}{\Delta T} \right)^2 \cdot \left(\frac{1}{f} \right)^{\frac{1}{3}} \exp \left[9270 \frac{1}{T_{\max}} \right] \quad (6.8)$$

Considerando ainda a frequência “f” de ocorrências é igual a um evento por hora, isto é para $f = 1$ tem-se a Equação 6.9 a qual será utilizada para avaliações de durabilidade que seguem.

$$N_f = M \left(\frac{1}{\Delta T} \right)^2 \exp \left[\frac{9270}{T_{\max}} \right] \quad (6.9)$$

Utilizando-se a Equação 6.9 e os dados da Tabela 6.4, obtém-se o número de ciclos para falhar individual $(N_f)_{i,j}$ para cada meio ciclo, combinando as respectivas fontes de falhas, T_{\max} e ΔT , sendo estes resultados apresentado na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 - Estimativa do número de ciclos para falhar $(N_f)_{i,j}$ individual para cada meio ciclo, combinando pares de T_{\max} e ΔT .

		Temperatura máxima T_{\max} (picos)				
		30 °C (303 K)	40 °C (313 K)	50 °C (323 K)	60 °C (333 K)	70 °C (343 K)
Faixa de variação ΔT	10 °C	---	---	---	$1,23 \times 10^{10}M$	---
	20 °C	---	$1,82 \times 10^{10}M$	$7,28 \times 10^9M$	---	$1,36 \times 10^9M$
	30 °C	---	---	$3,23 \times 10^9M$	$1,36 \times 10^9M$	---
	40 °C	---	---	---	---	$3,41 \times 10^8M$
	50 °C	---	---	---	---	---
$(N_f)_{i,j}$: Número de ciclos para falhar individual para cada meio ciclo						

Com a Equação 6.6, pode-se determinar a quantidade de defeitos para cada meio-ciclo $(qdpmc)_{i,j}$ individual para cada combinação de T_{\max} e ΔT . Os resultados são apresentados na Tabela 6.6.

Tabela 6.6 - Estimativa da quantidade de defeito por meio-ciclo $(qdpmc)_{i,j}$ individual para cada meio-ciclo, combinando pares de T_{\max} e ΔT .

		Temperatura máxima T_{\max} (picos)				
		30 °C (303 K)	40 °C (313 K)	50 °C (323 K)	60 °C (333 K)	70 °C (343 K)
Faixa de variação ΔT	10 °C	---	---	---	$8,13 \times 10^{-11}/M$	---
	20 °C	---	$5,49 \times 10^{-11}/M$	$1,37 \times 10^{-10}/M$	---	$7,35 \times 10^{-10}/M$
	30 °C	---	---	$3,09 \times 10^{-10}/M$	$7,35 \times 10^{-10}/M$	---
	40 °C	---	---	---	---	$2,93 \times 10^{-9}/M$
	50 °C	---	---	---	---	---
$(qdpmc)_{i,j}$: Quantidade de defeito para cada meio-ciclo						

Todos os dados da Tabela 6.6 são divididos pelo menor valor de quantidade de defeitos ($5,49 \times 10^{-11}/A$), e apresentados na Tabela 6.7, onde se pode observar facilmente a proporção do efeito danoso para cada combinação de pares de $T_{m\acute{a}x}$ e ΔT . Por exemplo, pode-se observar que a exposição a um meio-ciclo com variação de temperatura $\Delta T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ e atingindo a temperatura máxima $T_{m\acute{a}x} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ é 53 vezes mais danoso a um equipamento do que a exposição a um meio-ciclo com variação de temperatura $\Delta T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ e atingindo a temperatura máxima $T_{m\acute{a}x} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$. Ainda pode-se observar que a exposição a este meio-ciclo com variação de temperatura $\Delta T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ e atingindo a temperatura máxima $T_{m\acute{a}x} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ representa cerca de 58 % (53/90,8) dos danos causados por esta seqüência de 8 meios ciclos avaliados.

Pode-se também observar que a exposição a um meio-ciclo com variação de temperatura $\Delta T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ e atingindo a temperatura máxima $T_{m\acute{a}x} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ apresenta efeito danoso ao equipamento semelhante a exposição a um meio-ciclo com variação de temperatura $\Delta T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ e atingindo a temperatura máxima $T_{m\acute{a}x} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$.

Tabela 6.7 - Comparativo de proporcionalidade do dano causado em cada meio-ciclo combinando pares de $T_{m\acute{a}x}$ e ΔT .

		Temperatura máxima $T_{m\acute{a}x}$ (picos)				
		30 °C (303 K)	40 °C (313 K)	50 °C (323 K)	60 °C (333 K)	70 °C (343 K)
Faixa de variação ΔT	10 °C	---	---	---	1,5	---
	20 °C	---	1	2,5	---	13,4
	30 °C	---	---	5,6	13,4	---
	40 °C	---	---	---	---	53,4
	50 °C	---	---	---	---	---
Comparativo de proporcionalidade do dano causado em cada meio-ciclo combinando pares de $T_{m\acute{a}x}$ e ΔT						
Total = 90,8						

Com a Equação 6.7 e os dados apresentados nas Tabelas 6.4 e 6.5 pode-se calcular a parcela individual de defeito acumulado individual para as diversas combinações das respectivas fontes de falhas, $T_{m\acute{a}x}$ e ΔT . Estes valores são apresentados na Tabela 6.8.

Neste exemplo, utilizando-se as equações 6.3, 6.5, 6.6 e 6.7 obtém-se o defeito acumulado para a ocorrência de cada meio ciclo. Estes valores individuais de cada meio ciclo e a quantidade de defeitos acumulados durante um dia são apresentados na Tabela 6.8.

Tabela 6.8 - Defeitos acumulados individuais para cada combinação de $T_{\text{máx}}$ e ΔT .

		Temperatura máxima $T_{\text{máx}}$ (picos)				
		30 °C (303 K)	40 °C (313 K)	50 °C (323 K)	60 °C (333 K)	70 °C (343 K)
Faixa de variação ΔT	10 °C	---	---	---	$1 / M. 1,23 \times 10^{10}$ $= 8,13 \times 10^{-11} / M$	---
	20 °C	---	$1 / M. 1,82 \times 10^{10}$ $= 5,49 \times 10^{-11} / M$	$2 / M. 7,28 \times 10^9$ $= 2,74 \times 10^{-10} / M$	---	$1 / M. 1,36 \times 10^9$ $= 7,35 \times 10^{-10} / M$
	30 °C	---	---	$2 / M. 3,23 \times 10^9$ $= 6,18 \times 10^{-10} / M$	$1 / M. 1,36 \times 10^9$ $= 7,35 \times 10^{-10} / M$	---
	40 °C	---	---	---	---	$1 / M. 3,41 \times 10^8$ $= 2,93 \times 10^{-9} / M$
	50 °C	---	---	---	---	---
Quantidade de defeitos individuais para cada combinação de $T_{\text{máx}}$ e ΔT						
Somatório destes defeitos individuais resulta numa quantidade de defeitos acumulados “qda” igual a $5,42 \times 10^{-9} / M$ (Equação 6.7)						

6.1.3 Limitações do método apresentado

A metodologia aplicada para avaliação de confiabilidade combina os modelos e métodos descritos acima: Coffin-Manson, Arrhenius, Rainflow e Miner. Estes métodos são de uso corrente para este tipo de avaliação estatística, porém recomenda-se seu uso com cautela tendo em mente que estes possuem algumas limitações e simplificações.

O método de Coffin-Manson não considera a ocorrência de choques térmicos, isto é, o método considera que os efeitos e danos causados por uma variação de temperatura sejam iguais tanto para variações rápidas como para variações lentas.

A utilização do modelo de Arrhenius requer o valor da energia de ativação do componente que está sendo avaliado. Para isto usualmente utiliza-se a energia de ativação de valores tabelados na literatura observados em experimentos semelhantes, porém este pode não ser exatamente o mesmo deste estudo.

Considera que os ciclos térmicos, ao qual o componente é submetido, estão dentro da faixa de temperatura funcional recomendável. Não é considerada a temperatura de fusão a qual causaria falha drástica.

O método de contagem de ciclos *Rainflow* agrupa as combinações de temperaturas máximas e faixas de variação em faixas pré-determinadas que pode introduzir alguns erros principalmente para combinações que ocorrem em grande quantidade.

A regra de Miner considera que os mecanismos de falhas ocorrem de forma linear durante toda vida útil do componente, independente da ordem dos ciclos térmicos, das temperaturas médias e máximas e das faixas de variação apresentados nos modelos de Coffin-Manson e Arrhenius.

Quanto a frequência “ f ” do modelo de Coffin-Manson (Equação 6.3), estas podem neste caso avaliadas, ser horárias ou diárias. Nas avaliações feitas com frequências horárias é considerada a frequência de um meio ciclo por hora, para todos os meios-ciclos ascendentes e descendentes ocorridos, conforme exemplo apresentado na Figura 6.2, mesmo que um meio ciclo ascendente ou descendente tenha duração maior de uma hora. Nas avaliações feitas com frequências diárias é considerada a frequência de um ciclo por dia (um ciclo a cada 24 horas), considerando assim um ciclo (dois meios ciclos) apenas com a temperatura máxima do dia e a temperatura mínima do dia. Por exemplo, na Figura 6.3 seria considerado apenas um ciclo entre 20 °C e 70 °C.

Esta metodologia para avaliação da durabilidade do inversor considera apenas um dos fatores responsáveis pelas falhas (efeito da temperatura) sobre um dos componentes do inversor (módulo de chaveamento), baseados no modelo de predição e evolução de um único valor de temperatura para caracterização do inversor.

6.2 Testes de envelhecimento acelerados por temperatura

A estimativa do fator de aceleração a partir do modelo de Coffin-Manson (Equação 6.4) vem sendo utilizado em testes de envelhecimento acelerado por temperatura. Exemplos da equivalência de danos causados para diferentes combinações de número de eventos, variações de temperatura ΔT e temperatura máxima $T_{máx}$ são ilustrados nas Tabelas 6.6 e 6.7.

A Figura 6.4.a apresenta um exemplo de uma curva de mesma probabilidade de falha (fator de aceleração $FA = 1$) relacionada a um teste de envelhecimento acelerado por temperatura onde atribui a mesma probabilidade de falha para um equipamento trabalhando 5.000 horas a 200 °C ou 10.000 horas a 150 °C ou 100.000 horas a 85 °C.

A Figura 6.4.b apresenta os resultados, com estimativas de número de ciclos para falhar N_f , de um teste realizado em diferentes regimes de exigência (temperaturas máximas $T_{máx}$), para diferentes variações de temperatura ΔT dos ciclos.

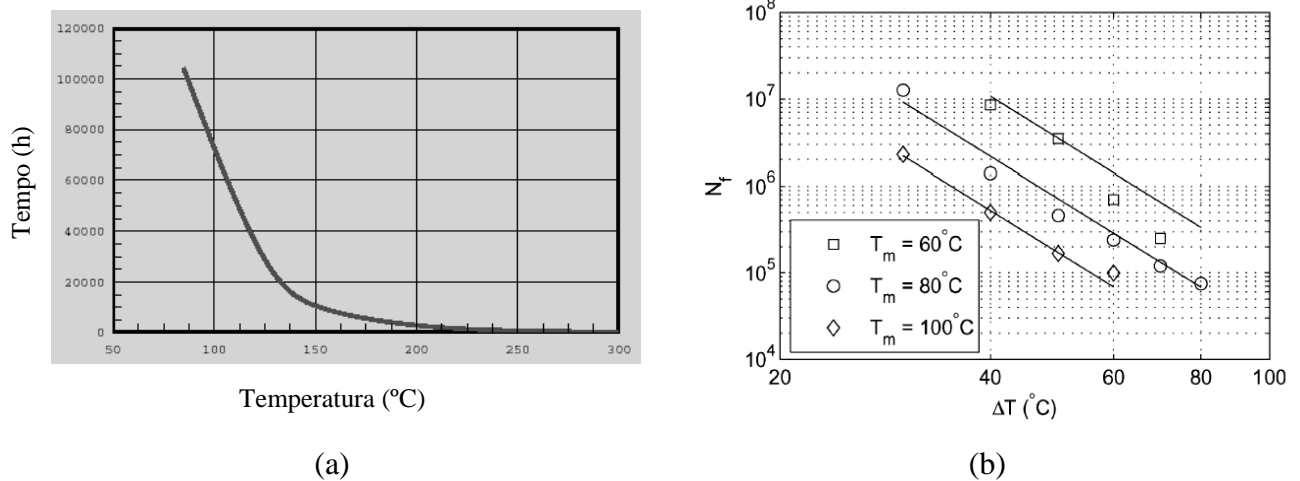


Figura 6.4. Exemplo de resultados de testes de envelhecimento acelerados por temperatura.

(a) Curva T_{max} (°C) x t (h), para $FA=1$. (b) Curva N_f x ΔT , para diferentes temperaturas máximas. [adaptado de Bryant et al, 2008]

A Tabela 6.9 apresenta alguns tipos de testes usuais, relacionados à confiabilidade e vida útil de inversores, onde é possível observar que muitos testes estão relacionados a ciclos térmicos e a exposição à temperatura elevada para acelerar efeitos de degradação (teste de envelhecimento acelerado por temperatura).

Tabela 6.9 - Alguns tipos de testes para equipamentos eletrônicos.

Sistema / Elemento	Mecanismo de falha	Teste acelerado
Gabinete e interconexões	Deformação mecânica, Ingresso de umidade, Corrosão, Ruptura de isolamento elétrico (<i>TDDB - Time Dependent Dielectric Breakdown</i>)	Ciclos térmicos (<i>TC</i>) Congelamento úmido (<i>HF</i>) Temperatura e umidade (<i>Damp Heat Test</i>), Degradação UV
Circuito impresso e solda	Incompatibilidade (<i>PCB / TCE Mismatch</i>), Eletromigração, Corrosão	Ciclos térmicos (<i>TC</i>), Umidade e congelamento (<i>HF</i>) Temperatura e umidade (<i>Damp Heat Test</i>)
Componentes passivos	Ruptura de isolamento elétrico (<i>TDDB</i>)	Umidade e congelamento (<i>HF</i>) Ciclos térmicos (<i>TC</i>), Degradação UV
Componentes ativos	Desgaste mecânico (<i>Wear-out</i>)	Ciclos térmicos (<i>TC</i>) Temperatura e umidade (<i>Damp Heat Test</i>) Exposição temperatura extrema, Ciclos de potência integrada
Circuitos integrados	Ruptura de isolamento elétrico (<i>TDDB</i>) Degradação (<i>HCI - Hot Carrier Injection</i>)	Ciclos térmicos (<i>TC</i>), Umidade e congelamento (<i>HF</i>) Temperatura e umidade (<i>Damp Heat Test</i>)

7 METODOLOGIA PARA SIMULAÇÃO DE SFCR

Para simulação de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR) são acoplados diversos modelos dos diversos componentes do sistema. Usualmente são utilizados modelos de dados climáticos, modelos de arranjos fotovoltaicos e modelos de inversores, acoplados conforme diagrama de blocos funcionais apresentados na Figura 7.1.

Nesta configuração com a entrada de dados climáticos de determinada região no modelo de arranjo fotovoltaico é possível simular a operação dos arranjos fotovoltaicos em diversas condições de radiação solar e temperatura ambiente e estimar a energia elétrica em corrente contínua entregue ao inversor.

No modelo de desempenho elétrico do inversor é possível, considerando a eficiência do seguimento do ponto de máxima potência e a eficiência de conversão CC-CA, determinar a potência em corrente alternada instantânea útil na saída do inversor. Integrando a potência no tempo pode-se estimar a produção de energia em corrente alternada que será entregue à rede.

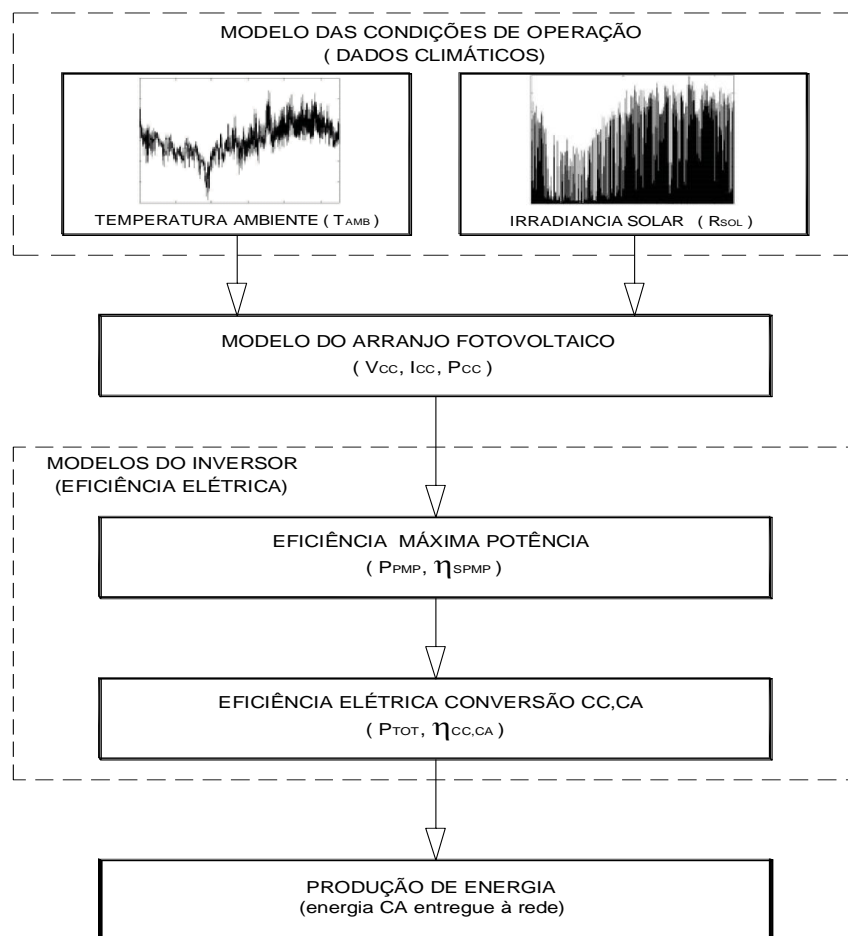


Figura 7.1 - Diagrama de blocos principais de um programa de simulação de SFCR.

7.1 Programas de simulação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede

O estudo dos diversos componentes do sistema fotovoltaico conectado à rede permite o desenvolvimento de modelos matemáticos do desempenho energético individual. Softwares de dimensionamento e simulação dinâmica utilizam estes modelos individuais de maneira acoplada para predição do desempenho energético global do sistema. De maneira geral estas avaliações energéticas permitem determinar a viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos conectados à rede.

7.1.1 Modelos de dados climáticos e arranjos fotovoltaicos

Programas de simulação de arranjos fotovoltaicos permitem estimar a potência elétrica instantânea e quantidade de energia acumulada em corrente contínua durante o período de interesse (normalmente um ano).

Inicialmente é definida a configuração geral do arranjo com módulos fotovoltaicos interligados eletricamente em série e paralelos, conforme características dos módulos disponíveis e características operacionais do inversor.

Usualmente estes programas de simulação de arranjos fotovoltaicos combinam dois modelos básicos, modelo de dados climáticos e modelo do arranjo fotovoltaico, conforme pode ser visto no diagrama apresentado na Figura 7.2.

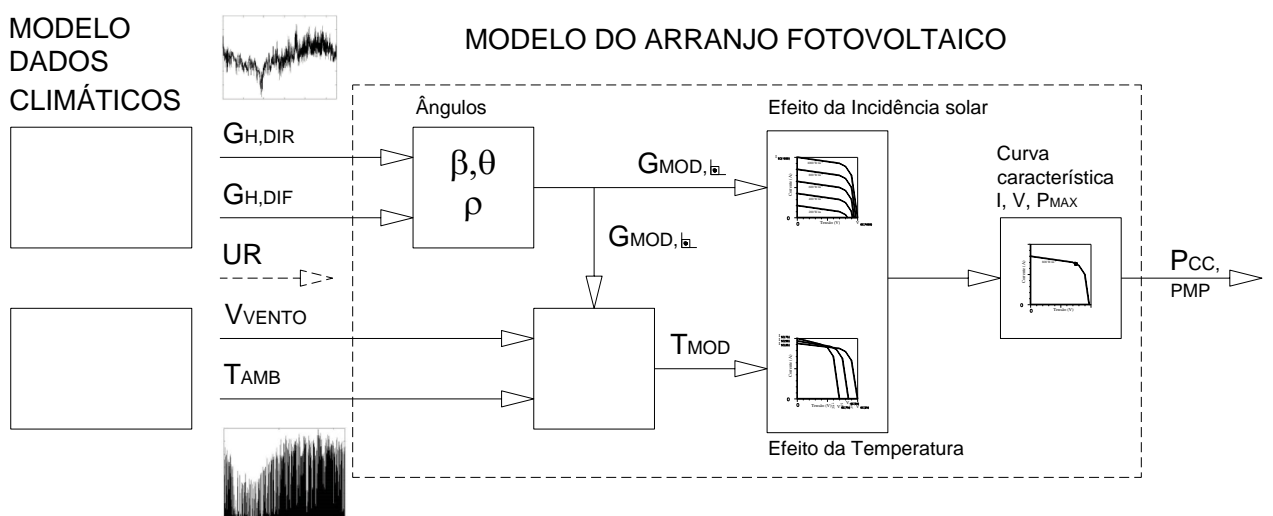


Figura 7.2 - Esquema funcional de programa de simulação de arranjos fotovoltaicos.

Arquivos de dados climáticos para simulações de sistemas fotovoltaicos apresentam dados como radiação solar (total, direta e difusa), temperatura ambiente, umidade do ar, velocidade do vento, etc. Estes arquivos de dados climáticos usualmente são formados por tabelas anuais totalizando 8760 horas no ano. Estes dados são apresentados em seqüências horárias de hora em hora, podendo eventualmente ser apresentados de minuto em minuto. Estes arquivos de dados são formados a partir de medições e registros obtidos em estações meteorológicas ou laboratórios de pesquisa. Existem muitos destes arquivos de dados climáticos catalogados na literatura para diversas cidades e localidades do mundo, pois são de uso corrente em programas gratuitos de simulação como *EnergyPlus* e *SAM*, do *NREL*. Na falta de dados reais medidos para determinada região, estes dados podem ainda serem sintetizados através de métodos estatísticos disponíveis em programas como o *Radiasol*, do *LABSOL*, *UFRGS*.

No modelo do arranjo fotovoltaico os dados climáticos de entrada são associados simultaneamente em seqüências horárias com os parâmetros físicos do arranjo fotovoltaico como o ângulo entre a superfície do módulo fotovoltaico e a horizontal, o ângulo de incidência da radiação solar e a refletividade angular do módulo, resultando assim na obtenção da radiação solar útil com incidência no módulo fotovoltaico. Com esta intensidade de radiação solar, com a velocidade do vento e com a temperatura ambiente pode-se ainda estimar a temperatura do módulo fotovoltaico. Por fim, considerando então o efeito combinado da intensidade de radiação solar e da temperatura do módulo é possível estimar a seqüência horária de curvas características I-V resultantes, instantâneas, com dados elétricos em corrente contínua (tensão, corrente, potência e ponto da máxima potência).

Há muitos softwares disponíveis para simulação de arranjos fotovoltaicos, como o *FVCONECT* do *LABSOL*, *UFRGS*, *EnergyPlus* e *SAM*, do *NREL*, *PVsystem* entre outros.

7.1.2 Modelos de inversores

Para avaliação do desempenho elétrico do inversor é possível, considerando a eficiência do seguimento do ponto de máxima potência e a eficiência de conversão CC-CA, determinar a potência em corrente alternada instantânea útil na saída do inversor. Integrando a potência no tempo pode-se estimar a produção de energia em corrente alternada que será entregue à rede.

Programas de simulação de inversores permitem estimar a potência elétrica instantânea e quantidade de energia acumulada em corrente alternada que será entregue à rede durante o período de interesse (normalmente um ano).

Inicialmente são definidas as características operacionais do inversor e fatores de dimensionamento conforme arranjo fotovoltaico.

Usualmente estes programas de simulação de inversores combinam três blocos funcionais básicos: modelo de eficiência do seguimento do ponto de máxima potência, modelo de eficiência de conversão CC-CA, modelo de saída de potência CA e totalização da energia CA entregue à rede, conforme pode ser visto no diagrama apresentado na Figura 7.3.

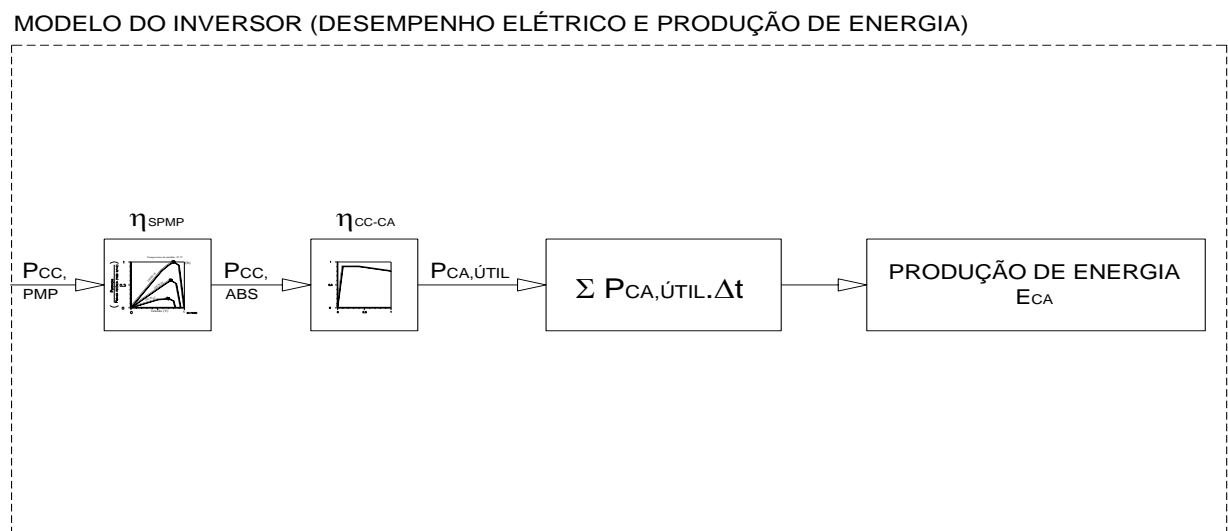


Figura 7.3 - Esquema funcional de programa de simulação de inversores.

7.1.3 Modelos de simulação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede

Usualmente programas de simulação de sistemas fotovoltaicos combinam os modelos dos componentes descritos anteriormente, conforme visto no diagrama funcional da Figura 7.4 (a). Frequentemente são utilizados modelos de dados climáticos, modelos de arranjos fotovoltaicos e modelos de inversores. Nesta configuração com a entrada de dados climáticos de determinada região no modelo de arranjo fotovoltaico é possível simular a operação dos arranjos fotovoltaicos em diversas condições de radiação solar e temperatura ambiente e estimar a energia elétrica em corrente contínua entregue ao inversor. No modelo de desempenho elétrico do inversor pode-se então estimar a produção de energia em corrente alternada que será entregue à rede.

7.2 Avanços em modelos de simulação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede

Alguns fatores como redução de capacidade do sistema devido ao aumento de temperatura de módulos fotovoltaicos já são bastante conhecidos. Modelos matemáticos que consideram o efeito da temperatura sobre o desempenho energético dos módulos fotovoltaicos são de uso corrente em softwares de simulação. Contudo usualmente não consideram o efeito da temperatura sobre o desempenho de inversores.

Esta tese apresenta um estudo sobre o efeito da temperatura sobre os inversores, avaliando eventual redução de desempenho energético devido às eventuais limitações necessárias para evitar superaquecimento e estimando efeitos sobre a durabilidade. Propõe-se a inclusão de novas funcionalidades no modelo do inversor.

Para isto foram desenvolvidos três modelos computacionais: modelo da eficiência elétrica com estimativa de perdas térmicas, modelo do comportamento térmico e modelo da análise de durabilidade, resultando no diagrama de blocos funcionais conforme apresentado nas Figuras 7.4 (b) e 7.5.

Nesta nova configuração através da simulação do comportamento térmico e das estratégias de arrefecimento será possível prever a temperatura de operação do inversor. Como já visto anteriormente sabe-se que a temperatura tem efeito direto na durabilidade de inversores, sendo assim possível avaliar de forma qualitativa e comparativa a durabilidade do inversor em diferentes situações de operação, com diferentes estratégias de arrefecimento, em diferentes regiões climáticas.

A partir de simulações de inversores com modelos elétricos e modelos térmicos acoplados espera-se também obter um refinamento na estimativa da produção de energia, avaliando o efeito da temperatura sobre a produtividade do inversor, estimando assim um “fator de desempenho eletro-térmico” que relacione as estratégias de arrefecimento e suas imposições de limitações, com a produção de energia em um longo tempo, com a vida útil do inversor, em diferentes condições de operação, de diferentes regiões e climas.

Existem hoje disponíveis no mercado inversores com alta eficiência conforme declarada pelo fabricante, quando operando em condições adequadas de temperatura. Com o modelo do comportamento térmico acoplado ao modelo de eficiência elétrica espera-se ser possível determinar um “fator de desempenho térmico” que relacione as estratégias de arrefecimento (e suas limitações) com a produção de energia (em um longo tempo) e a vida útil do inversor.

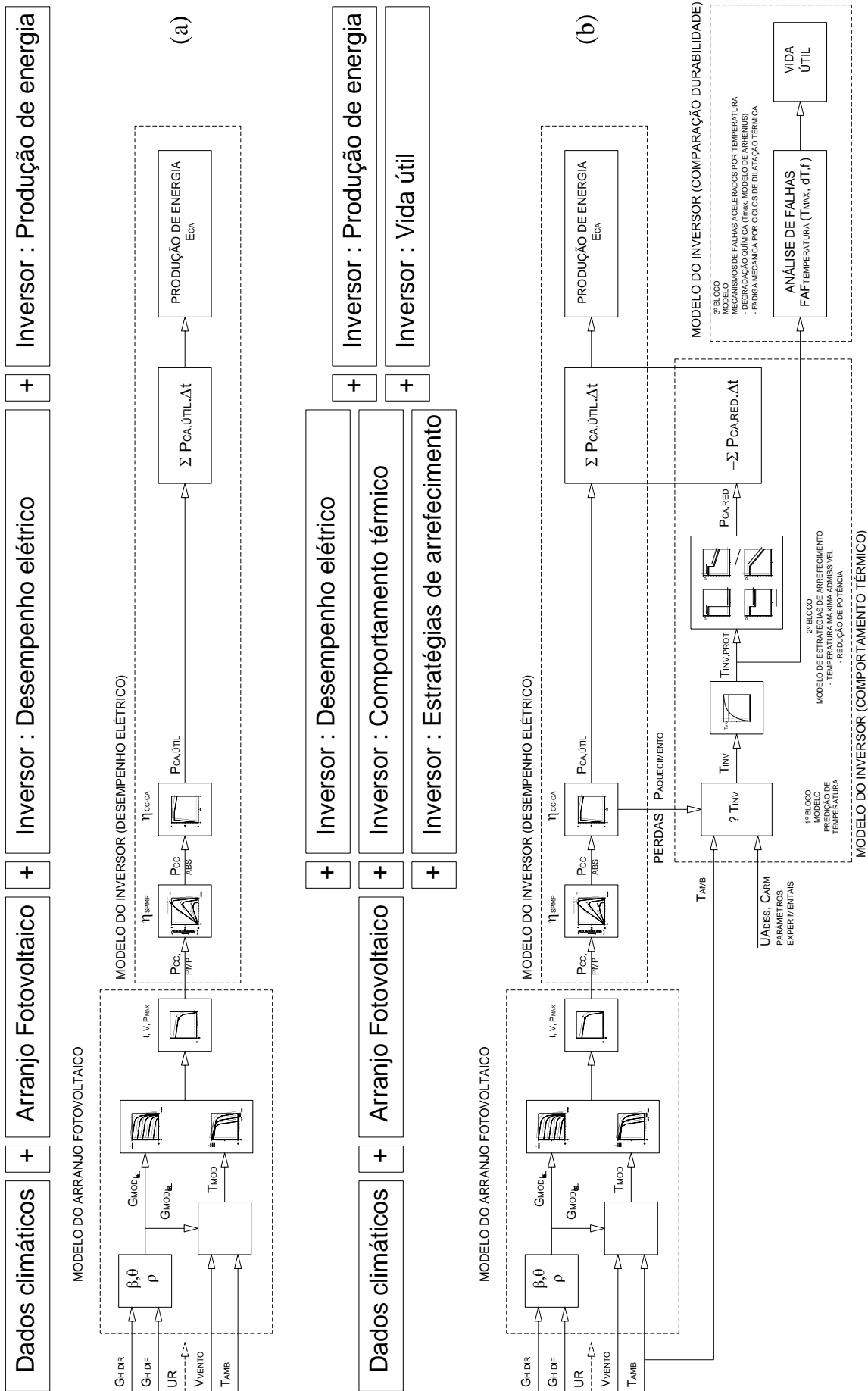


Figura 7.4 - Modelos de simulação de SFCR (a) modelos usuais, (b) modelo desenvolvido nesta tese.

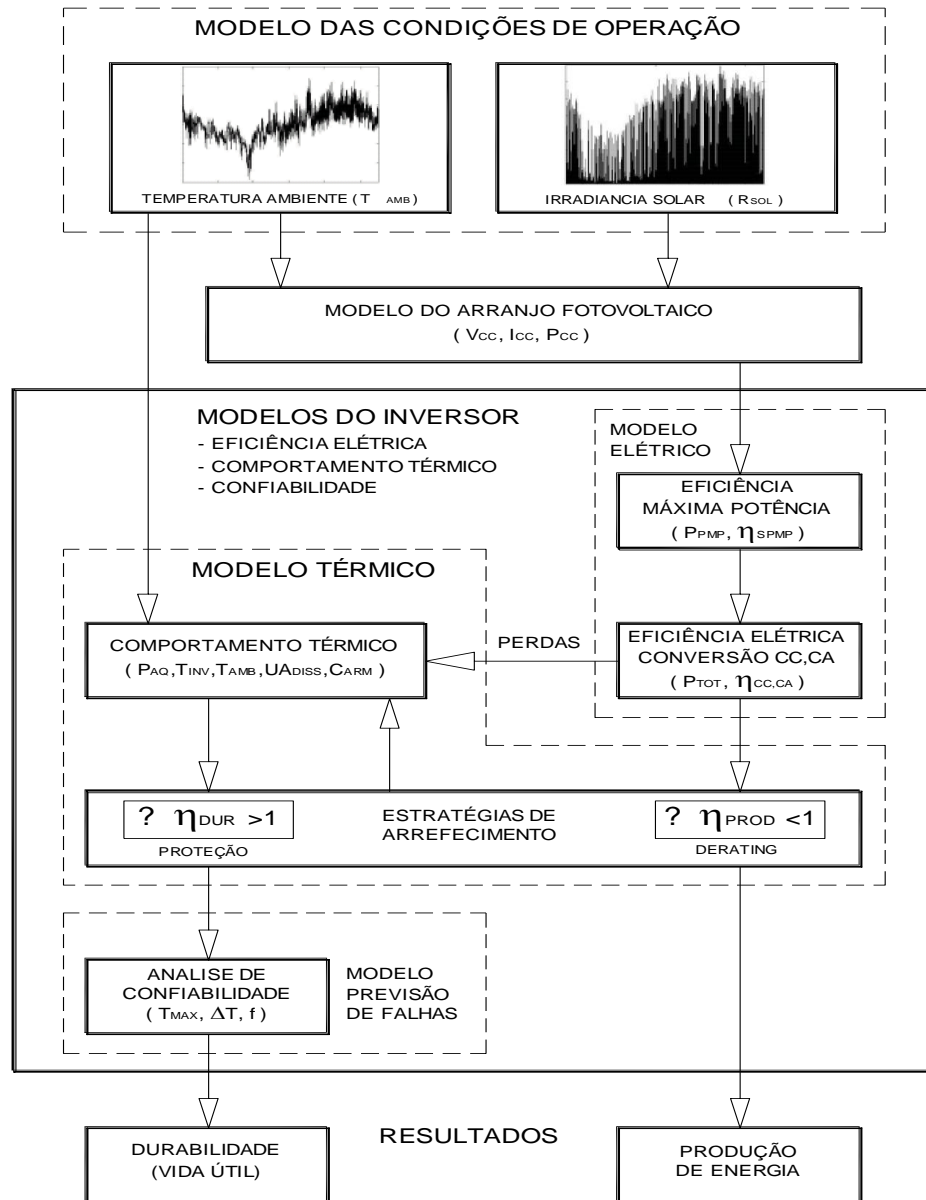


Figura 7.5 - Diagrama de blocos principais para novo programa de simulação de SFCR.

7.2.1 Resumo de etapas e modelos

O método utilizado para simulação energética e avaliação comparativa de durabilidade de inversores relacionado às condições de operação combinam os seguintes modelos:

- Modelo do arquivo climático com dados de temperatura ambiente e radiação solar;
- Modelo do arranjo fotovoltaico;
- Modelo de eficiência de conversão e desempenho elétrico do inversor;
- Modelo para simulação térmica do inversor em regime transiente;
- Modelo para simulação de operação em diferentes estratégias de arrefecimento;

- Modelo para estimativa comparativa de durabilidade do inversor;
- Modelo para estimativa da redução de produtividade devido à ativação das rotinas de arrefecimento e proteção térmica.

Inicia-se o processo de avaliação com a utilização do modelo de desempenho elétrico para determinação das perdas de energia e da potência responsável pelo aquecimento do inversor. Na sequência utiliza-se o modelo térmico para predição do perfil de temperatura de operação através de simulação em regime transiente, determinando assim o perfil de ciclos de temperatura.

Finaliza-se o processo com a utilização do modelo para avaliação comparativa da durabilidade e confiabilidade, através da estimativa de falhas relacionadas aos efeitos da temperatura sobre o inversor, avaliando o acúmulo de defeitos decorrentes dos ciclos das variações de temperatura e das ocorrências de picos de temperatura de operação.

7.2.2 Modelo do comportamento térmico

O modelo proposto para avaliação do comportamento térmico foi desenvolvido conforme conceitos apresentados anteriormente nos capítulos 4 e 5.

O primeiro bloco deste modelo consta de uma rotina incluída no modelo do desempenho elétrico do inversor capaz de determinar as perdas de energia responsáveis pelo aquecimento do inversor. No segundo bloco deste modelo térmico é possível prever a temperatura interna do inversor em diferentes condições de operação, a partir da potência de aquecimento. No terceiro bloco deste modelo térmico é possível simular diferentes estratégias de arrefecimento estabelecendo diferentes valores de temperatura limite.

Este modelo utiliza parâmetros térmicos do inversor que são determinados experimentalmente.

7.2.2.1 Determinação experimental de coeficientes térmicos

Para utilização dos modelos matemáticos, seja analítico ou numérico, desenvolvidos para avaliação do comportamento térmico, se faz necessário a determinação dos coeficientes térmicos concentrados “ $U_{A_{DISS}}$ ” (coeficiente concentrado de dissipação térmica entre o inversor e o ambiente) e “ C_{ARM} ” (capacidade concentrada de armazenamento térmico do inversor).

Internamente o inversor possui muitos componentes que contribuem para o aquecimento interno global do inversor. Para caracterização térmica geral do inversor é necessário definir um componente interno característico para representar a “temperatura concentrada do inversor” T_{INV} . Para este fim, propõe-se utilizar a temperatura do dissipador de calor do módulo de potência.

Para determinação destes parâmetros térmicos concentrados propõe-se a realização de experimentos capazes de medir os parâmetros térmicos e elétricos do inversor de interesse. Quando em teste, o sistema de medição e aquisição de dados da bancada de testes de inversores permite programar a realização de medidas de forma contínua, sequenciada em intervalos de tempos conhecidos. Mede-se de forma direta: o tempo entre medidas, a temperatura do inversor T_{INV} , a temperatura ambiente T_{AMB} , a potência de entrada do inversor em CC P_{CC} , a potência de saída do inversor em CA P_{CA} . A potência de aquecimento P_{AQ} é obtida de forma indireta, onde $P_{AQ} = P_{CC} - P_{CA}$

Uma vez realizados os testes, estes diversos parâmetros medidos são armazenados para pós-processamento. Para determinação dos coeficientes térmicos estes dados obtidos nos ensaios são ajustados às curvas do modelo analítico representado pela Equação 5.12, através do método dos mínimos quadrados.

7.2.3 Modelo para análise comparativa de durabilidade

O modelo proposto para previsão de falhas e avaliação comparativa de durabilidade foi desenvolvido conforme metodologia apresentada anteriormente no capítulo 6.

Com o modelo para análise de confiabilidade será possível comparar a expectativa de vida útil de inversores para diferentes estratégias de arrefecimento. Esta avaliação da durabilidade será realizada considerando a temperatura máxima de operação, os ciclos térmicos (frequência e variações de temperatura), dados estes de temperatura calculados pelo modelo térmico.

7.2.4 Utilização do modelo térmico do inversor

Uma vez determinados estes dois parâmetros térmicos concentrados “ UA_{DISS} ” e “ C_{ARM} ” os modelos matemáticos propostos (modelo analítico representado pela Equação 5.12 e do modelo numérico representado pela Equação 5.16) estarão aptos para predição da evolução da temperatura do inversor.

Com a implantação destes modelos em software de dimensionamento e simulação dinâmica de sistemas fotovoltaicos conectados à rede será possível estimar as perdas anuais de energia no inversor devido às limitações decorrentes das estratégias internas de gerenciamento térmico e proteção contra superaquecimento.

Futuramente quando em operação da usina fotovoltaica real pode-se também prever em tempo real, a partir da medida da temperatura instantânea do inversor, em que momento será esperado a redução da conversão de potência devido às limitações decorrentes das estratégias internas de gerenciamento térmico e proteção contra superaquecimento.

Estas informações resultantes, perdas anuais de energia em diferentes cenários poderá ser utilizado como critério de decisão quanto a utilizar sistema de arrefecimento e refrigeração caso seja positivo o balanço energético de energia produzida menos energia elétrica consumida pelo sistema de arrefecimento e ou refrigeração.

7.2.5 Metodologia do programa de simulação

As rotinas internas do programa podem ser descritas conforme segue:

Entrada de dados

- **Configuração geral do SFCR** (inversores, arranjo fotovoltaico, rede externa);
- **Dados técnicos dos equipamentos** fornecidos pelos fabricantes (inversores, arranjos fotovoltaicos);
- **Dados climáticos:** arquivos de dados climáticos da região de interesse obtidos na literatura, ou banco de dados do *Energy Plus*, ou dados sintetizados de forma estatística;
- **Identificação do tipo de estratégia de proteção e gerenciamento térmico do inversor.** O modelo do gerenciamento e proteção térmica permite selecionar o tipo da estratégia de arrefecimento e programar o ponto de temperatura máxima limite;
- **Parâmetros térmicos do inversor:** previamente determinados experimentalmente em ensaios de desempenho elétrico e comportamento térmico.

Rotinas de processamento interno

- **Modelo do arranjo fotovoltaico:** determina a potência elétrica disponível em corrente contínua, a partir dos dados de radiação solar incidente, temperatura ambiente, vento,

posição dos módulos do arranjo fotovoltaico, eficiência dos módulos fotovoltaicos, curva característica ;

- **Modelo de desempenho elétrico do inversor:** A partir da energia elétrica disponível no arranjo fotovoltaico, do ponto de carregamento e do efeito conjugada da eficiência do seguimento do ponto de máxima potência e da eficiência de conversão elétrica CC-CA, obtém-se a cada momento, a potência elétrica útil a ser entregue à rede. Integrando esta potência no tempo tem-se a energia elétrica útil acumulada. Simultaneamente, a partir do balanço de energia, pode ser determinada a perda de energia elétrica, a qual é transformada em energia térmica, sendo responsável pelo aumento de temperatura interna do inversor;
- **Modelo do comportamento térmico do inversor:** A partir desta potência de aquecimento e dos parâmetros térmicos concentrados “ UA_{DISS} ” e “ C_{ARM} ” é possível prever, a todo momento, a temperatura interna do inversor, gerando um série de valores de temperatura interna;
- **Modelo da estratégia de arrefecimento e proteção térmica:** Permite estabelecer o tipo de estratégia de arrefecimento e programar o ponto de temperatura máxima limite. Podem-se ainda avaliar os momentos onde ocorre redução total ou parcial da potência permitindo assim a possibilidade de integração no tempo para estimar a energia elétrica desperdiçada relacionada ao acionamento da estratégia de arrefecimento;
- **Modelo da análise de durabilidade:** A partir da série de valores de temperatura do inversor, faz-se uma seleção dos pontos determinando uma nova série de valores de temperatura somente com os pontos máximos e mínimos (picos e vales de temperatura). Esta série de picos e vales é então tratada a partir através do método *rainflow* descrito no capítulo 6. Finaliza estimando para estas condições de operação uma quantidade total de defeitos acumulados, a qual será utilizada para comparar a durabilidade com outras condições de operação.

Tipos de simulações

É possível realizar simulações combinando diversos fatores e cenários como:

- estratégias de arrefecimento e proteção térmica;
- configurações com diferentes fatores de dimensionamento do inversor;
- tipos de instalação de inversores;
- períodos de simulação;

- localidades e clima típico.

Resultados apresentados ao final da simulação

Ao final da simulação por um determinado período são apresentados resultados como:

- Gráfico horário das potências elétricas instantâneas CC e CA;
- Gráfico horário com valores de temperatura interna do inversor;
- Energia elétrica CA acumulada entregue à rede;
- Energia elétrica CC disponibilizada no arranjo fotovoltaico;
- Eficiência média de conversão CC-CA;
- Fator comparativo relacionado ao efeito da temperatura sobre a vida útil e durabilidade relativa do inversor;
- Redução de disponibilidade (perda de energia elétrica) relacionado ao acionamento de estratégias de arrefecimento (efeito da temperatura).

8 BANCADA DE ENSAIOS ELÉTRICOS E TÉRMICOS

8.1 Local da bancada de testes

A bancada de testes de inversores foi construída no Laboratório de Energia Solar LABSOL, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, no município de Porto Alegre, RS.

8.2 Características gerais da bancada de testes de inversores

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.

A Figura 8.1 mostra a 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.



Figura 8.1 - Vista parcial da bancada de teste de inversores.

A Figura 8.2 apresenta um diagrama de blocos com fluxos de energia entre os principais elementos da bancada de testes.

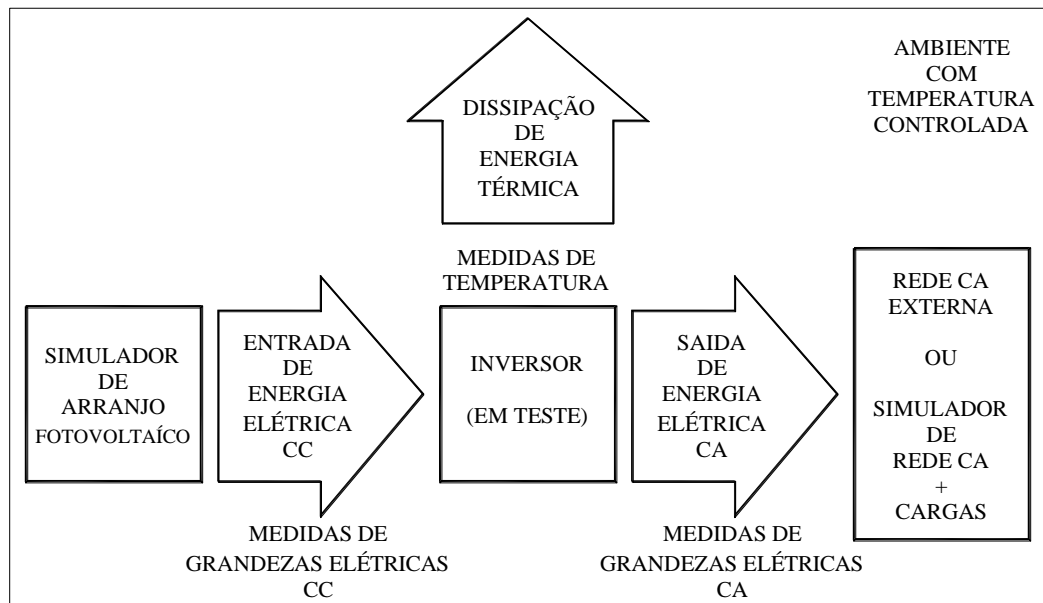


Figura 8.2 - Diagrama de blocos da bancada de testes dos inversores – Medidas e fluxos de energia.

8.3 Descrição dos principais componentes da bancada

Os componentes principais da bancada de testes de inversores são:

- Simulador de arranjos fotovoltaicos (fonte programável de corrente contínua);
- Simulador de rede CA externa (ou conexão direta à rede externa da concessionária);
- Simulador de carga RLC e cargas resistivas adicionais;
- Caixa de conexões, proteções elétricas;
- Medidores de grandezas elétricas (em corrente contínua e corrente alternada);
- Medidores de temperatura;
- Sistema de controle da bancada e aquisição de dados (medidas de grandezas elétricas e de temperatura);
- Sistema de climatização da sala (quente e frio).

A Figura 8.3 apresenta um esquema com principais componentes da bancada de testes e suas interligações elétricas em corrente contínua CC e corrente alternada CA.

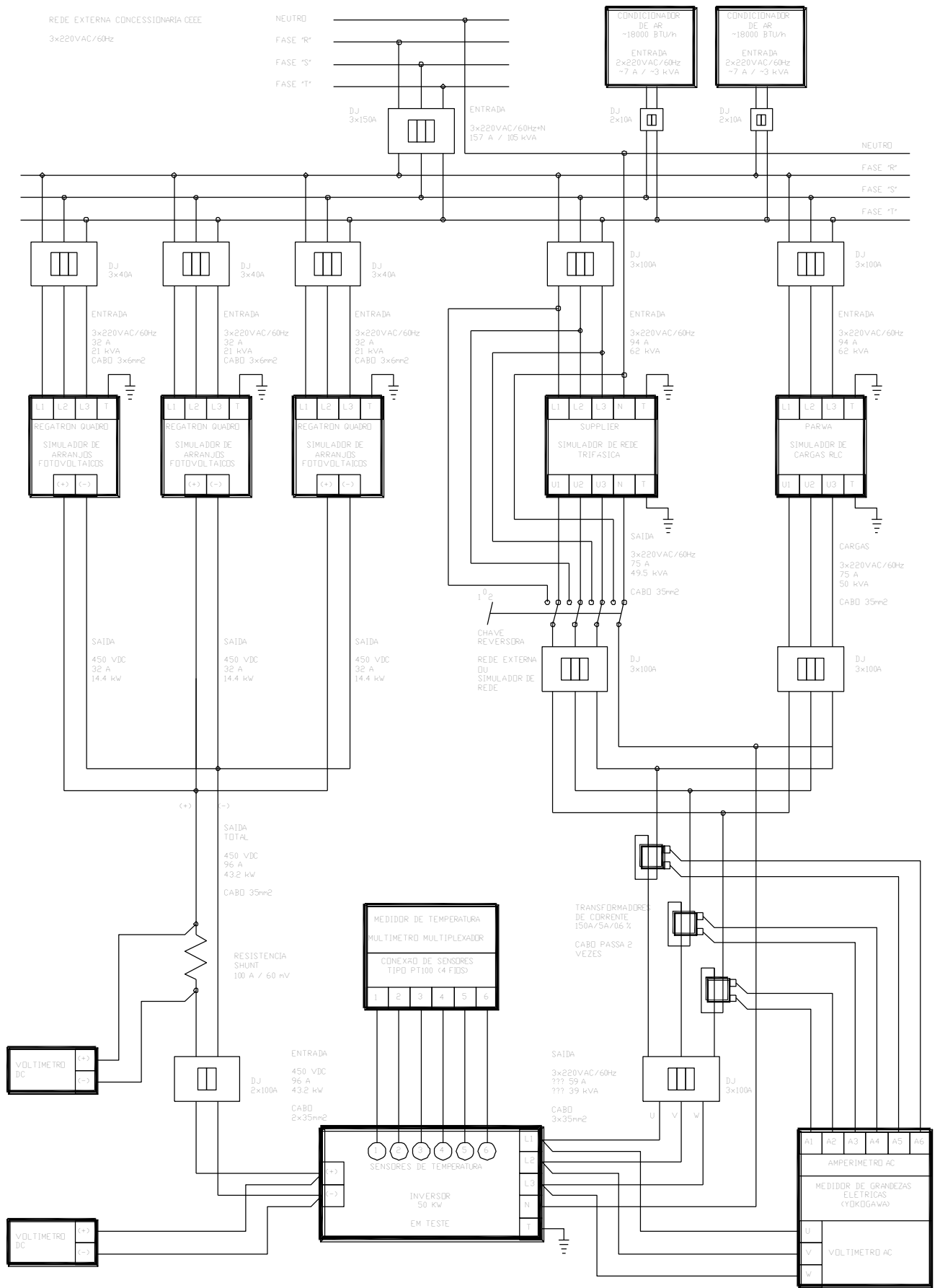


Figura 8.3 - Esquema da bancada de testes de inversores – Medições de grandezas térmicas e elétricas.

8.3.1 Simulador de arranjos de módulos fotovoltaicos

Para a simulação da energia elétrica em corrente contínua fornecida por módulos 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 fotovoltaicos 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. Permite realização de ensaios estáticos com parâmetros fixos, ou ensaios dinâmicos com parâmetros variáveis no tempo.

Três fontes Regatron TopCon, 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 8.4 apresenta a fonte simuladora de arranjos fotovoltaicos e o simulador de rede.



Figura 8.4 - Simulador de rede CA (à esquerda) e fonte simuladora de arranjos fotovoltaicos (à direita).

8.3.2 Simulador de rede CA externa

O simulador de rede CA fornece de forma programável tensão trifásica senoidal com baixa distorção harmônica. Possibilita programação de variação de tensão e da frequência em ampla faixa, programação de distúrbios e de harmônicas. Este simulador é fabricado pela Supplier, de Joinville - SC, modelo FCATQ 5000-44-15, 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 externa 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 a qualidade de energia em situações adversas.

8.3.3 Simulador de carga RLC (carga resistiva - indutiva – capacitiva)

Para realização de outros ensaios elétricos, tais como anti-ilhamento, é utilizado um equipamento simulador de 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 capacitivas de até 15 kVAr. Há ainda a possibilidade conectar uma combinação de cargas resistivas adicionais de até 50 kW (bateria de resistências com 25 elementos de 2 kW cada). A Figura 8.5 apresenta estes equipamentos e dispositivos.

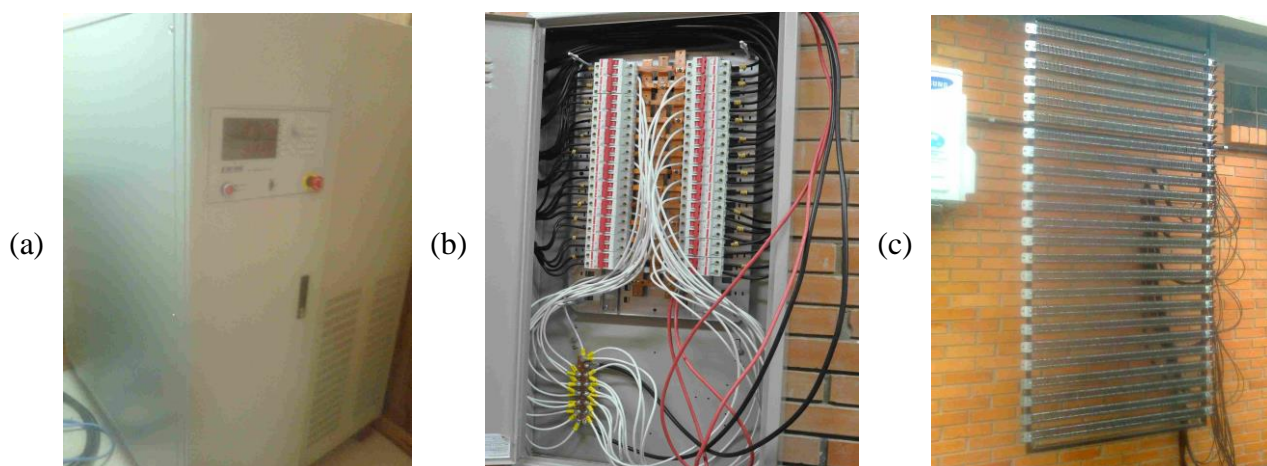


Figura 8.5 - (a) Simulador de carga RLC; (b) painel de ligações da carga resistiva adicional; (c) bateria de resistências da carga resistiva adicional.

8.3.4 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, conforme visto na Figura 8.6.

No interior desta caixa estão instalados os três transformadores de corrente utilizados para medida de corrente alternada nas três fases e o resistor shunt utilizado para medições de corrente contínua.

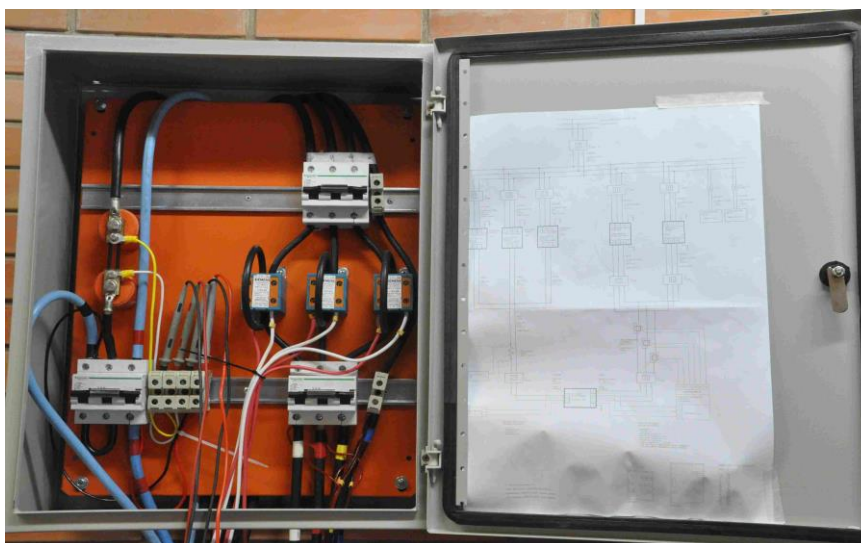


Figura 8.6 - Vista interna caixa de conexões e proteções elétricas.

8.3.5 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 8.1 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. A Tabela 8.2 apresenta as respectivas faixas de operação que podem ser selecionados na programação prévia dos ensaios.

8.3.6 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 patamares 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 aproximada 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.

8.4 Medição, programação e aquisição de dados

8.4.1 Grandezas medidas pela bancada de testes

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 8.1 e Figura 8.7), 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.

8.4.2 Programação e planejamento de testes

A bancada permite realização de ensaios com programação prévia do tempo e dos diversos parâmetros de teste. A Tabela 8.2 apresenta estes parâmetros e as respectivas faixas de operação que podem ser selecionados na programação prévia dos ensaios.

Tabela 8.1 - Configuração resumo do sistema de medição e aquisição de dados elétricos e térmicos.

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	
	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 (fase R)		V	Analisador de energia	Yokogawa / WT500	Porta serial USB	WTVIEWER	1
	Tensão (fase S)		V					
	Tensão (fase T)		V					
	Corrente (fase R)		A					
	Corrente (fase S)		A					
	Corrente (fase T)		A					
	Potência ativa (fase R)		W					
	Potência ativa (fase S)		W					
	Potência ativa (fase T)		W					
	Potência ativa total (3 fases)		W					
	Potência aparente total (3 fases)		VA					
	Fator de potência total (3 fases)		%					
	Frequência		Hz					
	Distorção Harmônica Total		%					
Pontos de medidas de temperatura no inversor (Figura 8.7)	Aleta do dissipador de calor	T1	°C	Multímetro multiplexador	Agilent / 34972 A	Porta serial USB	BenchVue	2
	Entrada de ar do dissipador de calor	T2	°C					
	Saída de ar do dissipador de calor	T3	°C					
	Transformador	T4	°C					
	Ar ambiente	T5	°C					
	Saída de ar do inversor	T6	°C					

Podem-se assim simular algumas condições de operação como: sombreamento temporário do arranjo fotovoltaico (simulando a passagem de nuvens), flutuações de 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).

Tabela 8.2 - Parâmetros programáveis para realização de 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)	300 a 600 V
Cargas na rede de corrente alternada (CA) (resistivas, indutivas, capacitivas)	0 a 15 kVA
Cargas na rede de corrente alternada (CA) (resistivas)	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 medidas armazenadas	elétrica > 2 s, térmica > 30 s

Para caracterização térmica do inversor inicialmente a bancada permite a instalação de sensores de temperatura em seis pontos de interesse no inversor, conforme apresentados na Figura 8.7 e descritos na Tabela 8.1.

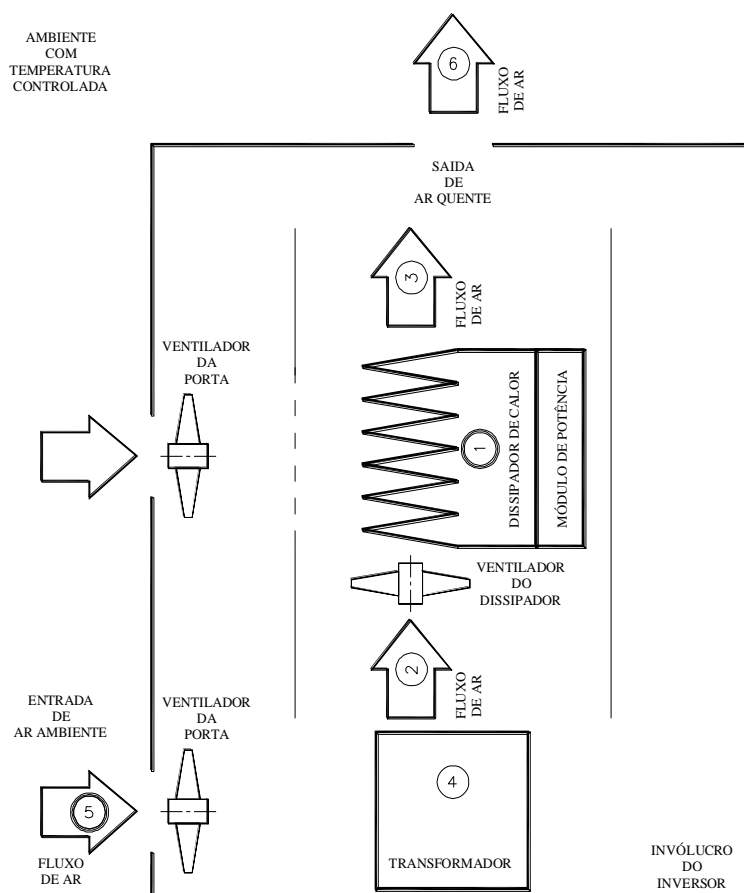


Figura 8.7 - Locais dos pontos de medições de temperatura do inversor.

8.4.3 Medições de grandezas elétricas e térmicas

8.4.3.1 Medição de grandezas elétricas - corrente contínua (CC)

Para medição das grandezas elétricas em corrente contínua são utilizados 2 multímetros Agilent modelo 34401. Um multímetro medindo diretamente a tensão CC, e o outro multímetro medindo a corrente elétrica CC de forma indireta através da medida queda de tensão em um resistor shunt. Na Figura 8.3 pode-se observar que a tensão efetiva sobre o inversor é medida após o resistor *shunt*, evitando que a queda de tensão causada pelo resistor *shunt* interfira.

Este sensor possui uma resistência elétrica fixa e conhecida. O resistor *shunt* tem objetivo de transformar a corrente elétrica a ser medida em um sinal correspondente de tensão que é facilmente medida pelo multímetro e/ou sistema de medição. O resistor *shunt* utilizado tem especificação 60 mV / 100 A, isto quer dizer que quando este resistor é submetido a uma corrente de 100 A, produz em seus terminais uma queda de tensão de 0,060 V. Indica também que a corrente máxima recomendável ao resistor *shunt* é de 100 A, e possui uma resistência de 0,0006 ohm. Este resistor *shunt* produz em seus terminais uma variação de tensão linear com a variação de corrente numa proporção de 0,6 mV gerado por cada Ampere circulante (0,0006 V/A). A Figura 8.8 apresenta um esquema ampliado desta ligação.

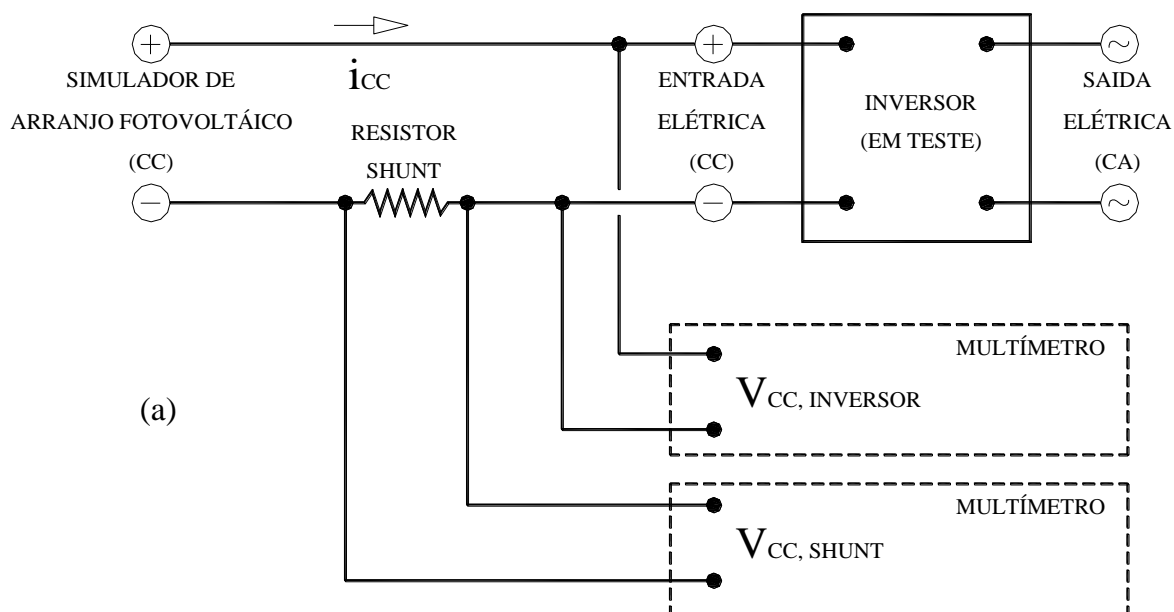
A medida da potência elétrica em corrente contínua absorvida pelo inversor é obtida pelo produto da tensão CC e da corrente medida CC. A perda de potência causada pelo resistor *shunt* é de no máximo 6 W (0,060 V x 100 A = 6 W).

8.4.3.2 Medição de grandezas elétricas – corrente alternada (CA)

Para medição das grandezas elétricas em corrente alternada é utilizado um analisador de energia elétrica da Yokogawa modelo WD500 *Power Analyzer*. O esquema de ligação pode ser visto na Figura 8.3 e Figura 8.9.

A medida de tensão em corrente alternada das 3 fases é feita diretamente e simultaneamente conectada a entrada de tensão do analisador de energia.

A medida da corrente elétrica em corrente alternada das 3 fases é feita através de três transformadores de corrente, fabricante Siemens, modelo 4NF01 21-2JC2, faixa 150/5 A (corrente nominal primária 150 A, corrente secundária 5 A), carga nominal 2,5 VA, classe exatidão 0,6%.



$$P_{CC,INVERSOR} (W) = V_{CC,INVERSOR} (V) * i_{CC, INVERSOR} (A) = V_{CC,INVERSOR} (V) * V_{CC,SHUNT} (V) / 0,0006$$



Figura 8.8 - Medição de tensão CC, corrente elétrica CC e potência CC;

(a) esquema de ligação; (b) resistor shunt; (c) multímetros.

Para aumentar a sensibilidade da relação de corrente de 150/5 A para 75/5 A, o cabo faz um *loop* passando duas vezes no interior do transformador de corrente, conforme visto na Figura 8.9(a).

As grandezas elétricas CA medidas são: tensão de cada fase, corrente de cada fase, potência de cada fase, potência total, fator de potência total.



(a)



(b)

Figura 8.9 - Medição de grandezas elétricas CA nas três fases (tensão, corrente, potência, fator de potência): (a) transformadores de corrente; (b) analisador de energia WD500.

8.4.3.3 Medição de temperatura

Para realização das medidas de temperatura e caracterização térmica do inversor inicialmente foram instalados sensores de temperatura em seis pontos de interesse no inversor conforme já apresentado na Figura 8.7 e Tabela 8.1.

Os sensores de temperatura utilizados são do tipo termorresistência de platina, Pt100 classe A, montados em encapsulamento metálico, com cabos de extensão apropriado para ligação a 4 fios.

Antes da utilização os sensores de temperatura foram previamente calibrados. Para aferição utilizou-se um banho térmico de temperatura ajustável, apresentado na Figura 8.10. Este equipamento consta basicamente em uma cuba com água, agitador para homogeneização da temperatura da água, aquecedor elétrico, acionado por controlador eletrônico de temperatura. Este banho térmico permite que se possam programar patamares fixos de temperatura. Todos os sensores de temperatura foram aferidos simultaneamente com um termômetro de excelente qualidade (tipo de vidro com coluna de mercúrio, com resolução de $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$), e ainda através do termômetro eletrônico do próprio banho térmico. Mergulharam-se estes sensores, juntamente com o termômetro, em um bloco de alumínio (Figura 8.10.b), dentro da cuba com água. Calibraram-se os respectivos sensores tipo termopar na faixa de interesse deste trabalho, entre 20 e $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Mede-se no termômetro de mercúrio a temperatura do banho térmico e o respectivo valor medido por cada Pt100. Registram-se os diversos dados medidos e monta-se a tabela

com valores das temperaturas medidas e curvas de calibração para compensação de erros de sensores que serão utilizados durante os ensaios.

Para coleta e armazenamento das medidas efetuadas utilizou-se um multímetro de alta precisão, 6 ½ dígitos, alta estabilidade, com filtros para rejeição de ruídos, fabricante Agilent, modelo 34972 A LXI *Data Aquisição*. Este sistema de aquisição de dados permite a medição da temperatura de forma quase simultânea dos seis pontos de interesse.

Considerando o conjunto formado pelos sensores de temperatura Pt100 e pelo sistema de medição, assim como os procedimentos de calibração adotados são esperadas medidas de temperatura com incerteza de $\pm 0,06$ °C.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 8.10 - (a) Banho termostático com controle eletrônico de temperatura para aferição de sensores de temperatura, fabricante Lauda, aberto desligado; (b) bloco de alumínio, (c) Banho termostático, fechado em operação, termômetro adicional de mercúrio, calibrando sensores dentro de bloco de alumínio, dentro de banho maria, com multímetro multiplexador; (d) cartão de conexões da placa de aquisição de dados.

8.4.4 Sistema de controle, aquisição de dados e pós-processamento

8.4.4.1 Sistema de controle da bancada de teste de inversores

Para controle do simulador de arranjos fotovoltaicos utiliza-se o software *SASControl* (*Solar Array Simulation Control*) da *Regatron AG*. Este software é particularmente adaptado para necessidades de testes de inversores. Possui uma área de programação em linguagem descritiva, onde é possível programar rotinas com ações, condições e seqüências de simulações. Possui uma rotina de programação para realização de ensaios e testes padronizados para medição de eficiência estática e dinâmica do seguimento de máxima potência, conforme norma EN50530.

Este programa *SASControl* possui um módulo que permite a seleção, visualização e aquisição de dados de algumas variáveis de interesse como:

- Tensão elétrica CC;
- Corrente elétrica CC;
- Potência elétrica CC.

Para controle do simulador de rede externa CA utiliza-se o software do fabricante *Supplier*, onde é possível programar a variação de tensão e da frequência em ampla faixa, programação de distúrbios e de harmônicas.

Para controle do simulador de cargas RLC utiliza-se o software do fabricante *Parwa*, permitindo programar a simulação de cargas na saída do inversor, interligando de forma gradual cargas resistivas, indutivas e capacitivas.

8.4.4.2 Sistema de aquisição de dados

Todos os equipamentos eletrônicos e instrumentos de medição são interligados a dois computadores, onde se podem definir as condições gerais para aquisição, registro e pós-processamento de dados. Podem-se definir parâmetros de operação, programação de ações, ranges e unidades das variáveis, escalas de gráficos, tempos entre medidas subsequentes, sincronização do início das medidas, etc

Inicialmente os dados são armazenados em diferentes formatos. No software *BenchVue* os dados podem ser exportados diretamente em planilhas formato Excel. No software do *WTViewer* os dados são armazenados em arquivos “.csv” (caracteres separados por vírgula), que posteriormente também são convertidos em planilhas formato Excel.

O software *BenchVue* da *Keysight Technologies* foi utilizado para aquisição dos dados medidos com multímetros da Agilent. A conexão para comunicação entre multímetros e computador é feita através de cabos apropriados para portas USB e GPIB. O software é prático, intuitivo, rápido, seguro, de fácil implantação com rápido reconhecimento dos medidores conectados. Permite medida, registro e visualização de diversos multímetros simultaneamente, exporta com rapidez dados medidos para planilhas padrão Excel.

O software *WTViewer* da Yokogawa foi utilizado para aquisição de dados medidos pelo analisador de energia WT500. A conexão para comunicação entre analisador e computador feita através de cabo apropriado para porta serial RS-232.

8.4.4.3 Pós-processamento de variáveis medidas

Conforme já visto, a Tabela 8.1 apresenta um resumo das variáveis primárias medidas de forma direta durante os ensaios de inversores. Nesta tabela é possível ver as variáveis que são armazenadas em arquivos tipo planilha Excel no *BenchVue* e no *WTViewer*. Todos estes dados, armazenados em diferentes planilhas, possuem a data e hora da medida permitindo a sincronização no tempo e pós-processamento. No pós-processamento podem-se gerar gráficos para observar comportamento de variáveis durante ensaios, e ainda determinar valores como:

- corrente elétrica CC na entrada do inversor;
- potência elétrica CA na saída do inversor;
- eficiência total de conversão de energia durante os ensaios;
- eficiência do seguimento ponto de máxima potência;
- variações de temperatura interna do inversor;
- coeficiente concentrado de dissipação térmica do inversor com o ambiente, UA_{DISS} ;
- capacidade concentrada de armazenamento térmico do inversor, C_{ARM} .

8.4.5 Sistema de controle de temperatura ambiente

O sistema de controle de temperatura da sala (temperatura ambiente do inversor) é controlado por dois condicionadores de ar. A escolha da temperatura ambiente a qual se deseja realizar os testes é programada manualmente no próprio condicionador de ar.

Uma vez acionado o sistema de climatização este ajusta automaticamente a temperatura da sala. Para os testes iniciais, já realizados, foram utilizados os seguintes patamares de temperatura ambiente: 20 °C, 30 °C, 40 °C, 50 °C.

9 RESULTADOS DE EXPERIMENTOS E SIMULAÇÕES

Foram 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.

A Figura 9.1 apresenta vistas do inversor de potência nominal CA de 50 kW, trifásico, próprio para conexão à rede, onde é possível visualizar componentes internos principais.



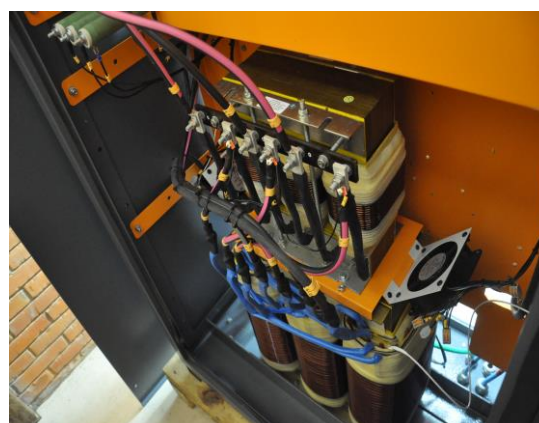
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 9.1 - Vistas internas e externas de um inversor trifásico de 50 kW (a) Vista geral externa do inversor (gabinete, painel de comando e ventiladores), (b) Vista geral interna do inversor (módulo de potência, ventiladores, módulo de comando, transformador), (c) Vista traseira interna (capacitores), (d) Vista traseira interna (transformador, indutores, ventiladores).

Segue descrição dos ensaios elétricos e térmicos realizados em condições variadas de tensão CC e temperatura ambiente da sala do inversor para determinar comportamento térmico e elétrico em diferentes condições de temperatura ambiente.

9.1 Resultados experimentais – comportamento elétrico e térmico do inversor

Para validação da bancada de ensaios desenvolvida e para planejamento da metodologia experimental foram realizados alguns testes preliminares com um inversor. Este inversor ensaiado faz parte do primeiro lote de inversores que estão sendo desenvolvidos e produzidos pela Schneider Electric / CP Eletrônica, que farão parte de uma usina fotovoltaica conectada à rede a ser instalada em Porto Alegre – RS.

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

Nestes ensaios realizados foram medidos parâmetros de desempenho elétrico simultaneamente às medidas de temperatura de alguns componentes internos do inversor, conforme variáveis descritas na Tabela 6.1.

Para caracterização da temperatura do inversor foi utilizada a temperatura do dissipador do módulo de potência T(1). Para caracterização da temperatura ambiente foi utilizada a temperatura do ar na entrada do ar de arrefecimento na porta do inversor T(5), conforme esquema Figura 8.7.

9.1.1 Medidas realizadas no ensaio 1

A fonte Regatron foi programada para fornecer alimentação elétrica em corrente contínua simulando um arranjo fotovoltaico na entrada do inversor com as características apresentadas na Figura 9.2 e Tabela 9.1.

Exemplo de programação do simulador de arranjo fotovoltaico: Alimentação CC fornecida durante três horas (22,7 kW na primeira hora, 45,4 kW na segunda hora, 22,7 kW na terceira hora), inversor desligado nas próximas três horas. Duração do teste de 6 h, conforme Figura 9.2. As medidas elétricas foram feitas e armazenadas a cada dois segundos durante as primeiras três horas do teste.

As medidas de temperatura realizadas e armazenadas a cada minuto durante as seis horas de teste são apresentadas na Figura 9.3, onde pode-se observar que a temperatura T_{INV}

(T1 - temperatura do dissipador) atingiu o máximo de 57,5 °C (em $t \sim 2$ horas), a temperatura T_{AMB} (T5 - temperatura ambiente) permaneceu quase constante próxima a 22,2 °C (variando entre 21,1 e 23,6 °C). O pico de temperatura de 73,3 °C ocorreu no transformador (T4) ao final da segunda hora de teste.

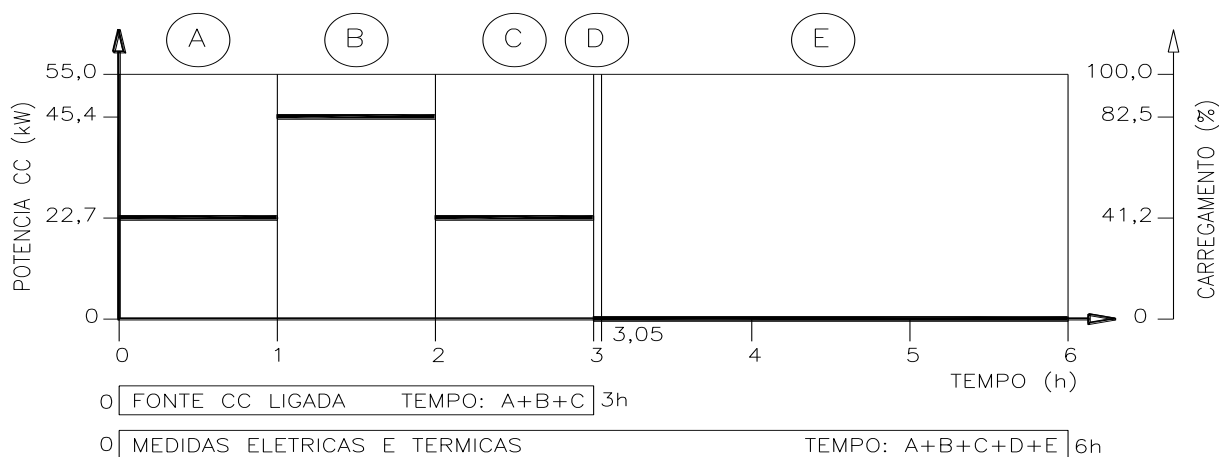


Figura 9.2 - Curva de planejamento do ensaio de inversor (patamares, tempos, carregamentos, características de operação do inversor, medições elétricas e térmicas).

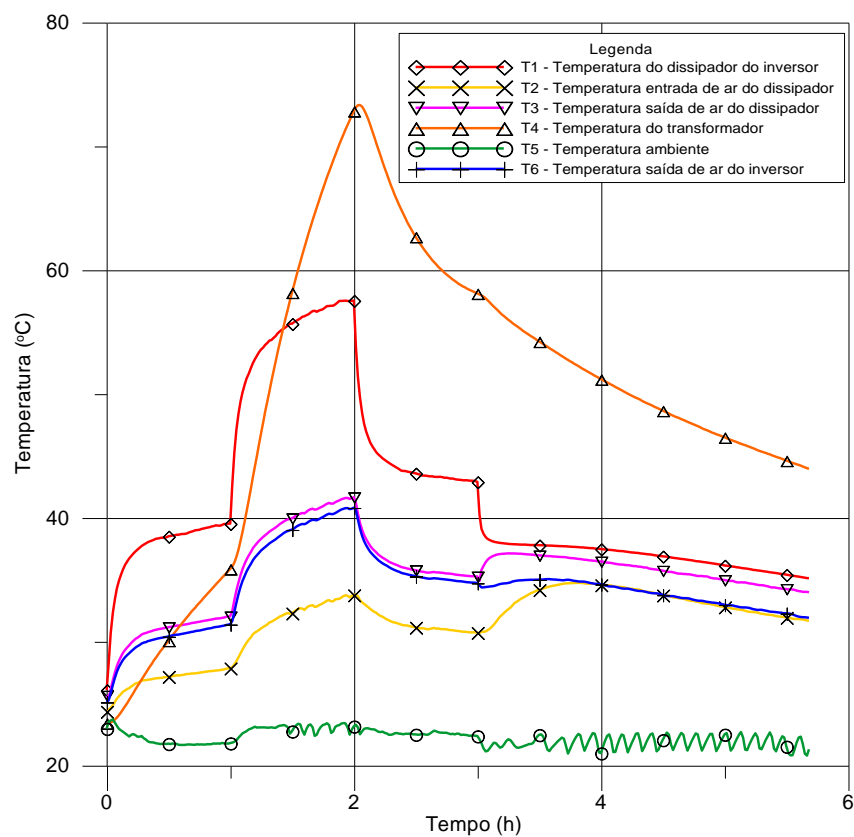


Figura 9.3 - Curva da variação da temperatura com o tempo durante primeiro ensaio (medidas nos seis pontos do inversor, conforme Figura 8.7).

As Tabelas 9.1 a 9.7 mostram um resumo dos dados programados e resultados obtidos neste teste inicial.

Tabela 9.1 - Curva de programação do ensaio 1 – alimentação elétrica do inversor CC (patamares, tempos e carregamentos programados na fonte simuladora de arranjo fotovoltaico).

Parâmetro	Patamar	A	B	C	D	E
Tempo	hora	$0 < t < 1$	$1 < t < 2$	$2 < t < 3$	$3 < t < 3,05$	$3,05 < t < 5,68$
Carregamento do inversor	%	41,2	82,5	41,2	0	0

Tabela 9.2 - Dados elétricos programados – alimentação elétrica do inversor CC (energia CC disponibilizada pela fonte simuladora de arranjo fotovoltaico).

Parâmetro	Patamar	A	B	C	D	E
V_{PMP}	V (CC)	499,2	499,2	499,2	0	0
I_{PMP}	A (CC)	45,528	91,056	45,528	0	0
P_{PMP}	W (CC)	22728	45456	22728	0	0

Tabela 9.3 - Dados elétricos medidos - eficiência de seguimento de máxima potência (energia CC nominal fornecido pela fonte para energia CC capturado pelo inversor).

Parâmetro	Patamar	A	B	C	D	E
η_{SPMP}	%	98,1	98,9	98,1	---	---
$P_{CC, MÉDIA}$	W (CC)	22298	44974	22304	0	0

Tabela 9.4 - Dados elétricos medidos - eficiência de conversão do inversor (CC capturado pelo inversor para CA injetado na rede).

Parâmetro	Patamar	A	B	C	D	E
$\eta_{CONV,CC,CA}$	%	91,7	93,9	91,7	---	---
$P_{CA, MÉDIA}$	W (CA)	20444	41868	20454	0	0
$P_{AQ, MÉDIA}$	W (térmico)	1854	3106	1850	0	0

Tabela 9.5 - Dados elétricos medidos - eficiência de global do inversor (energia CC disponível no arranjo fotovoltaico e energia de saída CA para rede).

Parâmetro	Patamar	A	B	C	D	E
η_{GLOBAL}	%	89,9	92,9	89,9	---	---

Tabela 9.6 - Dados térmicos medidos e condições de operação.

Local	Patamar	A	B	C	D	E
Inversor	processo	aquecimento	aquecimento	aquecimento	arrefecimento	arrefecimento
	temperatura início / fim	26,1/39,5 °C	42,7/57,5 °C	53,8/42,9 °C	40,2/39,1 °C	38,7/35,1 °C
	ventilador	ligado	ligado	ligado	desligado	desligado
Ambiente	temperatura	média 22,2 °C (variando entre 21,1 e 23,6 °C)				

9.1.1.1 Modelo térmico resultante no ensaio 1

Após a realização das medidas, foram determinados os parâmetros (Tabela 9.7) para ajustar o modelo analítico do comportamento térmico do inversor, correspondente a Equação 5.12, aos resultados experimentais. Como este inversor utiliza ventilação forçada, a qual fica acionada sempre que o inversor está em funcionamento, têm-se dois coeficientes concentrados de dissipação térmica, um para condição de inversor/ventilação ligados e outro para a condição de inversor/ventilação desligados.

Utilizando a temperatura ambiente média de 22,2 °C (Tabela 9.6) e as potências de aquecimento 1854 W, 3016 W, 1850 W (conforme Tabela 9.4) obteve-se o coeficiente concentrado de dissipação térmica entre o inversor e o ambiente $UA_{DISS,VL} = 92 \text{ W/}^\circ\text{C}$ (durante o processo de aquecimento, com ventiladores ligados) e $UA_{DISS,VD} = 1,2 \text{ W/}^\circ\text{C}$ (durante o processo de arrefecimento, com ventiladores desligados). Obteve-se também a capacidade concentrada de armazenamento térmico do inversor $C_{ARM} = 50400 \text{ J/}^\circ\text{C}$ (14 Wh/°C).

Tabela 9.7 - Resultados obtidos - Parâmetros térmicos determinados experimentalmente no ensaio 1.

Coefficiente concentrado	Patamar	A	B	C	D	E
Dissipação térmica	convecção	forçada				natural
	UA_{DISS}	92 W/°C				1,2 W/°C
Armazenamento térmico	C_{ARM}	50400 J/°C (14 Wh/°C)				

Substituindo parâmetros determinados UA_{DISS} e C_{ARM} na Equação 5.12, que representa o modelo matemático analítico proposto, pode-se avaliar a variação da temperatura neste inversor em duas situações de operação.

Para momentos com **ventiladores** do módulo de potência e da porta do gabinete **ligados**, pode-se utilizar a Equação 9.1

$$T_{INVERSOR}(t) = T_{AMBIENTE}(t) + \frac{T_{INVERSOR, inicial}(t=0) - T_{AMBIENTE}(t) + \frac{P_{AQ}(t)}{92}}{\exp\left(\frac{92}{14}t\right)} \cdot \left[1 - \frac{1}{\exp\left(\frac{92}{14}t\right)}\right] \quad (9.1)$$

Para momentos com **ventiladores** do módulo de potência e da porta do gabinete **desligados**, pode-se utilizar a Equação 9.2

$$T_{INVERSOR}(t) = T_{AMBIENTE}(t) + \frac{T_{INVERSOR, inicial}(t=0) - T_{AMBIENTE}(t) + \frac{P_{AQ}(t)}{1,2}}{\exp\left(\frac{1,2}{14}t\right)} \cdot \left[1 - \frac{1}{\exp\left(\frac{1,2}{14}t\right)}\right] \quad (9.2)$$

Substituindo parâmetros determinados UA_{DISS} e C_{ARM} na Equação 4.23, que representa o modelo matemático numérico proposto, pode-se avaliar a variação da temperatura neste inversor em duas situações de operação.

Para momentos com **ventiladores** do módulo de potência e da porta do gabinete **ligados**, pode-se utilizar a Equação 9.3

$$T_{INVERSOR}^{p+1} = T_{INVERSOR}^p + \left[\frac{P_{AQ}^p - 92 \cdot (T_{INVERSOR}^p - T_{AMBIENTE}^p)}{14} \right] \cdot [t^{p+1} - t^p] \quad (9.3)$$

Para momentos com **ventiladores** do módulo de potência e da porta do gabinete **desligados**, pode-se utilizar a Equação 9.4

$$T_{INVERSOR}^{p+1} = T_{INVERSOR}^p + \left[\frac{P_{AQ}^p - 1,2 \cdot (T_{INVERSOR}^p - T_{AMBIENTE}^p)}{14} \right] \cdot [t^{p+1} - t^p] \quad (9.4)$$

A Figura 9.4 apresenta a evolução da temperatura do inversor e da temperatura ambiente durante o ensaio 1. Apresenta também a curva resultante obtida via modelo proposto para avaliação da variação da temperatura, conforme equações 9.1 e 9.2.

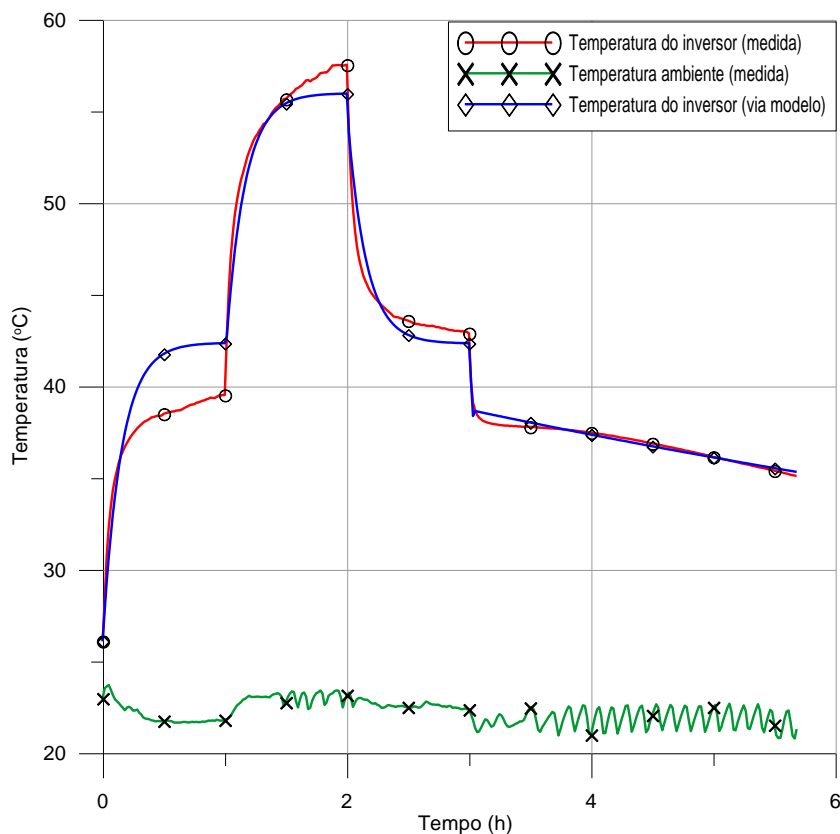


Figura 9.4 - Medições térmicas durante ensaio 1 (medidas das temperaturas do inversor e ambiente) e curva do modelo proposto para predição da temperatura do inversor.

9.1.2 Medidas realizadas no ensaio 2

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 82,5 % da potência nominal do inversor), conforme Figura 9.5 e Tabela 9.8. Os sensores de temperatura mediram a evolução das temperaturas a uma taxa de uma varredura a cada três minutos. Decorridas às cinco horas 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 ensaio programados, as medidas realizadas e resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 9.8 a 9.12.

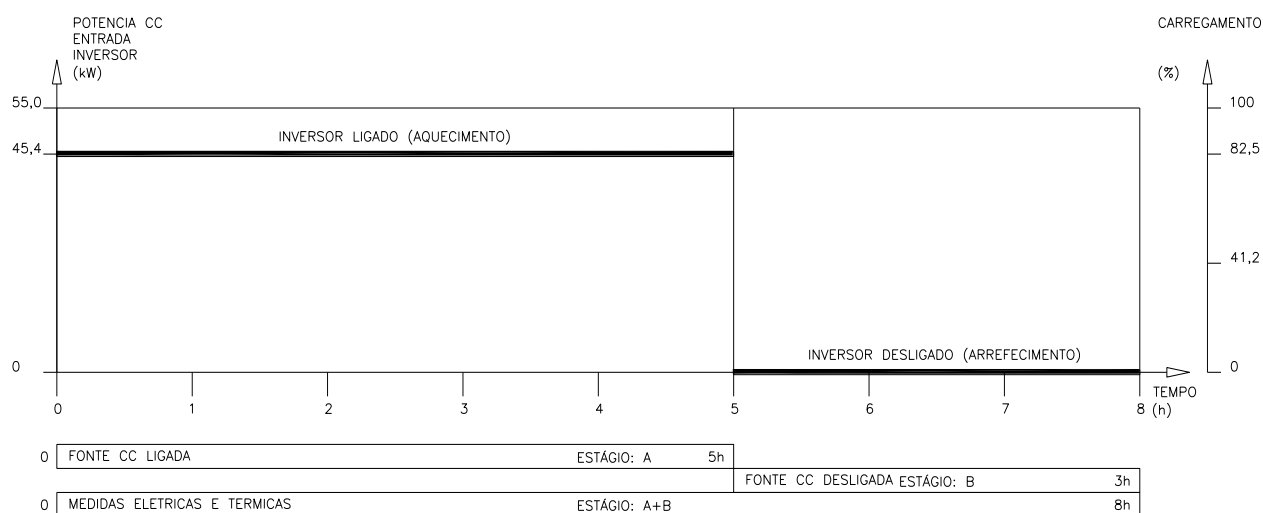


Figura 9.5 - Curva de planejamento do ensaio de inversor (patamares, tempos, carregamentos, características de operação do inversor, medições elétricas e térmicas).

Tabela 9.8 - Curva de programação do ensaio 2 – alimentação elétrica do inversor CC (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	%	82,5	0

Tabela 9.9 - Dados elétricos programados – alimentação elétrica do inversor CC (potência CC disponibilizada pelo simulador de arranjo fotovoltaico).

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

Tabela 9.10 - Dados elétricos medidos - eficiência de seguimento de máxima potência (potência CC absorvida pelo inversor).

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

Tabela 9.11 - Dados elétricos medidos - eficiência de conversão do inversor η_{CONV}
(potência CC convertida pelo inversor e potência injetada na rede).

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

Tabela 9.12 - Dados térmicos medidos e condições de operação.

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

9.1.2.1 Modelo térmico resultante no ensaio 2

Como no ensaio 1, os resultados das medidas obtidas no ensaio 2 foram ajustados à Equação 5.12 que representa o modelo analítico do comportamento térmico do inversor. Neste ensaio 2 utilizou-se a temperatura ambiente média de 23,9 °C e potência de aquecimento 5.153 W. Obteve-se assim no ensaio 2 os seguintes parâmetros térmicos do inversor: o coeficiente concentrado de dissipação térmica entre o inversor e o ambiente $U_{DISS,VL} = 88,3 \text{ W/}^\circ\text{C}$ (durante o processo de aquecimento, com ventiladores ligados) e $U_{DISS,VD} = 3,6 \text{ W/}^\circ\text{C}$ (durante o processo de arrefecimento, com ventiladores desligados) e a capacidade concentrada de armazenamento térmico do inversor $C_{ARM} = 59400 \text{ J/}^\circ\text{C}$ (16,5 Wh/°C).

Substituindo parâmetros determinados U_{DISS} e C_{ARM} na Equação 5.12, 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, pode-se utilizar a Equação 9.5

$$T_{INVERSOR}(t) = T_{AMBIENTE}(t) + \frac{T_{INVERSOR, inicial}(t=0) - T_{AMBIENTE}(t)}{\exp\left(\frac{88,3}{16,5}t\right)} + \frac{P_{AQ}(t)}{88,3} \cdot \left[1 - \frac{1}{\exp\left(\frac{88,3}{16,5}t\right)} \right] \quad (9.5)$$

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, pode-se utilizar a Equação 9.6

$$T_{INVERSOR}(t) = T_{AMBIENTE}(t) + \frac{T_{INVERSOR, inicial}(t=0) - T_{AMBIENTE}(t)}{\exp\left(\frac{3,6}{16,5}t\right)} \quad (9.6)$$

A Figura 9.6 apresenta a evolução da temperatura do inversor e da temperatura ambiente durante o ensaio 2. Apresenta também a curva resultante obtida via modelo proposto para avaliação da variação da temperatura, conforme equações 9.5 e 9.6.

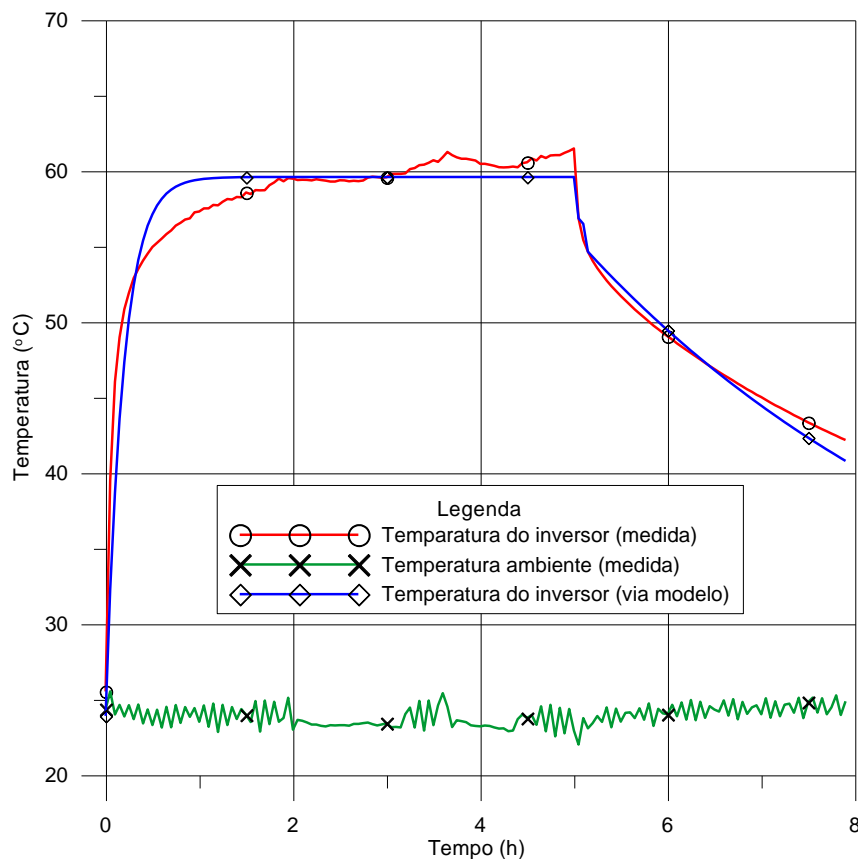


Figura 9.6 - Medições térmicas durante ensaio 2 (medidas das temperaturas do inversor e ambiente) e curva do modelo proposto para predição da temperatura do inversor.

9.1.3 Modelo térmico adotado

A determinação dos coeficientes térmicos do inversor a partir dos ensaios 1 e 2 resultou em valores próximos, porém não iguais. Para as simulações foram utilizados os valores médios conforme Tabela 9.13.

Tabela 9.13 - Parâmetros térmicos médios determinados a partir dos ensaios 1 e 2.

Coeficientes térmicos determinados no	U_{DISS}		C_{ARM}
	Ventilador ligado	Ventilador desligado	
Ensaio 1	92 W/°C	1,2 W/°C	50400 J/°C (14 Wh/°C)
Ensaio 2	88,3 W/°C	3,6 W/°C	59400 J/°C (16,5 Wh/°C)
Valor médio adotado	90,15 W/°C	2,4 W/°C	54900 J/°C (15,25 Wh/°C)

9.1.4 Resultados obtidos quanto à eficiência do inversor

Simultaneamente às medições térmicas do inversor ensaiado, foram realizadas medições de eficiência de conversão CC/CA. A Figura 9.7 mostra a curva da eficiência obtida em diferentes condições de carregamento do inversor.

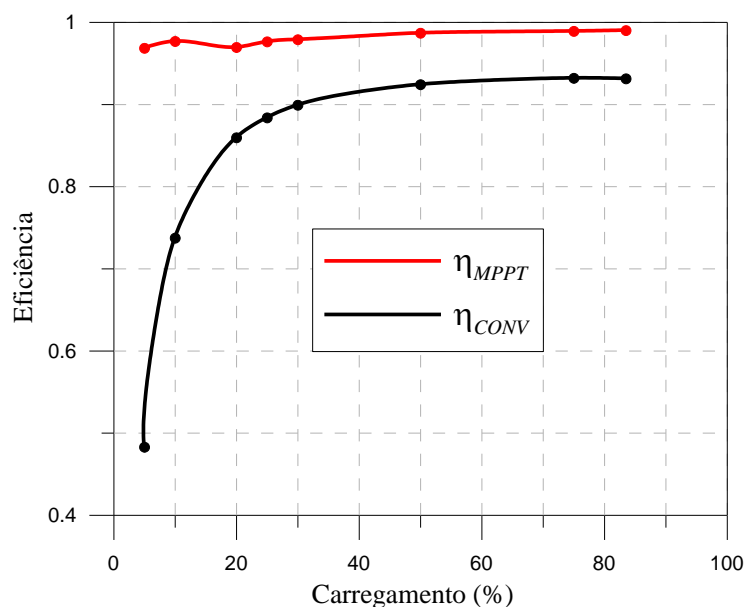


Figura 9.7 - Curvas de eficiência de seguimento de máxima potência (linha superior) e eficiência de conversão (linha inferior) determinadas em diferentes condições de carregamento de acordo com a norma EN50530.

A partir destes dados medidos podem-se então determinar os coeficientes de ajuste das equações de eficiência conforme modelos descritos nas equações 3.9 e 3.10. A Equação 9.7 representa a Equação ajustada para o inversor ensaiado relacionada à eficiência de conversão CC/CA em função do carregamento.

$$\eta_{INV,CONV}(Ld) = \frac{Ld}{Ld + 0,0546 - 0,14Ld + 0,19368Ld^2} \quad (9.7)$$

onde

$\eta_{INV,CONV}$ é a eficiência de conversão CC/CA

Ld é o carregamento do inversor

A Equação 9.8 representa a Equação ajustada para eficiência do seguimento do ponto de máxima potência em função do carregamento.

$$\eta_{INV,SPMP}(Ld) = \frac{Ld}{Ld + (0,000954494 + 0,0154857Ld^2)} \quad (9.8)$$

onde

$\eta_{INV,SPMP}$ é a eficiência do seguimento do ponto de máxima potência

9.1.5 Outras considerações sobre estes ensaios

Estes testes foram realizados com 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 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.

Nestes ensaios não foram realizadas análises de incertezas dos dados medidos.

9.2 Resultados de simulações de SFCR

Após a realização de ensaios para determinação dos parâmetros térmicos, foram realizadas diversas simulações do inversor “*On Grid Trifásico*”, fabricado pela Schneider Electric / CP Eletrônica em diferentes condições de operação.

A partir da modelagem da eficiência de conversão elétrica e do comportamento térmico do inversor realizaram-se diversas simulações para diferentes perfis e condições de operação, avaliando o efeito de diferentes estratégias de arrefecimento, na durabilidade e produção de energia do referido inversor.

No modelo elétrico da eficiência foi possível determinar o desempenho elétrico de conversão e as perdas responsáveis pelo aquecimento do inversor.

A partir desta potência de aquecimento, com o modelo preditivo de temperatura do inversor em regime transiente e os parâmetros térmicos determinados experimentalmente implementados em software de simulação de sistemas fotovoltaicos foi possível estimar as perdas anuais de desempenho energético decorrentes das rotinas de gerenciamento térmico, dos seus efeitos e das limitações impostas durante a operação deste inversor se conectado à rede.

Com o modelo para análise de confiabilidade foi possível comparar a expectativa de vida útil deste inversor para diferentes estratégias de arrefecimento. Esta avaliação da durabilidade será realizada considerando a temperatura máxima de operação, os ciclos térmicos (frequência e variações de temperatura), dados estes determinados pelo modelo térmico.

9.2.1 Dados utilizados para simulações

- **Inversor:** Fabricante Schneider Electric CP, modelo 50 kW (conforme dados descritos apêndice B), temperatura limite de 55 °C (desliga se $T_{\text{interna}} > 55$ °C, volta a ligar se $T_{\text{interna}} < 40$ °C).
- **Estratégia de arrefecimento e proteção térmica: tipo termostato liga e desliga (TLD),** onde foram simulados diversos valores de temperatura para limite de desligamento, como 45 °C, 50 °C, 55 °C, 60 °C, 70 °C, 80 °C, variação de temperatura para religamento do inversor $dT=5$ °C e $dT=15$ °C.
- **Estratégia de arrefecimento e proteção térmica: tipo redução de potência por temperatura (RPT),** onde foram simulados diversos valores de temperatura limite de operação, como 45 °C, 50 °C, 55 °C, 60 °C, 70 °C, 80 °C.
- **Parâmetros térmicos do inversor:** Parâmetros térmicos foram determinados experimentalmente conforme descrito anteriormente. Para simulação utilizaram-se os seguintes valores médios: $UA_{\text{DISS,VL}} = 90,15$ W/°C (durante o processo de aquecimento, com ventiladores ligados) e $UA_{\text{DISS,VD}} = 2,4$ W/°C (durante o processo de arrefecimento, com ventiladores desligados), $C_{\text{ARM}} = 15,25$ Wh/°C (54900 J/°C), conforme Tabela 9.13.
- **Instalação do inversor:** Foi considerada instalação em ambiente externo sombreado em temperatura ambiente.
- **Módulos fotovoltaicos:** Fabricante Canadian Solar, modelo CS6X-320P (conforme dados descritos no apêndice).
- **Locais dos SFCR:** Foram considerados três municípios brasileiros: Curitiba-PR, representando um clima mais frio, Porto Alegre – RS, representando um clima intermediário, Rio de Janeiro - RJ representando um clima mais quente. A Tabela 9.14 mostra alguns dados característicos dos arquivos climáticos utilizados.
- **Arquivos climáticos:** Para os municípios de Rio de Janeiro e Curitiba, foram utilizados arquivos horários com 8760 horas, dados padrão “EPW”, disponíveis no site do *Energy Plus* para América do Sul, WMO, Região 3, Brasil. https://energyplus.net/weather-region/south_america_wmo_region_3/BRA; Para Porto Alegre foram utilizados arquivos horários com 8760 horas, correspondentes ao ano de 2012 (estes arquivos foram adquiridos do 8º Distrito do Instituto Nacional de Meteorologia, em Porto Alegre).

Tabela 9.14 – Dados característicos dos arquivos climáticos utilizados.

Município	Período		Radiação horizontal global	Temperatura ambiente (bulbo seco)			Arquivo	Fonte
			Watt . hora / (m ² . ano)	Grau . hora / ano	(°C) máximo	(°C) mínimo		
Rio de Janeiro RJ	1 ano	8760 horas	1,84 x 10 ⁶	209 992	37,0	12,4	BRA_Rio.de.Janeiro-Santos.Dumont.837550_SWERA.epw	<i>Energy Plus</i>
Porto Alegre RS	1 ano	8760 horas	1,66 x 10 ⁶	178 079	38,6	1,1	POA_2012.csv	<i>INMET</i> (8° DISME)
Curitiba PR	1 ano	8760 horas	1,52 x 10 ⁶	150 418	35,0	0,0	BRA_Curitiba-Afonso.Pen.838400_SWERA.epw	<i>Energy Plus</i>

9.2.2 Combinações de fatores nas simulações realizadas

Foram realizadas diversas simulações considerando diferentes combinações de dados e condições de operação:

- Mesmo inversor, instalação externa (temperatura ambiente variável), na mesma cidade, com diferentes estratégias de arrefecimento (temperaturas de corte);
- Mesmo inversor, instalação interna (temperatura ambiente fixa climatizada), na mesma cidade, com diferentes estratégias de arrefecimento (temperaturas de corte);
- Mesmo inversor, com temperatura de corte fixa testada em diferentes cidades;
- Método da análise de falhas considerando frequência de eventos diários e frequência de eventos horários.

Estimativas e tendências de comportamento resultantes das simulações foram compilados e apresentados em tabelas e gráficos que seguem, observando itens de interesse como durabilidade (vida útil) e perdas de energia elétrica relacionadas ao acionamento das estratégias de arrefecimento e de proteção térmica.

9.2.3 Resultados quanto à produção de energia

Na Tabela 9.15 e Figura 9.8 apresentam-se um resumo dos dados resultantes de simulações de SFCR realizadas para diferentes configurações (diferentes fatores de dimensionamento do inversor FDI). Estas configurações são avaliadas com diferentes estratégias de arrefecimento: termostato liga e desliga com $dT=5^{\circ}\text{C}$ e $dT=15^{\circ}\text{C}$ (TLD), redução de potência por temperatura (RPT). Pode-se observar que a produção de energia anual do SFCR é afetada pela estratégia de arrefecimento e pela temperatura limite de operação. Lembrando, a temperatura limite de operação (temperatura de corte) é um parâmetro interno do inversor especificado pelo fabricante o qual determina a temperatura

interna máxima de operação do inversor. Esta temperatura limite é ajustada no termostato tipo liga/desliga (*setpoint*) ou no sistema de controle interno de potência.

Na Figura 9.8 pode-se observar que de forma geral, quanto menor a temperatura limite de operação do inversor, menor é a produção anual de energia elétrica esperada do SFCR.

Tabela 9.15 – Resumo de resultados das simulações realizadas – Porto Alegre – RS.

Inversor	50 kW	50 kW			50 kW		50 kW		50 kW	
Potência CA de saída (nominal)	50 kW	50 kW			50 kW		50 kW		50 kW	
Arranjo fotovoltaico	kW	71,7 kWpico			62,7 kWpico		53,8 kWpico		44,8 kWpico	
Potência CC (pico)	pico	(14 x 16 x 320 W)			(14x14x320 W)		(14x12x320 W)		(14x10x320 W)	
(quantidade de módulos)										
FDI		0,70			0,80		0,93		1,12	
T máxima do inversor	°C	128			104		83		65	
(sem limitação térmica)										
Estratégia de arrefecimento		TLD	TLD	RPT	TLD	RPT	TLD	RPT	TLD	RPT
(tipo de limitação térmica)		dT~15°C	dT~5°C		dT~5°		dT~5°		dT~5°	
Estimativa da produção de energia elétrica anual injetada na rede (MWh CA), considerando proteção térmica utilizando a temperatura limite de:	40 °C	37,5	51,9	61,1	51,6	59,2	50,0	56,0	46,4	50,7
	55 °C	68,5	73,2	78,3	69,7	73,0	63,6	65,6	54,6	55,7
	60 °C	78,9	80,4	84,1	75,7	77,6	68,1	68,8	57,3	57,4
	80 °C	89,6	89,9	91,3	81,0	81,4	69,8	69,8	57,4	57,4
	100 °C	92,9	93,0	93,2	81,8	81,8	69,8	69,8	57,4	57,4
	120 °C	93,5	93,5	93,5	81,8	81,8	69,8	69,8	57,4	57,4
Fator disponibilidade de conversão CC/CA, considerando proteção térmica utilizando a temperatura limite de:	40 °C	0,40	0,55	0,65	0,63	0,72	0,72	0,80	0,81	0,88
	55 °C	0,73	0,78	0,83	0,85	0,89	0,92	0,91	0,95	0,97
	60 °C	0,84	0,86	0,90	0,92	0,95	0,98	0,94	1,00	1,00
	80 °C	0,96	0,96	0,98	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00
	100 °C	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	120 °C	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Produção específica anual (kWh / kWpico), considerando proteção térmica utilizando a temperatura limite de:	40 °C	524	724	853	822	945	929	1041	1035	1131
	55 °C	956	1021	1093	1110	1164	1181	1218	1218	1242
	60 °C	1100	1121	1173	1207	1238	1265	1278	1279	1280
	80 °C	1250	1255	1273	1293	1298	1297	1297	1280	1280
	100 °C	1296	1297	1300	1305	1305	1297	1297	1280	1280
	120 °C	1304	1304	1305	1305	1305	1297	1297	1280	1280

No caso de utilizar inversor com estratégia de arrefecimento do tipo termostato liga/desliga (TLD), para um mesmo valor de temperatura limite, é desejável utilizar histerese (dT) menor. Por exemplo, para um SFCR com FDI=0,7 e temperatura limite de operação de 55 °C, espera-se uma produção anual de 78,3 MWh/ano com a estratégia RPT, 73,2 MWh/ano

com a estratégia tipo termostato limite com $dT=5^{\circ}\text{C}$ e 68,5 MWh/ano com a estratégia tipo termostato limite com $dT=15^{\circ}\text{C}$, conforme visto na Tabela 9.15 e Figura 9.9.

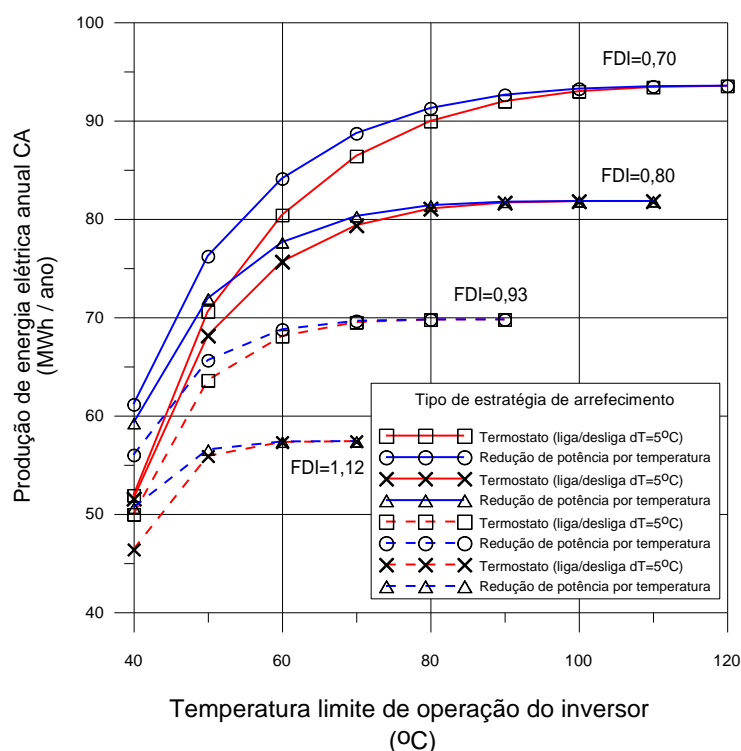


Figura 9.8 - Curvas de estimativas de produção de energia elétrica injetada na rede para SFCR com diferentes fatores FDI, com estratégias de arrefecimento RPT, TLD com $dT=5^{\circ}\text{C}$.

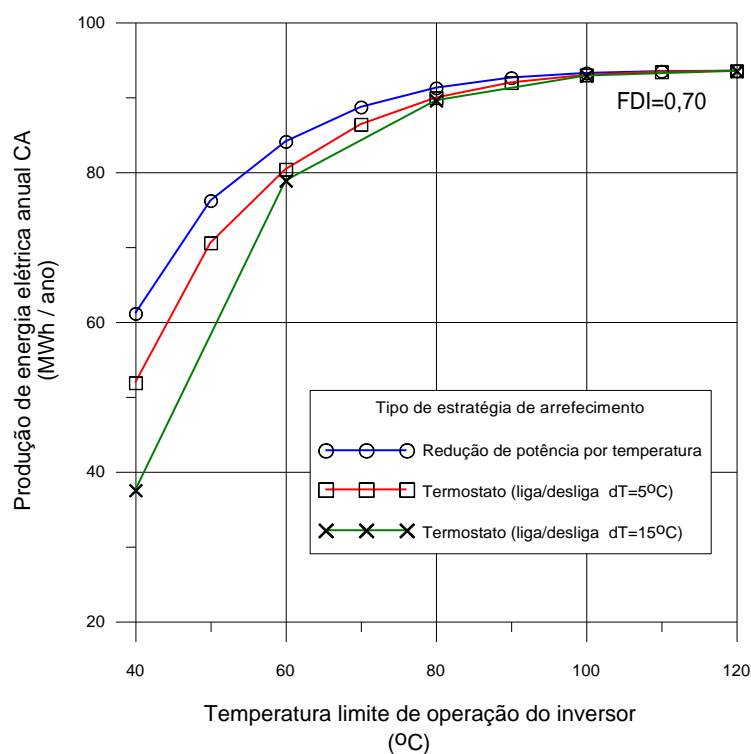


Figura 9.9 - Curvas de estimativas de produção de energia elétrica injetada na rede para FDI=0,7, com estratégias de arrefecimento RPT, TLD com $dT=5^{\circ}\text{C}$ e TLD com $dT=15^{\circ}\text{C}$.

Do ponto de vista de produção de energia elétrica, pode-se observar também que seria desejável utilizar inversores com a estratégia tipo redução de potência por temperatura para evitar superaquecimento (RPT), pois tendem a ter menor influência negativa sobre a produção de energia elétrica. Este comportamento é ilustrado na Figura 9.10, a qual apresenta a eficiência total anual esperada para um SFCR operando na cidade de Porto Alegre – RS em diferentes fatores de dimensionamento do inversor.

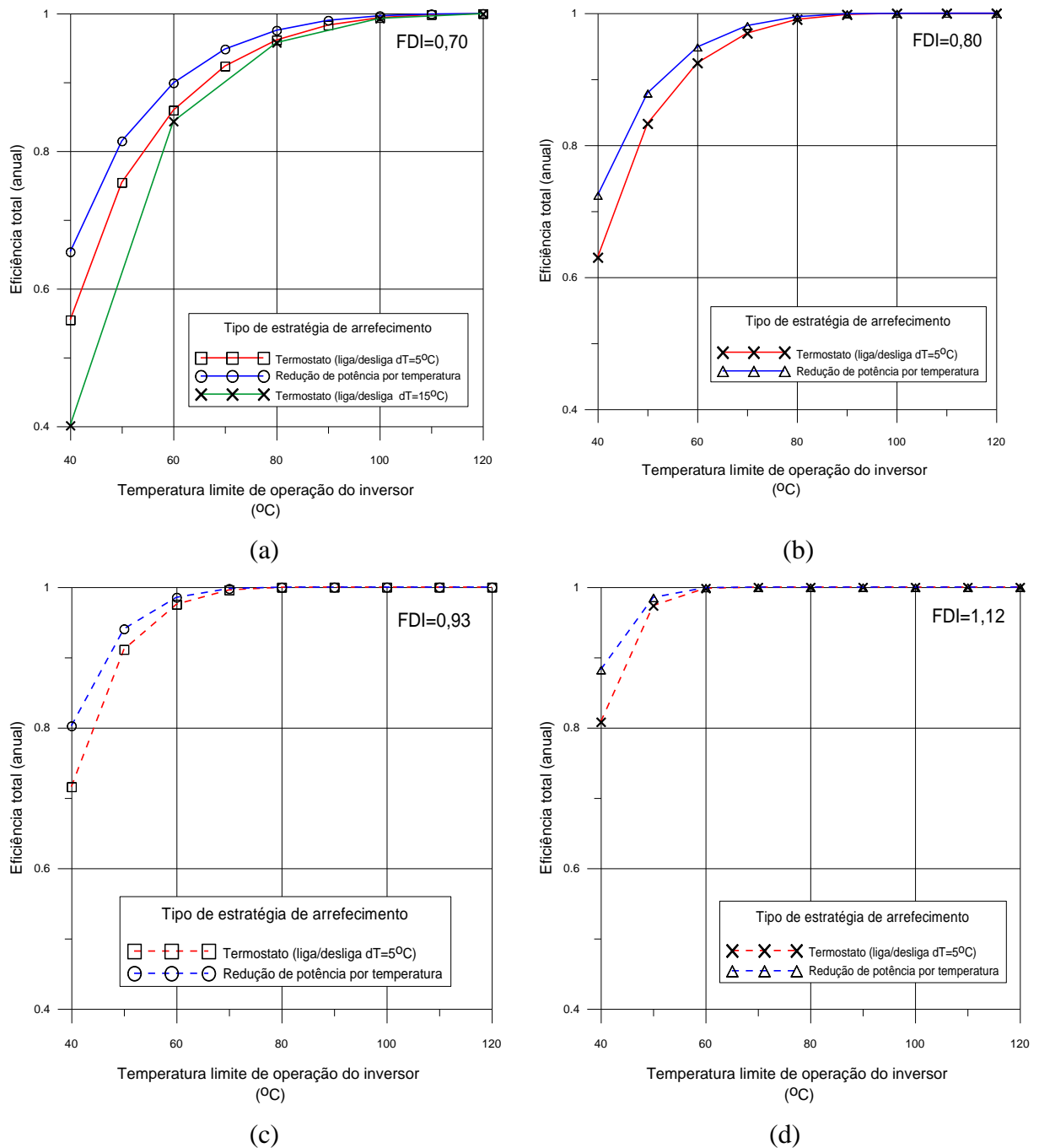


Figura 9.10 - Curvas de eficiência global do inversor para um SFCR com FDI=0,7, FDI=0,8, FDI=0,93, FDI=1,12 simulados para cidade de Porto Alegre – RS.

A Figura 9.11 ilustra o efeito de diferentes valores de histerese (dT) sobre a produtividade de energia elétrica, no caso de inversores com estratégia de arrefecimento do tipo termostato liga e desliga. Quanto menor dT maior é a produtividade anual esperada.

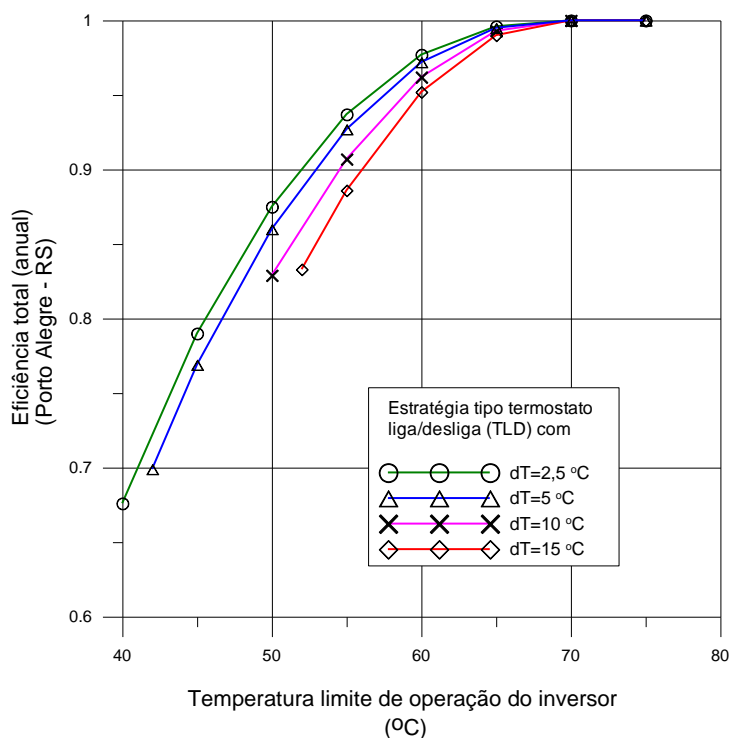


Figura 9.11 – Desempenho relativo global anual do inversor, com diferentes valores de histerese (dT), estimado para operação do inversor em Porto Alegre – RS.

9.2.4 Resultados obtidos quanto à estimativa de durabilidade do inversor

A partir da simulação de desempenho elétrico simultaneamente com a simulação do comportamento térmico do inversor foi possível aplicar a metodologia apresentada para avaliação da durabilidade relacionada à temperatura de operação do inversor.

As avaliações anuais com ciclos térmicos diários consideram 365 ciclos no ano, com respectivas temperaturas máxima e mínima de cada dia, enquanto as avaliações anuais com ciclos térmicos horários consideram os 8760 ciclos por ano com respectivas temperaturas máxima e mínima de cada hora.

Inicialmente esta avaliação da durabilidade foi simulada durante um ano para cidade de Porto Alegre – RS, considerando ciclos térmico horários. Na seqüência esta mesma simulação foi realizada considerando ciclos térmicos diários.

A Figura 9.12, apresenta estes resultados com estimativas de durabilidade relativas à temperatura de limite interna do inversor de 55 °C. Os pontos obtidos para ciclos térmicos horários e diários são apresentados juntamente com suas respectivas curvas de ajuste (exponencial).

Inicialmente pode-se observar que os resultados de durabilidade relativa foram bastante próximos tanto para avaliação considerando ciclos térmicos com frequências horárias, como para avaliação de ciclos térmicos com frequências diárias.

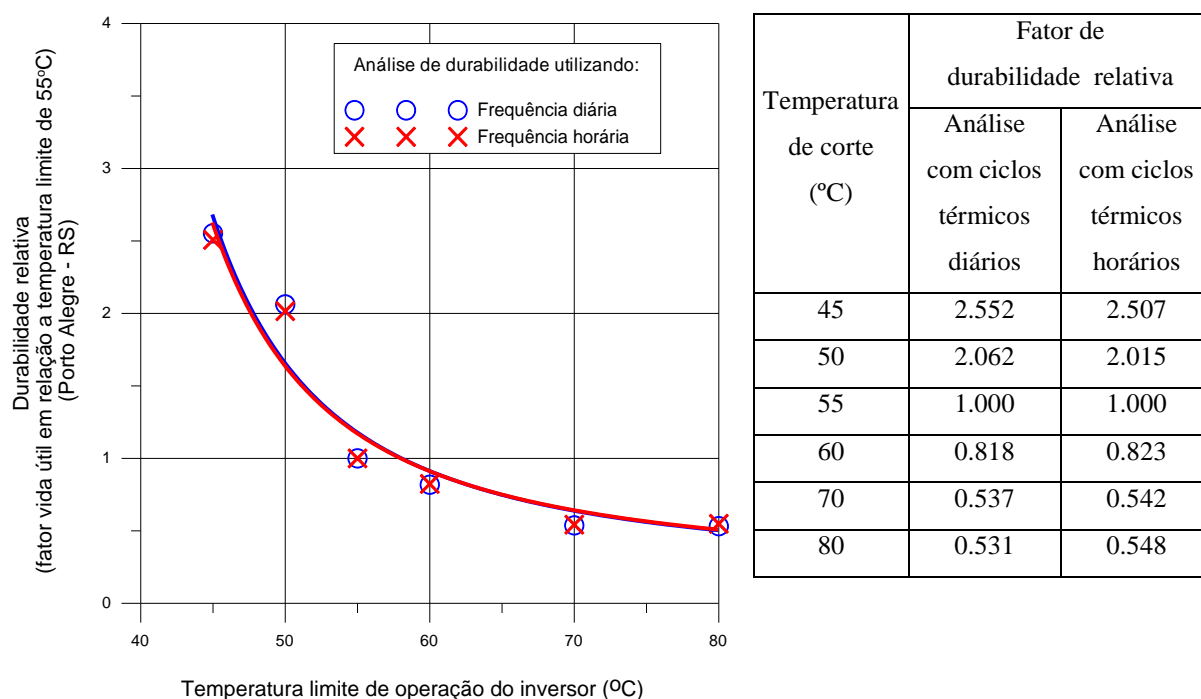


Figura 9.12 – Resultados da análise de durabilidade relacionadas às simulações de SFCR para cidade de Porto Alegre – RS, relativos à temperatura limite de operação de 55 °C.

Na avaliação da influência da temperatura limite de operação na durabilidade pode-se observar a tendência de que quanto maior for a temperatura limite de operação do inversor, fazendo com que o inversor trabalhe em temperaturas mais elevadas, menor será a sua durabilidade.

Por exemplo, na Figura 9.12, para um inversor ajustado com temperatura de corte de 50 °C estima-se que a vida útil do inversor possa ser aumentada em aproximadamente duas vezes (2,062 / 1,000) se comparada a um inversor com temperatura de corte ajustada em 55 °C, e ainda se este mesmo inversor for ajustado para temperatura limite de corte de 70 °C estima-se que a vida útil do inversor será menor, quase metade (0,537 / 1,000).

Apenas para análise de tendência da metodologia, esta análise de durabilidade, considerando ciclos térmicos com frequências diárias ou ciclos térmicos com frequências horárias, foi realizada também para cidades de Curitiba – PR e Rio de Janeiro - RJ as quais demonstraram a mesma tendência, conforme pode ser vista na Figura 9.13, isto é, pouca diferença entre os resultados relativos.

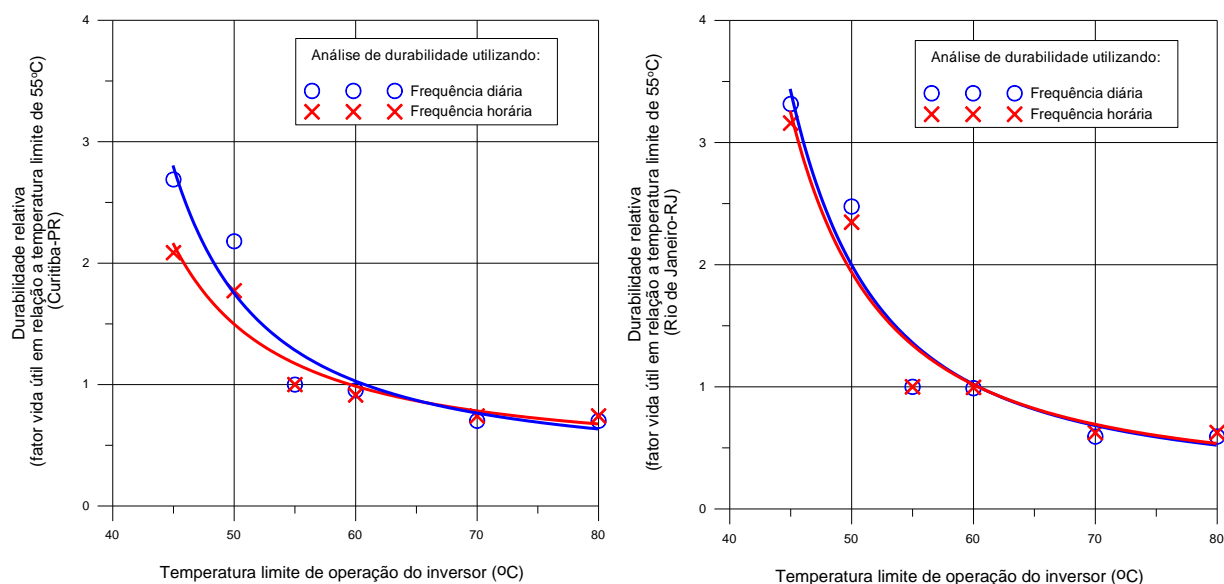


Figura 9.13 – Resultados da análise de durabilidade relacionadas às simulações de SFCR para cidades de (a) Curitiba – PR e (b) Rio de Janeiro - RJ, relativos à temperatura limite de operação de 55 °C.

9.3 Comentários sobre resultados obtidos

Resultados indicam que o modelo simplificado proposto apresenta boa concordância com as 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.

A modelagem matemática, os ensaios realizados e os resultados experimentais indicam que a metodologia apresentada permite a avaliação das limitações e reduções de desempenho de inversores conectados à rede, em decorrência da ativação das rotinas de gerenciamento térmico para proteção contra superaquecimento.

Conforme visto anteriormente, o inversor que foi utilizado nos ensaios tem temperatura de desligamento se $T_{\text{inversor}} > 55 \text{ °C}$ voltando a religar quando $T_{\text{inversor}} < 40 \text{ °C}$ (corresponde a uma variação de temperatura de 15 °C para religamento do inversor). Com estas simulações estima-se uma eficiência global anual de 73%, isto é, estima-se que o

inversor, se operando em Porto Alegre – RS, deixaria de aproveitar e injetar na rede 27% da energia elétrica anual útil disponível, devido aos desligamentos momentâneos e limitações impostas pela sua estratégia de arrefecimento e proteção térmica.

Pode-se ainda estimar que, caso fosse possível ajustar o valor da variação de temperatura para religamento de 15 °C para 5 °C, ocorreria um aumento da sua eficiência total anual passando de 73% para 78%.

Em outra situação hipotética pode-se também estimar que, caso fosse possível ajustar o valor da temperatura limite de 55 °C para 60 °C, ocorreria também aumento da sua eficiência global anual passando de 73% para 84%. Lembrando porém que com este aumento de 55 °C para 60 °C estima-se uma redução de durabilidade do inversor em -18% conforme visto anteriormente na Figura 9.12.

10 CONCLUSÕES

Esta tese apresentou uma metodologia para análise da influência da atuação de diferentes estratégias de arrefecimento sobre o desempenho energético e durabilidade de inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede.

Constatou-se que é possível estabelecer um método para avaliação da durabilidade a partir da teoria sobre testes de envelhecimento acelerados por temperatura. O método permite estimar de forma relativa e comparativa a vida útil de equipamentos eletrônicos, desde que se conheçam as amplitudes, os valores máximos e as frequências de ciclos térmicos do equipamento em operação.

A evolução da temperatura de operação do inversor foi determinada a partir dos modelos do comportamento térmico do inversor propostos por Rampinelli et al., 2014, estimando assim as sequências de ciclos térmicos durante a operação do inversor.

Previamente à utilização destes modelos de comportamento térmico do inversor, fez-se necessária a realização de experimentos para determinação dos parâmetros térmicos característicos do inversor utilizado como estudo de caso. Os experimentos para caracterização de desempenho e do comportamento térmico foram possíveis devido à construção de uma bancada de ensaios para inversores, a qual permitiu avaliar de forma simultânea o desempenho elétrico e o comportamento térmico em diferentes condições de carregamento (diferentes fatores de dimensionamento do inversor - FDI). Entende-se que a metodologia apresentada e os experimentos realizados para determinação dos parâmetros térmicos deste inversor também podem ser aplicados a outros inversores.

Uma vez determinados estes parâmetros do comportamento térmico, foi possível analisar a influência da temperatura sobre o desempenho de inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Com o software FVCONNECT foi possível simular a operação do inversor em diversas condições de operação: diferentes condições de carregamento e com diferentes estratégias de arrefecimento e proteção térmica.

Para aplicação do método de análise da confiabilidade e avaliação comparativa da durabilidade para os vários cenários foi desenvolvido um programa de simulação complementar, externo ao FVCONNECT, dentro de uma planilha específica (tipo Excel com macro de programação em Basic). Esta planilha realiza a análise de confiabilidade a partir de um arquivo com dados de saída do software FVCONNECT (sequência de ciclos térmicos com temperatura do inversor).

Resultados obtidos nas avaliações simultâneas de desempenho e nas estimativas de durabilidade mostram que temperatura elevada e o tipo de estratégia de arrefecimento e proteção térmica, afetam a eficiência global anual de forma significativa. Recomenda-se então que para realização de instalações de SFCR com maior desempenho e maior confiabilidade sejam consideradas, na etapa de projeto, soluções e configurações que garantam um gerenciamento térmico adequado aos inversores.

Apesar das simulações terem sido desenvolvidas para apenas um tipo de inversor, pode-se concluir que a estratégia de arrefecimento do tipo “redução de potência por temperatura”, para temperatura-limite entre 60 °C e 80 °C, faixa de temperaturas usualmente suportadas pelos componentes eletrônicos, apresenta maior produtividade energética, sendo desta forma a estratégia mais recomendada entre as que foram estudadas.

Pelos estudos realizados na estratégia TLD com $dT=15^{\circ}\text{C}$, estima-se que o simples ajuste da temperatura limite, por exemplo, de 55°C para 60°C , permite aumentar a produtividade de energia em aproximadamente 15% (de 73% para 84%, Tabela 9.15), mas por outro lado diminui a vida em aproximadamente 18% (de 1,00 para 0,82, conforme Figura 9.11). Pôde-se ainda avaliar outro exemplo, onde a temperatura limite permanece a mesma, 55°C , alterando agora a histerese do termostato de $dT=15^{\circ}\text{C}$ para $dT=5^{\circ}\text{C}$ o que permitiu aumentar a produtividade em aproximadamente 7% (de 73% para 78%, Tabela 9.15), sem afetar a durabilidade. A metodologia desenvolvida permite expandir análises como esta.

Estes resultados obtidos podem também auxiliar na otimização do inversor avaliado. Para aumento de eficiência total anual e maior produtividade de energia pode-se estudar a alteração de parâmetros (temperatura máxima e amplitude de histerese térmica) e da estratégia de arrefecimento existente, que atualmente é do tipo “termostato”. Pode-se ainda desenvolver e implementar uma nova estratégia de arrefecimento do tipo “redução de potência por temperatura”. Sabendo-se ainda que o transformador do inversor é uma importante fonte de aquecimento indesejado e que a temperatura interna elevada causa diretamente redução de durabilidade e redução de eficiência total pode-se reavaliar o layout interno do inversor, por exemplo mudando o transformador para parte superior do inversor, em compartimento interno separado, seria de se esperar uma redução no aquecimento do módulo de potência através da redução da parcela de aquecimento relativa ao transformador.

10.1 Sugestões de trabalhos futuros e continuidade do trabalho

Pode-se ainda sugerir nesta última seção alguns temas e linhas de pesquisa para trabalhos futuros.

- Incluir no software FVCONNECT rotina de análise de confiabilidade para avaliação comparativa da durabilidade;
- Aprimorar e incluir novas funcionalidades nas rotinas de simulação no software FVCONNECT relacionadas à análise do efeito da temperatura e atuação de estratégias de arrefecimento e proteção térmica sobre o desempenho elétrico e produtividade de energia;
- Validar em campo o modelo preditivo de temperatura, por um longo período, acompanhando medidas reais de temperatura do inversor com temperaturas previstas pelo modelo térmico do inversor;
- Validar em campo os valores da redução de eficiência total anual apresentados. Valores estes estimados através da simulação das diferentes estratégias de arrefecimento e proteção térmica;
- Desenvolver modelo específico e simular operação do inversor em eletrocentro climatizado, avaliando o consumo de energia elétrica do sistema de climatização;
- Incluir outros detalhes construtivos do inversor no modelo térmico;
- Modelar numericamente todo inversor, considerando outros componentes internos como transformadores e capacitores. Considerar trocas de calor por radiação com efeitos espectrais e direcionais dos materiais, gradientes de temperatura das superfícies, fluxos de calor tridimensionais, etc;
- Medir, armazenar e avaliar em campo a eficiência, a produtividade e a durabilidade, em diferentes condições operacionais. Instalar 11 inversores com módulos fotovoltaicos equivalentes, agrupados em diferentes configurações, como por exemplo:
 - um grupo de inversores instalados em eletrocentro climatizado,
 - outro grupo de inversores instalados em casa de máquinas fechada ventilada com estratégia de arrefecimento tipo termostato liga desliga,
 - outro grupo instalado em casa de máquinas fechada ventilada com estratégia de arrefecimento tipo redução de potência por temperatura,
 - eventualmente um grupo instalado com estratégias de arrefecimento e proteção térmicas desativadas

- Armazenar dados de operação desempenho, radiação solar, temperatura ambiente, vento. Avaliar índices de falhas: mecânicas (ventiladores, etc), eletroeletrônicas (IGBT, capacitores, indutores, conectores, etc);
- Realizar novos ensaios com inversores em condições extremas de operação com altos valores de carregamento e temperaturas ambientes mais altas;
- Implementar melhorias no inversor e realizar novos ensaios (novas estratégias de gerenciamento térmico e novo *layout* interno);
- Realizar um estudo financeiro e análise de viabilidade do investimento do SFCR, considerando a eficiência de produção e expectativa de vida útil, relacionado à influência de diferentes estratégias de arrefecimento. Estabelecer pesos financeiros para o inversor e demais elementos do SFCR;
- Utilizar a metodologia apresentada para avaliação de diversos inversores com diferentes características e capacidades. Elaborar análise dimensional (estudo para verificação de possibilidade de adimensionalização).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Referências bibliográficas citadas no texto

Andresen, M., Buticchi, G., Falk, J., Liserre, M., Mühlfeld, O, 2015. **Active thermal management for a single-phase H-Bridge inverter employing switching frequency control**. PCIM Europe 2015, Nuremberg, Germany, 2015.

Andresen, M., Liserre, M., Buticchi, G., 2014. **Review of active thermal and lifetime control techniques for power electronics modules**. Power electronics and applications (EPE'14-ECCE Europe-16th European Conference on. IEEE Conference Publications).

ANEEL, 2012. **Resolução Normativa nº 482**, de 17 de abril de 2012. Disponível no sitio na internet www.aneel.gov.br, em 18/maio/2016.

ANEEL, 2015. **Resolução Normativa nº 687**, de 24 de novembro de 2015. Disponível no sitio na internet www.aneel.gov.br, em 18/maio/2016.

ANEEL, 2016. **Banco de Informações de Geração - BIG**. Disponível no sitio na internet www.aneel.gov.br, em 18/maio/2016.

Anthon, A., Zhang, Z., Andersen, M., Holmes, G., McGrath, B., Teixeira, C., 2016. **Comparative evaluation of the loss and thermal performance of advanced three level inverter topologies**. 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), pages: 2252 - 2258, IEEE Conference Publications.

Bennion, K., Kelly, K., 2009. **Rapid modelling of power electronics thermal management technologies**. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, pages: 622 - 629, IEEE Conference Publications.

Blaabjerg, F, Wang, H., Liserre, M., 2013. Toward Reliable Power Electronics. Challenges, design, tools and opportunities. June, 2013, **IEEE Industrial Electronics Magazine**.

Bryant, A. T., Mawby, P. A., Palmer, P. R., Santi, E., Hudgins, J. L., 2008. Exploration of Power Device Reliability Using Compact Device Models and Fast Electrothermal Simulation. **IEEE Transactions on Industry Applications**, Volume: 44, Issue: 3, pages: 894 - 903, IEEE Journals & Magazines.

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.

Cao, W., Chen, H.; Ji, B., Pickert, V., 2014. Real-Time Temperature Estimation for Power MOSFETs Considering Thermal Aging Effects. **IEEE Transactions on Device and Materials Reliability**, Volume: 14, Issue: 1, pages: 220 – 228. IEEE Journals & Magazines.

Cui, H, 2005. **Accelerated Temperature Cycle Test and Coffin-Manson for Electronic Packaging**. IEEE, RAMS 2005.

Downing, S. D., Socie, D. F., 1982. Simple rainflow counting algorithm. **International Journal of Fatigue**, 4 (1), 31-40.

EPIA, 2016. European Photovoltaic Industry Association. **Sustainability of Photovoltaic Systems, The Carbon Footprint**. Disponível sitio na internet www.epia.org, em 01/junho/2016.

Falck, J., Andresen, M., Liserre, M., 2015. **Active thermal control of IGBT power electronic converters**. IECON 2015, Yokohama, 9-12, 2015.

Felix, É. P., 2006. **Análise de confiabilidade de sistemas eletrônicos complexos baseada em ensaios acelerados de vida**, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Fronius, 2013. Disponível no sitio na internet www.fronius.com / fifth fronius supplier day, em 14/06/2016.

Gulur, S., Karuppaswamy, A., John, V., 2015a. **A thermal enclosure model for inverters**. Transportation Electrification Conference (ITEC), 2015 IEEE International, pages: 1 - 6, IEEE Conference Publications.

Gulur, S., Karuppaswamy, A., John, V., 2015b. **A novel thermal performance evaluation method for inverter passive components**. Transportation Electrification Conference (ITEC), 2015 IEEE International, IEEE Conference Publications.

Incropera, F. P., DeWitt, D. P., 2005. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**, 5ª edição, LTC Editora, Rio de Janeiro.

Kececioglu, D.B., 1991. **Reliability Engineering Handbook**, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, Vol. 1.

Liu, Y., 2012. **Power electronic packaging**. Springer Science + Business Media Inc

Mallwitz, R., Engel, B., 2010. **“Solar Power Inverters”**, SMA Solar Technology AG, CIPS 2010, 6th International Conference on Integrated Power Electronics Systems, Nuremberg, Germany, paper 6.2.

Norris, K. C., Landzberg, A. H., 1969. Reliability of controlled collapse interconnections, **IBM J. Res. Develop.**, May 1969, pp. 266- 271,

Pinto Neto, A. F. C., 2012. **Qualificação e etiquetagem de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição**, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, EP/FEA/IEE/IF.

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, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, PPGEMM, 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 à rede**, Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, PPGEMM, Porto Alegre.

SMA, 2012. Solar Technology AG. **Temperature Derating**. Technical Information, UEN 103910 (Boletim técnico do fabricante de inversores SMA)

Yang, Y., Wang, H., Blaabjerg, F., Ma, K., 2013. **Mission profile based multi-disciplinary analysis of power modules in single-phase transformerless photovoltaic inverters**. Power Electronics and Applications (EPE), 2013 15th European Conference on, pages: 1 – 10.

Yang, Y., 2014. **Advanced Control Strategies to Enable a More Wide-Scale Adoption of Single-Phase Photovoltaic Systems**, Doctoral Thesis, Department of Energy Technology, Aalborg University.

Wang, H., Blaabjerg, F., Ma, K., Wu, R., 2013. **Design for reliability in power electronics in renewable energy systems – status and future**. Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 2013 Fourth International Conference on, pages: 1846 - 1851, IEEE Conference Publications.

Zhou, Z., Holland, P. M., Iqic, P., 2008. **Compact thermal model of a three-phase IGBT inverter power module**. Microelectronics, 2008. MIEL 2008. 26th International Conference on, pages: 167 - 170, IEEE Conference Publications.

Bibliografia complementar

Almeida, M. P., 2012. **Qualificação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede**, Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, Programe de Pós-graduação em Energia, São Paulo.

Armijo, K. M., 2013. **Reliability thermal management**. Sandia National Laboratories, Albuquerque, USA

Armijo, K. M., Lavrova, O., 2015. **Inverter eletro-thermal modelling**. Sandia National Laboratories, Albuquerque, USA

Armijo, K. M., 2013. **Performance Impact of Solar Gain on Photovoltaic Inverters and Utility-Scale Energy Generation Systems**. Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM 87185 USA

ASHRAE, 2005. **Handbook Fundamentals**, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Chapter 14 (Measurement and Instruments)

Aste, N. et al., 2015. A simplified model for the estimation of energy production of PV systems, **Energy** 59, 503-512

Benning, D., Reichl, J., Hefner, A., Hernandez, M., Ellenwood, C., Lai, J-S., 2005. **High speed IGBT module transient thermal response measurements for model validation**, *Ind. App. Conf. 38th IAS Annual Meeting*.

Burger, B., Rüther, R., 2006. Inverter sizing of grid-connected photovoltaic systems in the light of local solar resource distribution characteristics and temperature. **Solar Energy** 80, 32–45

Catálogos e manuais técnicos de módulos fotovoltaicos: **Bosch, Canadian Solar, Kyocera, Panasonic/Sanyo, Yingli**

Catálogos e manuais técnicos de inversores para conexão à rede: **SMA, WEG, CP, Schneider Electric**.

Catálogos e manuais técnicos de instrumentos de medição: **Regatron, Yokogawa, Agilent**

Carte, N. P. **The effect of temperature on the operation of micro inverters**. Enecsys.

Chen, S. et al., 2015. Determining the optimum grid-connected photovoltaic inverter size, **Solar Energy** 87, 96–116

Clean Energy Concil, 2015. **Grid-Connected Solar PV Systems**

Demoulias, C., 2010. A new simple analytical method for calculating the optimum inverter size in grid-connected PV plants, **Electric Power Systems Research** 80, 1197–1204.

Duffie, J. A., Beckman, W. A., 2006. **Solar Engineering of Thermal Processes**, John Wiley & Sons, New York.

Fowler, R., 2015. **Fundamentos de eletricidade**. Volume 2, Editora McGrawHill, 7ª edição Holman, J. P., 1997. “**Heat Transfer**”, 8ª ed., McGraw-Hill, New York.

Holman, J. P., 2001. **Experimental Methods for Engineers**, 7ª ed., McGraw-Hill International Edition, New York.

Janssens NA, Lambin G, Bragard N. **Active power control strategies of DFIG wind turbines**. IEEE Power Tech, Paper No. 167, Switzerland; July 2007.

Kesraoui, M. et al., 2011. Maximum power point tracker of wind energy conversion system. **Renewable Energy** 36, 2655-2662.

Krenzinger, A., Prieb, C. W. M., Dias, J. B., Blauth, Y. B., Silvério, W. V., Vera, L. H., Garcia, F. H., 2007. **Simulação computacional de sistema fotovoltaico conectado à rede**. I CBENS - I Congresso Brasileiro de Energia Solar. ABENS - Associação Brasileira de Energia Solar.

Luoma, J. et al., 2012. Optimal inverter sizing considering cloud enhancement. **Solar Energy** 86, 421–429

Lutz, J. et al., 2011. **Semiconductor Power Devices**. Springer Science + Business Media Inc.

Macedo, W.N., Zilles, R., 2007. Operational results of grid-connected photovoltaic system with different inverter's sizing factors (ISF). **Progress in Photovoltaics: Research and Applications** 15, 337–352.

McNeil Technologies, 2005. Summary Report on the DOE **High-tech Inverter Workshop**

Meysenc, L., Jylhakallio, M., Barbosa, P., 2005. Power electronics cooling effectiveness versus thermal inertia. **IEEE Transactions on Power Electronics** 20, 687–695.

Mondol, J.D. et al., 2006. Optimal sizing of array and inverter for grid-connected photovoltaic systems. **Solar Energy** 80, 1517–1539

Muyeen, S.M. et al., 2011. Variable speed wind turbine generator system with current controlled voltage source inverter. **Energy Conversion and Management** 52, 2688–2694

Nicolas Allet¹, Franz Baumgartner, Juergen Sutterlueti, Stefan Sellner, Manuel Pezzotti. **Inverter performance under field conditions**

Norma técnica ABNT NBR 5462, 1994. **Confiabilidade e manutenibilidade**

Norma técnica ABNT NBR 16149, 2014. **Sistema Fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com à rede elétrica de distribuição**

Norma técnica ABNT NBR 16150, 2015. **Sistema Fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com à rede elétrica de distribuição – Procedimentos de Ensaio de Conformidade**

Norma técnica ABNT NBR IEC 62116, 2012. **Procedimentos de Ensaio anti-ilhamento**

Norma técnica ASTM E 1049, 1985. *Standard practices for counting in fatigue analysis*

Norma técnica EN50530 European Standard, 2010. *Overall Efficiency on Grid Connected Photovoltaics Inverters*

Norma técnica IEC 61683, 1999. *Photovoltaic Systems – Power Conditioners – Procedure for Measure Efficiency*

Norma técnica IEC 62093, 2005. *PV Inverter Reliability Test Standard*

Notton, G. et al., 2010. Optimal sizing of a grid-connected PV system for various PV module technologies and inclinations, inverter efficiency characteristics and locations. **Renewable Energy** 35, 541–554.

Pecht, M. 1995. **The influence of temperature on microelectronic device failure mechanisms**. US Army Research Laboratory Electronics & Power Sources Directorate M/S AMSRL-EP-RA (Edward B. Hakim) 3 Fort Monmouth, NJ 07703-5601

Pinho, J. T, Galdino, M. A., 2014. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Cepel, Cresesb.

Reno, M., Stein, J., 2012. **Photovoltaic inverter: Thermal characterization to identify critical components**.

Smet, V., Forest, F., 2011. **Ageing and failure modes of IGBT modules in high-temperature power cycling**, *IEEE Trans. On Indus. Elecs.*, 58, No. 10.

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.

Queiroz, L. M. O., 2010. **Estimação e análise das perdas técnicas na distribuição de energia elétrica**, Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

Schuch, L., Rech, C., Hey, H., Pinheiro, J. R., Martins, M. L. S. Dupont, F. H., Saccol, G., 2015. **Relatório 1 — Análise do inversor da empresa CP eletrônica**. Inserção da Energia Solar Fotovoltaica Urbana Conectada à Rede em Porto Alegre. Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Centro de Tecnologia – CT, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica -PPGEE.

Singh, M. G., 1987. **Fault Detection & Reliability: Knowledge Based & Others Approaches**.

SMA Solar Technology AG, **SMA introduce cooling concept for PV-inverter**

Software EES - Engineering Equation Solver, versão 6867-3D, 2005. Klein, S. A.

Softwares Energy Plus e SAM, NREL, US

Software FVCONECT, Laboratório de Energia Solar, LABSOL/UFRGS

Software IHT - Iterative Heat Transfer, versão 2.0, 2002. Intellpro Inc, John Wiley & Sons, New York.

*Software PVSIZ*E, Laboratório de Energia Solar, LABSOL/UFRGS

Sulaiman, S. I. et al., 2012. An intelligent method for sizing optimization in grid-connected photovoltaic system, **Solar Energy** 86, 2067–2082.

Tong, X. C., 2011. **Advanced materials for thermal management of electronic packaging**. Springer Science + Business Media Inc.

Trillo-Montero, D. et al, 2014. Development of a software application to evaluate the performance and energy losses of grid-connected photovoltaic systems. **Energy Conversion and Management** 81, 144–159.

Vassighi, A.; Sachdev, M., 2006. **Thermal and power management to integrated circuits**. Springer Science + Business Media Inc.

Zhang, P., Wang, Y., Xiao, W., Li, W., 2012. **Reliability evaluation of grid-connected photovoltaic power systems**, IEEE Trans. On Sus. Energy 3, No. 5.

Zilles, R., Macêdo, W. N., Galhardo, M. A. B., Oliveira, S. H. F., 2012. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica**, 1º reimpressão, Editora Oficina dos Textos. São Paulo.

APÊNDICE A - Exemplos de módulos fotovoltaicos

Tabela A.1 - Características técnicas gerais de alguns módulos fotovoltaicos.

[adaptado de catálogos comerciais de fabricantes]

Fabricante				Panasonic	Yingli	Canadian	Bosch	Kyocera
Modelo				HIT N 245	Panda YL 280C-30b	CS6X- 320P	M60/255	KD245GH -4FB
Eficiência	Módulo		%	19,4	17,1	16,68	16,4	14,8
Características elétricas em STC	Potência (máxima potência)	P_{MP}	W	245	280	320	255	245
	Tensão (máxima potência)	V_{MP}	V	44,3	31,3	36,8	29,94	29,8
	Corrente (máxima potência)	I_{MP}	A	5,54	8,96	8,69	8,52	8,23
	Tensão de circuito aberto	V_{OC}	V	53,0	39,1	45,3	37,29	36,9
	Corrente de curto circuito	I_{SC}	A	5,86	9,5	9,26	9,12	8,91
Características elétricas em NOCT	Potência (máxima potência)	P_{MP}	W	187,4	204,2	232	185	176
	Tensão (máxima potência)	V_{MP}	V	42,5	28,5	33,6	27,52	26,8
	Corrente (máxima potência)	I_{MP}	A	4,41	7,17	6,91	6,72	6,58
	Tensão de circuito aberto	V_{OC}	V	50,3	36,2	41,6	30,06	33,7
	Corrente de curto circuito	I_{SC}	A	4,71	7,66	7,50	7,35	7,21
Efeito da temperatura	Potência (máxima potência)	CP_{MP}	% / K	-0,29	-0,42	-0,43	-0,44	-0,46
	Tensão de circuito aberto	CV_{OC}	% / K	-0,133V/K	-0,31	-0,34	-0,31	-0,36
	Corrente de curto Circuito	CI_{SC}	% / K	1,76mA/K	0,04	0,065	0,031	0,06
	Temperatura NOTC	T_{NOC} T	° C	44,0	46 +/- 2	45 +/- 2	48,4	45
Efeito da intensidade da radiação	800 W/m ²	V_{MP}	%				0	
	200 W/m ²	V_{MP}	%	-2,48			-2,36	
	100 W/m ²	V_{MP}	%				-5,45	
	800 W/m ²	I_{MP}	%				- 20	
	200 W/m ²	I_{MP}	%	-80,32			- 80	
	100 W/m ²	I_{MP}	%				- 90	
Características mecânicas	Comprimento	C	mm	1580	1650	1954	1660	1662
	Largura	L	mm	798	990	982	990	990
	Altura da moldura	A	mm	35	40	40	50	46
	Peso		kg	15	18,5	22	21	21
	Tomada de ligação			SMK	IP65 / MC4	IP67/MC4 3 diodos	IP65 / MC4	IP65 / PV- 03 (SMK)
	Cobertura			vidro	vidro baixo ferro 3,2mm	vidro temperado 3,2 mm	vidro anti-reflexo	vidro
Células	Material			Silício	Silício	Silício	c-Si	Silício
	Tipo			Monocrist.	Monocrist.	Policrist., 6"	cristalino	Policrist.
	Número			60	60	72 (6x12)	60	60

Características elétricas em STC (*Standard Test Conditions*): Irradiação ~1000 W/m²; massa de ar ~1,5; temperatura da célula ~25 °C. Características elétricas em NOCT (*Normal Operating Test Conditions*): Irradiação ~800 W/m²; massa de ar ~1,5; velocidade do vento 1 m/s; temperatura ambiente ~20 °C.

APENDICE B - Estratégias de gerenciamento térmico do inversor On-Grid Trifásico da CP Eletrônica / Schneider Electric

O inversor avaliado nos testes possui estratégia de arrefecimento tipo “termostato limite”. Segue descrição do método utilizado para simular o efeito da estratégia de arrefecimento, tipo termostato-limite, na durabilidade. Este inversor pode desligar o inversor por alguns instantes, para evitar superaquecimento, voltando a religar novamente automaticamente após algum tempo. O desligamento ocorre sempre que a temperatura interna ultrapassa uma temperatura limite de operação. Estando desligado a temperatura interna vai baixando gradativamente. Uma vez atingido uma temperatura menor que uma temperatura limite de religamento o inversor volta a ligar automaticamente. Quando em operação volta a aquecer podendo novamente desligar caso a temperatura limite de operação seja novamente ultrapassada. Este processo é contínuo e em dias de alta radiação solar e alta temperatura ambiente pode ocorrer várias vezes no dia.

O fabricante do Inversor On-Grid Trifásico Schneider Electric apresenta as seguintes informações sobre estratégias do inversor para gerenciamento e proteção térmica:

- **Temperatura interna:** Alarme caso a temperatura interna do inversor ultrapasse 36 °C;
- **Temperatura interna crítica:** Caso o equipamento apresente uma temperatura interna superior a 55 °C por mais de 5 segundos, será realizado o desligamento do inversor (o inversor de corrente é desligado e desconectado da rede e dos painéis fotovoltaicos). Enquanto a temperatura interna permanecer acima de 40 °C os comandos permanecerão indisponíveis, sendo mostrado o aviso na tela: “Temp. Interna Crit.”;
- **Proteção do módulo de potência:** O módulo de potência IGBT do conversor DC/AC possui um sensor bimetálico que, em caso de sobreaquecimento (temperatura superior a 80 °C no módulo), ocasionará o desligamento do inversor de corrente e desconexão das contadoras de rede e barramento DC.

Dissipação térmica dos inversores: O Inversor On-Grid Trifásico foi desenvolvido para operar com temperatura ambiente entre 0 °C e 40 °C. Além disso, o equipamento padrão tem grau de proteção IP-52. Condição ambiental fora da especificação pode resultar em um funcionamento inadequado ou acidentes. É importante que o local seja arejado, ou por meio de aberturas, exaustores ou por condicionadores de ar. O fabricante do inversor informa que apresenta uma dissipação térmica de ~4,1 kW (14.000 BTU/h) por inversor.

Tabela B.1 - Exemplos de especificações técnicas de inversores.

Descrição		Unidade	Inversor On-Grid Trifásico	Inversor On-Grid Trifásico
Fabricante			CP / Schneider Electric	Ningbo Ginlong
Modelo			50000	Solis – 6K
Eficiência		%	94 (máxima)	97,5 (máxima)
Entrada CC	Potência máxima	kW	55000	6000
	Corrente de entrada máxima CC	A	127 (entrada única)	18 + 18 (entrada dupla)
	Tensão CC nominal	Vdc	500	
	Tensão de circuito aberta sugerida (Voc)	Vdc	625	
	Tensão CC mínima	Vdc	430	
	Tensão CC máxima	Vdc	750 / 900	1000
	Faixa de tensão MPPT	Vdc	450 ~ 560/700	420 ~ 800
	Tensão de partida	Vdc	Configurável por calibrador	
	Seguimento de máxima potência	Algoritmo de SMP		Tensão constante e Perturba & Observa (P&O)
Número de entradas CC			1 entrada CC 1 SMP	2 entradas CC independentes 2 SMP independentes
Saída CA	Potência nominal CA	VA	50000	6000
	Potência máxima CA	VA	50000	
	Número de fases		3 fases + neutro	3 fases + neutro
	Tensão operacional nominal	Vca	380 (3 fases de 220 V cada)	400 (3 fases de 231 V cada)
	Corrente máxima	Aca	95	8,7
	Fator de potência	%	90 a 100 %	> 99 %
	Frequência nominal	Hz	60 Hz	60 Hz
	Variação admissível da tensão operacional nominal	%	80 a 110 % (304 a 418 Vac)	78 a 117 % (313 a 470 Vac)
	Variação admissível da frequência	Hz	57,5 a 62 Hz	57 a 62 Hz
	Distorção harmônica da corrente	%	< 5% na potência nominal	< 4% (total THD)
	Transformador de saída CA		Com transformador	Sem transformador
	Injeção de corrente contínua	mA		< 20 mA
Consumo		W	Interno < 20 W	Interno < 6 W (a noite)
Dimensões	Largura x Altura x Profundidade	cm	L 97 x A 175 x P 60	L 43 x A 60 x P 22
Peso		kg	700	27
Construção			Painel de aço com porta frontal. Apoiado no chão	Gabinete em alumínio. Fixação em parede
	Interface homem-máquina			
	Comunicação			
Proteções			Curto circuito CA; Anti-ilhamento; Alta temperatura	Polaridade inversa CC; Curto circuito CA; Anti-ilhamento; Alta temperatura
Durabilidade				> 20 anos
Condições	Temperatura ambiente (operação)	°C	0 a 40 °C	-25 a 60 °C