

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**PAULA DOS SANTOS VICENTE**

**TESE DE DOUTORADO**

**RECONFIGURAÇÃO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS  
SOMBREADOS UTILIZANDO A TEORIA DOS CONJUNTOS  
APROXIMADOS**

**Dezembro de 2015**

**Itajubá – MG**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**

**PAULA DOS SANTOS VICENTE**

**RECONFIGURAÇÃO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS  
SOMBREADOS UTILIZANDO A TEORIA DOS CONJUNTOS  
APROXIMADOS**

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DE ITAJUBÁ

Área de Concentração

**Microeletrônica**

Orientador: Professor Tales Cleber Pimenta

Coorientador: Professor Enio Roberto Ribeiro

**Itajubá – MG  
2015**

*“Aos outros, dou o direito de ser como são.  
A mim, dou o dever de ser cada dia melhor.”*

Francisco Cândido Xavier

## **Agradecimentos**

Agradeço primeiramente a Deus por ter me conduzido nesta longa caminhada.

Aos professores Enio Roberto Ribeiro e Tales Cleber Pimenta pela paciência, dedicação e sabedoria na orientação deste trabalho.

Ao meu pai Paulo e minha avó Terezinha por toda confiança e apoio.

Ao meu esposo Eduardo, pelo amor, paciência e companheirismo ao longo dessa jornada.

Aos professores e funcionários da Universidade Federal de Itajubá que contribuíram com o conhecimento e a estrutura para o desenvolvimento das pesquisas.

A CAPES pelo apoio financeiro.

A todos que de forma direta e indireta contribuíram para realização deste trabalho.

Resumo da tese apresentada à Universidade Federal de Itajubá como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica

## **RECONFIGURAÇÃO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS SOMBREADOS USANDO A TEORIA DOS CONJUNTOS APROXIMADOS**

**Paula dos Santos Vicente**  
**Novembro de 2015**

Orientador: Professor Tales Cleber Pimenta, Dr.

Coorientador: Professor Enio Roberto Ribeiro, Dr.

Área de concentração: Microeletrônica

Palavras-chave: Sistemas fotovoltaicos, sombreamento, reconfiguração, Teoria dos Conjuntos Aproximados.

Número de páginas: 116

### **RESUMO:**

Este trabalho apresenta um método para a reconfiguração dinâmica das conexões elétricas em um painel fotovoltaico Série-Paralelo (SP) sob condições de sombreamento parcial. A reorganização dos módulos possibilita a máxima extração de energia da matriz fotovoltaica em situações onde os módulos apresentam pontos de operação diferentes em função do sombreamento. O método proposto tem como característica a manutenção das dimensões da matriz fotovoltaica, ou seja, nenhum módulo é excluído ou adicionado ao painel. Além disso, o algoritmo de controle é baseado na Teoria dos Conjuntos Aproximados (TCA), o que possibilita a implementação de um sistema rápido e eficiente constituído de regras que identificam a configuração ótima para o sistema. A viabilidade do método proposto é avaliada através de simulações e testes experimentais.

*Abstract of Thesis presented to the Federal University of Itajubá as a partial requirement for the degree of Doctor in Electrical Engineering*

***SHADED PV MODULE RECONFIGURATION THROUGH ROUGH SETS THEORY***

**Paula dos Santos Vicente**

*November, 2015*

*Advisor: Tales Cleber Pimenta, Dr.*

*Co-Advisor: Enio Roberto Ribeiro, Dr.*

*Concentration area: Microelectronics*

*Key words: Photovoltaic systems, shadowing, reconfiguration, Rough Sets Theory.*

*Number of pages: 116*

**ABSTRACT:**

*This work presents a dynamic reconfiguration method for electrical connections in a Series-Parallel connected photovoltaic array under partial shading conditions. It is desirable to extract the maximum energy from the array, but it does not occur in situations where the modules have different points of operation caused by shading. The proposed method is then characterized by the maintenance of the PV array dimensions, i.e. no module is removed or added to the array. Furthermore, the control algorithm is based on the Rough Sets Theory, which allows the fast and efficient implementation of a control system, comprising rules that identify the system optimal configuration. Simulations and experimental tests evaluate the feasibility of the proposed method.*

# Sumário

Lista de figuras .....	x
Lista de tabelas .....	xvi
Lista de símbolos .....	xvii
1 Introdução .....	1
1.1 Justificativa do trabalho.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Estrutura da tese .....	3
2 Sistemas fotovoltaicos .....	4
2.1 Considerações iniciais .....	4
2.2 Sistemas fotovoltaicos.....	4
2.3 Célula, módulo e painel fotovoltaico .....	5
2.3.1 Célula fotovoltaica.....	5
2.3.2 Módulo e painel fotovoltaico .....	7
2.4 Eficiência do módulo fotovoltaico .....	7
2.4.1 Temperatura .....	8
2.4.2 Irradiância .....	9
2.5 Sombreamento .....	10
2.6 Considerações finais.....	11
3 Contexto atual dos sistemas de reconfiguração .....	12
3.1 Considerações iniciais .....	12
3.2 Reconfiguração de módulos fotovoltaicos .....	12
3.2.1 Reconfiguração em arranjos TCT.....	13
3.2.2 Reconfiguração em arranjos SP .....	17
3.2.3 Reconfiguração em arranjos variáveis/flexíveis.....	23

3.3	Considerações finais.....	25
4	A Teoria dos Conjuntos Aproximados .....	26
4.1	Considerações iniciais .....	26
4.2	Teoria dos Conjuntos Aproximados (TCA) .....	26
4.3	Fundamentos da Teoria dos Conjuntos Aproximados .....	27
4.3.1	Relações de equivalência .....	27
4.3.2	Base de conhecimento .....	27
4.3.3	Representação dos conjuntos aproximados.....	28
4.3.4	Redução de conhecimento.....	30
4.3.5	Reduto e núcleo .....	30
4.3.6	Representação do conhecimento .....	31
4.3.7	Tabelas de decisão .....	31
4.3.8	Redução das tabelas de decisão .....	32
4.4	Considerações finais.....	33
5	Projeto do sistema de reconfiguração.....	34
5.1	Considerações iniciais .....	34
5.2	Metodologia de reconfiguração .....	34
5.3	Criação de regras com a TCA.....	37
5.4	Projeto do sistema de reconfiguração.....	37
5.4.1	Matriz 2x2 .....	37
5.4.2	Matriz 3x2 .....	41
5.4.3	Matriz 2x3 .....	45
5.5	Considerações finais.....	50
6	Resultados de simulações .....	51
6.1	Considerações iniciais .....	51
6.2	Sistema de reconfiguração – Matriz 2x2 .....	51

6.2.1	Comportamento do sistema para diferentes padrões de sombreamento .....	53
6.3	Sistema de reconfiguração - Matriz 3x2.....	60
6.3.1	Comportamento do sistema para diferentes padrões de sombreamento .....	61
6.4	Sistema de reconfiguração - Matriz 2x3.....	70
6.4.1	Comportamento do sistema para diferentes padrões de sombreamento .....	70
6.5	Considerações finais.....	78
7	Testes experimentais .....	79
7.1	Considerações iniciais .....	79
7.2	Construção do protótipo .....	79
7.2.1	Painel fotovoltaico .....	79
7.2.2	Microcontrolador .....	81
7.2.3	Circuito de comutação .....	83
7.3	Sistema de reconfiguração - Matriz 2x2.....	83
7.3.1	Resultados experimentais.....	86
7.4	Sistema de reconfiguração - Matriz 3x2.....	93
7.4.1	Resultados experimentais.....	94
7.5	Sistema de reconfiguração - Matriz 2x3.....	102
7.5.1	Resultados experimentais.....	103
7.6	Considerações finais.....	111
8	Conclusão geral.....	112
9	Referências.....	114

## Lista de figuras

Fig. 2.1 – Projeção da capacidade de instalação fotovoltaica nos próximos anos.....	4
Fig. 2.2 – Modelo de circuito equivalente para uma célula fotovoltaica [33]......	5
Fig. 2.3 – Curvas características I-V e P-V para uma célula fotovoltaica. ....	6
Fig. 2.4 – Célula, módulo e painel fotovoltaico [34]. ....	7
Fig. 2.5 – Curvas I-V para um módulo sob radiação constante e diferentes valores de temperatura. ....	8
Fig. 2.6 – Curva P-V para um módulo sob radiação constante e diferentes valores de temperatura. ....	9
Fig. 2.7 – Curvas I-V para um módulo sob temperatura constante e diferentes níveis de irradiância. ....	9
Fig. 2.8 – Curvas P-V para um para um módulo sob temperatura constante e diferentes níveis de irradiância.....	10
Fig. 2.9 – Sombreamento em um módulo fotovoltaico: (a) sombreamento parcial de três células; (b) sombreamento total de seis células.....	11
Fig. 3.1 – Topologias básicas de configuração.....	12
Fig. 3.2 – Exemplo de equalização da irradiância [9].....	14
Fig. 3.3 – Sistema para equalização da irradiância: matriz dinâmica e fixa [3]......	14
Fig. 3.4 – (a) Matriz de conexões e (b) topologia resultante para o sistema de reconfiguração proposto em [4]. ....	16
Fig. 3.5 – Realocação dos módulos sombreados: (a) antes; (b) depois da reconfiguração [15]. ....	17
Fig. 3.6 – Matriz 4x4: (a) antes e (b) depois da reconfiguração [19]. ....	18
Fig. 3.7 – Testes em uma matriz SP 4x4 (a) <i>Fixed-State</i> ; (b) <i>Bi-State</i> ; (c) <i>Tri-State</i> ; (d) comparação entre as respostas do sistema para as três metodologias [20].....	19
Fig. 3.8 – Sistema FSM: (a) condições normais e (b) sombreamento de dois módulos [21]...	20
Fig. 3.9 – Sistema OS-DPVA [22]. ....	20
Fig. 3.10 – Painel fotovoltaico SP ativo: (a) antes e (b) depois da reconfiguração [23]. ....	21
Fig. 3.11 – Diagrama de blocos do sistema de reconfiguração proposto em [26].....	22
Fig. 3.12 – Configurações: (a) série, (b) série-paralela e (c) paralela [6]. ....	23
Fig. 3.13 – Configuração ideal: (a) um módulo sombreado; (b) dois módulos sombreados; (c) três módulos sombreados; (d) quatro módulos sombreados [29]. ....	24

Fig. 4.1 – Representação de um conjunto dividido em classes de equivalência [38].	27
Fig. 4.2 – Conjunto $X$ na base de conhecimento $K = (U, R)$ [37].	28
Fig. 4.3 – Aproximação inferior de $X$ em $K$ [37].	29
Fig. 4.4 – Aproximação superior de $X$ em $K$ [37].	29
Fig. 4.5 – Regiões de $X$ em $K$ [37].	30
Fig. 5.1 – Exemplo: (a) antes da reconfiguração; (b) depois da reconfiguração.	35
Fig. 5.2 – Matriz $2 \times 2$ .	38
Fig. 5.3 – Situações equivalentes para uma matriz $2 \times 2$ .	38
Fig. 5.4 – Configurações de interesse para matriz $2 \times 2$ .	38
Fig. 5.5 – Matriz $3 \times 2$ .	41
Fig. 5.6 – Configurações de interesse para matriz $3 \times 2$ .	42
Fig. 5.7 – Análise da configuração anterior para situação 4 da Tabela 5.2.	45
Fig. 5.8 – Matriz $2 \times 3$ .	46
Fig. 5.9 – Configurações de interesse para matriz $2 \times 3$ .	46
Fig. 6.1 – Circuito simplificado do sistema de reconfiguração para a matriz $2 \times 2$ .	51
Fig. 6.2 – Fluxograma do algoritmo proposto.	52
Fig. 6.3 – Sombreamentos estáticos em um painel fotovoltaico $2 \times 2$ : (a) um módulo; (b) dois módulos em uma mesma coluna; (c) dois módulos em uma mesma linha; (d) dois módulos na diagonal; (e) três módulos; (f) quatro módulos.	54
Fig. 6.4 – Potência <i>versus</i> tempo – antes e depois da reconfiguração para sombreamentos estáticos em um painel fotovoltaico $2 \times 2$ : (a) um módulo; (b) dois módulos em uma mesma coluna; (c) dois módulos em uma mesma linha; (d) dois módulos na diagonal; (e) três módulos; (f) quatro módulos.	55
Fig. 6.5 – Sombreamento com deslocamento horizontal em uma matriz $2 \times 2$ .	56
Fig. 6.6 – Potência <i>versus</i> tempo, antes e depois da reconfiguração, para o sombreamento com deslocamento horizontal em uma matriz $2 \times 2$ .	57
Fig. 6.7 – Sombreamento com deslocamento vertical em uma matriz $2 \times 2$ .	57
Fig. 6.8 – Potência <i>versus</i> tempo, antes e depois da reconfiguração, para o sombreamento com deslocamento vertical, em uma matriz $2 \times 2$ .	58
Fig. 6.9 – Sombreamento com deslocamento diagonal em uma matriz $2 \times 2$ .	59
Fig. 6.10 – Potência <i>versus</i> tempo, antes e depois da reconfiguração, para o sombreamento com deslocamento diagonal, em uma matriz $2 \times 2$ .	59

Fig. 6.11 – Potência <i>versus</i> tempo, antes e depois da reconfiguração, para matriz 2x2 e sombreamentos progressivos. ....	60
Fig. 6.12 – Circuito simplificado do sistema de reconfiguração para a matriz 3x2. ....	61
Fig. 6.13 – Sombreamentos estáticos em um painel fotovoltaico 3x2: (a) um módulo; (b) dois módulos em uma mesma coluna; (c) dois módulos em uma mesma linha; (d) três módulos em uma mesma coluna; (e) três módulos em duas colunas; (f) quatro módulos; (g) cinco módulos; (h) seis módulos. ....	62
Fig. 6.14 – Potência <i>versus</i> tempo – antes e depois da reconfiguração para sombreamentos estáticos em um painel fotovoltaico 3x2: (a) um módulo; (b) dois módulos em uma mesma coluna; (c) dois módulos em uma mesma linha; (d) três módulos em uma mesma coluna; (e) três módulos em duas colunas; (f) quatro módulos; (g) cinco módulos; (h) seis módulos. ....	63
Fig. 6.15 – Sombreamento com deslocamento horizontal: (a) uma linha e até dois módulos atingidos; (b) duas linhas e até quatro módulos atingidos. ....	64
Fig. 6.16 – Potência <i>versus</i> tempo, antes e depois da reconfiguração, para o sombreamento com deslocamento horizontal de uma linha na matriz 3x2. ....	64
Fig. 6.17 – Potência <i>versus</i> tempo, antes e depois da reconfiguração, para o sombreamento com deslocamento horizontal de duas linhas na matriz 3x2. ....	65
Fig. 6.18 – Sombreamento com deslocamento vertical: (a) uma linha e dois módulos atingidos; (b) duas linhas e até quatro módulos atingidos. ....	66
Fig. 6.19 – Potência <i>versus</i> tempo, antes e depois da reconfiguração, para o sombreamento com deslocamento vertical na matriz 3x2: (a) uma linha e dois módulos atingidos; (b) duas linhas e até quatro módulos atingidos. ....	67
Fig. 6.20 – Sombreamento com deslocamento diagonal: (a) até dois módulos atingidos; (b) até três módulos atingidos. ....	67
Fig. 6.21 – Potência <i>versus</i> tempo, antes e depois da reconfiguração, para o sombreamento com deslocamento diagonal e até dois módulos atingidos na matriz 3x2. ....	68
Fig. 6.22 – Potência <i>versus</i> tempo, antes e depois da reconfiguração, para o sombreamento com deslocamento diagonal e até três módulos atingidos na matriz 3x2. ....	68
Fig. 6.23 – Potência <i>versus</i> tempo, antes e depois da reconfiguração, para a matriz 3x2 e sombreamentos progressivos. ....	69
Fig. 6.24 – Potência após a reconfiguração e configuração habilitada a cada intervalo de tempo. ....	69

Fig. 6.25 – Circuito simplificado do sistema de reconfiguração da matriz 2x3.....	70
Fig. 6.26 – Sombreamentos estáticos em um painel fotovoltaico 2x3: (a) um módulo; (b) dois módulos em uma mesma coluna; (c) dois módulos em uma mesma linha; (d) três módulos em duas colunas; (e) três módulos em uma mesma linha; (f) quatro módulos em duas colunas; (g) quatro módulos em três colunas; (h) cinco módulos; (i) seis módulos. ....	71
Fig. 6.27 – Potência <i>versus</i> tempo – antes e depois da reconfiguração para sombreamentos estáticos em um painel fotovoltaico 2x3: (a) um módulo; (b) dois módulos em uma mesma coluna; (c) dois módulos em uma mesma linha; (d) três módulos em duas colunas; (e) três módulos em uma mesma linha; (f) quatro módulos em duas colunas; (g) quatro módulos em três colunas; (h) cinco módulos; (i) seis módulos. ....	72
Fig. 6.28 –Sombreamento com deslocamento horizontal: (a) uma linha e até dois módulos atingidos; (b) uma linha e até três módulos atingidos; (c) duas linhas e dois módulos atingidos.....	73
Fig. 6.29 – Potência <i>versus</i> tempo, antes e depois da reconfiguração, para o sombreamento com deslocamento horizontal de uma linha e até dois módulos atingidos. ....	74
Fig. 6.30 – Potência <i>versus</i> tempo, antes e depois da reconfiguração, para o sombreamento com deslocamento horizontal de uma linha e até três módulos atingidos. ....	74
Fig. 6.31 – Potência <i>versus</i> tempo, antes e depois da reconfiguração, para o sombreamento com deslocamento horizontal sobre uma coluna e dois módulos atingidos.....	75
Fig. 6.32 –Sombreamento com deslocamento vertical: (a) uma linha e dois módulos atingidos; (b) uma linha três módulos atingidos. ....	75
Fig. 6.33 – Potência <i>versus</i> tempo, antes e depois da reconfiguração, para o sombreamento com deslocamento vertical: (a) dois módulos atingidos; (b) três módulos atingidos.....	76
Fig. 6.34 –Sombreamento com deslocamento diagonal e até dois módulos atingidos. ....	76
Fig. 6.35 – Potência <i>versus</i> tempo, antes e depois da reconfiguração, para o sombreamento com deslocamento diagonal e até dois módulos atingidos.....	77
Fig. 6.36 – Potência <i>versus</i> tempo para painel 2x3, antes e depois da reconfiguração, e sombreamentos progressivos. ....	77
Fig. 7.1 –Módulo fotovoltaico KS10. ....	79
Fig. 7.2 – Sistema composto por módulo fotovoltaico e circuito de medição. ....	81
Fig. 7.3 – Circuito de medição para até seis módulos fotovoltaicos. ....	81
Fig. 7.4 – Plataforma Arduino Mega 2560.....	82
Fig. 7.5 – Fluxograma do algoritmo de controle. ....	82

Fig. 7.6 – Circuito de disparo para o relé <i>reed</i> . .....	83
Fig. 7.7 – Circuito do sistema de reconfiguração para a matriz 2x2. ....	84
Fig. 7.8 – Arranjo experimental do sistema de reconfiguração para a matriz 2x2. ....	84
Fig. 7.9 – Bancada de testes do sistema de reconfiguração 2x2.....	85
Fig. 7.10 – Curvas características I-V para um módulo fotovoltaico KS10 antes e após o sombreamento realizado com o material TNT.....	85
Fig. 7.11 – Tensão, corrente e potência para o sombreamento de um módulo fotovoltaico....	87
Fig. 7.12 – Tensão, corrente e potência para o sombreamento de dois módulos em uma mesma coluna. ....	87
Fig. 7.13 – Tensão, corrente e potência sombreamento de dois módulos em colunas diferentes. .....	88
Fig. 7.14 – Tensão, corrente e potência para: (a) sombreamento de três módulos e (b) sombreamento de quatro módulos. ....	89
Fig. 7.15 – Tensão, corrente e potência para um sombreamento dinâmico com deslocamento horizontal. ....	90
Fig. 7.16 – Tensão, corrente e potência para um sombreamento dinâmico com deslocamento vertical. ....	91
Fig. 7.17 – Tensão, corrente e potência para um sombreamento dinâmico com movimentação diagonal. ....	92
Fig. 7.18 – Tensão, corrente e potência para a matriz 2x2 sem reconfiguração e com reconfiguração.....	93
Fig. 7.19 – (a) Bancada de testes para o sistema de reconfiguração 3x2; (b) plataforma com circuitos para o sistema de reconfiguração 3x2. ....	94
Fig. 7.20 – Tensão, corrente e potência para: (a) dois módulos sombreados; (b) três módulos sombreados. ....	95
Fig. 7.21 – Tensão, corrente e potência para: (a) dois módulos sombreados; (b) três módulos sombreados. ....	96
Fig. 7.22 – Tensão, corrente e potência para: (a) um módulo sombreado; (b) quatro módulos sombreados; (c) cinco módulos sombreados; (d) seis módulos sombreados. ....	97
Fig. 7.23 – Tensão, corrente e potência para um sombreamento dinâmico com deslocamento horizontal da sombra em uma linha. ....	98
Fig. 7.24 – Tensão, corrente e potência para um sombreamento dinâmico com deslocamento horizontal da sombra em duas linhas. ....	98

Fig. 7.25 – Tensão, corrente e potência para um sombreamento dinâmico com deslocamento vertical da sombra e dois módulos atingidos. ....	99
Fig. 7.26 – Tensão, corrente e potência para um sombreamento dinâmico com deslocamento vertical da sombra e até quatro módulos atingidos. ....	100
Fig. 7.27 – Tensão, corrente e potência para um sombreamento dinâmico com deslocamento diagonal da sombra e até dois módulos atingidos. ....	100
Fig. 7.28 – Tensão, corrente e potência para um sombreamento dinâmico com deslocamento diagonal da sombra e até três módulos atingidos. ....	101
Fig. 7.29 – Tensão, corrente e potência para a matriz 3x2 sem reconfiguração e com reconfiguração. ....	102
Fig. 7.30 – Bancada de testes do sistema de reconfiguração 2x3. ....	102
Fig. 7.31 – Tensão, corrente e potência para: (a) dois módulos sombreados; (b) três módulos sombreados; (c) quatro módulos sombreados. ....	104
Fig. 7.32 – Tensão, corrente e potência para: (a) dois módulos sombreados; (b) três módulos sombreados; (c) quatro módulos sombreados. ....	105
Fig. 7.33 – Tensão, corrente e potência para: (a) cinco módulos sombreados; (b) seis módulos sombreados. ....	106
Fig. 7.34 – Tensão, corrente e potência para um sombreamento dinâmico com deslocamento horizontal da sombra em uma linha e até dois módulos atingidos. ....	107
Fig. 7.35 – Tensão, corrente e potência para um sombreamento dinâmico com deslocamento horizontal da sombra em uma linha e até três módulos atingidos. ....	107
Fig. 7.36 – Tensão, corrente e potência para um sombreamento dinâmico com deslocamento horizontal da sombra em uma coluna e dois módulos atingidos. ....	108
Fig. 7.37 – Tensão, corrente e potência para um sombreamento dinâmico com deslocamento vertical da sombra em uma linha e dois módulos atingidos. ....	108
Fig. 7.38 – Tensão, corrente e potência para um sombreamento dinâmico com deslocamento vertical da sombra em uma linha e três módulos atingidos. ....	109
Fig. 7.39 – Tensão, corrente e potência para um sombreamento dinâmico com deslocamento diagonal e até dois módulos atingidos. ....	110
Fig. 7.40 – Tensão, corrente e potência para a matriz 2x3 sem reconfiguração e com reconfiguração. ....	110

## Lista de tabelas

Tabela 3.1 - Configurações para quatro módulos fotovoltaicos [31]. .....	25
Tabela 4.1 - Exemplo de um SI [41]......	32
Tabela 5.1 - Sistema de Informação para a matriz 2x2.....	39
Tabela 5.2 - Sistema de Informação para a matriz 3x2.....	42
Tabela 5.3 - Sistema de Informação para a matriz 2x3.....	46
Tabela 7.1 - Parâmetros do módulo fotovoltaico KS10 Kyocera®. ....	79

# Lista de símbolos

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
BL	<i>Bridge Linked</i> (conexão em ponte)
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CF	Configuração ótima
COI	<i>Configurations of Interest</i> (configurações de interesse)
DES	<i>Dynamic Electrical Scheme</i> (esquema elétrico dinâmico)
FSM	<i>Flexible Switch Matriz</i> (Matriz de comutação flexível)
G	Irradiância
CF	Configuração ótima
I	Corrente nos terminais da célula
$I_0$	Corrente inversa máxima de saturação do diodo
$I_D$	Corrente que passa pelo diodo
$I_{MPP}$	Corrente no ponto de máxima potência
IMI	<i>Irradiance Level Mismatch Index</i> (índice de incompatibilidade no nível de irradiância)
$I_P$	Corrente que passa por $R_P$
$I_{PH}$	Corrente fotogerada
$I_S$	Corrente fotogerada
$I_{SC}$	Corrente de curto-circuito
$I_T$	Configurações de interesse
K	Base de conhecimento
m	Fator de idealidade do diodo
M	Número de colunas da matriz fotovoltaica
$M_S$	Quantidade de módulos sombreados
MPP	<i>Maximum Power Point</i> (ponto de máxima potência)
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i> (rastreamento do ponto de máxima potência)
n	Número de módulos
N	Número de linhas da matriz fotovoltaica
OS-DPVA	<i>Optimized String Dynamic Photovoltaic Array</i> (matriz fotovoltaica dinâmica otimizada)
P	Quantidade de permutações
$P_{MPP}$	Potência no ponto de máxima potência
PV	<i>Photovoltaic</i> /fotovoltaico
R	Relações de equivalência
$R_P$	Resistência paralela
$R_S$	Resistência série
S	Fator de sombreamento
SI	Sistema de Informação
SP	<i>Series-Parallel</i> (conexão série-paralela)

$S_P$	Quantidade de diferentes possibilidades de sombreamento
$S_R$	Irradiância
STC	<i>Standard Test Conditions</i> (condições de teste padrão)
T	Temperatura em °C
TCA	Teoria dos Conjuntos Aproximados
TCT	<i>Total Cross Tied</i> (conexão total-cruzada)
U	Conjunto Universo
V	Tensão nos terminais da célula
$V_D$	Tensão direta no diodo
$V_{MPP}$	Tensão no ponto de máxima potência
$V_{OC}$	Tensão de circuito aberto
$V_T$	Potencial térmico
$W_p$	(Watt-pico) medida de potência energética para sistemas fotovoltaicos
$W/m^2$	Watt por metro quadrado
$Y_{IQ}$	<i>Existence Variable</i> (variável existente)

## 1.1 Justificativa do trabalho

Atualmente, a geração de energia elétrica faz-se quase que exclusivamente a partir da energia hídrica, térmica e nuclear. Com o crescente aumento na demanda de energia, além da preocupação com o meio ambiente, surge a necessidade de utilizar fontes alternativas e não poluentes para a geração de eletricidade. Nos últimos anos foram desenvolvidas diferentes tecnologias, onde a geração de energia elétrica pode ser feita a partir de energia maremotriz, geotérmica, heliotérmica, eólica e fotovoltaica entre outras.

Dentre as fontes alternativas, destaca-se a energia solar. Os sistemas fotovoltaicos dependem exclusivamente da luz do Sol. Além disso, fatores como a redução de perdas por transmissão e distribuição e a possibilidade de injeção da energia elétrica excedente no barramento impulsionam seu uso em aplicações domésticas e comerciais.

A eficiência dos sistemas fotovoltaicos apresenta variação significativa em função das condições climáticas, sendo o sombreamento, um fenômeno comum e de grande impacto na produção de energia. Em diversas situações, o painel fotovoltaico pode ser iluminado de maneira não uniforme (sombreado por nuvens, sujeira, árvores, estruturas prediais, etc) resultando em alguns efeitos indesejados como:

- Surgimento de pontos quentes (*hot spot*): isto ocorre quando a célula ou grupo de células sombreadas são forçadas a uma polarização inversa, dissipando energia que pode causar sobreaquecimento, danificando o seu encapsulamento e degradando o desempenho de todo o módulo;

- Alteração no ponto de operação dos módulos;
- Redução na quantidade de energia gerada;

Na literatura técnica são citadas diferentes propostas para a redução dos efeitos negativos causados pelo sombreamento parcial. Dentre os quais se destacam:

- Sistema com micro-conversores: cada módulo do painel fotovoltaico é conectado a um conversor com sistema de rastreamento do ponto de máxima potência (*Maximum Power Point Tracking* (MPPT)) dedicado. Este tipo de solução produz ótimos resultados, uma vez que

cada módulo fotovoltaico opera em seu ponto ótimo. Como desvantagem pode-se citar, essencialmente, o seu alto custo devido ao uso de vários conversores [2];

- Diodos *bypass*: são conectados em antiparalelo com os módulos fotovoltaicos, evitando que os mesmos, quando sombreados, sejam percorridos por correntes reversas e funcionem como carga para os demais. Além deste tipo de montagem requerer grande número de diodos, a energia produzida não é totalmente aproveitada uma vez que os módulos sombreados são desviados do arranjo final;

- Reconfiguração das conexões elétricas: tradicionalmente as conexões entre os módulos que constituem um painel fotovoltaico são fixas. Entretanto, trabalhos recentes [3] - [31] apresentam sistemas onde os módulos fotovoltaicos são rearranjados em tempo real, a fim de que o sistema fotovoltaico tenha um melhor aproveitamento da energia produzida.

A reconfiguração das conexões elétricas do painel fotovoltaico, em geral, é feita com a inserção de um circuito de comutação. Com o rearranjo dos módulos, é possível recuperar grande parte da energia que seria perdida em um sistema com conexões fixas. Entretanto, alguns dos métodos propostos requerem o uso de uma quantidade excessiva de sensores e interruptores [3] [4], o que eleva o custo e a complexidade dos circuitos de conexão.

## 1.2 Objetivos

Nesta tese de doutorado é apresentado o desenvolvimento e construção de um sistema de reconfiguração de módulos fotovoltaicos, cujo objetivo é a redução dos impactos negativos causados pelo sombreamento. O sistema proposto é capaz de reconfigurar dinamicamente as conexões elétricas de um painel fotovoltaico em situações de sombreamento.

Na literatura, é possível encontrar trabalhos que propõem metodologias de reconfiguração para arranjos fotovoltaicos nas topologias *Total Cross Tied* (TCT), *Series-Parallel* (SP) entre outros. Grande parte das abordagens é voltada principalmente para os arranjos do tipo TCT, enquanto as propostas para a reconfiguração em painéis SP são menos frequentes. Tendo isso em vista, neste trabalho de doutorado, escolheu-se como referência a topologia SP para o arranjo de módulos fotovoltaicos em estudo. Outro fator que estimulou a escolha desta topologia é o fato de que os arranjos do tipo SP são fortemente afetados pela ocorrência do sombreamento o que viabiliza a aplicação do sistema de reconfiguração como estratégia para redução dos efeitos negativos causados pela sombra.

O processo de reconfiguração pode ser dividido em algumas fases, sendo que a primeira delas constitui a medição e identificação da situação dos módulos que compõem o painel fotovoltaico. Após a identificação (sombreado / não sombreado) de cada módulo, o sistema desenvolvido deve definir o arranjo mais adequado e que proporcione o melhor aproveitamento da energia fornecida pelo painel. Destaca-se que a metodologia proposta tem como característica a manutenção das dimensões da matriz fotovoltaica, ou seja, nenhum módulo é excluído ou adicionado ao painel. Além disso, o diferencial deste trabalho encontra-se na aplicação da Teoria dos Conjuntos Aproximados (TCA) para a construção do algoritmo de controle.

Nesta tese, objetiva-se a avaliação do comportamento do sistema de reconfiguração através de simulações e testes experimentais, sendo que para a implementação da metodologia proposta utiliza-se um microcontrolador responsável pela execução das regras geradas com a TCA.

### **1.3 Estrutura da tese**

Nesta tese de doutorado serão apresentados alguns dos aspectos teóricos e práticos necessários para o desenvolvimento do sistema proposto. Assim sendo, no Capítulo 2 apresenta-se uma breve introdução aos sistemas fotovoltaicos onde a modelagem matemática e eficiência destes sistemas são discutidos.

Uma revisão bibliográfica realizada de forma ampla e geral, mostrando o estado da arte na área dos métodos de reconfiguração para sistemas fotovoltaicos é apresentada no Capítulo 3. Dedicar-se especial atenção aos trabalhos relacionados às topologias TCT e SP.

Os fundamentos básicos da Teoria dos Conjuntos Aproximados e da modelagem de sistemas utilizando esse recurso são apresentados no Capítulo 4.

A apresentação da metodologia proposta para a construção do sistema de reconfiguração bem como o projeto desenvolvido para três matrizes fotovoltaicas são apresentados no Capítulo 5.

No Capítulo 6 avalia-se a viabilidade da metodologia proposta através de simulações computacionais.

Os circuitos avaliados computacionalmente, no Capítulo 6, são implementados e os testes experimentais realizados tem seus resultados expostos de forma detalhada no Capítulo 7.

Por fim, no Capítulo 8, são discutidos os resultados obtidos através das simulações e ensaios experimentais e as conclusões a respeito do estudo desenvolvido são apresentadas.

## 2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

### 2.1 Considerações iniciais

Neste capítulo serão apresentadas algumas características dos sistemas fotovoltaicos para geração de energia. Uma breve descrição do princípio de funcionamento, bem como a modelagem matemática da célula fotovoltaica serão mostradas. Em seguida são apresentadas definições importantes a respeito dos sistemas fotovoltaicos, além dos principais aspectos teóricos e práticos envolvidos em aplicações deste tipo de sistema.

### 2.2 Sistemas fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos são uma tecnologia emergente para a geração de energia elétrica e vêm se mostrando uma alternativa viável aos métodos convencionais de produção de energia. A perspectiva para os próximos anos é que a instalação de sistemas fotovoltaicos apresente um crescimento expressivo conforme ilustra a projeção apresentada na Fig. 2.1.

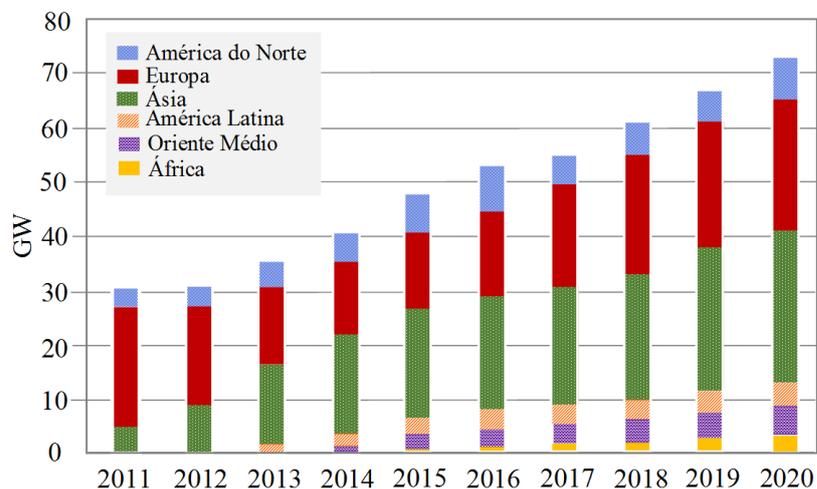


Fig. 2.1 – Projeção da capacidade de instalação fotovoltaica nos próximos anos (*Navigant Research*) [32].

Uma análise da capacidade de instalação fotovoltaica apresentada na Fig. 2.1 mostra que entre 2015 e 2020 espera-se um aumento em torno de 50% no total de instalações. O aumento de instalações, associado ao alto custo do kw/h gerado impulsionam diversas pesquisas com o intuito de aprimorar a eficiência destes sistemas.

No estudo dos sistemas fotovoltaicos, alguns conceitos são imprescindíveis. A seguir, são apresentadas informações essenciais para análise e modelagem deste tipo de sistema.

## 2.3 Célula, módulo e painel fotovoltaico

Embora as análises realizadas para células fotovoltaicas possam ser estendidas para módulos e painéis fotovoltaicos, é importante salientar a diferença entre esses três termos que são frequentemente confundidos.

### 2.3.1 Célula fotovoltaica

O princípio de funcionamento da célula fotovoltaica está baseado no efeito fotovoltaico, observado pela primeira vez por Edmond Becquerel. A célula fotovoltaica pode ser construída a partir de diferentes materiais, sendo que a grande maioria das células comerciais são de silício policristalino.

Uma célula solar policristalina é composta por camadas de silício dopado por impurezas do tipo *n* e do tipo *p* e tem o mesmo princípio que um diodo comum de silício. Diante disso, é possível elaborar um circuito elétrico que representa a célula fotovoltaica (Fig. 2.2) [33].

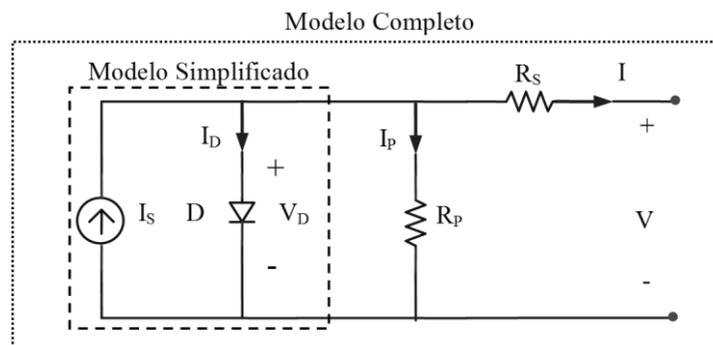


Fig. 2.2 – Modelo de circuito equivalente para uma célula fotovoltaica [33].

No circuito:

- $I_S$  Corrente fotogerada.
- $I_D$  Corrente que passa pelo diodo.
- $V_D$  Tensão direta sobre o diodo.
- $R_P$  Resistência paralela.
- $I_P$  Corrente que passa por  $R_P$ .
- $R_S$  Resistência série.
- $I$  Corrente nos terminais da célula.
- $V$  Tensão nos terminais da célula.

Na Fig. 2.2, o circuito equivalente delimitado pelo retângulo pontilhado representa o modelo completo para célula fotovoltaica. Neste modelo, as não idealidades da célula são representadas através das resistências série ( $R_S$ ) e paralela ( $R_P$ ).

Admitindo-se  $R_S=0$  e  $R_P=\infty$ , obtém-se o modelo simplificado, delimitado pelo quadrado tracejado. Este modelo é composto apenas pela fonte de corrente em paralelo com um diodo.

O circuito equivalente possibilita extrair as equações para os parâmetros elétricos de uma célula fotovoltaica iluminada: a corrente de curto-circuito ( $I_{SC}$ ), a tensão de circuito aberto ( $V_{OC}$ ), a corrente ( $I_{MPP}$ ), a tensão ( $V_{MPP}$ ) e a potência ( $P_{MPP}$ ) no ponto de máxima potência.

O circuito simplificado desconsidera os elementos parasitas de uma célula fotovoltaica real e, portanto, as suas expressões são aproximadas. Analisando-se o circuito simplificado obtém-se a equação (2.1), em que:  $I_0$  é a corrente inversa máxima de saturação do diodo,  $m$  é o fator de idealidade do diodo e  $V_T$  é o potencial térmico.

$$I = I_S - I_0 \cdot \left( e^{\frac{V}{m \cdot V_T}} - 1 \right) \quad (2.1)$$

Analisando-se os nós do modelo completo da célula, chega-se a equação da corrente dada por (2.2). A solução da equação (2.2) leva à curva característica corrente *versus* tensão (I-V) da célula fotovoltaica, a qual é apresentada na Fig. 2.3, bem como a indicação de seus parâmetros elétricos.

$$I = I_S - I_0 \cdot \left\{ e^{\frac{V+I \cdot R_S}{m \cdot V_T}} - 1 \right\} - \frac{V + I \cdot R_S}{R_P} \quad (2.2)$$

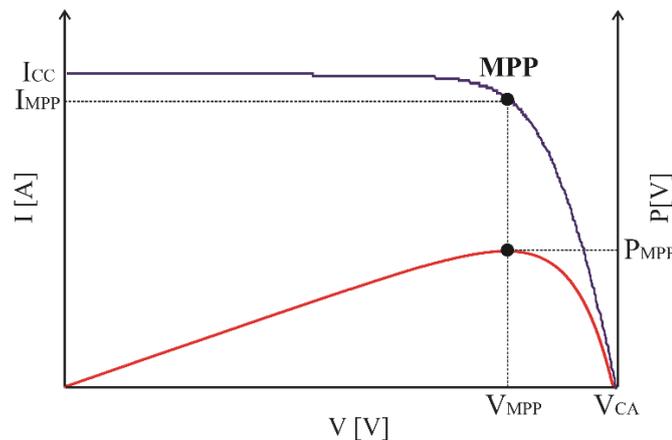


Fig. 2.3 – Curvas características I-V e P-V para uma célula fotovoltaica.

A partir da curva característica I-V é possível obter a curva da potência *versus* tensão também apresentada na Fig. 2.3. Nessa curva existe um único ponto de máximo para o produto

I-V. Este ponto é chamado de ponto de máxima potência (*Maximum Power Point – MPP*) conforme indicado na Fig. 2.3.

### 2.3.2 Módulo e painel fotovoltaico

As células fotovoltaicas podem ser associadas em conexões série, paralela ou mistas (série e paralela). Assim, um módulo fotovoltaico é composto por um conjunto de células, que em geral são conectadas em série a fim de elevar os níveis de tensão resultante.

Por sua vez, o painel ou matriz fotovoltaica é formado por um conjunto de módulos fotovoltaicos. Assim como as células e os módulos, o painel pode ter seus elementos conectados em série, paralelo ou arranjos mistos. O tipo de arranjo irá definir os níveis de tensão, corrente e potência de saída do painel [34].

A Fig. 2.4 ilustra a representação física da célula, módulo e painel fotovoltaico.

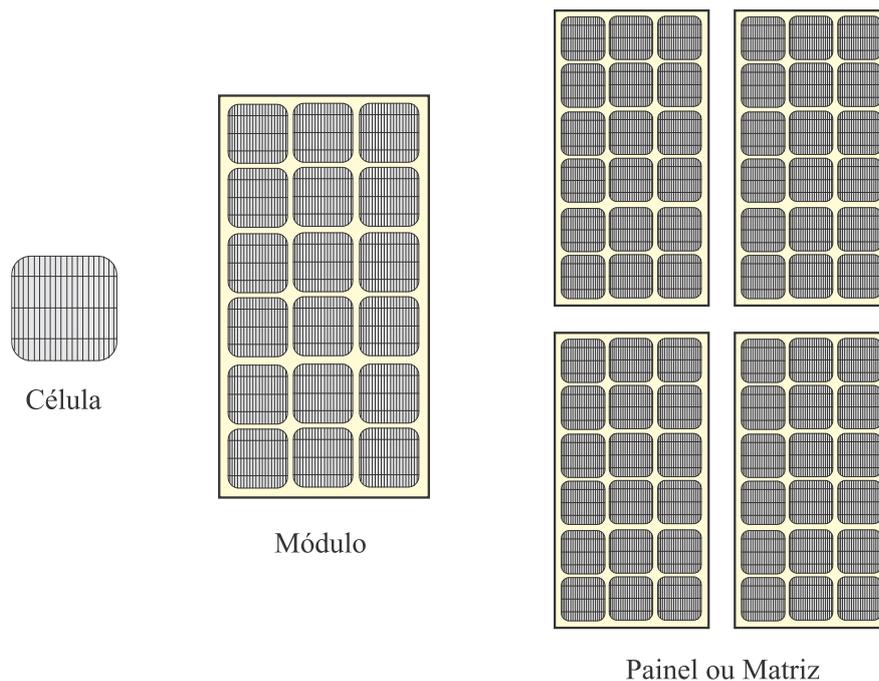


Fig. 2.4 – Célula, módulo e painel fotovoltaico [34].

## 2.4 Eficiência do módulo fotovoltaico

As células solares comerciais apresentam uma eficiência de conversão da ordem de 16%. Entretanto, o rendimento de um sistema fotovoltaico pode ser severamente reduzido se os módulos não estiverem sob condições ideais de funcionamento. O desempenho destes sistemas

depende, principalmente, da irradiância e da temperatura. Portanto, os sistemas fotovoltaicos são fortemente dependentes das condições climáticas a que estão submetidos.

Para padronizar as informações a respeito dos módulos fotovoltaicos, os fabricantes tipicamente utilizam o termo *Standart Test Conditions* (STC) ou condições de teste padrão nos dados de catálogo. Neste caso, os valores de irradiância e temperatura são fixados em  $S_R = 1000 \text{ W/m}^2$  e  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ , respectivamente.

### 2.4.1 Temperatura

A temperatura é uma medida do grau de agitação das moléculas e é um fator que influencia no funcionamento dos módulos fotovoltaicos. Um dos efeitos provocados pelo aumento da temperatura do módulo é uma redução de sua tensão de circuito aberto, como se verifica na Fig. 2.5.

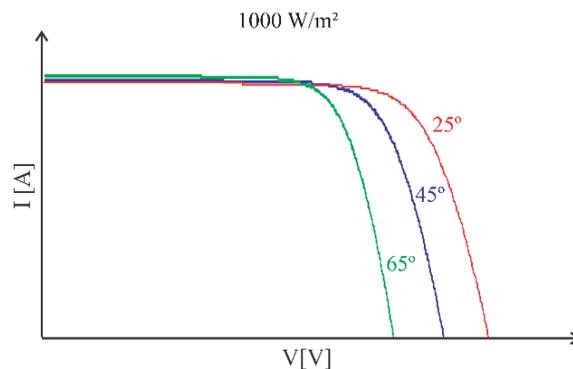


Fig. 2.5 – Curvas I-V para um módulo sob radiação constante e diferentes valores de temperatura.

Quando há um aumento na temperatura do módulo, ocorrem dois processos que alteram seu desempenho. Quando o cristal de Silício está quente, a vibração dos átomos é mais intensa e os choques com os fótons levam a produzir um valor de corrente ligeiramente mais alta, para uma mesma radiação. Além disso, com o aumento da temperatura, os elétrons livres e lacunas possuirão excesso de energia térmica para que se “empurrem” contra a junção *pn* no sentido contrário ao imposto pelo campo elétrico criado, acarretando em uma redução da tensão de saída [34].

Na Fig. 2.6 são apresentadas as curvas para potência de uma célula fotovoltaica em função de variações na temperatura. Na imagem destaca-se o deslocamento do ponto de máxima potência em função do aumento na temperatura.

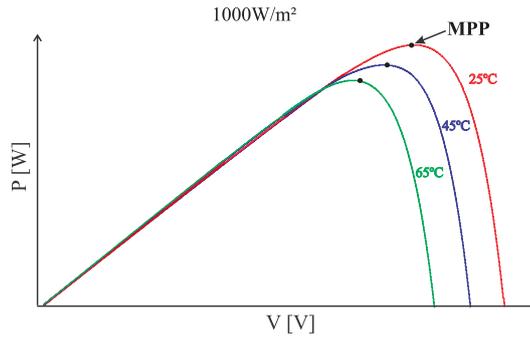


Fig. 2.6 – Curva P-V para um módulo sob radiação constante e diferentes valores de temperatura.

## 2.4.2 Irradiância

Irradiância é a grandeza utilizada para descrever a radiação solar incidente por unidade de área e é medida em  $W/m^2$ . Em um módulo fotovoltaico, a incidência da radiação solar provoca o surgimento de uma fotocorrente diretamente proporcional a essa irradiância. Na Fig. 2.7, as curvas I-V para uma célula fotovoltaica sob diferentes níveis de irradiância são apresentadas.

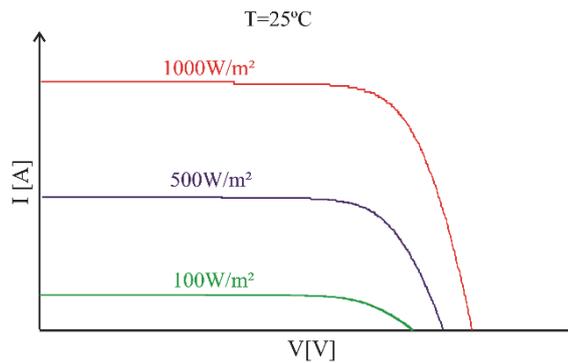


Fig. 2.7 – Curvas I-V para um módulo sob temperatura constante e diferentes níveis de irradiância.

Observa-se que a corrente de curto-circuito diminui à medida que diminui o nível de radiação. A variação da tensão de circuito aberto, em função da variação da radiação, sofre menor influência e pode ser determinada a partir da equação (2.3).

$$\Delta V_{OC} = \frac{m \cdot V_T}{e} \cdot \ln\left(\frac{G_1}{G_2}\right) \quad (2.3)$$

em que,  $\Delta V_{OC}$  é a variação da tensão de circuito aberto,  $G_1$  é a irradiância inicial e  $G_2$  a irradiância final [35].

Para facilitar a visualização dos efeitos das alterações na irradiância sobre a potência da célula fotovoltaica são apresentadas as curvas da Fig. 2.8.

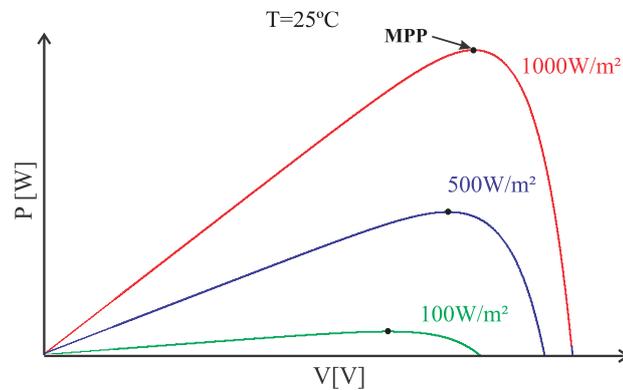


Fig. 2.8 – Curvas P-V para um para um módulo sob temperatura constante e diferentes níveis de irradiância.

## 2.5 Sombreamento

Um efeito importante que merece destaque quando se trata de sistemas fotovoltaicos é a ocorrência de sombreamentos suaves ou severos. Os sombreamentos suaves são aqueles onde os raios solares são dispersados e se tornam difusos, podendo ser causados por nuvens pouco densas, sujeira, poluição, etc, diminuindo a potência gerada. O sombreamento severo ocorre quando os raios solares são totalmente interrompidos, não alcançando a superfície do módulo [34] [36].

O sombreamento pode ocorrer de forma parcial ou total. No sombreamento parcial, visto na Fig. 2.9 (a), somente parte de uma ou mais células do módulo fotovoltaico deixa de ser iluminada, implicando numa redução, proporcional à área sombreada, da potência de saída. Este efeito ocorre devido ao fato de que em um módulo, geralmente, as células estão conectadas em série, assim a redução de geração de uma delas causará a redução no fluxo de corrente das demais. No caso do sombreamento total, ilustrado na Fig. 2.9 (b), a área de uma ou várias células é totalmente coberta, dessa forma, a geração de energia elétrica pode cair a zero [34].

Assim como uma célula sombreada implica na redução da geração de todas as células conectadas em série a ela, um módulo fotovoltaico sombreado, compromete a potência gerada por outros módulos que estiverem conectados a ele no mesmo ramo série.



Fig. 2.9 – Sombreamento em um módulo fotovoltaico: (a) sombreamento parcial de três células; (b) sombreamento total de seis células.

Em um painel fotovoltaico, diante do sombreamento de um ou mais módulos, haverá redução na potência fornecida pelo conjunto. A magnitude dessa redução depende de fatores como tipo de arranjo, posição da sombra e intensidade do sombreamento [17].

## 2.6 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentados os principais conceitos relacionados à geração de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos. Em uma breve introdução teórica foi apresentada a modelagem da célula fotovoltaica e os fatores que influenciam na sua eficiência.

Por meio dos conceitos apresentados, verifica-se que o desempenho de sistemas fotovoltaicos é fortemente influenciado por condições climáticas. Diante do exposto, justifica-se a realização deste trabalho, onde a implementação de um sistema de reconfiguração é capaz de melhorar o desempenho global do sistema diante de situações de sombreamento.

# 3 CONTEXTO ATUAL DOS SISTEMAS DE RECONFIGURAÇÃO

## 3.1 Considerações iniciais

Neste capítulo será apresentado o contexto atual dos sistemas de reconfiguração para painéis fotovoltaicos sombreados. A partir de uma revisão bibliográfica detalhada, os principais trabalhos disponíveis na literatura técnica relacionados ao tema foram levantados e divididos em grupos,

## 3.2 Reconfiguração de módulos fotovoltaicos

Em geral, os módulos fotovoltaicos são associados em arranjos, a fim de que se tenha, na saída do sistema, a tensão e a corrente desejadas para uma determinada aplicação. Existem diferentes maneiras de interconectar os módulos na matriz fotovoltaica e cada tipo de arranjo possui indicações e características específicas. Podem-se citar três topologias básicas, que são ilustradas na Fig. 3.1:

- *Series-Parallel* (SP): os módulos são associados em série e os ramos resultantes são conectados em paralelo;
- *Total Cross Tied* (TCT): os módulos são conectados em paralelo e os conjuntos formados são conectados em série;
- *Bridge-linked* (BL): os módulos são conectados de forma semelhante a uma ponte retificadora. Esse arranjo possui a metade das conexões da topologia TCT.

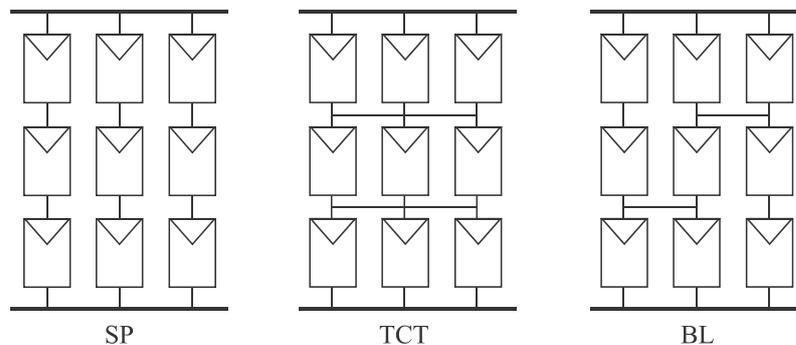


Fig. 3.1 – Topologias básicas de configuração.

Recentemente, outros tipos de conexões têm sido propostas e testadas, entretanto, as topologias SP e TCT são as mais utilizadas. Quando os módulos fotovoltaicos são associados na topologia SP ou TCT, o sistema pode ser acometido por alguns problemas, principalmente quando os módulos apresentam características e pontos de operação distintos. As diferenças no ponto de operação podem surgir de eventuais desuniformidades de iluminação (sombreamento) e provocam perdas no sistema [5].

Em um painel fotovoltaico parcialmente sombreado, a potência real do sistema pode ser menor que soma das potências individuais de todos os módulos. O sombreamento de um módulo é capaz de causar a redução da corrente resultante da associação e, conseqüentemente, a potência fornecida pela matriz fotovoltaica também será reduzida. A máxima potência disponível pelo painel fotovoltaico pode ser melhorada se as ligações entre os módulos forem reconfiguradas [3] - [31].

Uma matriz fotovoltaica reconfigurável foi proposta em 1990 por Salameh et al. [6] [7]. Anos depois, Auttawaitkul et al. [8] propuseram um sistema de reconfiguração para otimizar o funcionamento de um carro elétrico. A partir dessas propostas iniciais, os sistemas de reconfigurações vêm sendo alvo de diversos estudos e se tornaram um método emergente para a recuperação de energia em sistemas sombreados.

A seguir, são apresentadas algumas características dos sistemas de reconfigurações desenvolvidos para arranjos TCT, SP e arranjos flexíveis.

### **3.2.1 Reconfiguração em arranjos TCT**

Na topologia TCT, o método mais utilizado é o da equalização da irradiância, que busca o equilíbrio na distribuição dos módulos sombreados. O seu objetivo é que o somatório das irradiâncias para cada linha da matriz fotovoltaica seja o mesmo, ou o mais similar possível, conforme ilustra a Fig. 3.2.

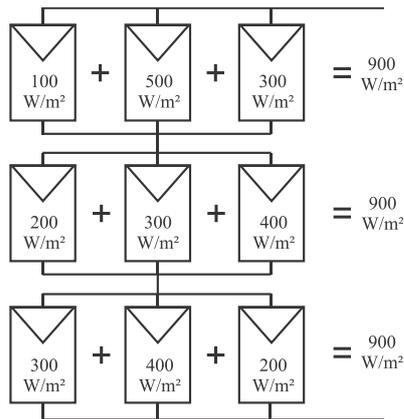


Fig. 3.2 – Exemplo de equalização da irradiância [9].

Para a equalização da irradiância, alguns trabalhos [3], [9] - [14] propõem que o painel fotovoltaico seja composto de uma parte fixa e uma parte dinâmica. A parte fixa é dividida em subconjuntos onde os módulos são conectados em paralelo. Quando o sombreamento é identificado em determinada linha do painel fixo, conectam-se em paralelo a essa linha os módulos da parte dinâmica (banco adaptativo) a fim de compensar a energia perdida. A Fig. 3.3 ilustra um exemplo de sistema para a equalização da irradiância.

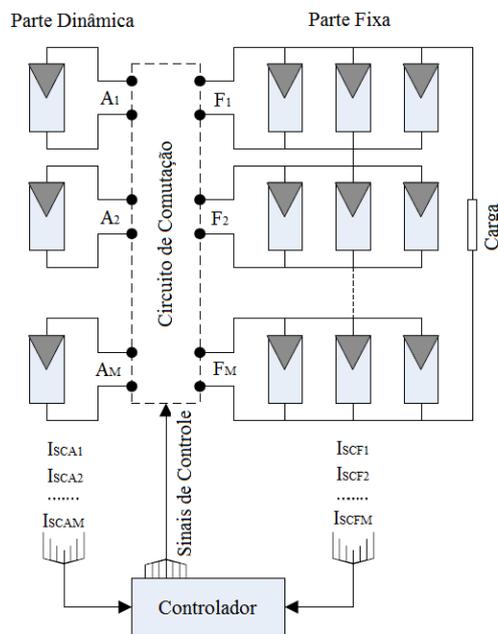


Fig. 3.3 – Sistema para equalização da irradiância: matriz dinâmica e fixa [3].

Em [10] e [11], a metodologia proposta para a equalização da irradiância é avaliada através da associação de células fotovoltaicas. Com testes experimentais, compararam-se os comportamentos de dois algoritmos (*Bubble Method / Model Prediction Method*) que definem

o acionamento dos interruptores do circuito de conexões. Esse método de reconfiguração resulta em diferentes quantidades de células nas linhas da matriz.

Uma proposta semelhante é apresentada em [12], em que um algoritmo de triagem identifica as linhas da matriz (parte fixa) que são mais prejudicadas pelo sombreamento e as classifica. Após a classificação, as células do banco dinâmico são conectadas à matriz estática para compensar as perdas causadas pelo sombreamento.

Nos trabalhos supracitados [10] - [12], a identificação das linhas afetadas pelo sombreamento é feita a partir da análise da tensão em cada subconjunto da matriz estática. Em contrapartida, a proposta apresentada em [3] utiliza a corrente de curto-circuito como principal parâmetro, uma vez que a mesma é diretamente afetada pela insolação. Através de regras de permutação, diferentes configurações são testadas e, após a exclusão das configurações inviáveis ou impossíveis, o algoritmo define a configuração ótima.

El-Dein et al. [13] definem dois parâmetros matemáticos: *Irradiance Level Mismatch Index* (IMI) e *Existence Variable* ( $Y_{IQ}$ ). Ambos são utilizados no cálculo e definição da situação onde a equalização da irradiância é mais equilibrada, ou seja, o valor médio da irradiância em cada linha da matriz seja igual ou similar às demais. Assim como nos trabalhos supracitados, o nível de complexidade do algoritmo de controle é proporcional à quantidade de células/módulos envolvidos.

O princípio de funcionamento dos sistemas de reconfiguração compostos por uma parte fixa e um banco dinâmico é essencialmente o mesmo. O que difere uma proposta da outra são os algoritmos executados. Em [14], por exemplo, o algoritmo de controle é construído com lógica *Fuzzy* e tem sua eficácia comprovada através de testes experimentais.

Os resultados obtidos em [10] - [14] são satisfatórios. Entretanto, salienta-se como inconveniente a grande quantidade de interruptores e a complexidade dos circuitos de contatos. A matriz de conexões proposta em [9] é construída, visando à simplificação e redução na quantidade de componentes com base apenas nas configurações de interesse e portanto, a mobilidade na parte dinâmica é limitada. Neste trabalho, para preservar a vida útil dos interruptores (relés eletromecânicos), os cálculos do algoritmo são executados repetidas vezes num dado intervalo de tempo, garantindo que a reconfiguração só é permitida após a certificação de que as condições de sombreamento não foram alteradas e, desta forma, evitam-se reconfigurações desnecessárias.

Os sistemas de reconfiguração baseados na combinação dos elementos de um conjunto dinâmico com uma matriz estática [3], [9] - [14] apresentam bons resultados quando

comparados a painéis totalmente estáticos. Fica evidente que a realocação de células/módulos da matriz dinâmica auxilia no processo de equalização da irradiância, o que melhora o resultado global. Entretanto, quando o número de elementos afetados pelo sombreamento excede a quantidade de componentes da matriz dinâmica, ou quando o banco adaptativo é atingido por sombreamento, o sistema tem seu desempenho severamente comprometido.

Maior versatilidade e mobilidade são alcançadas em sistemas onde todos os componentes da matriz fotovoltaica possam ser rearranjados. Esse conceito é apresentado em [4], [15] e [16]. O *Dynamic Electrical Scheme* (DES) proposto em [4] é totalmente dinâmico e permite diferentes tipos de conexão entre os módulos fotovoltaicos. A arquitetura proposta permite a implementação de  $\frac{(n.n)!}{(n!)^n}$  configurações diferentes, em que  $n$  é o número de módulos. Para garantir a compatibilidade com um conversor, o algoritmo de controle contempla restrições como número mínimo e máximo de linhas permitidas na associação. A Fig. 3.4 ilustra a matriz de conexões e o arranjo resultante para o sistema proposto.

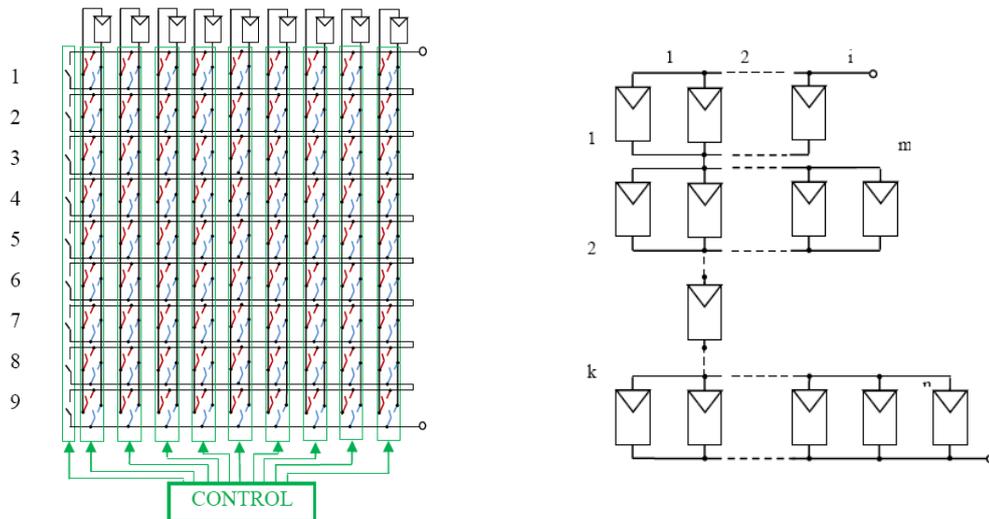


Fig. 3.4 – (a) Matriz de conexões e (b) topologia resultante para o sistema de reconfiguração proposto em [4].

Em matrizes totalmente dinâmicas, as combinações geradas pela permutação entre os módulos muitas vezes são redundantes. Para reduzir o número de arranjos e contemplar apenas as configurações de interesse, Wilson et al. [15] utilizam o parâmetro *Configurations of Interest* (COI) que determina a quantidade de configurações que efetivamente produzem diferentes resultados. Neste trabalho, para a execução do método da equalização da irradiância, a matriz pode ter suas dimensões alteradas. Entretanto, o algoritmo de otimização garante que todas as

linhas possuem a mesma quantidade de módulos. A Fig. 3.5 ilustra o processo de realocação dos módulos sombreados para uma matriz 4x4.

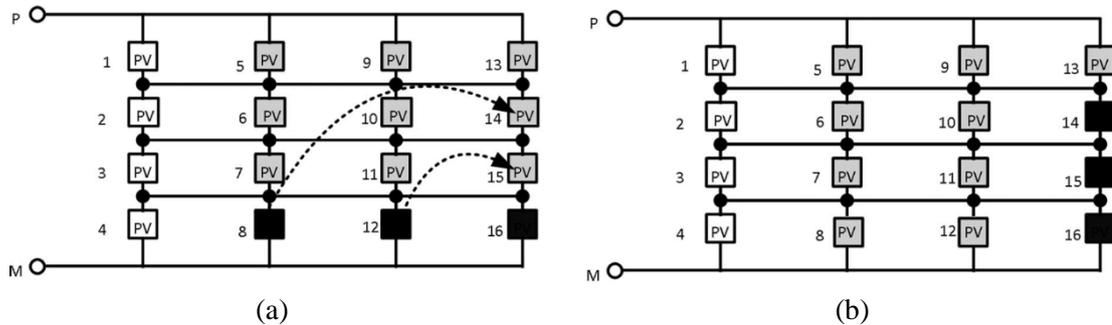


Fig. 3.5 – Realocação dos módulos sombreados: (a) antes; (b) depois da reconfiguração [15].

### 3.2.2 Reconfiguração em arranjos SP

Em painéis fotovoltaicos com topologia SP, o processo de reconfiguração baseia-se no agrupamento dos módulos sombreados [17]. Módulos com níveis de irradiância semelhantes devem ser conectados em série e os ramos resultantes são conectados em paralelo. Desta forma, evita-se que os módulos afetados pelo sombreamento limitem o fornecimento de energia dos módulos iluminados.

Para a reconfiguração, é preciso conhecer a situação de todos os módulos que constituem o painel fotovoltaico. Essas informações podem ser extraídas através de medições ou estimadas conforme [18], em que Bastidas-Rodriguez et al. sugerem um método para a estimação de parâmetros dos módulos fotovoltaicos. A partir das informações estimadas, as configurações de interesse (excluindo-se as configurações redundantes) são avaliadas a fim de determinar aquela que proporciona melhor resultado.

O sistema de reconfiguração proposto em [19] identifica a situação de cada módulo fotovoltaico através da análise dos níveis de corrente e tensão de cada um. Patnaik et al. definem um limiar de 15 % para que a reconfiguração do painel seja habilitada, quando o sombreamento for inferior a este limiar, a reconfiguração não produz resultados expressivos.

Na metodologia apresentada em [19] os módulos totalmente sombreados são excluídos da associação, uma vez que sua contribuição é considerada desprezível e os módulos restantes são agrupados de forma a constituir um arranjo SP. A Fig. 3.6 ilustra a reorganização dos módulos fotovoltaicos em uma matriz 4x4.

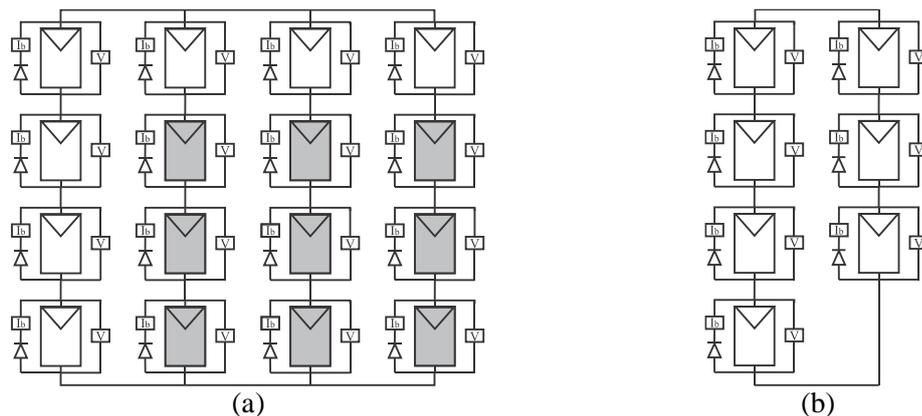


Fig. 3.6 – Matriz 4x4: (a) antes e (b) depois da reconfiguração [19].

Uma evolução do trabalho proposto em [19] é apresentada em [20], em que os módulos fotovoltaicos são classificados em três diferentes níveis de irradiância ( $G$ ): iluminado ( $600 \text{ W/m}^2 < G < 800 \text{ W/m}^2$ ), cinza ( $400 \text{ W/m}^2 < G < 600 \text{ W/m}^2$ ) e escuro ( $G < 400 \text{ W/m}^2$ ). A identificação do sombreamento é feita através do monitoramento da corrente através dos diodos *bypass*. Quando a corrente no diodo for maior que zero, o módulo é considerado sombreado. Caso contrário, amostra-se a corrente de curto-circuito e se classifica o módulo como iluminado ou cinza.

Em [20], Patnaik et al. comparam o comportamento de uma matriz fotovoltaica quando esta é submetida a três estratégias de reconfiguração diferentes:

- *Fixed-State*: matriz fotovoltaica permanece com as conexões estáticas;
- *Bi-State Reconfigurable Array*: metodologia de reconfiguração onde os módulos escuros são excluídos e os módulos cinza e iluminados são mantidos na posição em que se encontram;
- *Tri-State Reconfigurable Array*: metodologia em que os módulos escuros são excluídos. Os módulos cinza e iluminados são mantidos e reconfigurados de forma a agrupar os módulos com níveis de irradiância semelhantes.

A Fig. 3.7 (a), (b) e (c) ilustra o comportamento da matriz fotovoltaica em uma situação de sombreamento e o resultado obtido através de cada estratégia de reconfiguração proposta. A Fig. 3.7 (d) apresenta uma comparação entre as potências resultantes de cada arranjo. Constatase que a metodologia que utiliza o algoritmo *Tri-State Reconfigurable Array* apresenta os melhores resultados.

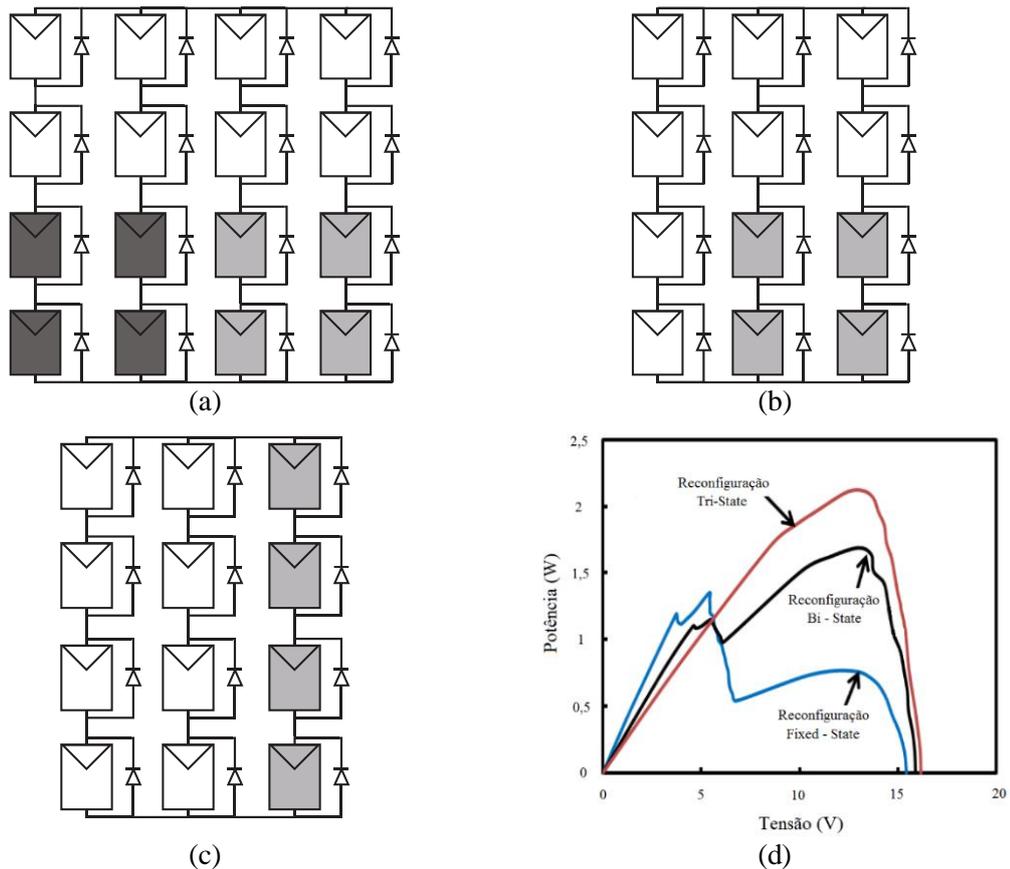


Fig. 3.7 – Testes em uma matriz SP 4x4 (a) *Fixed-State*; (b) *Bi-State*; (c) *Tri-State*; (d) comparação entre as respostas do sistema para as três metodologias [20].

A exclusão dos módulos mais atingidos pelo sombreamento pode dar origem a arranjos assimétricos, como o mostrado na Fig. 3.6 (b). Nessas situações ocorre um desequilíbrio entre os níveis de tensão das colunas associadas. Uma alternativa para corrigir esse desequilíbrio é o uso de conversores estáticos.

Um sistema de reconfiguração flexível *Flexible Switch Matrix* (FSM) é apresentado em [21]. Em condições normais de funcionamento, quando todos os módulos estão iluminados, o sistema opera com um inversor central. Quando ocorre o sombreamento, os módulos severamente sombreados são excluídos da matriz principal e os demais são reconfigurados. Se por ventura, não houver módulos suficientes para construir uma associação simétrica, um conversor CC/CC pode ser conectado ao ramo deficiente para compensar os níveis de tensão. A Fig. 3.8 ilustra o método proposto.

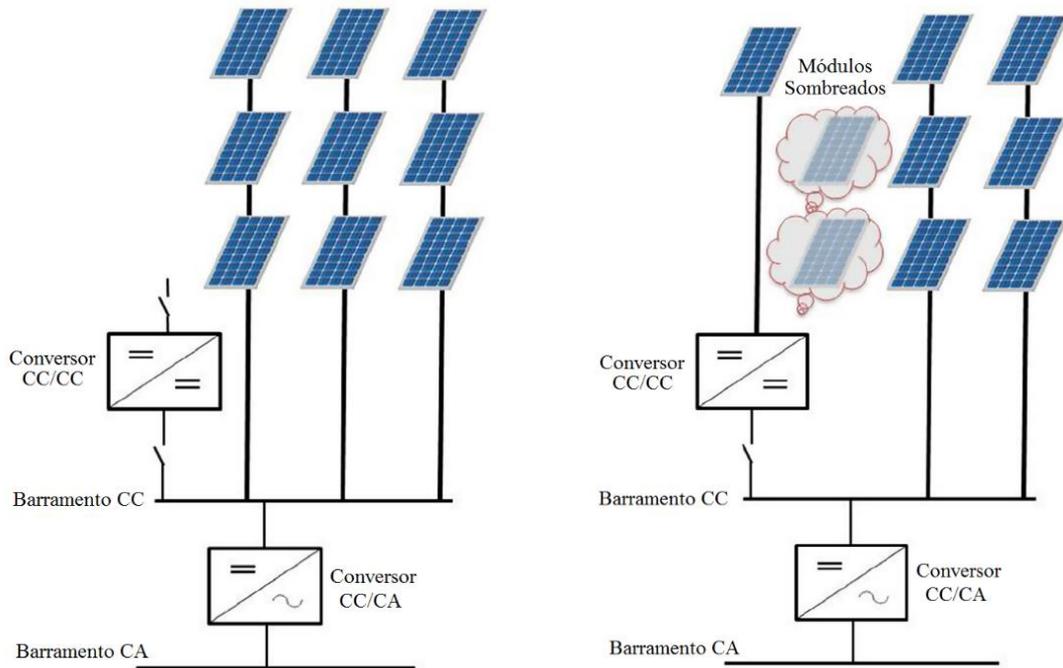


Fig. 3.8 – Sistema FSM: (a) condições normais e (b) sombreamento de dois módulos [21].

Outra abordagem que utiliza conversores estáticos é apresentada em [22]. O sistema *Optimized String Dynamic Photovoltaic Array* (OS-DPVA) tem como objetivo a criação de múltiplos subgrupos com níveis de potência similares. Esses grupos são conectados a conversores CC/CC e posteriormente são associados em paralelo como mostrado na Fig. 3.9. Devido à natureza imprevisível dos perfis de sombreamento, o número de módulos associados em cada grupo pode ser diferente. Isso significa que os conversores devem ser projetados para uma ampla gama de tensões de entrada.

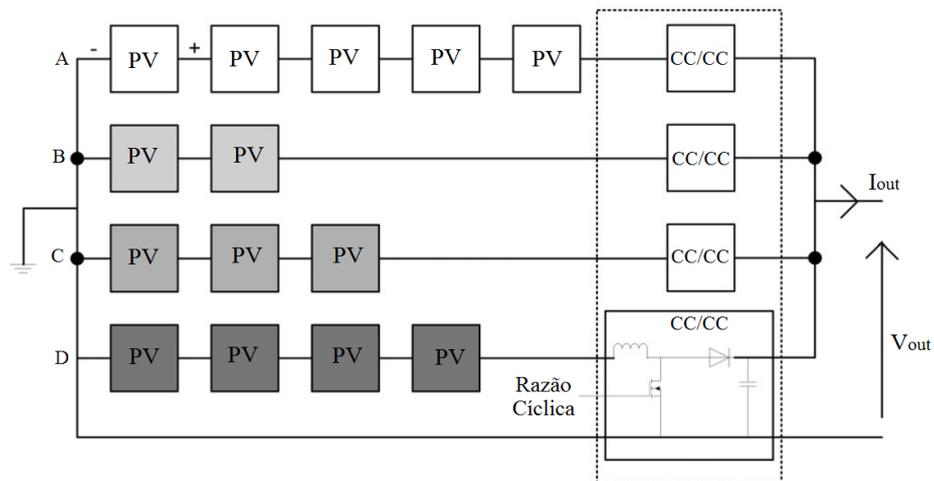


Fig. 3.9 – Sistema OS-DPVA [22].

Em [22], salienta-se que dentre todas as possibilidades de reconfiguração dos módulos fotovoltaicos, apenas uma pequena fração delas é eletricamente útil. Entretanto, mesmo após simplificações, a quantidade de interruptores necessários no processo é relativamente alta.

Os sistemas de reconfiguração para arranjos SP apresentados em [19] - [22] possuem em comum a característica de eliminação dos módulos severamente sombreados da associação. Essa eliminação muitas vezes pode gerar problemas como a assimetria no arranjo, que pode ser corrigida com o uso de conversores estáticos. A eficácia deste tipo de estratégia foi comprovada em [21] e [22]. Entretanto, o elevado custo e a complexidade dos algoritmos de controle dificultam sua implementação prática.

Nos painéis com conexão TCT, é comum encontrar abordagens onde a reconfiguração é feita com o auxílio de um conjunto extra de módulos. A matriz fotovoltaica é constituída de uma parte fixa e uma parte dinâmica [3], [9] - [14]. Uma proposta semelhante é apresentada para um arranjo SP em [23], em que se sugere que diante de situações de sombreamento, módulos extras sejam conectados à matriz principal. No trabalho em questão, o painel fotovoltaico possui diodos *bypass* em antiparalelo com cada um dos módulos. Desta forma, quando ocorre o sombreamento, os módulos afetados são desviados do painel e, conseqüentemente, há um desequilíbrio na tensão do ramo atingido (os terminais do módulo ficam em uma situação semelhante a um curto-circuito). Os módulos extras são conectados de forma a compensar os módulos desviados. A Fig. 3.10 ilustra o método proposto.

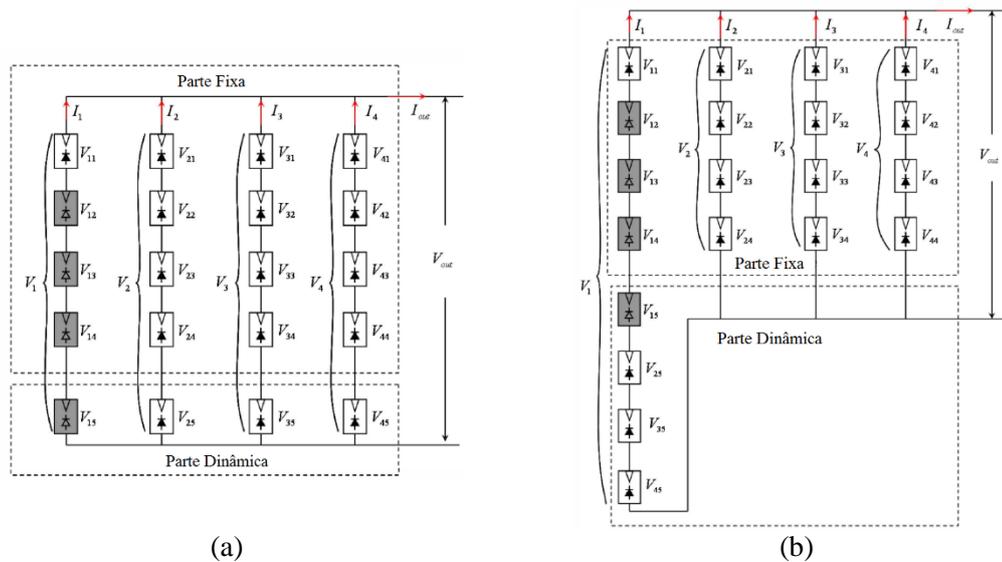


Fig. 3.10 – Painel fotovoltaico SP ativo: (a) antes e (b) depois da reconfiguração [23].

Outra abordagem para o método de reconfiguração em arranjos SP é a realocação de todos os módulos da matriz fotovoltaica. Nos trabalhos apresentados a seguir, nenhum módulo é excluído ou adicionado ao arranjo fotovoltaico. Sendo assim, as matrizes não sofrem modificações na simetria como ocorre em [19] - [23].

Em [17], dos Santos et al. apresentam um estudo a respeito da influência na posição dos módulos sombreados em uma matriz fotovoltaica SP. Neste trabalho, comprova-se através de uma avaliação matemática e testes experimentais que há um melhor aproveitamento na energia produzida quando os módulos fotovoltaicos sombreados encontram-se agrupados. Uma continuidade deste trabalho é apresentada em [24] onde se propõe que a produção de energia em um sistema fotovoltaico sombreado pode ser maximizada através da reorganização das conexões elétricas do painel.

Um trabalho similar é apresentado em [25] e [26], em que Dio Dio et al. constroem o protótipo de um sistema de reconfiguração para um painel fotovoltaico 3x2. A metodologia de reconfiguração baseia-se na concentração dos módulos sombreados em um mesmo ramo série da matriz fotovoltaica. Em [25], o protótipo do sistema de reconfiguração é construído com uma FPGA que executa o algoritmo de controle e envia os sinais de comando a interruptores eletromecânicos que executam a reconfiguração. Em [26], o microprocessador utilizado para a construção do sistema de controle é o AtMega 2560. A Fig. 3.11 ilustra o diagrama de blocos do sistema proposto.

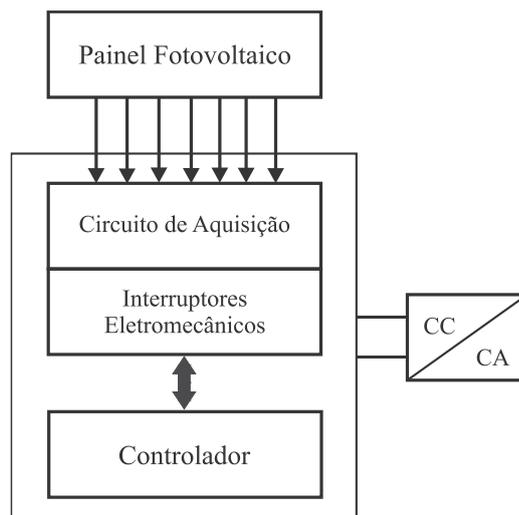


Fig. 3.11 – Diagrama de blocos do sistema de reconfiguração proposto em [26].

É possível encontrar na literatura o registro de alguns pedidos de patente relativos a propostas de sistemas de reconfiguração em arranjos SP. Em [27], por exemplo, considera-se

que qualquer módulo fotovoltaico pode ser inserido em uma posição diferente da matriz fotovoltaica ou permanecer desligado. O número de interruptores utilizados no sistema pode ser calculado através da quantidade de linhas e colunas da matriz SP. Todo o sistema pode ser conectado a um conversor central. A mesma abordagem também é aplicada a um produto que encontra-se disponível no mercado [28].

### 3.2.3 Reconfiguração em arranjos variáveis/flexíveis

Nos sistemas apresentados nas seções anteriores, os módulos fotovoltaicos são interconectados de forma que a matriz de referência constitua arranjos do tipo SP ou TCT. Em alguns casos, opta-se por conectar os módulos fotovoltaicos de maneira mais flexível. Nessas situações o processo de reconfiguração pode originar diferentes estruturas de matriz fotovoltaica para cada perfil de sombreamento.

O trabalho desenvolvido por Salameh et al. [6] apresenta um sistema de bombeamento de água controlado por um arranjo denominado *Electrical Array Reconfiguration Controller* (EARC). Diante de situações de sombreamento, a matriz pode ser configurada de três maneiras diferentes dependendo dos níveis de irradiância como indicado na Fig. 3.13:

- 1 – Baixa irradiância: conexão série entre os módulos;
- 2 – Média irradiância: conexão serie-paralela dos módulos;
- 3 – Alta irradiância: conexão paralela entre os módulos.

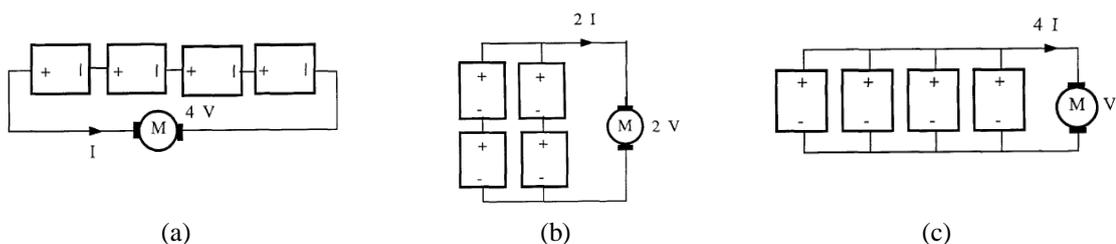


Fig. 3.12 – Configurações: (a) série, (b) série-paralela e (c) paralela [6].

Uma ideia semelhante é apresentada em [29], onde Candela et al. alteram sucessivamente a conexão entre módulos fotovoltaicos a fim de identificar qual é a mais adequada para cada perfil de sombreamento. No trabalho citado, não são consideradas restrições nos níveis de corrente e tensão, o que confere maior versatilidade nas possibilidades de conexão. A Fig. 3.13 ilustra as conexões mais adequadas quando ocorre o sombreamento de um, dois, três e quatro módulos fotovoltaicos.

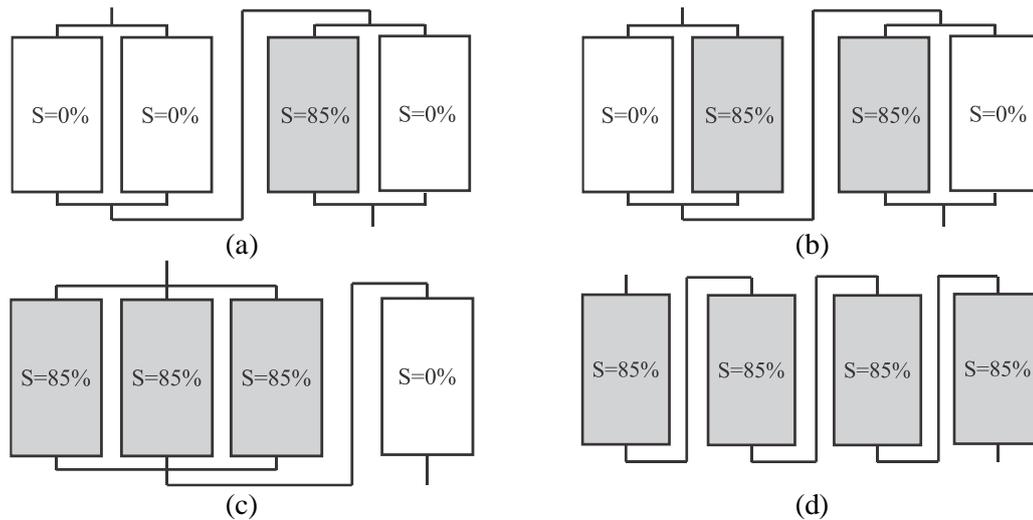


Fig. 3.13 – Configuração ideal: (a) um módulo sombreado; (b) dois módulos sombreados; (c) três módulos sombreados; (d) quatro módulos sombreados [29].

Neste método de reconfiguração, é fundamental estabelecer limiares para os níveis de tensão e corrente resultantes, uma vez que é necessário manter a compatibilidade com a carga do sistema.

O trabalho apresentado em [30] propõe um sistema de reconfiguração, em que inicialmente são estabelecidos os limites exigidos pelo conversor conectado ao painel. O processo de reconfiguração busca a otimização das conexões da matriz fotovoltaica através do cálculo de potência para diferentes padrões de ligação, onde a configuração que oferece maior valor de potência de saída é selecionada. A metodologia proposta tem seus resultados avaliados em dois sistemas de 3 kW e 90 kW.

Uma vez que a topologia da matriz fotovoltaica possa sofrer variações dependendo do perfil de sombreamento, a quantidade de diferentes possibilidades de conexão torna-se elevada. Em [31], o algoritmo de controle altera a simetria das configurações a partir da definição do número de linhas e colunas que constituem a matriz fotovoltaica. A Tabela 1.1 apresenta as possibilidades de configuração para um sistema com quatro módulos fotovoltaicos, onde  $n$  é a quantidade de módulos em série e  $m$  é a quantidade de módulos em paralelo.

A definição da configuração ideal considera possíveis restrições da carga, o que auxilia na definição da quantidade de unidades em série (ajuste da tensão) ou em paralelo (ajuste de corrente). Neste trabalho são realizados testes experimentais com cargas que demandam corrente ou tensão constante e cargas com resistência constante. Em todos os casos é possível verificar uma melhora no desempenho do sistema.

Tabela 3.1 - Configurações para quatro módulos fotovoltaicos [31].

<b>Unidades em Série, (<i>n</i>)</b>	<b>Unidades em Paralelo, (<i>m</i>)</b>
1	1
1	2
1	3
1	4
2	1
2	2
3	1
4	1

### 3.3 Considerações finais

Com base nas inúmeras publicações estudadas, foi possível observar as principais metodologias utilizadas para a reconfiguração dos módulos em sistemas fotovoltaicos. Entre as propostas mais difundidas, encontram-se os sistemas de reconfiguração em arranjos fotovoltaicos do tipo TCT e SP.

Diferentes métodos para a execução da reconfiguração foram apresentados, sendo que em todos os trabalhos avaliados, verificou-se que os sistemas reconfiguráveis apresentaram melhor desempenho diante de situações de sombreamento quando comparados aos sistemas com conexões elétricas fixas.

No presente trabalho de doutorado, o foco do estudo é a proposição e construção de um novo método para a reconfiguração de arranjos com a topologia SP.

## **4 A TEORIA DOS CONJUNTOS APROXIMADOS**

---

### **4.1 Considerações iniciais**

A TCA é a ferramenta escolhida para manipulação dos dados e construção do sistema de controle responsável pela execução da reconfiguração de módulos fotovoltaicos. Sendo assim, este capítulo tem como objetivo apresentar e discutir os conceitos fundamentais da Teoria dos Conjuntos Aproximados, fornecendo os subsídios necessários ao uso dessa teoria.

A partir dos fundamentos apresentados serão analisadas propriedades importantes para a construção do sistema de reconfiguração proposto.

### **4.2 Teoria dos Conjuntos Aproximados (TCA)**

A Teoria dos Conjuntos Aproximados (TCA) é uma extensão da teoria dos conjuntos, cujo foco é a extração do conhecimento intrínseco a um conjunto de dados e a criação de regras que sintetizam o conhecimento contido nesse conjunto. Foi inicialmente desenvolvida por Zdzislaw Pawlak [37] no início da década de 1980. Entretanto, a TCA difundiu-se somente na década de 1990 graças ao aumento da capacidade de processamento e à difusão do uso dos computadores pessoais.

A capacidade de observar certa quantidade de informações e a partir dela construir uma base de conhecimento é inerente ao ser humano e a sua capacidade de aprendizado. Porém, a realização desta tarefa pode ser complexa, principalmente quando as informações são desorganizadas, incompletas ou contém partes irrelevantes. A Teoria dos Conjuntos Aproximados pode ser usada para facilitar a transformação automática de dados em conhecimento [37].

Com conceitos matemáticos simples que envolvem conjuntos finitos, relações e classes de equivalência, uma das principais características da TCA é representar as similaridades conceituais entre os dados de um determinado sistema, agrupando valores que são conceitualmente similares ou equivalentes. Valores que pertencem a um mesmo grupo são considerados indiscerníveis e, assim, o sistema que implementa a TCA pode levar em consideração o significado intrínseco dos dados e a relação que existe entre eles, não tratando

os seus valores apenas de maneira isolada. Um sistema baseado na TCA tem a capacidade de tomar as decisões apropriadas a partir das situações ao qual é submetido.

## 4.3 Fundamentos da Teoria dos Conjuntos Aproximados

### 4.3.1 Relações de equivalência

A Teoria dos Conjuntos Aproximados é baseada na teoria de conjuntos e em relações de equivalência. As relações de equivalência particionam um determinado conjunto em subconjuntos menores que são chamados de classes de equivalência  $[x]_{\mathbf{R}}$ . Todos os elementos de uma dada classe de equivalência são equivalentes entre si e representam o mesmo conhecimento sobre o subconjunto ao qual pertencem. Na Fig. 4.1 tem-se uma representação gráfica desse conceito. Um conjunto universo  $U$  é particionado em cinco classes de equivalência  $[a_1]_{\mathbf{R}}, [a_2]_{\mathbf{R}}, \dots, [a_5]_{\mathbf{R}}$  com interseção nula entre si.

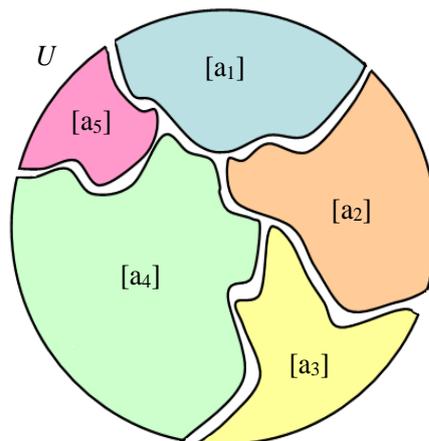


Fig. 4.1 – Representação de um conjunto dividido em classes de equivalência [38].

### 4.3.2 Base de conhecimento

Uma base de conhecimento é um sistema relacional denotado  $\mathbf{K} = (U, \mathbf{R})$ , onde  $U$  é o conjunto universo finito e  $\mathbf{R}$  é uma família de relações de equivalência sobre  $U$ .

A intersecção entre todas as classes de equivalência pertencentes a  $\mathbf{R}$  é chamada de relação de indiscernibilidade em  $\mathbf{R}$ ,  $\text{IND}(\mathbf{R})$  de acordo com a expressão (4.1). Esta relação estabelece que o elemento  $x$  é indiscernível na base de conhecimento configurada por  $\mathbf{R}$ , pois este pertence a todas as relações de equivalência de  $\mathbf{R}$  e não pode ser classificado de forma única com o conhecimento que se dispõe sobre o conjunto  $U$  [37].

$$[x]IND(R) = I_{R \in R}[x]R \quad (4.1)$$

### 4.3.3 Representação dos conjuntos aproximados

Muitas vezes não é possível representar de forma exata um subconjunto de  $U$  à partir das relações de equivalência encontradas na base de conhecimento, porém é possível representá-lo de forma aproximada. Este conjunto que representa  $U$  de forma aproximada é definido como conjunto aproximado.

#### 4.3.3.1 Aproximação inferior e superior

Dada uma base de conhecimento  $K = (U, R)$  e um conjunto  $X \subseteq U$ , observa-se o quão  $X$  pode ser bem representado pelas aproximações definidas na Fig. 4.2:

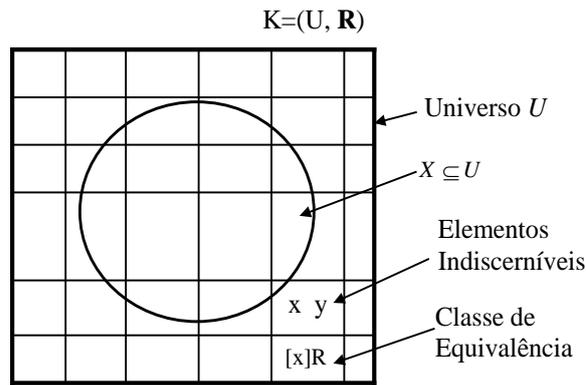


Fig. 4.2 – Conjunto  $X$  na base de conhecimento  $K = (U, R)$  [37].

Assim, definem-se os seguintes conceitos:

- Aproximação Inferior indicada na Fig. 4.3: é definida como a união de todos os subconjuntos de  $U$  que certamente estão contidos em  $X$ , de acordo com (4.2).

$$K_{inf}(X) = \{x \in U | [x]_R \subseteq X\} \quad (4.2)$$

- Aproximação Superior mostrada na Fig. 4.4: é definida como a união de todos os conjuntos que possuem interseção não nula com  $X$ , ou seja, união dos subconjuntos de  $U$  que contém elementos que podem fazer parte de  $X$ . Essa condição é expressa por (4.3).

$$K_{sup}(X) = \{x \in U | [x]_R \cap X \neq \emptyset\} \quad (4.3)$$

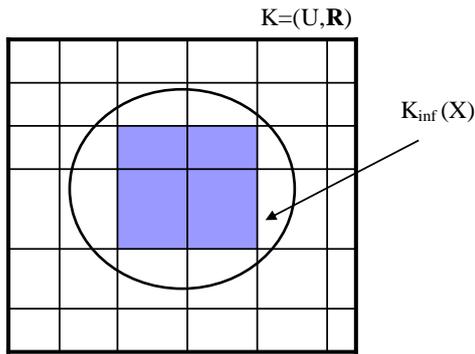


Fig. 4.3 – Aproximação inferior de X em K [37].

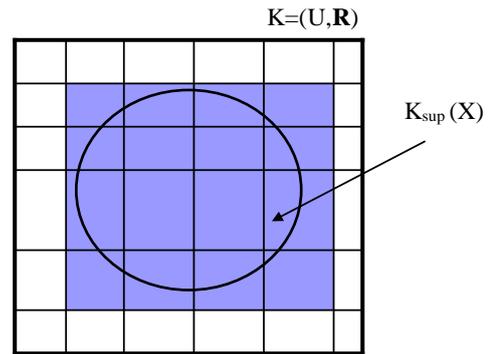


Fig. 4.4 – Aproximação superior de X em K [37].

### 4.3.3.2 Regiões do espaço aproximado

Para a base de conhecimento  $K = (U, R)$  e  $X \subseteq U$ , as aproximações inferior e superior permitem a classificação do espaço aproximado em três regiões, como se verifica na Fig. 4.5 [37].

- Região positiva de X em K, formada por todos os subconjuntos de U contidos inteiramente no conjunto X, dada por (4.4). Todos os elementos desta região pertencem a X.

$$pos_k(X) = K_{inf}(X) \quad (4.4)$$

- Região negativa de X em K, formada pelos subconjuntos de K que não estão contidos na aproximação superior de X, é dada por (4.5). Afirma-se que nenhum dos elementos da região negativa pertence a X.

$$neg_k(X) = U - K_{sup}(X) \quad (4.5)$$

- Região duvidosa de X em K, formada pelos elementos que pertencem à aproximação superior mas não pertencem à aproximação inferior, dada por (4.6). A pertinência de um elemento desta região a X é incerta.

$$dov_k(X) = K_{sup}(X) - K_{inf}(X) \quad (4.6)$$

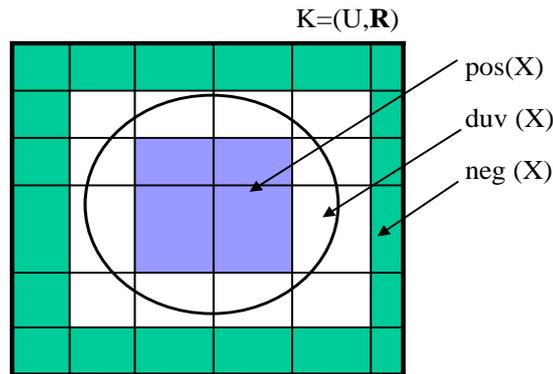


Fig. 4.5 – Regiões de X em K [37].

#### 4.3.4 Redução de conhecimento

O conhecimento existente sobre um universo de objetos pode ser insuficiente ou até mesmo excessivo. Quando insuficiente, leva à formação de medidas de baixa precisão. Porém, quando exagerado, é possível que nem todas as informações disponíveis sejam necessárias para que se obtenha a classificação desejada da base de conhecimento [39]. Neste caso, é conveniente identificar as informações que podem ser desconsideradas diminuindo o volume de dados a serem trabalhados e, conseqüentemente, tempo e esforço computacional.

#### 4.3.5 Reduto e núcleo

Seja  $\mathbf{R}$  uma família de relações de equivalência e  $R \in \mathbf{R}$ , sendo que  $R$  pode ser dispensada sem prejuízo ao conhecimento do sistema se a relação (4.7) for satisfeita. Caso contrário,  $R$  é indispensável em  $\mathbf{R}$ . A família  $\mathbf{R}$  é independente se cada  $R \in \mathbf{R}$  é indispensável em  $\mathbf{R}$ . Caso contrário,  $\mathbf{R}$  é dependente.

$$IND(\mathbf{R}) = IND(\mathbf{R} - \{R\}) \quad (4.7)$$

De acordo com a equação (4.7), o grau de indiscernimento do sistema não se altera com a remoção da relação  $R$ , ou seja, a classificação e o particionamento do sistema se mantêm inalterados. Entretanto, algumas relações não podem ser removidas, pois prejudicam a classificação. Tais relações são chamadas indispensáveis.

Define-se um reduto,  $RED(K)$ , como sendo um conjunto de relações de equivalência independentes e indispensáveis que representam a parte essencial da base de conhecimento e tem a capacidade de fornecer a mesma classificação que o todo.

Seja  $P \subseteq \mathbf{R}$  o subconjunto  $Q \subseteq P$  é reduto de  $P$  se  $Q$  é independente e  $\text{IND}(Q) = \text{IND}(P)$ . O conjunto de todas as relações indispensáveis em  $P$  é chamado de núcleo de  $P$ , ou  $\text{CORE}(P)$ . A relação entre reduto e núcleo é representada por (4.8).

$$\text{CORE}(P) = \cap \text{RED}(P) \quad (4.8)$$

em que  $\text{RED}(P)$  é a família de todos os possíveis redutos de  $P$ .

O núcleo pode ser visto como o conjunto mais relevante da base de conhecimento e compreende todas as relações que não podem ser eliminadas no processo de redução do conhecimento. A determinação dos redutos e núcleos permitem que todo o conhecimento sobre um conjunto  $U$  seja sintetizado e concentrado em poucos subconjuntos, favorecendo a criação de bases de dados concisas e eficientes [40].

#### 4.3.6 Representação do conhecimento

Para manipulação das informações, utiliza-se um sistema de representação do conhecimento, normalmente chamado de Sistema de Informação (SI) que é uma representação sintática do conhecimento sobre o conjunto de objetos e consiste de uma tabela de dados, onde as colunas são os atributos e as linhas os objetos. Cada coluna representa uma relação de equivalência e cada linha armazena as classes de equivalência nas quais o objeto desta linha está inserido. Formalmente, um SI é um par dado por (4.9).

$$R = (U, A) \quad (4.9)$$

Sendo que  $U$  é o universo finito de  $R$ , seus respectivos elementos chamados objetos, os quais são caracterizados por um conjunto finito e não vazio de atributos  $A$ .

#### 4.3.7 Tabelas de decisão

As tabelas de decisão são um tipo particular de sistemas de informação. Consistem em um SI da forma  $T = (U, A, C, D)$  onde  $C \subseteq A$  e  $D \subseteq A$ . Os atributos de  $C$  são os chamados atributos de condição e os atributos de  $D$  são os atributos de decisão.

A Tabela 4.1 ilustra uma tabela de decisão. Neste exemplo, o Universo é formado pelas lojas  $e_1, e_2, \dots, e_6$ . Os atributos de condição são: experiência do vendedor, qualidade do produto e boa localização; o atributo de decisão é o retorno.

Tabela 4.1 - Exemplo de um SI [41].

$U$	$A$			
	$C$			$D$
Loja	Experiência do vendedor	Qualidade do produto	Boa localização	Retorno
$e_1$	Alta	Boa	Não	Lucro
$e_2$	Média	Boa	Não	Prejuízo
$e_3$	Baixa	Média	Não	Prejuízo
$e_4$	Média	Média	Sim	Prejuízo
$e_5$	Alta	Média	Sim	Lucro
$e_6$	Média	Média	Sim	Lucro

Para cada objeto do conjunto  $U$ , é gerada uma função chamada regra de decisão  $dx$  conforme a expressão (4.10), que relaciona os atributos de condição aos atributos de decisão.

$$dx: A \rightarrow V | dx(a) = a(x) \text{ para todo } a \in C \cup D \quad (4.10)$$

Uma regra é considerada inconsistente se para um mesmo conjunto de atributos de condição existirem atributos de decisão distintos. Um exemplo de inconsistência é mostrado na Tabela 4.1 para as lojas  $e_4$  e  $e_6$ .

#### 4.3.8 Redução das tabelas de decisão

Para trabalhar com as tabelas de decisão, é necessário estabelecer um conjunto de funções  $dx$  que mapeiem as classes de condições para as classes de decisões. Esta pode ser uma tarefa difícil dependendo do volume de dados envolvidos. Por isso, é recomendável submeter estas tabelas a processos de redução e simplificação. No processo de simplificação, os atributos dispensáveis, as linhas duplicadas e valores supérfluos são eliminados, dando origem a regras mais simples que representam sem prejuízos a base de conhecimento do sistema.

A simplificação manual de uma base de conhecimento pode ser um trabalho exaustivo quando o volume de informações é muito grande. Tendo isso em vista foram desenvolvidos alguns programas específicos para este tipo de aplicação, sendo que os aplicativos mais conhecidos são ROSETTA, Grobian e Rough Enough.

Atualmente, o aplicativo gratuito ROSETTA [42] é um dos mais utilizados, o qual permite carregar uma tabela de decisões e escolher o método utilizado para a criação das classes e dos redutos. Após o término do processo, são criadas as regras que modelam o comportamento do sistema.

#### **4.4 Considerações finais**

Neste capítulo foram apresentados os principais conceitos da Teoria dos Conjuntos Aproximados. Mostrou-se também a viabilidade da aplicação da Teoria de Conjuntos Aproximados para a organização e classificação de informações através do estabelecimento de relações.

Foram citadas algumas ferramentas computacionais que agilizam a análise dos dados com a TCA e permitem trabalhar de forma rápida e precisa grandes volumes de informações.

# **5 PROJETO DO SISTEMA DE RECONFIGURAÇÃO**

---

## **5.1 Considerações iniciais**

O objetivo deste capítulo é apresentar o desenvolvimento da metodologia proposta para a construção do sistema de reconfiguração de painéis fotovoltaicos.

A decisão de reconfigurar ou não uma matriz fotovoltaica não é uma tarefa simples. Quando todas as diferentes possibilidades de sombreamento são avaliadas, a quantidade de dados a serem analisados pode ser muito grande, sendo necessário o uso de uma ferramenta matemática para organizar e agrupar as informações.

A ferramenta escolhida para o desenvolvimento da metodologia de reconfiguração é a Teoria dos Conjuntos Aproximados apresentada no Capítulo 4. Para ilustrar o desenvolvimento do sistema proposto e obtenção das regras de decisão baseadas na TCA, são apresentados três exemplos de matrizes fotovoltaicas.

## **5.2 Metodologia de reconfiguração**

Tradicionalmente, os painéis fotovoltaicos são construídos com conexões elétricas fixas. Neste tipo de arranjo, em situações de sombreamento, dependendo da posição e intensidade do fenômeno, a energia extraída é reduzida drasticamente. Entretanto, se os módulos atingidos pelo sombreamento forem reconfigurados, parte da energia inicialmente perdida pode ser recuperada.

Diante do exposto, apresenta-se a proposta de uma metodologia para a reconfiguração em painéis fotovoltaicos sombreados arranjos na topologia SP. O método de reconfiguração consiste basicamente no agrupamento dos módulos atingidos pelo sombreamento no menor número de ramos em série possível. Em [17], constatou-se, através de simulações e testes experimentais, que esse procedimento mostra-se eficiente na redução dos efeitos negativos causados pelo sombreamento em uma matriz fotovoltaica.

Para ilustrar o método proposto, toma-se como exemplo um painel composto por 20 módulos em um arranjo SP 4x5. Com o sombreamento de oito módulos, ilustrado na Fig. 5.1 (a), um melhor resultado pode ser obtido se os módulos afetados forem agrupados de forma a atingir a menor quantidade possível de colunas da matriz fotovoltaica (Fig. 5.1 (b)).

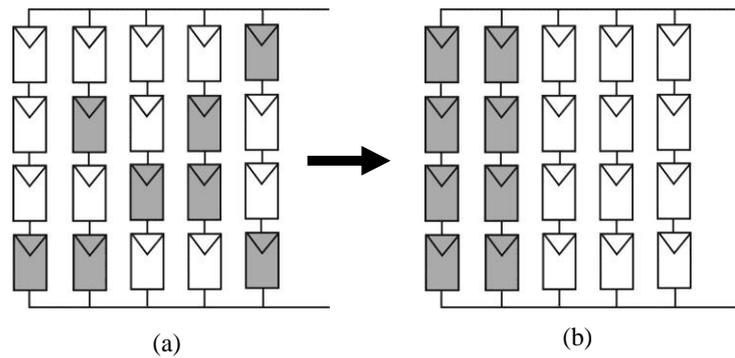


Fig. 5.1 – Exemplo: (a) antes da reconfiguração; (b) depois da reconfiguração.

Na Fig. 5.1 (a), apresenta-se a situação inicial, onde o painel é acometido pelo sombreamento de forma distribuída, o que compromete vários ramos em série da matriz fotovoltaica. A metodologia de reconfiguração propõe que estes módulos sejam agrupados no menor número de colunas possível. Desta forma, os módulos que permanecem iluminados não tem seu fornecimento de corrente limitado pelas unidades sombreadas como mostrado na Fig. 5.1 (b).

Visualmente, a realocação dos módulos sombreados parece um processo simples e intuitivo. Entretanto, dependendo do número de módulos que constituem a matriz, essa pode ser uma tarefa complexa.

Em uma matriz com  $n$  módulos, o sombreamento pode acontecer de forma que existam zero, um, dois, ... ou  $n$  módulos sombreados simultaneamente. A quantidade de diferentes possibilidades de sombreamento,  $S_P$  é definida por (5.1).

$$S_P = 2^n \quad (5.1)$$

sendo  $n$  a quantidade de módulos que compõem a matriz fotovoltaica.

É possível alterar a disposição dos módulos que constituem uma matriz fotovoltaica  $SP$  de diversas maneiras e desta forma construir  $P$  diferentes permutações de acordo com a equação (5.2).

$$P = n! \quad (5.2)$$

De acordo com os conceitos da análise combinatória, em uma permutação a ordem dos elementos é relevante, ou seja, a sequência ABC é considerada diferente da sequência CBA. Entretanto, do ponto de vista de conexões elétricas a ordem com que os módulos fotovoltaicos são conectados em um ramo série não interfere no resultado final.

Entre as  $P$  possíveis configurações calculadas através da equação (5.2), apenas uma parcela tem potencial para gerar diferentes resultados na potência de saída do sistema. A quantidade de configurações de interesse,  $I_T$ , pode ser calculada através de (5.3) e está relacionada à simetria da matriz fotovoltaica (quantidade de linhas e colunas) [18].

$$I_T = \frac{(N \cdot M)!}{(N!)^M \cdot M!} \quad (5.3)$$

sendo  $N$ , o número de linhas e  $M$  é o número de colunas da matriz fotovoltaica.

Entre as configurações de interesse, existirá pelo menos uma que é mais indicada para determinado perfil de sombreamento. Os perfis de sombreamento são definidos pela quantidade e posição dos módulos sombreados. Para isso é necessária a identificação e classificação de cada módulo do arranjo.

A identificação da condição dos módulos fotovoltaicos é feita a partir do parâmetro  $S$ , que classifica os módulos em sombreado e não sombreado segundo (5.4). Essa classificação pode ser obtida através de medições na corrente, tensão ou irradiância.

$$\begin{cases} S = 1 \rightarrow \text{sombreado} \\ S = 0 \rightarrow \text{não sombreado} \end{cases} \quad (5.4)$$

A quantidade de módulos sombreados está diretamente relacionada à viabilidade da reconfiguração. Em uma matriz fotovoltaica  $N \times M$  a recombinação é viável nas situações onde a quantidade de módulos sombreados  $M_S$  são valores contidos no conjunto definido por (5.5).

$$M_S = \{x \mid x \in \mathbb{N} \text{ e } (\exists y)(\exists z)(y \in \{M\} \text{ e } z \in \{N\} \text{ e } 2 \leq x \leq (z \cdot y - z))\} \quad (5.5)$$

Assim, tem-se o conjunto dos números inteiros positivos que estão compreendidos entre 2 e o limite estabelecido por  $(z \cdot y - z)$ , em que  $z$  e  $y$  são os números contidos nos respectivos conjuntos unitários definidos por  $N$  e  $M$ .

É importante salientar que existem perfis de sombreamento em que nada pode ser feito, ou seja, alterar a disposição dos módulos através da reconfiguração das conexões elétricas não irá produzir mudanças na potência final extraída a partir dos módulos. Entretanto, nas situações onde a reconfiguração é favorável, poderá existir entre as configurações de interesse pelo menos uma em que a potência final é melhorada. Cabe ao sistema de reconfiguração realizar essa identificação.

### **5.3 Criação de regras com a TCA**

O método de reconfiguração visa ao agrupamento dos módulos sombreados. Em alguns casos o agrupamento só acontece em uma das configurações de interesse, mas existem situações que são atendidas por mais de uma configuração.

Para a TCA, as situações de sombreamento que são atendidas por mais de uma configuração de interesse são consideradas situações inconsistentes, pois para o mesmo conjunto de atributos de condição existem atributos de decisão diferentes. Entretanto, para o sistema de reconfiguração essa situação não é inconsistente, mas sim redundante, uma vez que a seleção de qualquer configuração terá um resultado equivalente.

Diante das considerações anteriores, é possível construir o Sistema de Informação (SI) para o método de reconfiguração proposto. O SI deve possuir como atributos de condição a situação de cada módulo da matriz fotovoltaica (sombreado e não sombreado). O atributo de decisão CF. indica a configuração ótima diante dos atributos de decisão.

### **5.4 Projeto do sistema de reconfiguração**

Para ilustração do método proposto, tomam-se como exemplos os projetos para os sistemas de reconfiguração de matrizes fotovoltaicas constituídas por quatro e seis módulos. A partir dos exemplos é possível avaliar o comportamento, a eficiência e a viabilidade do método proposto.

#### **5.4.1 Matriz 2x2**

A matriz 2x2 mostrada na Fig. 5.2, constitui o menor arranjo SP onde é possível aplicar a técnica de reconfiguração dos módulos. São poucos os perfis de sombreamento onde a

reconfiguração produz melhoria na produção de energia. Contudo, a construção deste sistema possibilita avaliar as características e eficácia do método proposto.

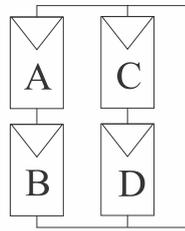


Fig. 5.2 – Matriz 2x2.

Para uma matriz fotovoltaica 2x2, de acordo com a equação (5.2), é possível alterar a posição dos módulos de 24 diferentes maneiras. Entretanto, grande parte dos arranjos resultantes é eletricamente equivalente, ou seja, produzirá o mesmo resultado.

Os arranjos ilustrados na Fig. 5.3 são exemplos de situações equivalentes. Nas quatro matrizes apresentadas, o conjunto de módulos A e B e os conjuntos C e D são conectados em série, enquanto os ramos resultantes são conectados em paralelo.

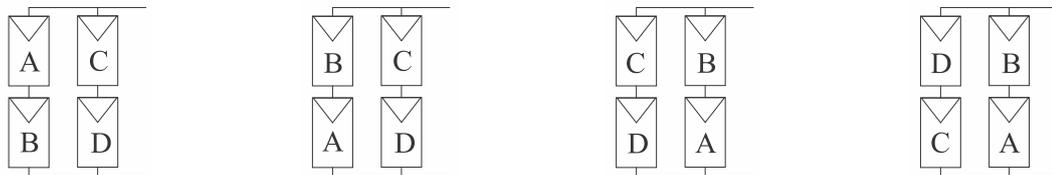


Fig. 5.3 – Situações equivalentes para uma matriz 2x2.

De acordo com a expressão (5.3), para uma matriz 2x2 existem três configurações de interesse. Das 24 diferentes maneiras de arranjar os módulos fotovoltaicos, podem-se extrair três configurações que não apresentam equivalência entre si. Essas configurações são obtidas através dos princípios da análise combinatória e são apresentadas na Fig. 5.4.

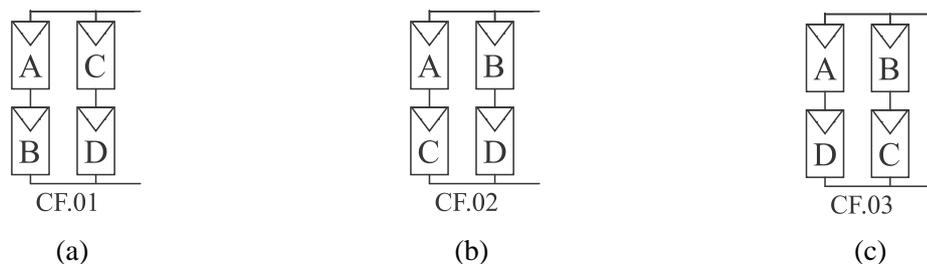


Fig. 5.4 – Configurações de interesse para matriz 2x2: (a) Configuração 01, (b) Configuração 02 e (c) Configuração 03.

De acordo com a equação (5.1), a quantidade de diferentes possibilidades de sombreamento para um painel com quatro módulos é dada por  $2^4=16$ .

Resolvendo a equação (5.5) para  $N=2$  e  $M=2$ , obtém-se:

$$M_S = [2] \quad (5.6)$$

Assim, nas situações onde o total de módulos sombreados for igual a dois, a reconfiguração pode ser viável implicando na melhoria na produção de energia do sistema. Nos casos em que os critérios de reconfiguração não são atendidos, a matriz fotovoltaica é mantida na configuração de referência representada por CF.01.

O tamanho reduzido do painel fotovoltaico 2x2 torna o projeto do sistema de reconfiguração simplificado, uma vez que são poucas as situações onde a reconfiguração é indicada e não existirão situações redundantes como foi comentado na Seção 5.2.

Para a construção do SI, bastam as informações da condição de cada módulo (sombreado e não sombreado), aliadas aos critérios de reconfiguração definidos na Seção 5.3. A Tabela 5.1 apresenta o SI obtido para a matriz 2x2.

Tabela 5.1 - Sistema de Informação para a matriz 2x2.

<b>U</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>Configuração Ótima (CF.)</b>
<b>1</b>	0	0	0	0	CF.01
<b>2</b>	0	0	0	1	CF.01
<b>3</b>	0	0	1	0	CF.01
<b>4</b>	0	0	1	1	CF.01
<b>5</b>	0	1	0	0	CF.01
<b>6</b>	0	1	0	1	CF.02
<b>7</b>	0	1	1	0	CF.03
<b>8</b>	1	1	1	1	CF.01
<b>9</b>	1	0	0	0	CF.01
<b>10</b>	1	0	0	1	CF.03
<b>11</b>	1	0	1	0	CF.02
<b>12</b>	1	0	1	1	CF.01
<b>13</b>	1	1	0	0	CF.01
<b>14</b>	1	1	0	1	CF.01
<b>15</b>	1	1	1	0	CF.01
<b>16</b>	1	1	1	1	CF.01

As 16 diferentes situações de sombreamento que podem acometer a matriz 2x2 são representadas pelo conjunto Universo  $U$ . Os atributos de condição são representados pelas

variáveis A, B, C e D relacionadas a cada módulo do painel. O atributo de decisão CF. é obtido com o auxílio de funções lógicas e comparações disponíveis em um *software* de planilhas.

Cada linha da Tabela 5.1 representa uma das situações de sombreamento a que a matriz 2x2 pode ser submetida e qual a configuração mais adequada para essa condição. Na situação 1, por exemplo, todos os módulos da matriz 2x2 encontram-se não sombreados as três configurações de interesse produziram resultados equivalentes. De acordo com o método proposto, neste tipo de situação define-se que a matriz fotovoltaica deve ser conectada de acordo com a configuração de referência, ou seja, a configuração CF.01. Na situação 7, os módulos B e C encontram-se sombreados e a configuração ideal é CF.03.

A simplificação dos dados contidos na Tabela 5.1 e a geração das regras correspondentes são realizadas com o uso do aplicativo ROSETTA. Com a simplificação, é possível extrair a essência dessas informações e identificar o padrão existente nos dados.

Para a Tabela 5.1, são geradas as oito regras que são listadas a seguir:

1.  $A(0) \text{ AND } B(0) \Rightarrow \text{CF}(01)$
2.  $A(1) \text{ AND } B(1) \Rightarrow \text{CF}(01)$
3.  $C(0) \text{ AND } D(0) \Rightarrow \text{CF}(01)$
4.  $C(1) \text{ AND } D(1) \Rightarrow \text{CF}(01)$
5.  $A(1) \text{ AND } B(0) \text{ AND } C(1) \text{ AND } D(0) \Rightarrow \text{CF}(02)$
6.  $A(0) \text{ AND } B(1) \text{ AND } C(0) \text{ AND } D(1) \Rightarrow \text{CF}(02)$
7.  $A(1) \text{ AND } B(0) \text{ AND } C(0) \text{ AND } D(1) \Rightarrow \text{CF}(03)$
8.  $A(0) \text{ AND } B(1) \text{ AND } C(1) \text{ AND } D(0) \Rightarrow \text{CF}(03)$

As oito regras geradas pelo ROSETTA podem ser agrupadas e reescritas de forma simplificada, isto é:

1.  $\text{IF } (A = B) \text{ OR } (C = D) \rightarrow \text{CF.01}$
2.  $\text{IF } (A=C) \text{ AND } (B=D) \text{ AND } (A \neq B) \rightarrow \text{CF.02}$
3.  $\text{IF } (A=D) \text{ AND } (B=C) \text{ AND } (A \neq B) \rightarrow \text{CF.03}$

Essas regras são baseadas na Teoria dos Conjuntos Aproximados e permitem que a escolha da configuração ideal seja feita de forma rápida e precisa, a partir da identificação da condição em que cada módulo se encontra.

## 5.4.2 Matriz 3x2

À medida que a matriz fotovoltaica torna-se maior, a quantidade de configurações de interesse aumenta e, paralelamente, também aumenta a quantidade de situações onde a reconfiguração melhora o desempenho do sistema fotovoltaico sombreado. Uma expansão vertical da matriz 2x2, apresentada na Seção 5.4.1, leva a uma matriz 3x2 (três linhas e duas colunas) conforme ilustra a Fig. 5.5.

O procedimento para a construção do SI se dá de forma análoga. Contudo, conforme aumenta o número de módulos que constituem a matriz, como é o caso do sistema 3x2, começam a surgir redundâncias no SI. Há casos em que o agrupamento dos módulos sombreados só acontece em uma das Configurações de Interesse, mas existem situações que são atendidas por mais de uma configuração.

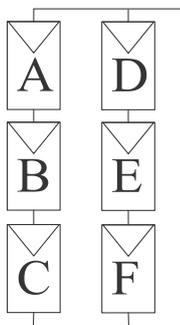


Fig. 5.5 – Matriz 3x2.

Das equações (5.2) e (5.5), constata-se que para uma matriz com seis módulos fotovoltaicos existem 64 diferentes possibilidades de sombreamento que podem atingir de zero a seis módulos simultaneamente. Entre as 64 possibilidades de sombreamento, nas situações onde existem dois ou três módulos sombreados, de acordo com (5.5) a reconfiguração da matriz pode ser viável e melhorar a produção de energia. De acordo com a equação (5.3), existem dez configurações de interesse que são apresentadas na Fig. 5.6.

A criação do SI para a matriz 3x2 é realizada com o auxílio de um aplicativo de planilhas eletrônicas de forma semelhante à apresentada para o sistema 2x2. Adicionalmente, utiliza-se o atributo Q (somatório dos módulos sombreados) para auxiliar no processo de redução do sistema de informação. Os dados são apresentados na Tabela 5.2.

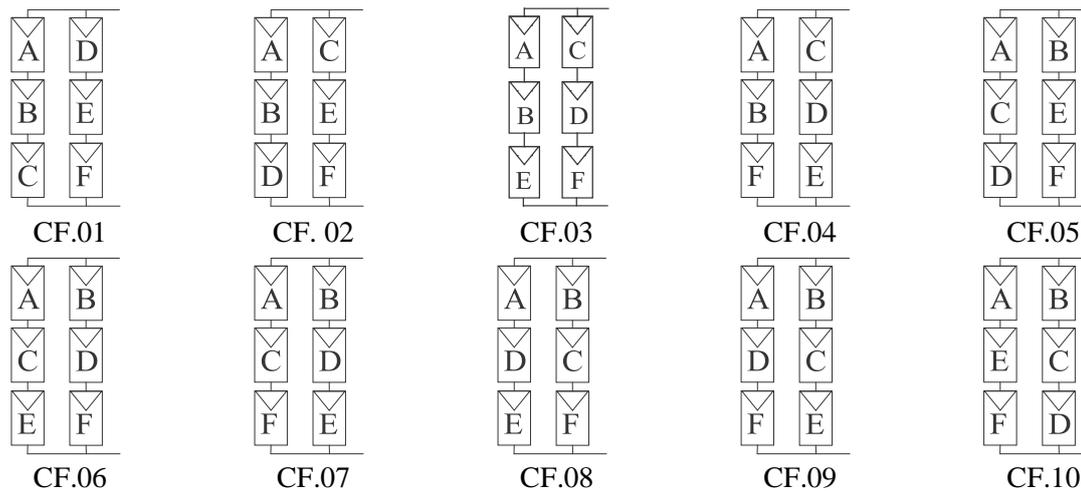


Fig. 5.6 – Configurações de interesse para matriz 3x2.

Tabela 5.2 - Sistema de Informação para a matriz 3x2.

U	A	B	C	D	E	F	Q	Configuração Ótima (CF.)
1	0	0	0	0	0	0	0	CF.01
2	0	0	0	0	0	1	1	CF.01
3	0	0	0	0	1	0	1	CF.01
4	0	0	0	0	1	1	2	CF.01 or CF.02 or CF.05 or CF.10
5	0	0	0	1	0	0	1	CF.01
6	0	0	0	1	0	1	2	CF.01 or CF.03 or CF.06 or CF.09
7	0	0	0	1	1	0	2	CF.01 or CF.04 or CF.07 or CF.08
8	0	0	0	1	1	1	3	CF.01
9	0	0	1	0	0	0	1	CF.01
10	0	0	1	0	0	1	2	CF.02 or CF.03 or CF.07 or CF.08
11	0	0	1	0	1	0	2	CF.02 or CF.04 or CF.06 or CF.09
12	0	0	1	0	1	1	3	CF.02
13	0	0	1	1	0	0	2	CF.03 or CF.04 or CF.05 or CF.10
14	0	0	1	1	0	1	3	CF.03
15	0	0	1	1	1	0	3	CF.04
16	0	0	1	1	1	1	4	CF.01
17	0	1	0	0	0	0	1	CF.01
18	0	1	0	0	0	1	2	CF.04 or CF.05 or CF.06 or CF.08
19	0	1	0	0	1	0	2	CF.03 or CF.05 or CF.07 or CF.09
20	0	1	0	0	1	1	3	CF.05
21	0	1	0	1	0	0	2	CF.02 or CF.06 or CF.07 or CF.10
22	0	1	0	1	0	1	3	CF.06
23	0	1	0	1	1	0	3	CF.07
24	0	1	0	1	1	1	4	CF.01
25	0	1	1	0	0	0	2	CF.01 or CF.08 or CF.09 or CF.10
26	0	1	1	0	0	1	3	CF.08
27	0	1	1	0	1	0	3	CF.09
28	0	1	1	0	1	1	4	CF.01
29	0	1	1	1	0	0	3	CF.01
30	0	1	1	1	0	1	4	CF.01

31	0	1	1	1	1	0	4	CF.01
32	0	1	1	1	1	1	5	CF.01
33	1	0	0	0	0	0	1	CF.01
34	1	0	0	0	0	1	2	CF.04 or CF.07 or CF.09 or CF.10
35	1	0	0	0	1	0	2	CF.03 or CF.06 or CF.08 or CF.10
36	1	0	0	0	1	1	3	CF.10
37	1	0	0	1	0	0	2	CF.02 or CF.05 or CF.08 or CF.09
38	1	0	0	1	0	1	3	CF.09
39	1	0	0	1	1	0	3	CF.08
40	1	0	0	1	1	1	4	CF.01
41	1	0	1	0	0	0	2	CF.01 or CF.05 or CF.06 or CF.07
42	1	0	1	0	0	1	3	CF.07
43	1	0	1	0	1	0	3	CF.06
44	1	0	1	0	1	1	4	CF.01
45	1	0	1	1	0	0	3	CF.05
46	1	0	1	1	0	1	4	CF.01
47	1	0	1	1	1	0	4	CF.01
48	1	0	1	1	1	1	5	CF.01
49	1	1	0	0	0	0	2	CF.01 or CF.02 or CF.03 or CF.04
50	1	1	0	0	0	1	3	CF.04
51	1	1	0	0	1	0	3	CF.03
52	1	1	0	0	1	1	4	CF.01
53	1	1	0	1	0	0	3	CF.02
54	1	1	0	1	0	1	4	CF.01
55	1	1	0	1	1	0	4	CF.01
56	1	1	0	1	1	1	5	CF.01
57	1	1	1	0	0	0	3	CF.01
58	1	1	1	0	0	1	4	CF.01
59	1	1	1	0	1	0	4	CF.01
60	1	1	1	0	1	1	5	CF.01
61	1	1	1	1	0	0	4	CF.01
62	1	1	1	1	0	1	5	CF.01
63	1	1	1	1	1	0	5	CF.01
64	1	1	1	1	1	1	6	CF.01

A partir da Tabela 5.2, observa-se que na situação 4, por exemplo, os módulos E e F estão sombreados, enquanto os outros módulos da matriz encontram-se iluminados. Segundo o método de reconfiguração estabelecido na Seção 5.3, a configuração ótima é aquela em que os módulos E e F permaneçam agrupados no mesmo ramo série (coluna da matriz). Esse agrupamento ocorre nas configurações de interesse CF.01, CF.02, CF.05 e CF.10 como mostra a Fig. 5.6.

De acordo com a TCA, os perfis de sombreado que são atendidos por mais de uma configuração de interesse, como é o caso da situação 4 na Tabela 5.2, são considerados inconsistentes pois, para o mesmo conjunto de atributos de condição, existem atributos de

decisão diferentes. Entretanto, do ponto de vista elétrico, essas situações não são inconsistentes, mas sim redundantes, uma vez que a seleção de qualquer configuração terá um resultado equivalente.

No sistema 3x2, fica evidente a importância e eficácia do processo de redução do conhecimento. A partir do Sistema de Informação apresentado na Tabela 5.2, é possível extrair 25 regras lógicas que representam toda a essência da base de conhecimento.

As 25 regras lógicas são escritas de forma simplificada e listadas a seguir.

1. IF ((Q=0 OR Q=1 OR Q=4 OR Q=5 OR Q=6) OR (D=1 AND E=1 AND F=1) OR (A=1 AND B=1 AND C=1)) → **CF.01**
2. IF ((Q=3) AND ((A=0 AND B=0 AND D=0) OR (A=1 AND B=1 AND D=1))) → **CF.02**
3. IF ((Q=3) AND ((A=0 AND B=0 AND E=0) OR (A=1 AND B=1 AND E=1))) → **CF.03**
4. IF ((Q=3) AND ((A=0 AND B=0 AND F=0) OR (A=1 AND B=1 AND F=1))) → **CF.04**
5. IF ((Q=3) AND ((A=0 AND C=0 AND D=0) OR (A=1 AND C=1 AND D=1))) → **CF.05**
6. IF ((Q=3) AND ((A=0 AND C=0 AND E=0) OR (A=1 AND C=1 AND E=1))) → **CF.06**
7. IF ((Q=3) AND ((A=0 AND C=0 AND F=0) OR (A=1 AND C=1 AND F=1))) → **CF.07**
8. IF ((Q=3) AND ((A=0 AND D=0 AND E=0) OR (A=1 AND D=1 AND E=1))) → **CF.08**
9. IF ((Q=3) AND ((A=0 AND D=0 AND F=0) OR (A=1 AND D=1 AND F=1))) → **CF.09**
10. IF ((Q=3) AND ((A=0 AND E=0 AND F=0) OR (A=1 AND E=1 AND F=1))) → **CF.10**
11. IF (E=1 AND F=1 AND Q=2) → (**CF.01 OR CF.02 OR CF.05 OR CF.10**)
12. IF (D=1 AND F=1 AND Q=2) → (**CF.01 OR CF.03 OR CF.06 OR CF.09**)
13. IF (D=1 AND E=1 AND Q=2) → (**CF.01 OR CF.04 OR CF.07 OR CF.08**)
14. IF (B=1 AND C=1 AND Q=2) → (**CF.01 OR CF.08 OR CF.09 OR CF.10**)
15. IF (A=1 AND C=1 AND Q=2) → (**CF.01 OR CF.05 OR CF.06 OR CF.07**)
16. IF (C=1 AND F=1 AND Q=2) → (**CF.02 OR CF.03 OR CF.07 OR CF.08**)
17. IF (C=1 AND E=1 AND Q=2) → (**CF.02 OR CF.04 OR CF.06 OR CF.09**)
18. IF (B=1 AND D=1 AND Q=2) → (**CF.02 OR CF.06 OR CF.07 OR CF.10**)
19. IF (A=1 AND D=1 AND Q=2) → (**CF.02 OR CF.05 OR CF.08 OR CF.09**)
20. IF (C=1 AND D=1 AND Q=2) → (**CF.03 OR CF.04 OR CF.05 OR CF.10**)
21. IF (B=1 AND E=1 AND Q=2) → (**CF.03 OR CF.05 OR CF.07 OR CF.09**)
22. IF (A=1 AND E=1 AND Q=2) → (**CF.03 OR CF.06 OR CF.08 OR CF.10**)
23. IF (A=1 AND B=1 AND Q=2) → (**CF.01 OR CF.02 OR CF.03 OR CF.04**)
24. IF (B=1 AND F=1 AND Q=2) → (**CF.04 OR CF.05 OR CF.06 OR CF.08**)
25. IF (A=1 AND F=1 AND Q=2) → (**CF.04 OR CF.07 OR CF.09 OR CF.10**)

Para cada um dos 64 diferentes perfis de sombreamento, somente uma das regras será satisfeita e indicará a configuração de interesse mais adequada. Nos casos onde ocorrem redundâncias (regras 11 a 25), a escolha da melhor configuração é realizada em um segundo

estágio do algoritmo de controle, onde a configuração anterior é avaliada. Com a informação da configuração anterior, objetiva-se promover o menor número de alterações possível na disposição dos módulos diante das situações de sombreamento.

A definição da configuração ótima em situações redundantes ocorre a partir de dois critérios básicos:

1. Se a configuração anterior estiver entre as configurações ótimas, deve-se mantê-la;
2. Se a configuração anterior não estiver entre as configurações ótimas, deve-se observar a configuração onde a menor quantidade de módulos é deslocada.

A Fig. 5.7 ilustra o processo de análise de mudança da configuração anterior (CF.06) para as quatro possíveis configurações. Partindo-se de CF.06, a mudança para CF.05 é a mais adequada nesse caso.

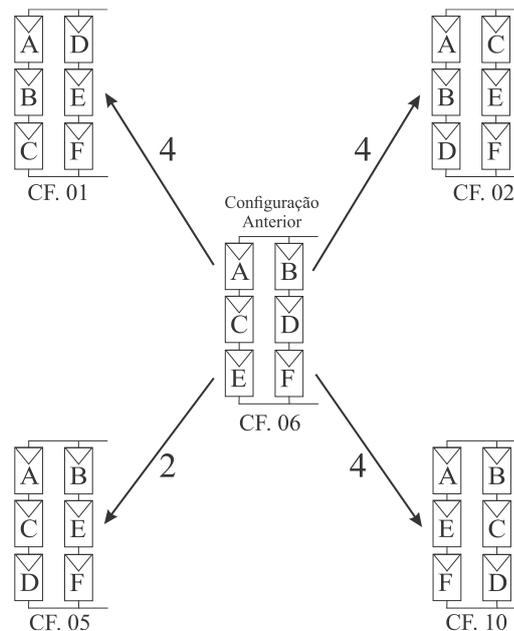


Fig. 5.7 – Análise da configuração anterior para situação 4 da Tabela 5.2.

### 5.4.3 Matriz 2x3

A expansão horizontal da matriz 2x2 apresentada na Seção 5.4.1 leva a uma matriz 2x3 (duas linhas e três colunas), conforme ilustra a Fig. 5.8.

O procedimento para a criação do Sistema de Informação e obtenção das regras é análogo àquele apresentado nas seções anteriores para as matrizes 2x2 e 3x2. Para o sistema 2x3, existem 15 configurações de interesse que são apresentadas na Fig. 5.9.

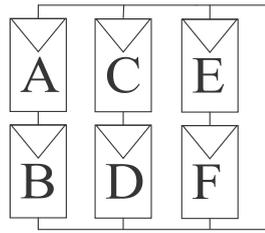


Fig. 5.8 – Matriz 2x3.

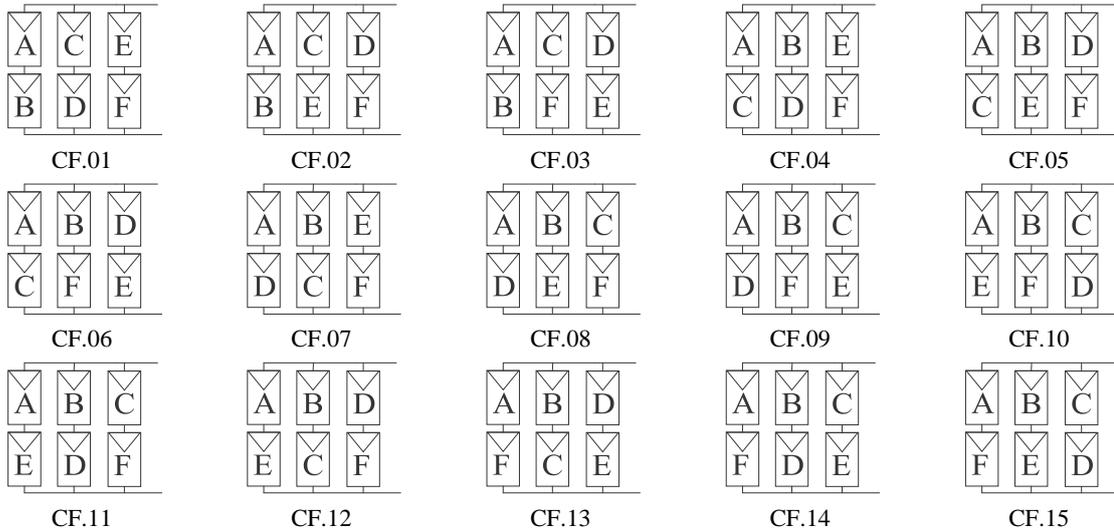


Fig. 5.9 – Configurações de interesse para matriz 2x3.

Como o sistema 2x3 foi expandido horizontalmente, a reconfiguração é viável nas situações onde o número de módulos sombreados for dois, três ou quatro (equação 5.5). Este fato aumenta a quantidade de situações redundantes conforme se observa no Sistema de Informação apresentado na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Sistema de Informação para a matriz 2x3.

U	A	B	C	D	E	F	Q	Configuração Ótima (CF)
1	0	0	0	0	0	0	0	CF.01
2	0	0	0	0	0	1	1	CF.01
3	0	0	0	0	1	0	1	CF.01
4	0	0	0	0	1	1	2	CF.01 or CF.04 or CF.07
5	0	0	0	1	0	0	1	CF.01
6	0	0	0	1	0	1	2	CF.02 or CF.05 or CF.12
7	0	0	0	1	1	0	2	CF.03 or CF.06 or CF.13
8	0	0	0	1	1	1	3	CF.01 or CF.02 or CF.03 or CF.04 or CF.05 or CF.06 or CF.07 or CF.12 or CF.13
9	0	0	1	0	0	0	1	CF.01

<b>10</b>	0	0	1	0	0	1	2	CF.03 or CF.08 or CF.11
<b>11</b>	0	0	1	0	1	0	2	CF.02 or CF.09 or CF.14
<b>12</b>	0	0	1	0	1	1	3	CF.01 or CF.02 or CF.03 or CF.04 or CF.07 or CF.08 or CF.09 or CF.11 or CF.14
<b>13</b>	0	0	1	1	0	0	2	CF.01 or CF.10 or CF.15
<b>14</b>	0	0	1	1	0	1	3	CF.01 or CF.02 or CF.03 or CF.05 or CF.08 or CF.10 or CF.11 or CF.12 or CF.15
<b>15</b>	0	0	1	1	1	0	3	CF.01 or CF.02 or CF.03 or CF.06 or CF.09 or CF.10 or CF.13 or CF.14 or CF.15
<b>16</b>	0	0	1	1	1	1	4	CF.01 or CF.02 or CF.03
<b>17</b>	0	1	0	0	0	0	1	CF.01
<b>18</b>	0	1	0	0	0	1	2	CF.06 or CF.09 or CF.10
<b>19</b>	0	1	0	0	1	0	2	CF.05 or CF.08 or CF.15
<b>20</b>	0	1	0	0	1	1	3	CF.01 or CF.04 or CF.05 or CF.06 or CF.07 or CF.08 or CF.09 or CF.10 or CF.15
<b>21</b>	0	1	0	1	0	0	2	CF.04 or CF.11 or CF.14
<b>22</b>	0	1	0	1	0	1	3	CF.02 or CF.04 or CF.05 or CF.06 or CF.09 or CF.10 or CF.11 or CF.12 or CF.14
<b>23</b>	0	1	0	1	1	0	3	CF.03 or CF.04 or CF.05 or CF.06 or CF.8 or CF.11 or CF.13 or CF.14 or CF.15
<b>24</b>	0	1	0	1	1	1	4	CF.04 or CF.05 or CF.06
<b>25</b>	0	1	1	0	0	0	2	CF.07 or CF.12 or CF.13
<b>26</b>	0	1	1	0	0	1	3	CF.03 or CF.06 or CF.07 or CF.08 or CF.09 or CF.10 or CF.11 or CF.12 or CF.13
<b>27</b>	0	1	1	0	1	0	3	CF.02 or CF.05 or CF.07 or CF.08 or CF.09 or CF.12 or CF.13 or CF.14 or CF.15
<b>28</b>	0	1	1	0	1	1	4	CF.07 or CF.08 or CF.09
<b>29</b>	0	1	1	1	0	0	3	CF.01 or CF.04 or CF.07 or CF.10 or CF.11 or CF.12 or CF.13 or CF.14 or CF.15
<b>30</b>	0	1	1	1	0	1	4	CF.10 or CF.11 or CF.12
<b>31</b>	0	1	1	1	1	0	4	CF.13 or CF.14 or CF.15
<b>32</b>	0	1	1	1	1	1	5	CF.01
<b>33</b>	1	0	0	0	0	0	1	CF.01
<b>34</b>	1	0	0	0	0	1	2	CF.13 or CF.14 or CF.15
<b>35</b>	1	0	0	0	1	0	2	CF.10 or CF.11 or CF.12
<b>36</b>	1	0	0	0	1	1	3	CF.01 or CF.04 or CF.07 or CF.10 or CF.11 or CF.12 or CF.13 or CF.14 or CF.15
<b>37</b>	1	0	0	1	0	0	2	CF.07 or CF.08 or CF.09
<b>38</b>	1	0	0	1	0	1	3	CF.02 or CF.05 or CF.07 or CF.08 or CF.09 or CF.12 or CF.13 or CF.14 or CF.15
<b>39</b>	1	0	0	1	1	0	3	CF.03 or CF.06 or CF.07 or CF.08 or CF.09 or CF.10 or CF.11 or CF.12 or CF.13
<b>40</b>	1	0	0	1	1	1	4	CF.07 or CF.12 or CF.13
<b>41</b>	1	0	1	0	0	0	2	CF.04 or CF.05 or CF.06
<b>42</b>	1	0	1	0	0	1	3	CF.03 or CF.04 or CF.05 or CF.06 or CF.8 or CF.11 or CF.13 or CF.14 or CF.15

43	1	0	1	0	1	0	3	CF.02 or CF.04 or CF.05 or CF.06 or CF.09 or CF.10 or CF.11 or CF.12 or CF.14
44	1	0	1	0	1	1	4	CF.04 or CF.11 or CF.14
45	1	0	1	1	0	0	3	CF.01 or CF.04 or CF.05 or CF.06 or CF.07 or CF.08 or CF.09 or CF.10 or CF.15
46	1	0	1	1	0	1	4	CF.05 or CF.08 or CF.15
47	1	0	1	1	1	0	4	CF.06 or CF.09 or CF.10
48	1	0	1	1	1	1	5	CF.1
49	1	1	0	0	0	0	2	CF.01 or CF.02 or CF.03
50	1	1	0	0	0	1	3	CF.01 or CF.02 or CF.03 or CF.06 or CF.09 or CF.10 or CF.13 or CF.14 or CF.15
51	1	1	0	0	1	0	3	CF.01 or CF.02 or CF.03 or CF.05 or CF.08 or CF.10 or CF.11 or CF.12 or CF.15
52	1	1	0	0	1	1	4	CF.01 or CF.10 or CF.15
53	1	1	0	1	0	0	3	CF.01 or CF.02 or CF.03 or CF.04 or CF.07 or CF.08 or CF.09 or CF.11 or CF.14
54	1	1	0	1	0	1	4	CF.02 or CF.09 or CF.14
55	1	1	0	1	1	0	4	CF.03 or CF.08 or CF.11
56	1	1	0	1	1	1	5	CF.1
57	1	1	1	0	0	0	3	CF.01 or CF.02 or CF.03 or CF.04 or CF.05 or CF.06 or CF.07 or CF.12 or CF.13
58	1	1	1	0	0	1	4	CF.03 or CF.06 or CF.13
59	1	1	1	0	1	0	4	CF.02 or CF.05 or CF.12
60	1	1	1	0	1	1	5	CF.1
61	1	1	1	1	0	0	4	CF.01 or CF.04 or CF.07
62	1	1	1	1	0	1	5	CF.01
63	1	1	1	1	1	0	5	CF.01
64	1	1	1	1	1	1	6	CF.01

As regras geradas a partir do SI apresentado na Tabela 5.3 são semelhantes às aquelas apresentadas nas seções anteriores, sendo descritas a seguir.

1. IF (Q=0 OR Q=1 OR Q=5 OR Q=6) → (CF.01)
2. IF ((E=1 AND F=1 AND Q=2) OR (E=0 AND F=0 AND Q=4)) → (CF.01 OR CF.04 OR CF.07)
3. IF ((A=0 AND B=0 AND C=0 AND Q=3) OR (A=1 AND B=1 AND C=1 AND Q=3)) → (CF.01 OR CF.02 OR CF.03 OR CF.04 OR CF.05 OR CF.06 OR CF.07 OR CF.12 OR CF.13)
4. IF ((A=0 AND B=0 AND D=0 AND Q=3) OR (A=1 AND B=1 AND D=1 AND Q=3)) → (CF.01 OR CF.02 OR CF.03 OR CF.04 OR CF.07 OR CF.08 OR CF.09 OR CF.11 OR CF.14)
5. IF ((C=1 AND D=1 AND Q=2) OR (C=0 AND D=0 AND Q=4)) → (CF.01 OR CF.10 OR CF.15)
6. IF ((A(0) AND B(0) AND F(0) AND Q(3)) OR (A(1) AND B(1) AND F(1) AND Q(3))) → (CF.01 OR CF.02 OR CF.03 OR CF.06 OR CF.09 OR CF.10 OR CF.13 OR CF.14 OR CF.15)
7. IF ((A=0 AND B=0 AND E=0 AND Q=3) OR (A=1 AND B=1 AND E=1 AND Q=3)) → (CF.01 OR CF.02 OR CF.03 OR CF.05 OR CF.08 OR CF.10 OR CF.11 OR CF.12 OR CF.15)

8. IF ((A=0 AND B=0 AND Q=4) OR (A=1 AND B=1 AND Q=2)) → (CF.01 OR CF.02 OR CF.03)
9. IF ((A=0 AND C=0 AND D=0 AND Q=3) OR (A=1 AND C=1 AND D=1 AND Q=3)) → (CF.01 OR CF.04 OR CF.05 OR CF.06 OR CF.07 OR CF.08 OR CF.09 OR CF.10 OR CF.15)
10. IF ((A=0 AND E=0 AND F=0 AND Q=3) OR (A=1 AND E=1 AND F=1 AND Q=3)) → (CF.01 OR CF.04 OR CF.07 OR CF.10 OR CF.11 OR CF.12 OR CF.13 OR CF.14 OR CF.15)
11. IF ((D=1 AND F=1 AND Q=2) OR (D=0 AND F=0 AND Q=4)) → (CF.02 OR CF.05 OR CF.12)
12. IF ((C=1 AND E=1 AND Q=2) OR (C=0 AND E=0 AND Q=4)) → (CF.02 OR CF.09 OR CF.14)
13. IF ((A=0 AND C=0 AND E=0 AND Q=3) OR (A=1 AND C=1 AND E=1 AND Q=3)) → (CF.02 OR CF.04 OR CF.05 OR CF.06 OR CF.09 OR CF.10 OR CF.11 OR CF.12 OR CF.14)
14. IF ((A=0 AND D=0 AND F=0 AND Q=3) OR (A=1 AND D=1 AND F=1 AND Q=3)) → (CF.02 OR CF.05 OR CF.07 OR CF.08 OR CF.09 OR CF.12 OR CF.13 OR CF.14 OR CF.15)
15. IF ((D=1 AND E=1 AND Q=2) OR (D=0 AND E=0 AND Q=4)) → (CF.03 OR CF.06 OR CF.13)
16. IF ((C=1 AND F=1 AND Q=2) OR (C=0 AND F=0 AND Q=4)) → (CF.03 OR CF.08 OR CF.11)
17. IF ((A=0 AND C=0 AND F=0 AND Q=3) OR (A=1 AND C=1 AND F=1 AND Q=3)) → (CF.03 OR CF.04 OR CF.05 OR CF.06 OR CF.08 OR CF.11 OR CF.13 OR CF.14 OR CF.15)
18. IF ((A=0 AND D=0 AND E=0 AND Q=3) OR (A=1 AND D=1 AND E=1 AND Q=3)) → (CF.03 OR CF.06 OR CF.07 OR CF.08 OR CF.09 OR CF.10 OR CF.11 OR CF.12 OR CF.13)
19. IF ((B=1 AND D=1 AND Q=2) OR (B=0 AND D=0 AND Q=4)) → (CF.04 OR CF.11 OR CF.14)
20. IF ((A=0 AND C=0 AND Q=4) OR (A=1 AND C=1 AND Q=2)) → (CF.04 OR CF.05 OR CF.06)
21. IF ((B=1 AND C=1 AND Q=2) OR (B=0 AND C=0 AND Q=4)) → (CF.07 OR CF.12 OR CF.13)
22. IF ((A=0 AND D=0 AND Q=4) OR (A=1 AND D=1 AND Q=2)) → (CF.07 OR CF.08 OR CF.09)
23. IF ((B=1 AND E=1 AND Q=2) OR (B=0 AND E=0 AND Q=4)) → (CF.05 OR CF.08 OR CF.15)
24. IF ((B=1 AND F=1 AND Q=2) OR (B=0 AND F=0 AND Q=4)) → (CF.06 OR CF.09 OR CF.10)
25. IF ((A=0 AND E=0 AND Q=4) OR (A=1 AND E=1 AND Q=2)) → (CF.10 OR CF.11 OR CF.12)
26. IF ((A=0 AND F=0 AND Q=4) OR (A=1 AND F=1 AND Q=2)) → (CF.13 OR CF.14 OR CF.15)

Assim como ocorre no sistema 3x2 (Seção 5.4.2), nas situações em que ocorre redundância, ou seja, existe mais de uma configuração ótima para determinado perfil de sombreamento, a definição da configuração ideal é realizada através da análise da configuração anterior. A configuração ótima é aquela em que menor quantidade de módulos fotovoltaicos é deslocada/movimentada em relação à situação anterior.

## **5.5 Considerações finais**

Neste capítulo foram apresentados os principais detalhes para a elaboração do sistema de reconfiguração baseado na TCA para painéis fotovoltaicos com quatro e seis módulos.

Verificou-se que a TCA é uma ferramenta eficiente na organização e simplificação dos dados para os sistemas fotovoltaicos estudados. Através do aplicativo ROSETTA foi possível gerar regras lógicas simples, através das quais, a identificação da configuração ótima para a matriz fotovoltaica diante de situações de sombreamento é realizada de maneira direta, sendo necessárias apenas as informações do estado de cada módulo fotovoltaico que compõe a matriz.

## 6 RESULTADOS DE SIMULAÇÕES

### 6.1 Considerações iniciais

Este capítulo apresenta uma avaliação computacional dos sistemas de reconfiguração projetados no capítulo 5.

O *software* utilizado para a montagem dos circuitos dos sistemas de reconfiguração é o PSIM®. Esta escolha se deve a possibilidade de representar de forma simples e adequada o funcionamento de módulos fotovoltaicos comerciais, além de permitir a simulação do comportamento de microcontroladores através da programação do bloco lógico DLL.

### 6.2 Sistema de reconfiguração – Matriz 2x2

A Fig. 6.1 apresenta o circuito simplificado do sistema de reconfiguração para a matriz 2x2. O circuito pode ser dividido em três blocos distintos: painel fotovoltaico, microcontrolador e circuito de comutação.

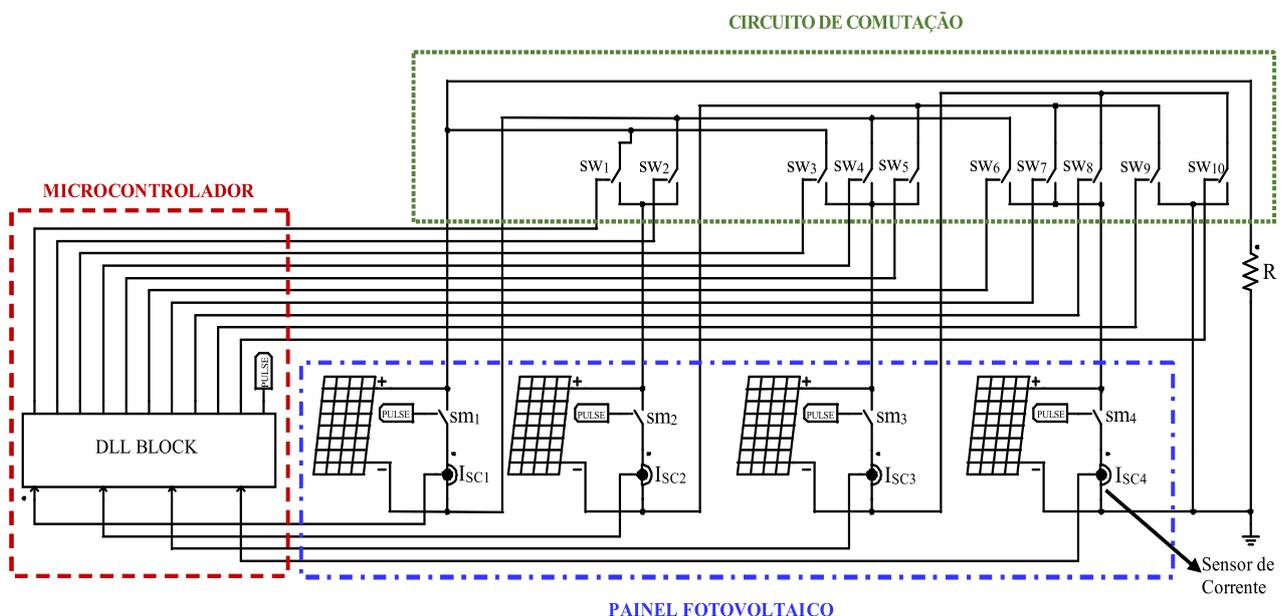


Fig. 6.1 – Circuito simplificado do sistema de reconfiguração para a matriz 2x2.

O circuito de comutação delimitado pelo retângulo pontilhado superior é construído de forma que seja possível conectar os módulos de acordo com as três configurações de interesse apresentadas na Fig. 5.4.

O painel é constituído por quatro módulos fotovoltaicos que simulam o comportamento do módulo comercial KS10 de 10 W, fabricado pela Kyocera®, cujos dados são:  $I_{SC}=0,62$  A,  $I_{MPP}=0,60$  A,  $V_{OC}=20,0$  V e  $V_{MPP}=16,9$  V.

Em um módulo fotovoltaico, a corrente de curto-circuito é proporcional a irradiância incidente sobre o mesmo. Portanto, o sombreamento pode ser identificado através de medições periódicas na corrente de curto-circuito,  $I_{SC}$  [43]. No instante da medição, todos os interruptores do circuito de comutação devem estar bloqueados de forma que a medição de cada módulo seja totalmente independente.

Nas simulações, as medições da corrente  $I_{SC}$  são sincronizadas com as alterações na irradiância dos módulos fotovoltaicos. A cada nova condição de irradiância os interruptores do circuito de comutação ( $sw_1, sw_2, \dots, sw_{10}$ ) são abertos e as correntes de curto-circuito ( $I_{SC1}, I_{SC2}, I_{SC3}$  e  $I_{SC4}$ ) são medidas através do acionamento dos interruptores ( $sm_1, sm_2, sm_3$  e  $sm_4$ ). No circuito simulado, um módulo é considerado sombreado se a corrente fornecida pelo mesmo é inferior a 0,5 A, ou seja, a partir de um sombreamento de aproximadamente 20%.

O sistema de controle consiste basicamente do bloco DLL que executa um algoritmo compilado no aplicativo DEV C++, o qual é construído a partir das regras lógicas obtidas com o aplicativo ROSETTA apresentadas na Seção 5. O fluxograma do algoritmo proposto é apresentado na Fig. 6.2.

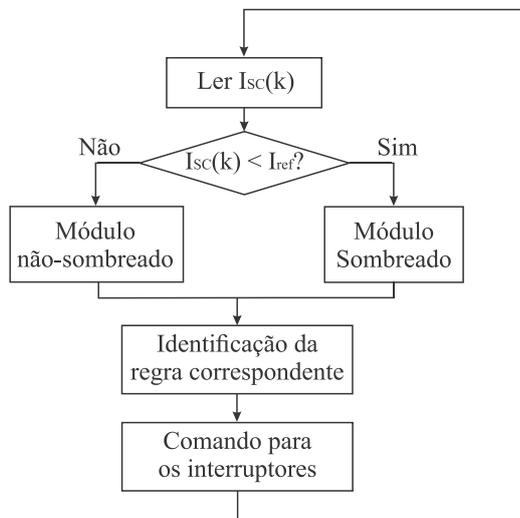


Fig. 6.2 – Fluxograma do algoritmo proposto.

De acordo com o fluxograma, a corrente fornecida por cada módulo fotovoltaico  $I_{SC}(k)$  é lida. Se esta corrente for menor que a corrente de referência  $I_{REF}$ , o módulo é considerado sombreado. Caso contrário, o módulo é considerado não sombreado. A informação de cada módulo é enviada ao bloco DLL, onde a regra correspondente ao perfil de sombreamento analisado é selecionada. Após a definição da configuração ideal, o circuito de comutação é acionado.

Os sistemas de geração de energia fotovoltaica, normalmente, estão associados a rastreadores do ponto de máxima potência (MPPT), os quais garantem que o produto entre os valores de tensão e corrente dos módulos seja o maior possível. Entretanto, como o objetivo da simulação é verificar a eficácia da reconfiguração, o painel foi conectado a uma carga resistiva de valor fixo. O valor da resistência foi calculado para que o sistema opere próximo ao ponto de máxima potência em situações de teste padrão (1000 W/m<sup>2</sup> e 25 °C). Portanto, nas situações onde simula-se a ocorrência de sombreamento as condições mudam e, conseqüentemente, o sistema não opera mais em seu ponto de potência máxima. Nos testes apresentados a seguir, as situações em que simula-se a presença de sombreamento a irradiância é reduzida para 450 W/m<sup>2</sup> o que caracteriza um sombreamento de 55%. Em todos os testes a temperatura foi mantida em 25 °C.

## **6.2.1 Comportamento do sistema para diferentes padrões de sombreamento**

Durante o período de exposição do painel fotovoltaico ao Sol, a sombra pode apresentar diferentes padrões, o que irá interferir diretamente na resposta do sistema de reconfiguração.

As simulações apresentadas a seguir foram divididas em três grupos distintos, onde avalia-se o comportamento do sistema de reconfiguração diante de diferentes padrões de sombreamento.

### **6.2.1.1 Sombreamento estático**

O primeiro padrão de sombreamento avaliado nas simulações é o sombreamento estático. Nesse caso, a sombra atinge o painel fotovoltaico e não muda de posição, permanecendo estática durante o período de tempo analisado.

Com a simulação deste tipo de sombreamento é possível analisar o comportamento do sistema de reconfiguração antes e após a presença da sombra no painel fotovoltaico. As imagens apresentadas na Fig. 6.3 ilustram os seis tipos de sombreamentos estáticos analisados.

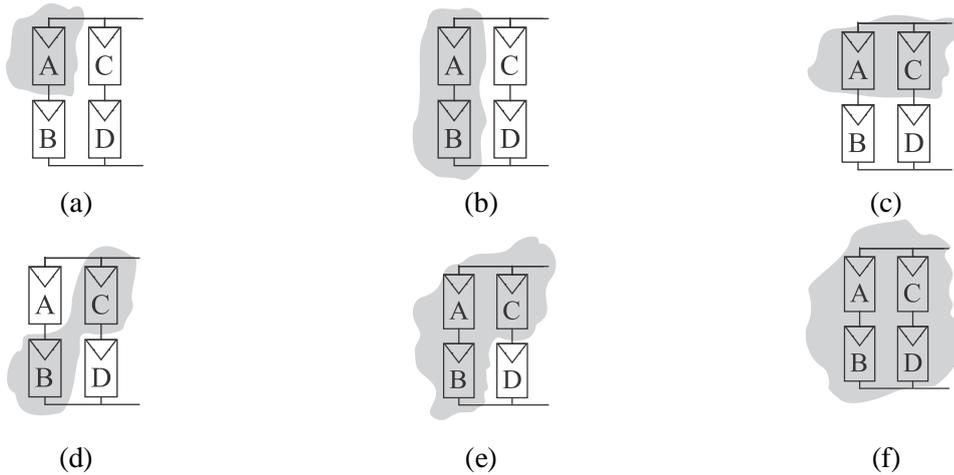
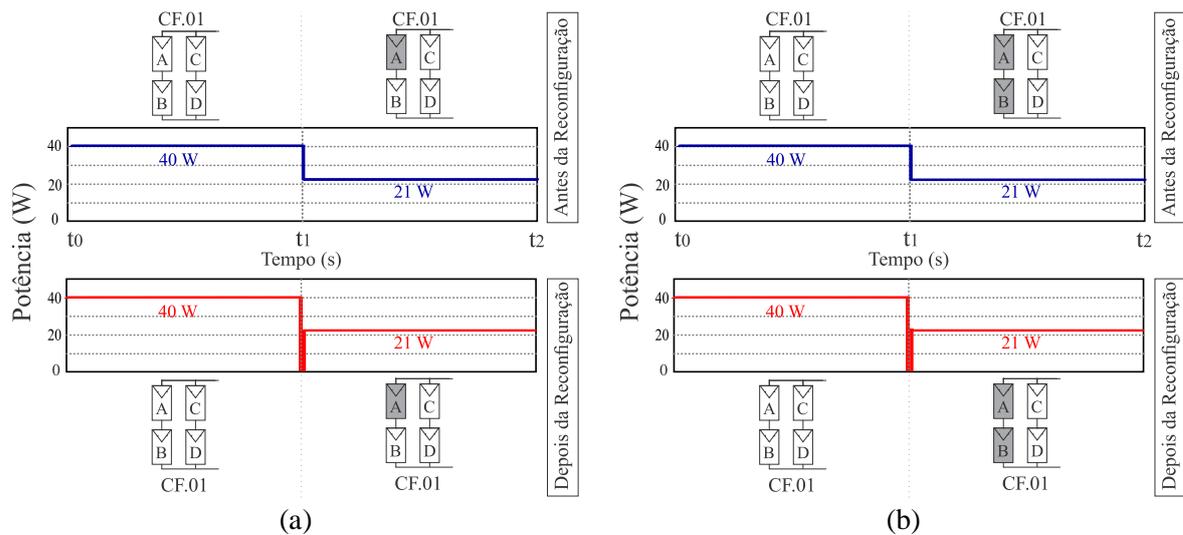


Fig. 6.3 – Sombreamentos estáticos em um painel fotovoltaico 2x2: (a) um módulo; (b) dois módulos em uma mesma coluna; (c) dois módulos em uma mesma linha; (d) dois módulos na diagonal; (e) três módulos; (f) quatro módulos.

Os resultados da simulação para cada uma das situações ilustradas na Fig. 6.3 são apresentados na Fig. 6.4. Os resultados da Fig. 6.4 são divididos em dois intervalos de tempo, antes da presença do sombreamento ( $t_0$  a  $t_1$ ) e após a presença do sombreamento ( $t_1$  a  $t_2$ ). Em todas as simulações a abertura dos interruptores para leitura das correntes é sincronizada com a realização do sombreamento, portanto, a atuação do sistema de reconfiguração é imediata.

Na parte superior e inferior de cada imagem são mostrados os arranjos para a matriz fotovoltaica antes e depois da reconfiguração, respectivamente. As situações em que a mudança na configuração proporciona uma recuperação de energia são evidenciadas no gráfico.



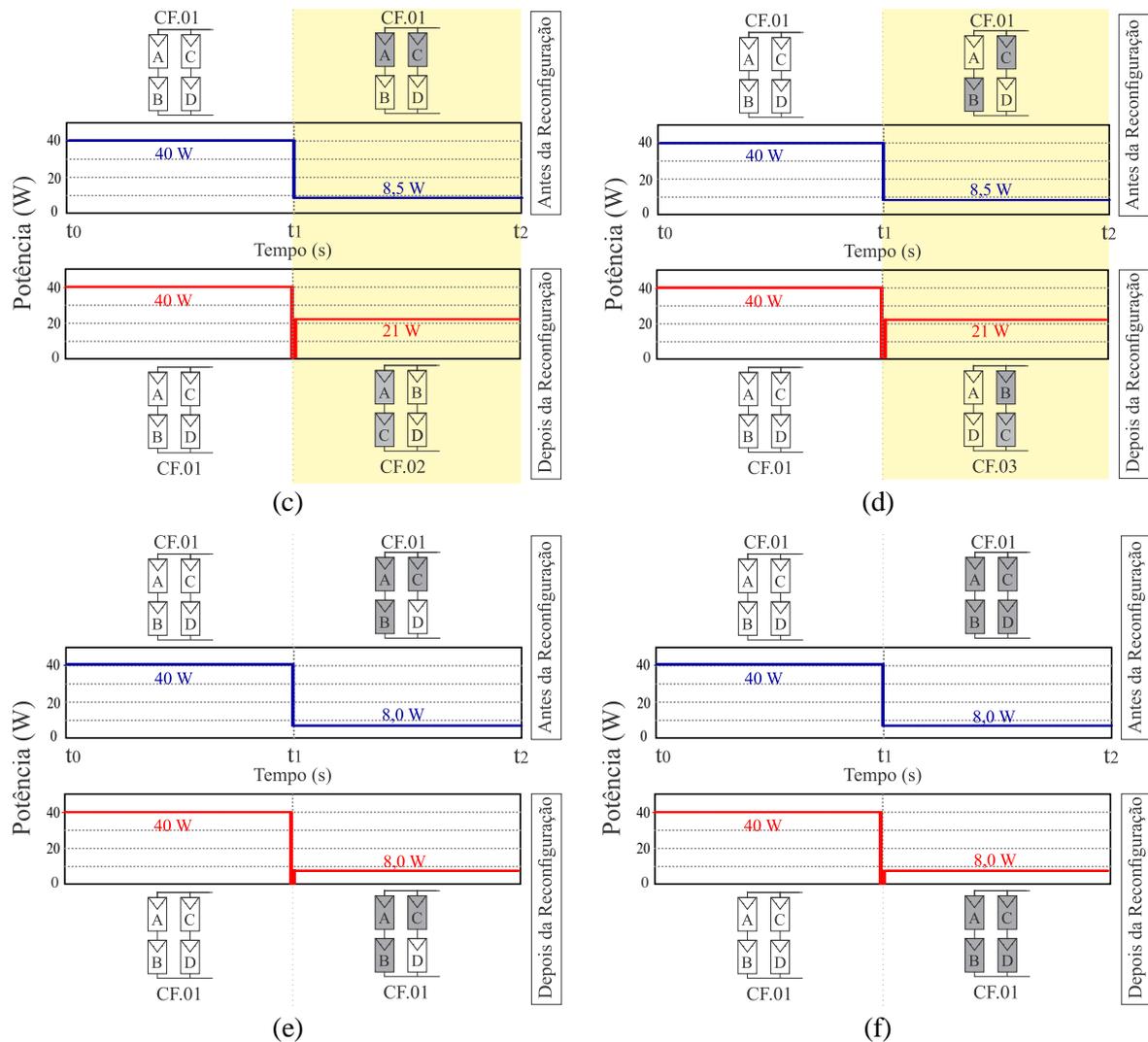


Fig. 6.4 – Potência *versus* tempo – antes e depois da reconfiguração para sombreamentos estáticos em um painel fotovoltaico 2x2: (a) um módulo; (b) dois módulos em uma mesma coluna; (c) dois módulos em uma mesma linha; (d) dois módulos na diagonal; (e) três módulos; (f) quatro módulos.

Conforme foi discutido no Capítulo 5, para um painel fotovoltaico 2x2, a reconfiguração das conexões elétricas somente é viável quando ocorre o sombreamento de dois módulos localizados em colunas diferentes, essas situações são apresentadas nas Fig. 6.4 (c) e (d). Em todos os outros casos, a reconfiguração não é viável e o sistema é mantido na configuração de referência.

Nas simulações apresentadas a seguir pode-se observar que diferentes padrões de sombreamento podem produzir resultados análogos como é o caso das Fig. 6.4 (a) e (b), Fig. 6.4 (c) e (d) e Fig. 6.4 (e) e (f).

Esse comportamento justifica-se pelo fato de que nas simulações, a presença de um módulo sombreado no ramo série é interpretada como uma limitação no fluxo de corrente

fornecido por este ramo, desta forma, a presença de um ou dois módulos sombreados, no mesmo ramo, reproduzem um comportamento semelhante.

### 6.2.1.2 Sombreamento dinâmico

#### ▪ Deslocamento horizontal

Em aplicações práticas, tipicamente, a sombra possui um comportamento dinâmico, movendo-se sobre a matriz fotovoltaica. Isso pode ocorrer em função da movimentação dos obstáculos que produzem a sombra ou devido à movimentação do Sol.

O primeiro padrão de sombreamento dinâmico avaliado é o deslocamento horizontal da sombra, conforme ilustra a Fig. 6.5.

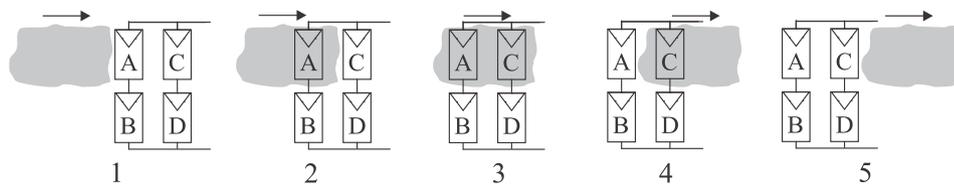


Fig. 6.5 –Sombreamento com deslocamento horizontal em uma matriz 2x2.

As imagens da Fig. 6.5 esboçam o deslocamento de uma sombra que se move horizontalmente e passa sobre uma linha do painel fotovoltaico. A movimentação da sombra é dividida em 5 estágios que compreendem:

- 1 – Painel iluminado e a sombra se deslocando horizontalmente em direção a ele;
- 2 – A sombra atinge o primeiro módulo do painel;
- 3 – A sombra atinge mais um módulo, totalizando dois módulos sombreados;
- 4 – A sombra continua seu percurso e o primeiro módulo atingido é liberado;
- 5 – Finalmente, a sombra passa e o painel volta a ser estar completamente iluminado.

As curvas da potência em função do tempo para o sombreamento horizontal em uma matriz 2x2 são apresentadas na Fig. 6.6. Na figura é possível analisar a resposta do sistema antes e depois da reconfiguração. Na parte inferior da figura, são apresentadas as transições entre as configurações ótimas durante a passagem da sombra sobre o painel. Destaca-se que as alterações ocorrem apenas entre as conexões elétricas dos módulos, fisicamente a posição dos módulos permanece inalterada.

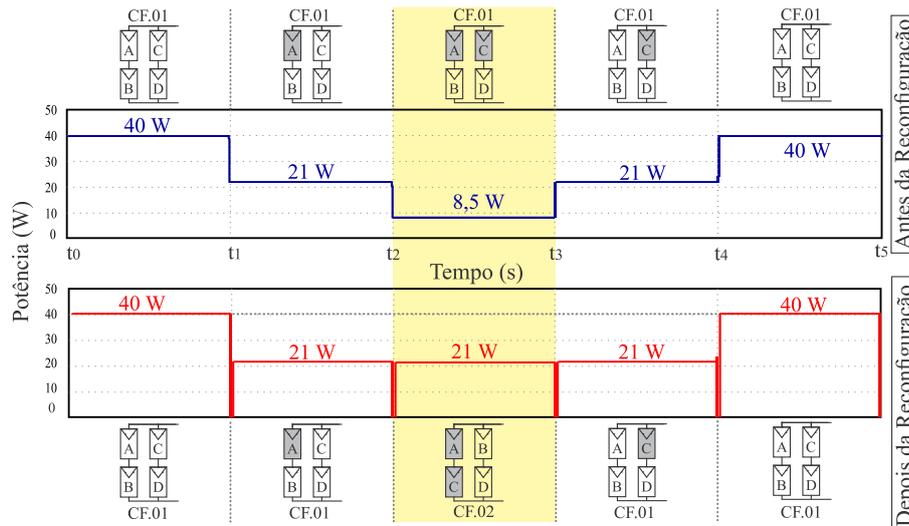


Fig. 6.6 – Potência *versus* tempo, antes e depois da reconfiguração, para o sombreamento com deslocamento horizontal em uma matriz 2x2.

Durante a passagem da sombra sobre o painel fotovoltaico observa-se que existe apenas um intervalo de tempo em que a reconfiguração dos módulos é viável, sendo possível uma recuperação de 12,5 W, essa situação é destacada no gráfico.

#### ▪ Deslocamento vertical

Outro perfil de deslocamento analisado é o vertical, em que a sombra movimentar-se verticalmente atingindo ambas as colunas da matriz fotovoltaica. Nas Fig. 6.7 observa-se o comportamento de uma sombra vertical deslocando-se de cima para baixo.

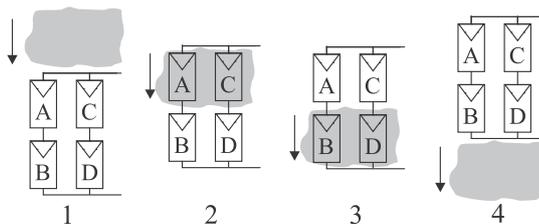


Fig. 6.7 – Sombreamento com deslocamento vertical em uma matriz 2x2.

Assim como o padrão de sombreamento apresentado no item anterior, pode-se dividir o perfil de sombreamento vertical em alguns estágios. São eles:

- 1 – Painel iluminado e a sombra se deslocando verticalmente em direção a ele;
- 2 – A sombra atinge a primeira linha da matriz fotovoltaica;
- 3 – A sombra continua seu percurso, desobstruindo a linha sombreada no estágio 2 e sombreando a segunda linha do painel;
- 4 – No quarto estágio o painel volta a estar totalmente iluminado.

Na Fig. 6.8 são apresentadas as curvas da potência *versus* tempo durante o intervalo de tempo simulado. Destaca-se que para este padrão de sombreamento existem dois intervalos de tempo em que a reconfiguração dos módulos fotovoltaicos promove um aumento na potência gerada pelo sistema.

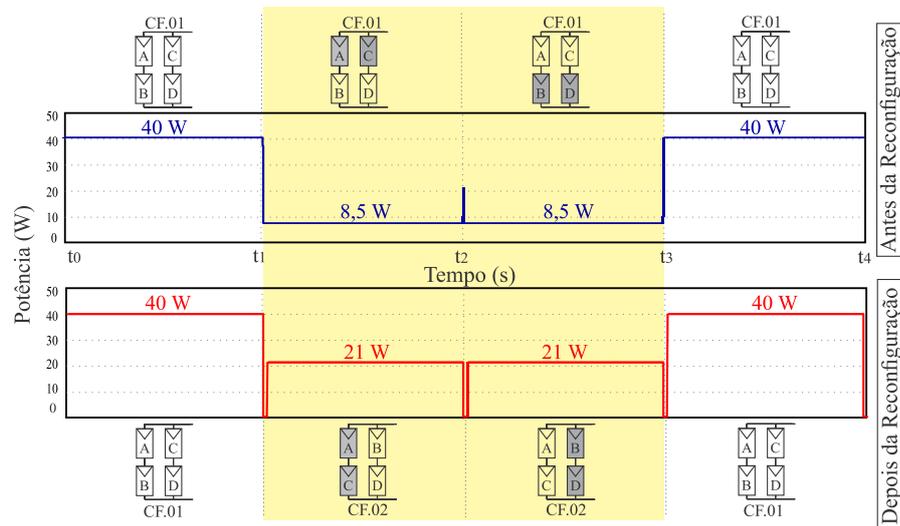


Fig. 6.8 – Potência *versus* tempo, antes e depois da reconfiguração, para o sombreamento com deslocamento vertical, em uma matriz 2x2.

Entre os instantes de tempo  $t_1$  e  $t_2$  ocorre o sombreamento dos módulos A e C, diante disso, o sistema de reconfiguração atua e a matriz fotovoltaica é eletricamente conectada de acordo com a configuração 02 (CF.02), o que proporciona um aumento de 12,5 W na potência produzida pelo sistema.

No intervalo seguinte, entre  $t_2$  e  $t_3$ , a sombra muda de posição e atinge os módulos B e D, entretanto, o painel fotovoltaico já se encontra na configuração ótima para esse perfil de sombreamento e a configuração 02 é mantida.

#### ▪ Deslocamento diagonal

O terceiro e último perfil de sombreamento avaliado para uma matriz fotovoltaica 2x2 é o sombreamento diagonal. No exemplo apresentado na Fig. 6.9 observa-se o deslocamento diagonal da sombra em cinco estágios distintos.

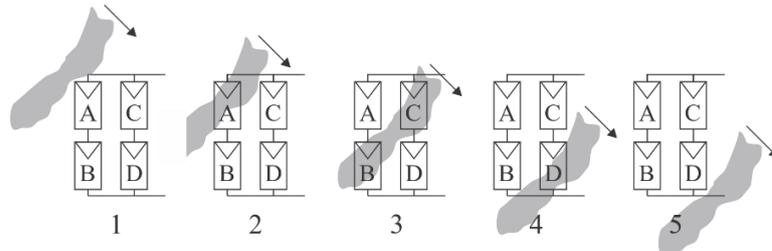


Fig. 6.9 – Sombreamento com deslocamento diagonal em uma matriz 2x2.

- 1 – Painel iluminado e a sombra se deslocando diagonalmente em direção a ele;
- 2 – A sombra atinge o primeiro módulo;
- 3 – A sombra se move, libera o primeiro módulo e atinge outros dois módulos na diagonal;
- 4 – A sombra continua seu percurso, libera os módulos sombreados no instante anterior e sombreada o último módulo;
- 5 – Finalmente, a sombra passa e o painel volta a estar completamente iluminado.

As curvas da potência em função do tempo para um painel fotovoltaico 2x2 passando pelos cinco estágios de sombreamento descritos anteriormente são apresentados na Fig. 6.10.

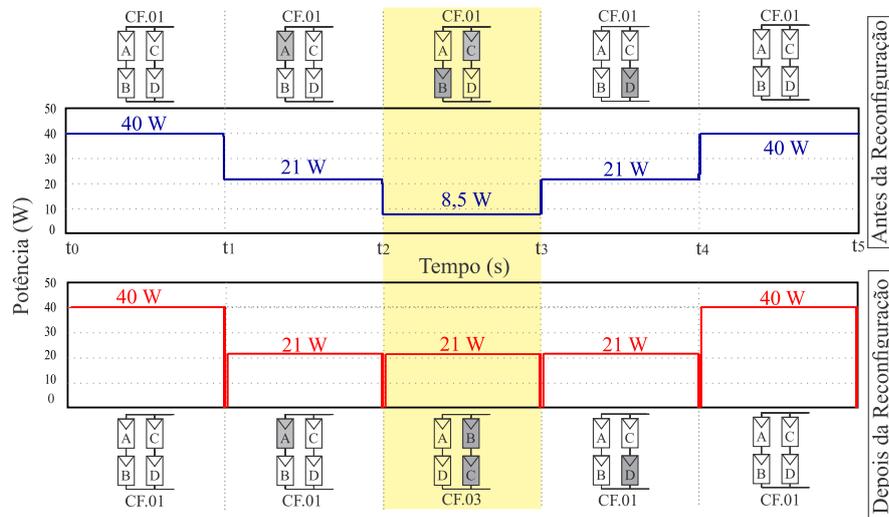


Fig. 6.10 – Potência *versus* tempo, antes e depois da reconfiguração, para o sombreamento com deslocamento diagonal, em uma matriz 2x2.

Uma análise da Fig. 6.10 mostra que a mudança da configuração 01 (CF.01) para a configuração 03 (CF.03) é benéfica enquanto os módulos B e C estão sombreados. Em todos os outros intervalos de tempo a reconfiguração dos módulos não traria melhora para o sistema, portanto, a matriz permanece na configuração de referência (CF.01).

### 6.2.1.3 Sombreamentos progressivos

Os resultados apresentados nas seções anteriores não simulam todas as possibilidades de sombreamento que podem ocorrer em um painel fotovoltaico 2x2. Para que as 16 diferentes possíveis situações de sombreamento sejam contempladas em uma única simulação ajusta-se a variação no nível de corrente gerada em cada um dos módulos do painel fotovoltaico durante o intervalo de tempo analisado.

As curvas apresentadas na Fig. 6.11 reproduzem o comportamento potência fornecida pelo painel, ao passar por todas as situações possíveis de sombreamento (com zero, um, dois, três e quatro módulos sombreados) antes e depois da reconfiguração.

A sequência de sombreamento é realizada de acordo com a Tabela 5.1. No primeiro intervalo ( $t_0 - t_1$ ), todos os módulos estão iluminados – situação 1 da Tabela 5.1, no segundo intervalo ( $t_1 - t_2$ ), ocorre o sombreamento do módulo D – situação 2 da Tabela 5.1, e assim por diante. Das 16 diferentes possibilidades de sombreamento, a reconfiguração é viável em apenas quatro casos. Com a reconfiguração, nas situações destacadas, é possível elevar a potência de 8,5 W para 21 W, ou seja, um aumento de 12,5 W.

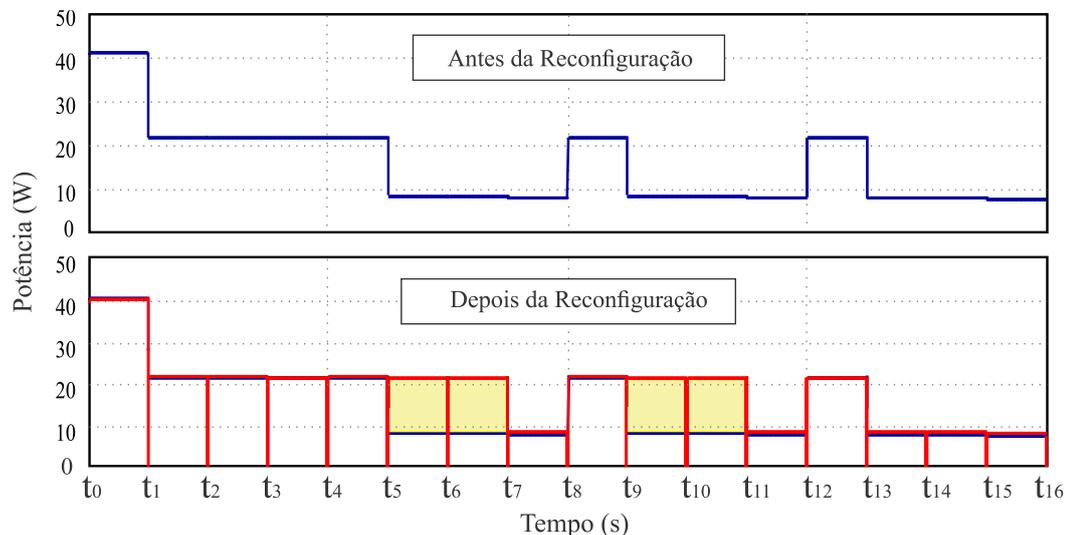


Fig. 6.11 – Potência *versus* tempo, antes e depois da reconfiguração, para matriz 2x2 e sombreamentos progressivos.

## 6.3 Sistema de reconfiguração - Matriz 3x2

A construção do circuito para a simulação do sistema de reconfiguração para a matriz 3x2 é similar ao procedimento apresentado na seção anterior, para a matriz 2x2, conforme ilustra a Fig. 6.12. Seis módulos fotovoltaicos são conectados ao circuito de comutação e ao

microcontrolador. O painel alimenta uma carga resistiva de valor fixo onde são amostrados os valores de potência antes e depois da reconfiguração.

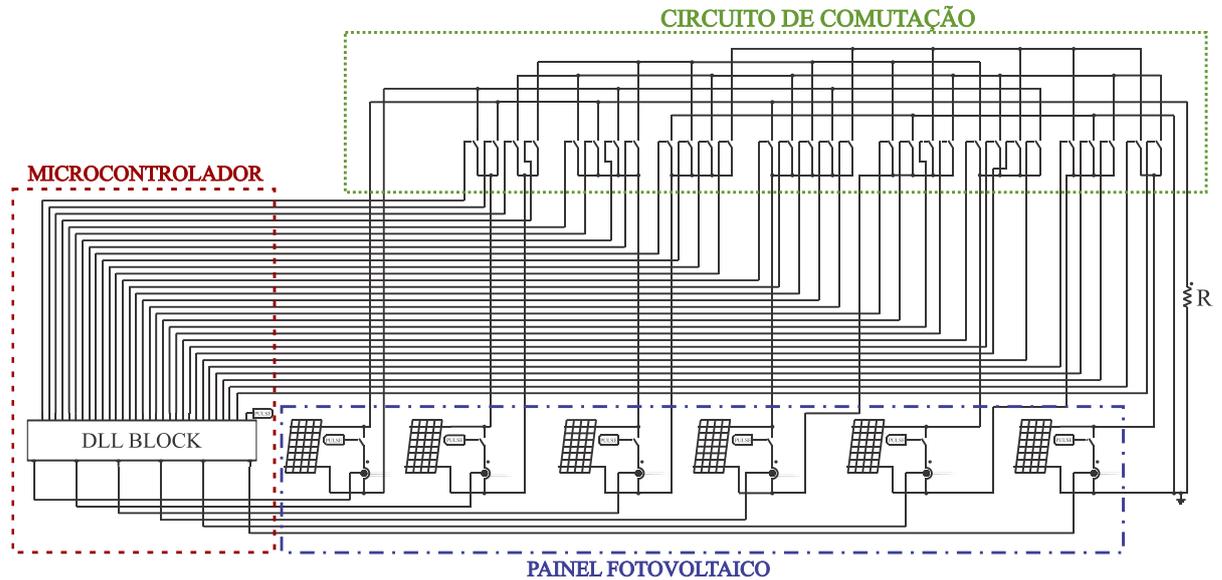


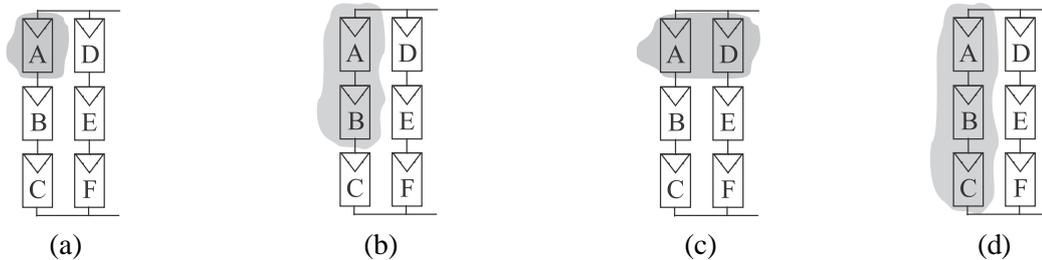
Fig. 6.12 – Circuito simplificado do sistema de reconfiguração para a matriz 3x2.

A matriz 3x2 é a expansão vertical da matriz 2x2, portanto, os padrões de sombreamento avaliados nas seções anteriores, para as matrizes 2x2 podem ser analisados de forma semelhante.

### 6.3.1 Comportamento do sistema para diferentes padrões de sombreamento

#### 6.3.1.1 Sombreamento estático

Para o painel fotovoltaico 3x2 serão avaliados os oito tipos de sombreamentos estáticos ilustrados na Fig. 6.13.



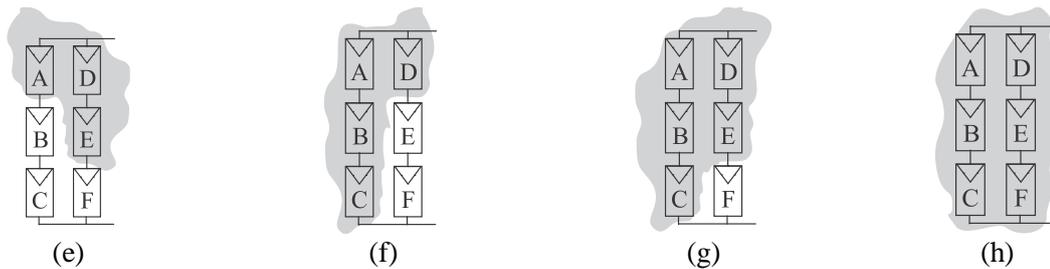
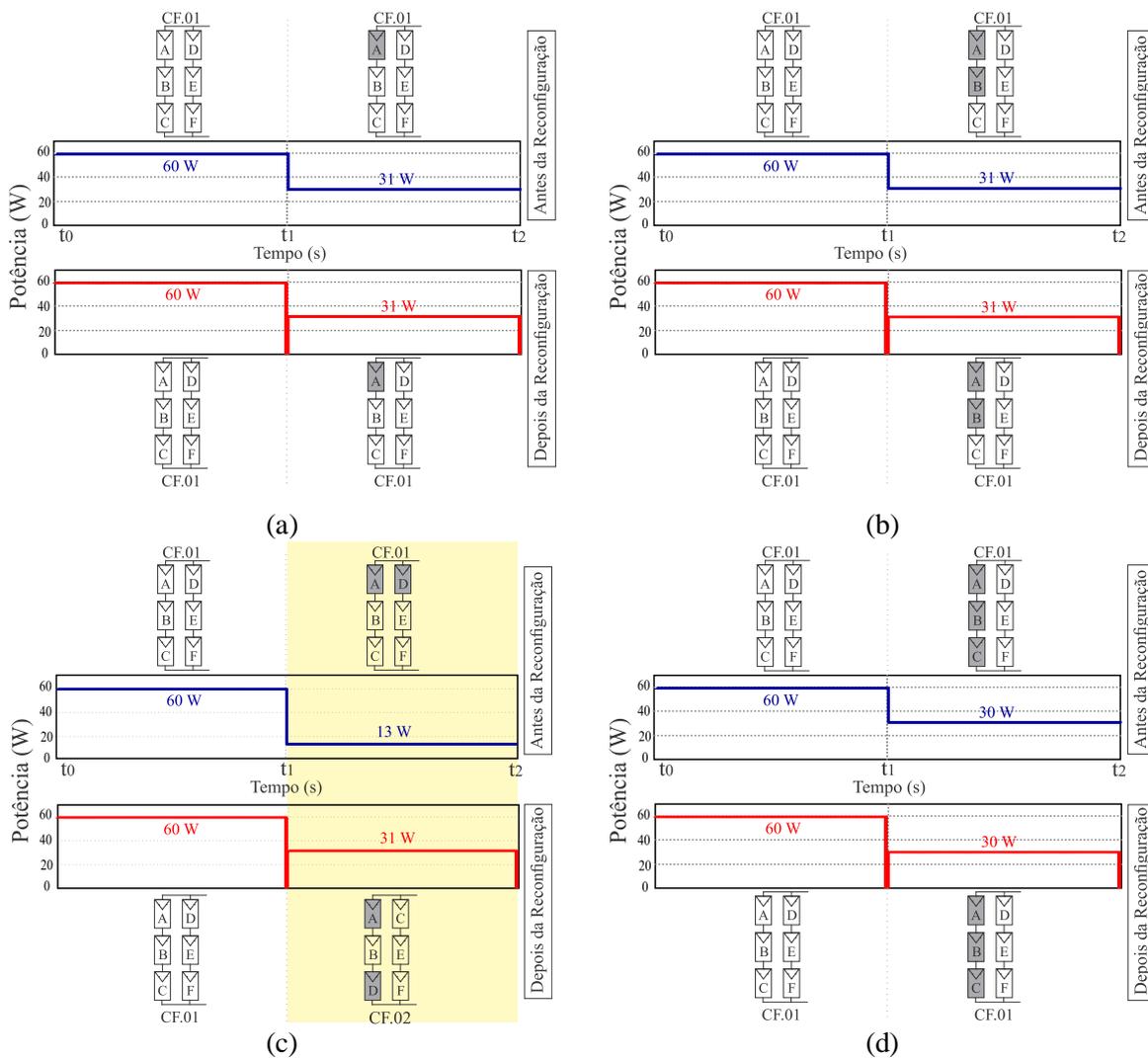


Fig. 6.13 – Sombreamentos estáticos em um painel fotovoltaico 3x2: (a) um módulo; (b) dois módulos em uma mesma coluna; (c) dois módulos em uma mesma linha; (d) três módulos em uma mesma coluna; (e) três módulos em duas colunas; (f) quatro módulos; (g) cinco módulos; (h) seis módulos.

Os resultados da simulação para cada uma das situações ilustradas na Fig. 6.13 são apresentados na Fig. 6.14.



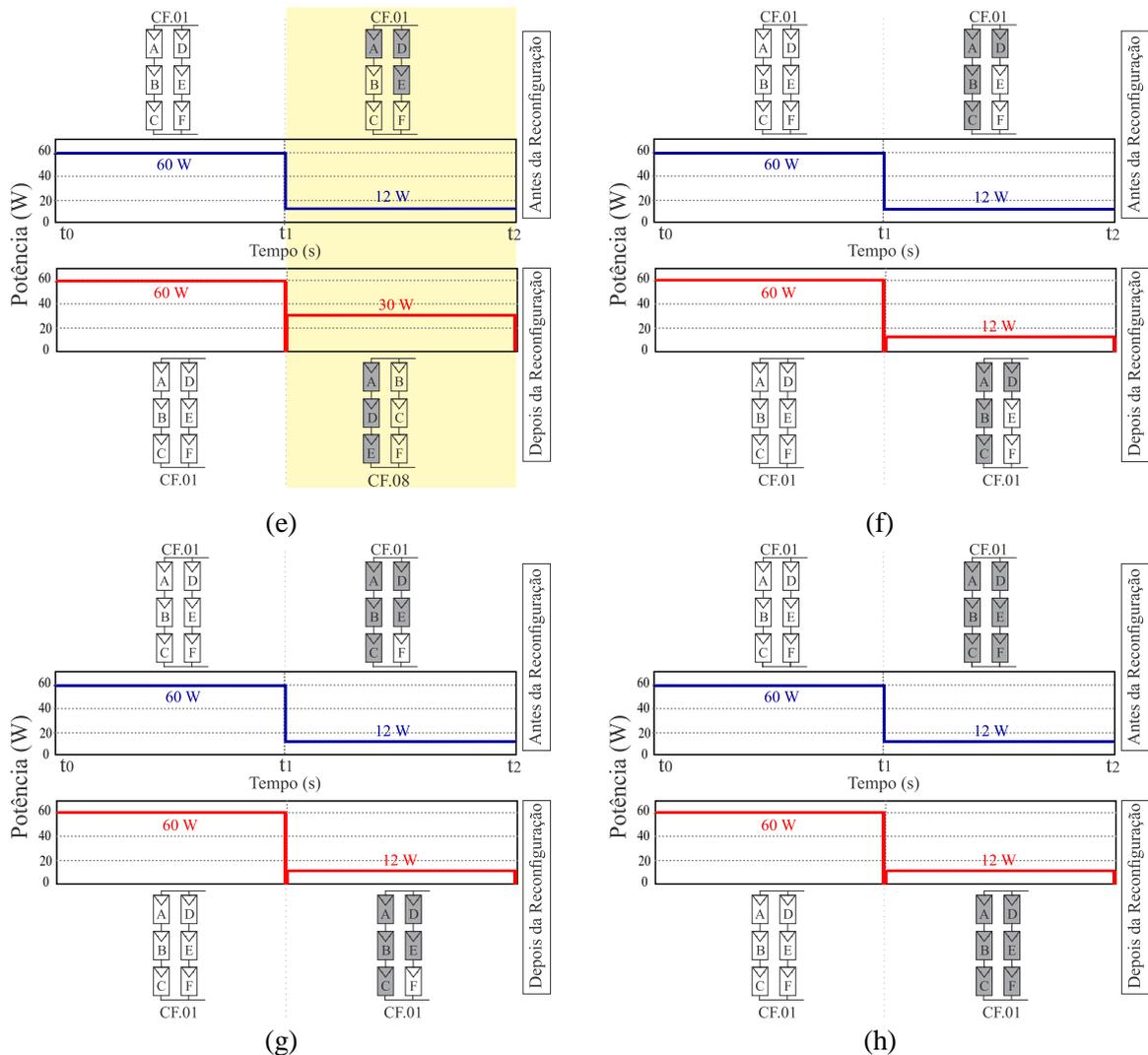


Fig. 6.14 – Potência *versus* tempo – antes e depois da reconfiguração para sombreamentos estáticos em um painel fotovoltaico 3x2: (a) um módulo; (b) dois módulos em uma mesma coluna; (c) dois módulos em uma mesma linha; (d) três módulos em uma mesma coluna; (e) três módulos em duas colunas; (f) quatro módulos; (g) cinco módulos; (h) seis módulos.

Para o painel fotovoltaico na configuração 3x2, a reconfiguração pode ser viável diante do sombreamento de dois ou três módulos. Se os módulos sombreados já estiverem posicionados no mesmo ramo série (coluna) da matriz, o sistema fotovoltaico mantém as conexões elétricas entre os módulos de acordo com a configuração de referência (CF.01). Se os módulos sombreados estiverem localizados de forma distribuída, atingindo as duas colunas da matriz, o sistema de reconfiguração atua e reconecta a matriz de acordo com a configuração ótima. As simulações apresentadas na Fig. 6.14 (c) e (e) ilustram essas condições.

### 6.3.1.2 Sombreamento dinâmico

#### ▪ Deslocamento horizontal

Na matriz 3x2 esse tipo de sombreamento pode acontecer de forma que sejam atingidas uma, duas ou três linhas do painel fotovoltaico. Nesta seção serão analisados os resultados de simulação para o sombreamento com deslocamento horizontal que atinge uma ou duas linhas da matriz conforme ilustradas nas Fig. 6.15 (a) e (b), respectivamente. Os resultados para a simulação dessas duas condições são apresentados nas Fig. 6.16 e Fig. 6.17.

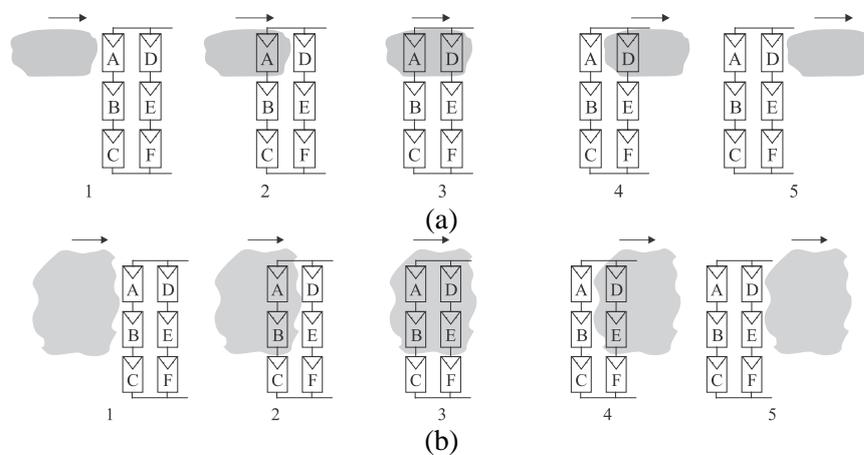


Fig. 6.15 – Sombreamento com deslocamento horizontal: (a) uma linha e até dois módulos atingidos; (b) duas linhas e até quatro módulos atingidos.

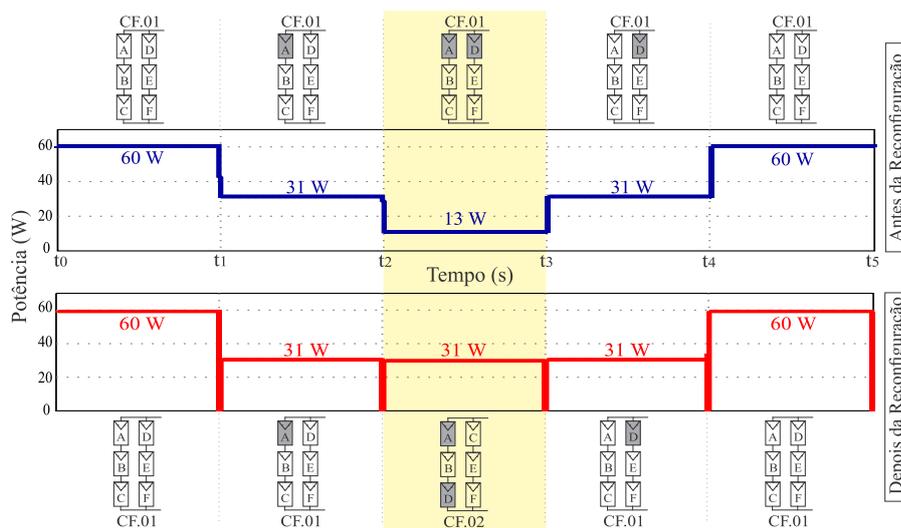


Fig. 6.16 – Potência versus tempo, antes e depois da reconfiguração, para o sombreamento com deslocamento horizontal de uma linha na matriz 3x2.

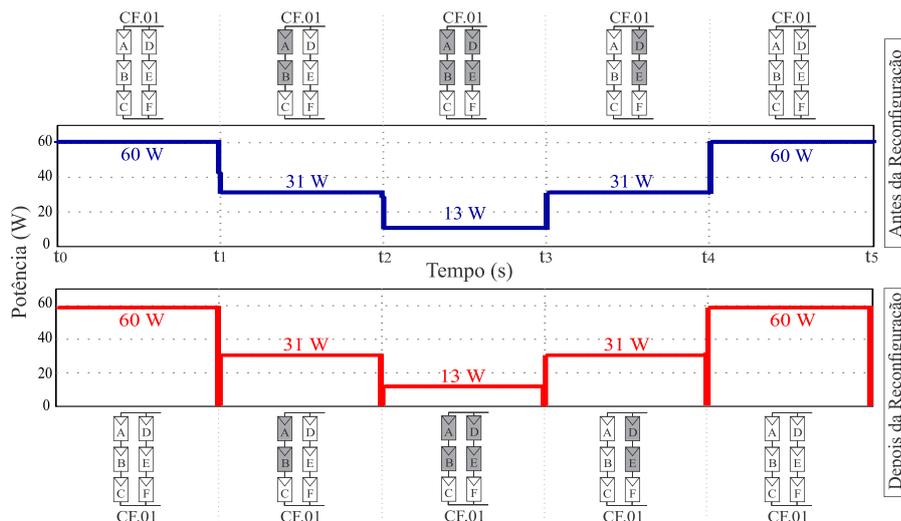


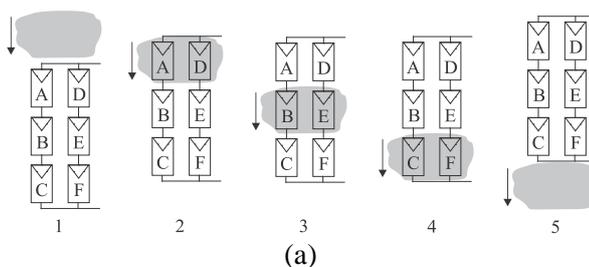
Fig. 6.17 – Potência versus tempo, antes e depois da reconfiguração, para o sombreamento com deslocamento horizontal de duas linhas na matriz 3x2.

Uma comparação entre os resultados apresentados nas Fig. 6.16 e Fig. 6.17 mostra que, embora o deslocamento da sombra seja no mesmo sentido e os perfis de sombreamento sejam semelhantes, o sistema de reconfiguração atua de forma diferente para cada caso.

Quando apenas uma linha da matriz é atingida pela sombra, a reconfiguração pode propiciar uma recuperação de aproximadamente 18 W no intervalo de tempo entre  $t_2$  e  $t_3$ . Mas na simulação em que as duas colunas da matriz são sombreadas progressivamente, a reconfiguração dos módulos não é capaz de minimizar a perda de energia que ocorre em função do sombreamento.

#### ▪ Deslocamento vertical

O sombreamento com movimentação vertical pode atingir uma, duas ou três linhas do painel fotovoltaico durante a passagem da sombra sobre a matriz. Os perfis de sombreamento com deslocamento vertical avaliados são apresentados na Fig. 6.18.



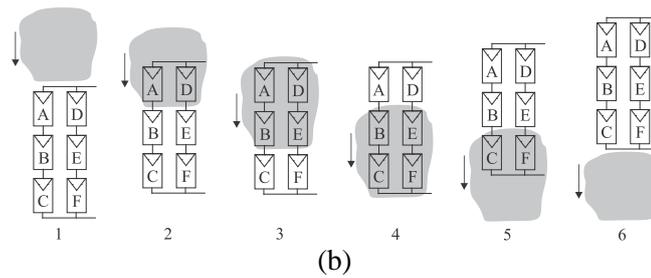
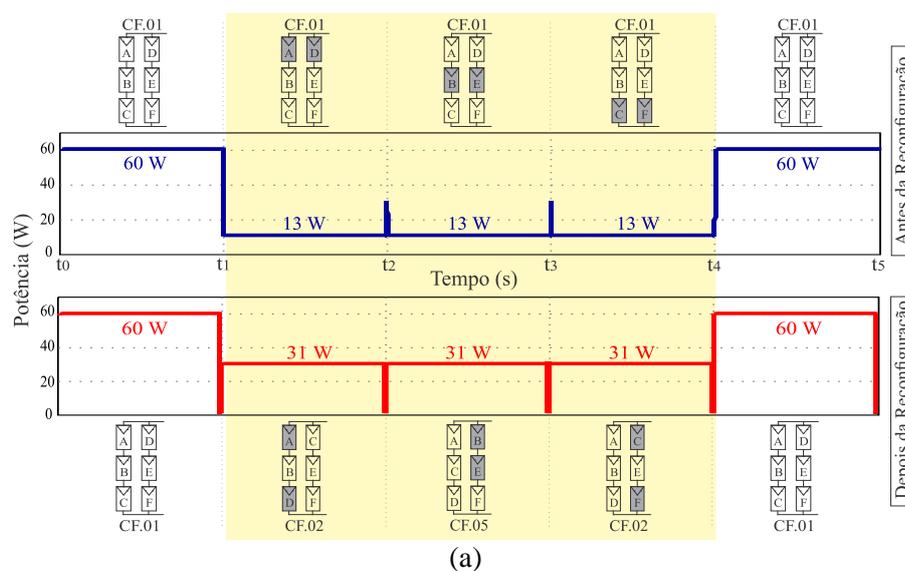


Fig. 6.18 –Sombreamento com deslocamento vertical: (a) uma linha e dois módulos atingidos; (b) duas linhas e até quatro módulos atingidos.

As situações em que o sombreamento ocorre com movimentação vertical são as mais favoráveis para a atuação do sistema de reconfiguração. Nestes casos, dependendo da quantidade de módulos atingidos pelo sombreamento, é possível recuperar uma parcela significativa de energia que seria perdida se o sistema permanecesse com as conexões fixas.

Na Fig. 6.19 (a) e (b) são apresentadas as curvas de potência em função do tempo, antes e depois da reconfiguração, para o padrão de sombreamento com movimentação vertical. Destaca-se que na simulação apresentada na Fig. 6.19 (a), durante todo o percurso da sombra sobre o painel, o sistema de reconfiguração atuou e promoveu uma recuperação de aproximadamente 18 W.

Nos resultados apresentados na Fig. 6.19 (b), verifica-se que a reconfiguração dos módulos é realizada nos momentos em que existem apenas dois módulos sombreados simultaneamente. Nessas situações, uma parcela da potência perdida com o sombreamento é recuperada a partir da mudança nas conexões elétricas dos módulos.



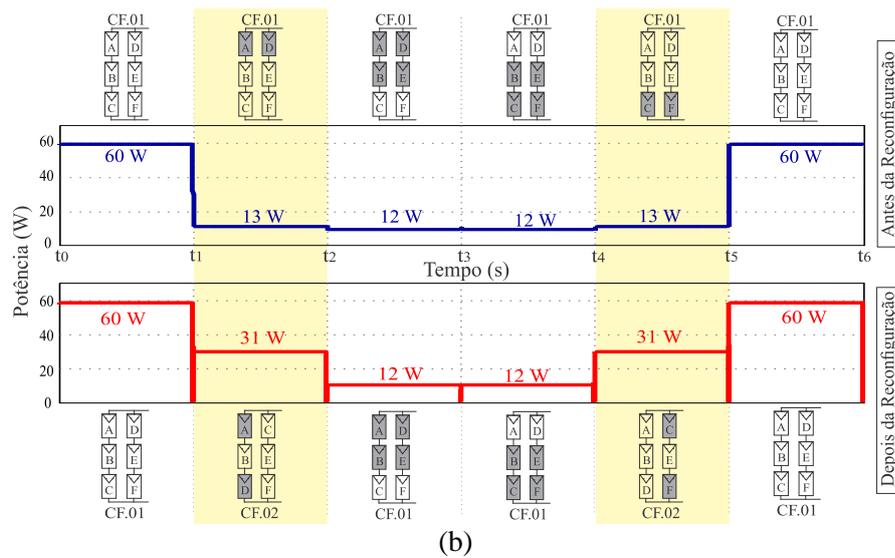


Fig. 6.19 – Potência *versus* tempo, antes e depois da reconfiguração, para o sombreamento com deslocamento vertical na matriz 3x2: (a) uma linha e dois módulos atingidos; (b) duas linhas e até quatro módulos atingidos.

▪ **Deslocamento diagonal**

O tipos de sombreamento com movimentação diagonal analisados são mostrados na Fig. 6.20 (a) e (b). Esse perfil de sombreamento é dividido em seis estágios que compreendem desde a chegada da sombra sobre a matriz até sua saída completa.

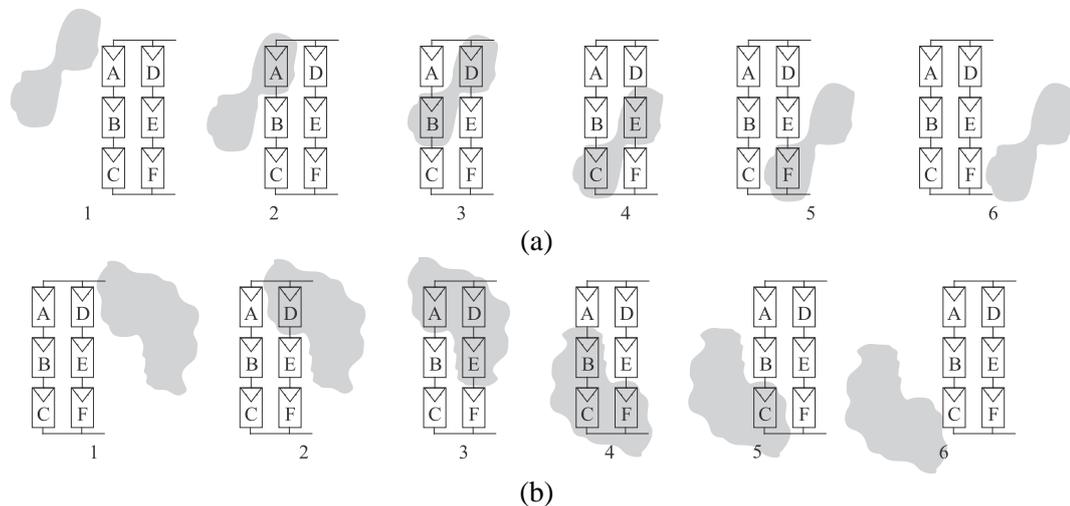


Fig. 6.20 – Sombreamento com deslocamento diagonal: (a) até dois módulos atingidos; (b) até três módulos atingidos.

Os resultados da simulação para o sombreamento com movimentação diagonal são apresentados nas Fig. 6.21 e Fig. 6.22 e os intervalos de tempo em que houve um aumento na potência fornecida são evidenciados.

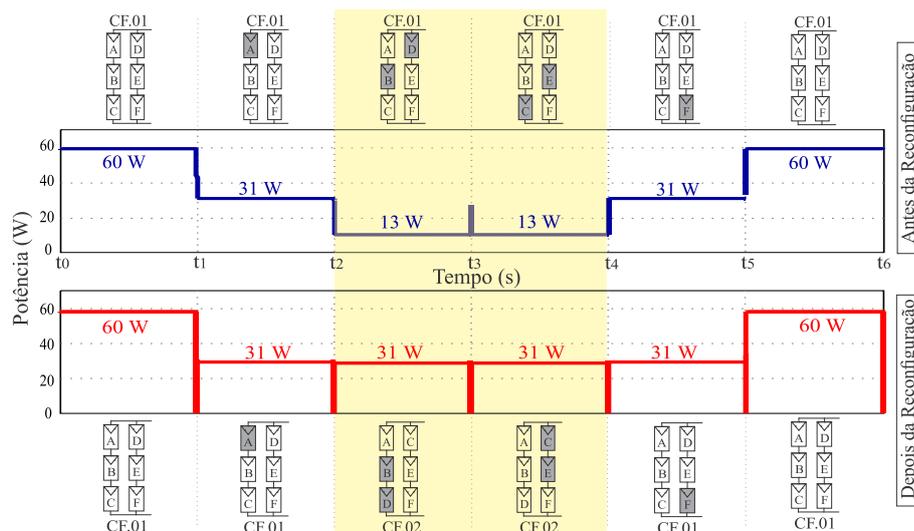


Fig. 6.21 – Potência *versus* tempo, antes e depois da reconfiguração, para o sombreamento com deslocamento diagonal e até dois módulos atingidos na matriz 3x2.

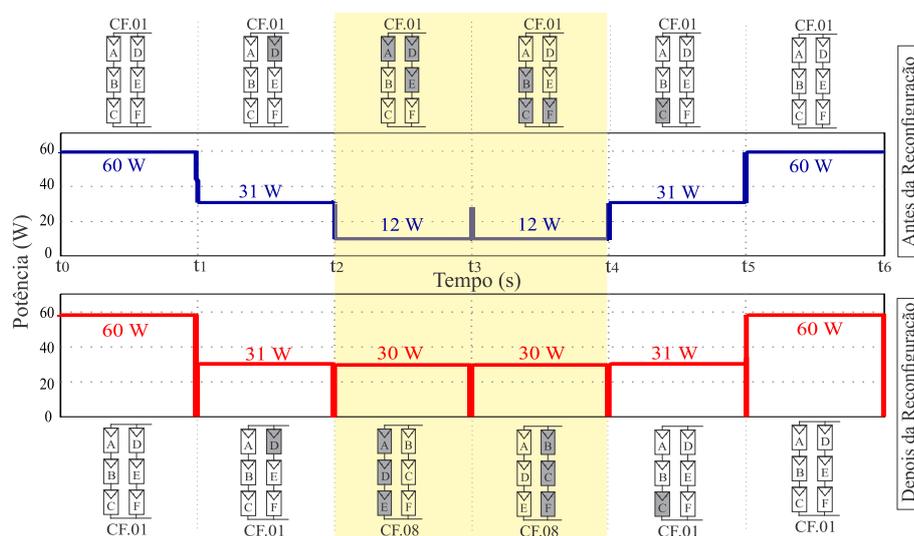


Fig. 6.22 – Potência *versus* tempo, antes e depois da reconfiguração, para o sombreamento com deslocamento diagonal e até três módulos atingidos na matriz 3x2.

### 6.3.1.3 Sombreamentos progressivos

Na Fig. 6.23 são apresentadas as curvas da potência de saída antes e depois da reconfiguração para as 64 diferentes situações de sombreamento. No intervalo de tempo simulado são contempladas todas as 64 condições descritas na Tabela 5.2.

Na Fig. 6.23, todas as situações onde a reconfiguração proporcionou ganho na potência de saída do sistema foram hachuradas. A análise das curvas torna evidente a viabilidade do sistema proposto, uma vez que nas situações onde ocorre o sombreamento é possível elevar a potência do sistema somente com a reconfiguração das conexões elétricas do painel.

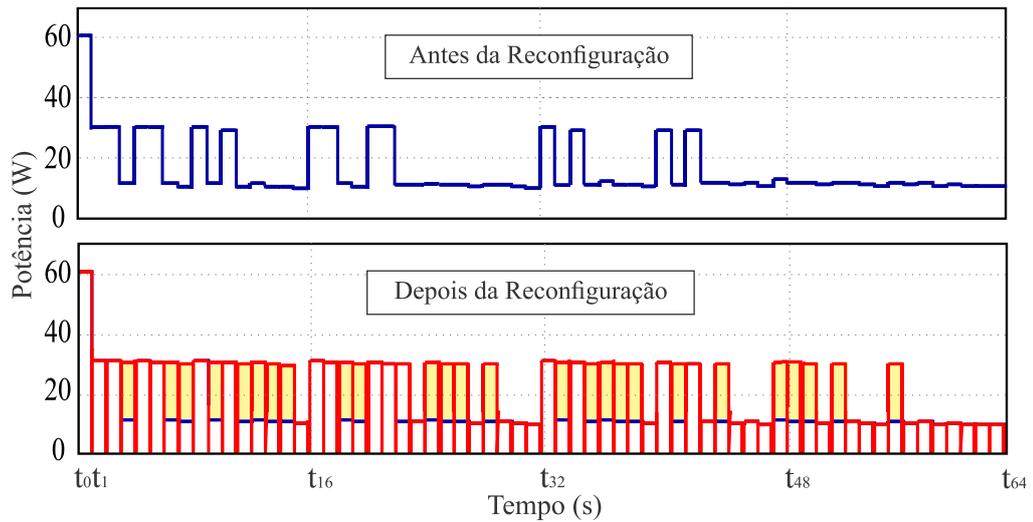


Fig. 6.23 – Potência *versus* tempo, antes e depois da reconfiguração, para a matriz 3x2 e sombreamentos progressivos.

De acordo com o exposto na Seção 5.4.2 existem situações que são atendidas por mais de uma configuração de interesse. Nesses casos a configuração ideal é definida através da análise da configuração em que o painel se encontrava no momento anterior.

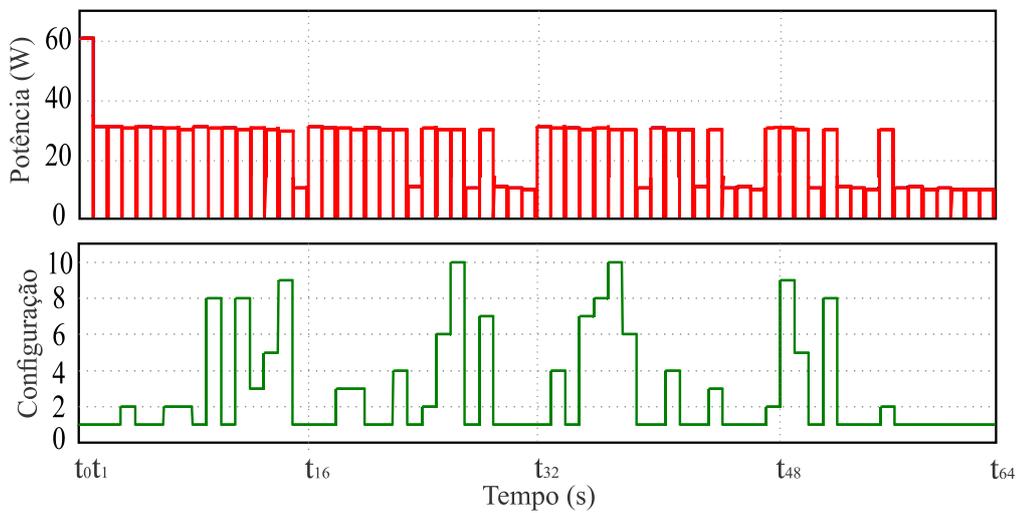


Fig. 6.24 – Potência após a reconfiguração e configuração habilitada a cada intervalo de tempo.

Conforme apresentado na Fig. 5.4, existem 10 configurações de interesse para uma matriz 3x2. A Fig. 6.24 ilustra o processo de transição entre as 10 configurações de interesse ao se considerar as 64 possibilidades de sombreamento do painel 3x2.

## 6.4 Sistema de reconfiguração - Matriz 2x3

A Fig. 6.25 apresenta o circuito para a simulação do sistema de reconfiguração da matriz 2x3. O circuito é construído de forma análoga aos circuitos do sistema de reconfiguração para as matrizes 2x2 (Fig. 6.1) e 3x2 (Fig. 6.12).

De maneira semelhante ao que foi apresentado para os sistemas analisados anteriormente, a seguir são expostas as formas de onda da potência em função do tempo para diferentes padrões de sombreamento em uma matriz 2x3.

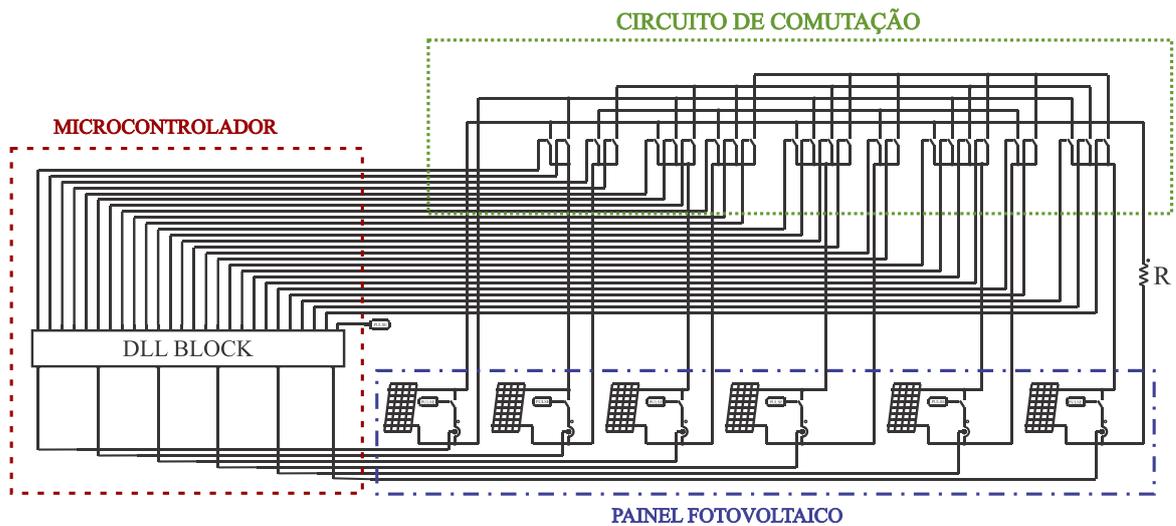
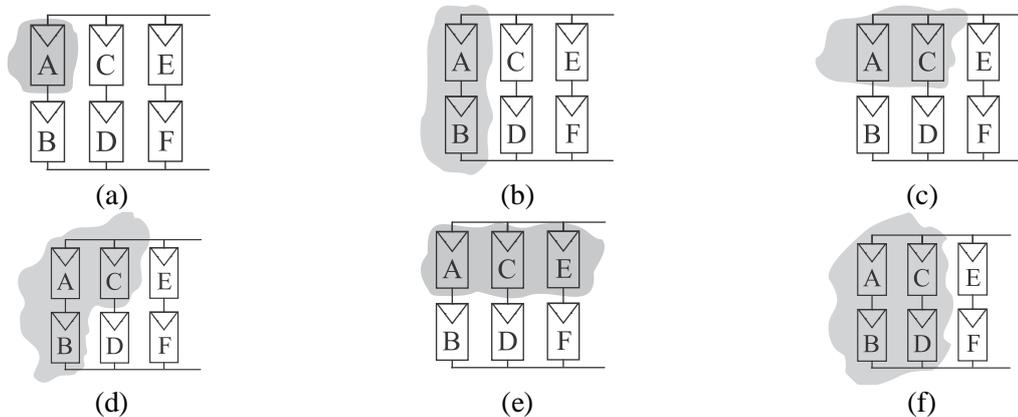


Fig. 6.25 – Circuito simplificado do sistema de reconfiguração da matriz 2x3.

### 6.4.1 Comportamento do sistema para diferentes padrões de sombreamento

#### 6.4.1.1 Sombreamento estático

Para o painel fotovoltaico, na configuração 2x3, serão avaliados os tipos de sombreamentos estáticos ilustrados na Fig. 6.26.



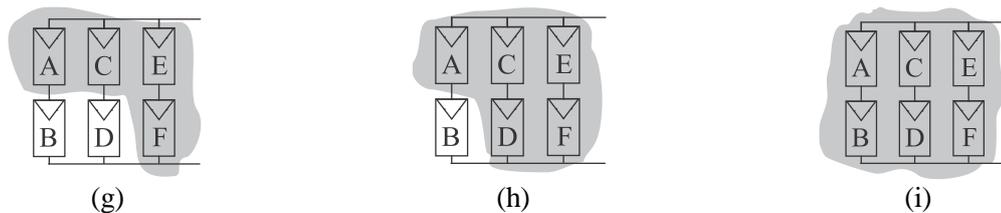
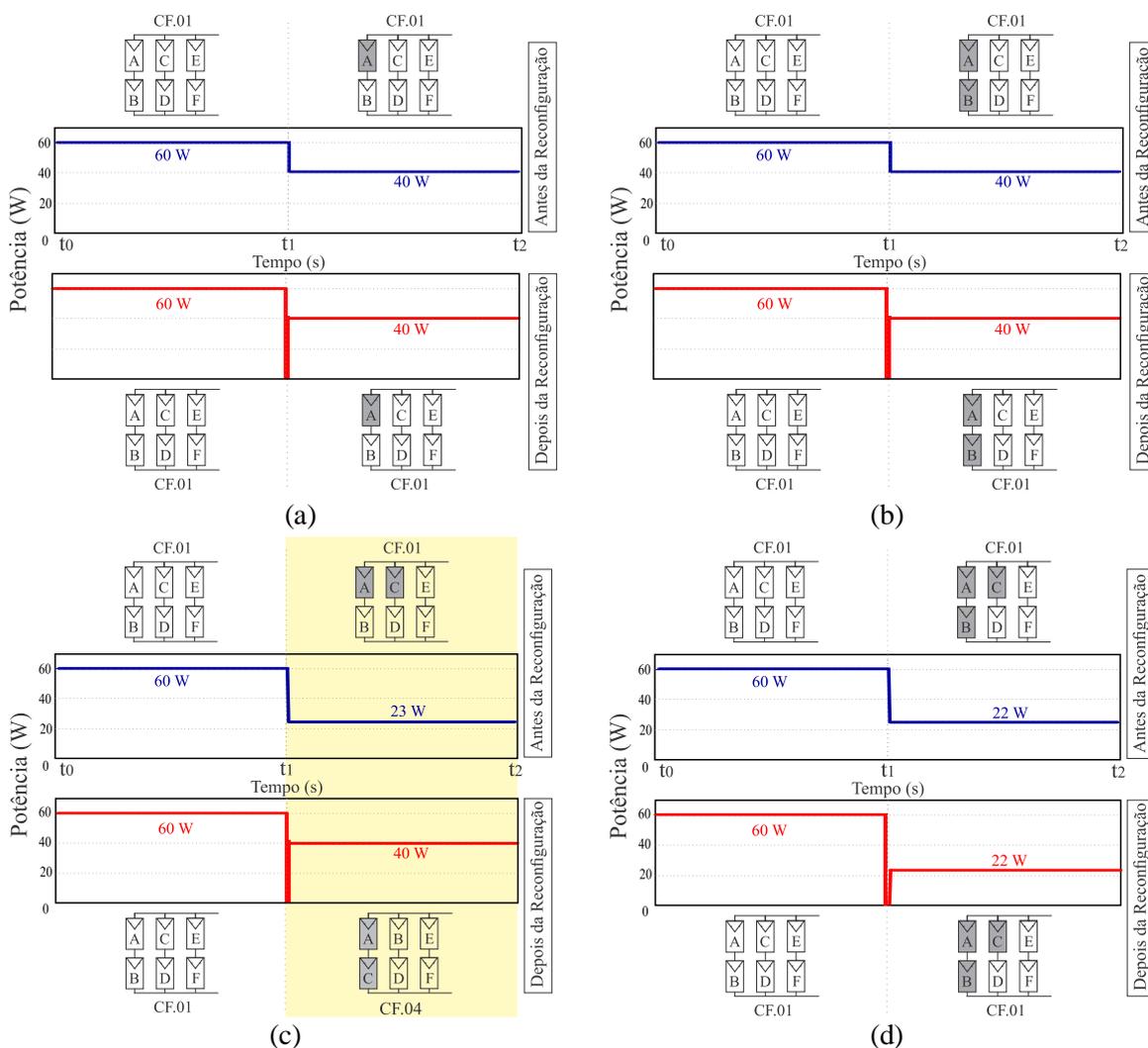


Fig. 6.26 – Sombreamentos estáticos em um painel fotovoltaico 2x3: (a) um módulo; (b) dois módulos em uma mesma coluna; (c) dois módulos em uma mesma linha; (d) três módulos em duas colunas; (e) três módulos em uma mesma linha; (f) quatro módulos em duas colunas; (g) quatro módulos em três colunas; (h) cinco módulos; (i) seis módulos.

Os resultados da simulação para cada uma das situações ilustradas na Fig. 6.26 são apresentados na Fig. 6.27.



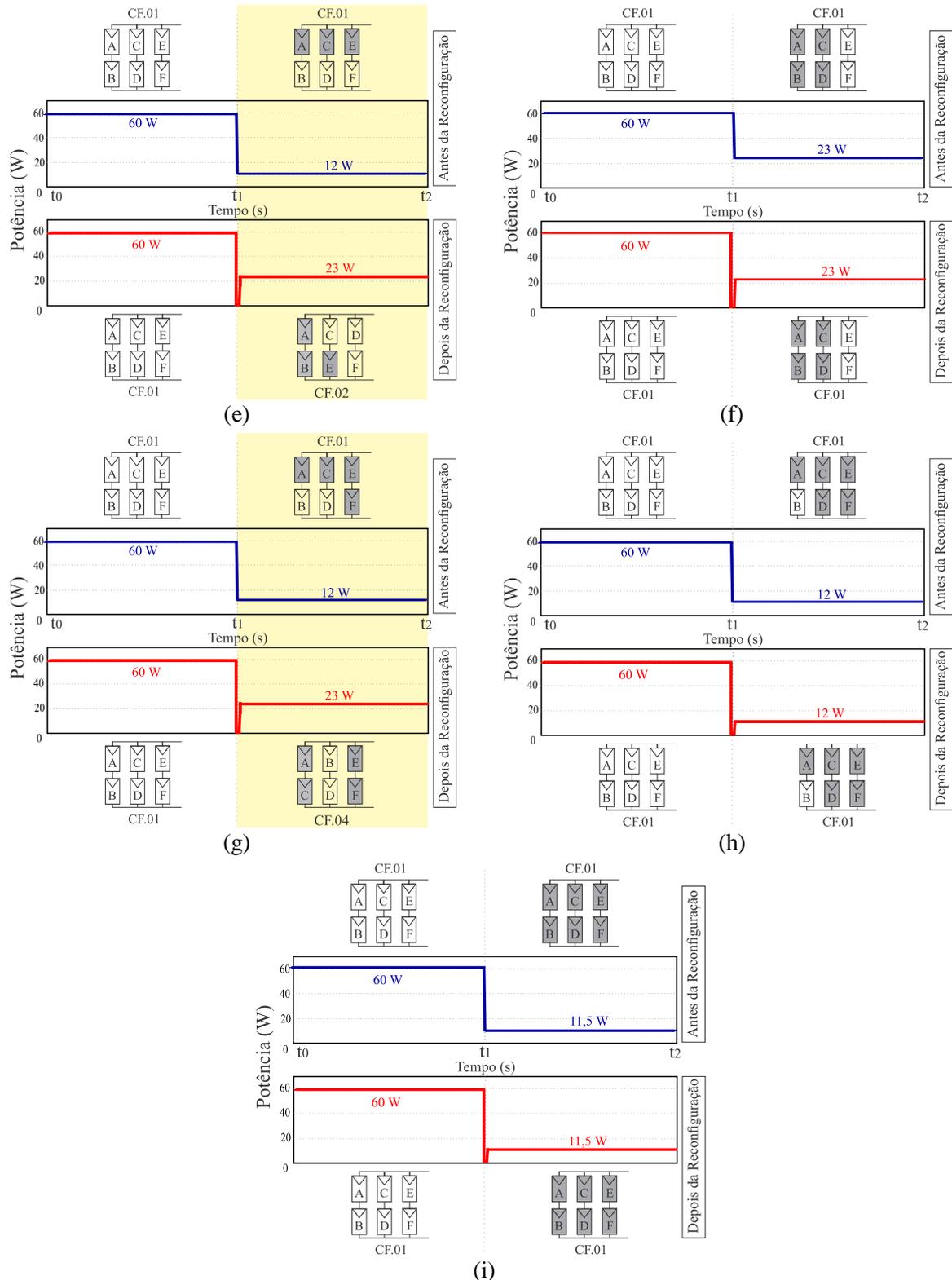


Fig. 6.27 – Potência *versus* tempo – antes e depois da reconfiguração para sombreamentos estáticos em um painel fotovoltaico 2x3: (a) um módulo; (b) dois módulos em uma mesma coluna; (c) dois módulos em uma mesma linha; (d) três módulos em duas colunas; (e) três módulos em uma mesma linha; (f) quatro módulos em duas colunas; (g) quatro módulos em três colunas; (h) cinco módulos; (i) seis módulos.

### 6.4.1.2 Sombreamento dinâmico

#### ▪ Deslocamento horizontal

Esse sombreamento pode ocorrer de diferentes maneiras, podendo envolver uma quantidade variada de linhas e colunas na matriz fotovoltaica. Nessa seção foram definidos três diferentes perfis de sombreamento com deslocamento horizontal na matriz 2x3 conforme ilustra a Fig. 6.28.

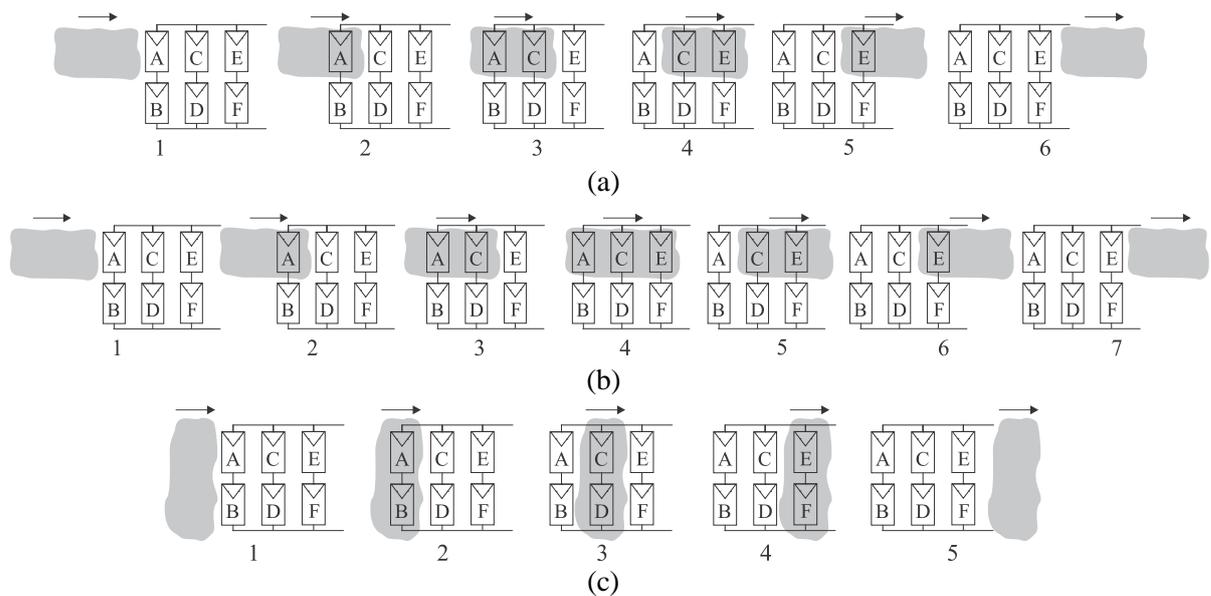


Fig. 6.28 –Sombreamento com deslocamento horizontal: (a) uma linha e até dois módulos atingidos; (b) uma linha e até três módulos atingidos; (c) duas linhas e dois módulos atingidos.

Os perfis de sombreamento podem ser analisados de forma análoga ao que foi apresentado anteriormente, a quantidade de estágios no processo de sombreamento depende da quantidade de módulos atingidos.

Os resultados de simulação para o primeiro perfil de sombreamento horizontal na matriz 2x3 são apresentados na Fig. 6.29. Com esse padrão de sombreamento, a passagem da sombra pelo painel fotovoltaico irá atingir no máximo dois módulos de uma mesma linha simultaneamente. As situações em que a reconfiguração das conexões elétricas produz um aumento na potência gerada pelo sistema são destacadas no gráfico através da área colorida.

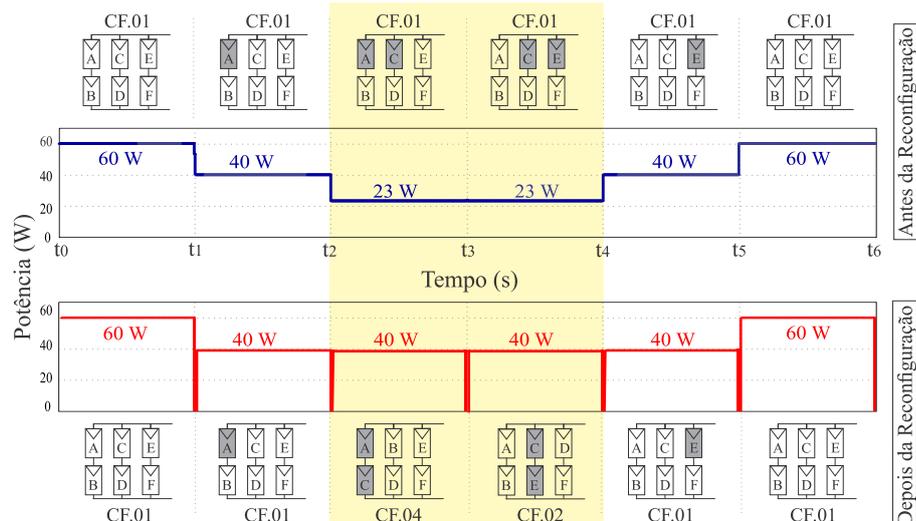


Fig. 6.29 – Potência *versus* tempo, antes e depois da reconfiguração, para o sombreamento com deslocamento horizontal de uma linha e até dois módulos atingidos.

Nos resultados apresentados na Fig. 6.30, o sombreamento se desloca horizontalmente da esquerda para a direita e pode atingir até três módulos simultaneamente em uma mesma linha da matriz fotovoltaica.

O período compreendido entre os instantes de tempo  $t_2$  e  $t_5$  é evidenciado pela possibilidade de recuperação de energia através da reconfiguração das conexões elétricas entre os módulos do painel fotovoltaico.

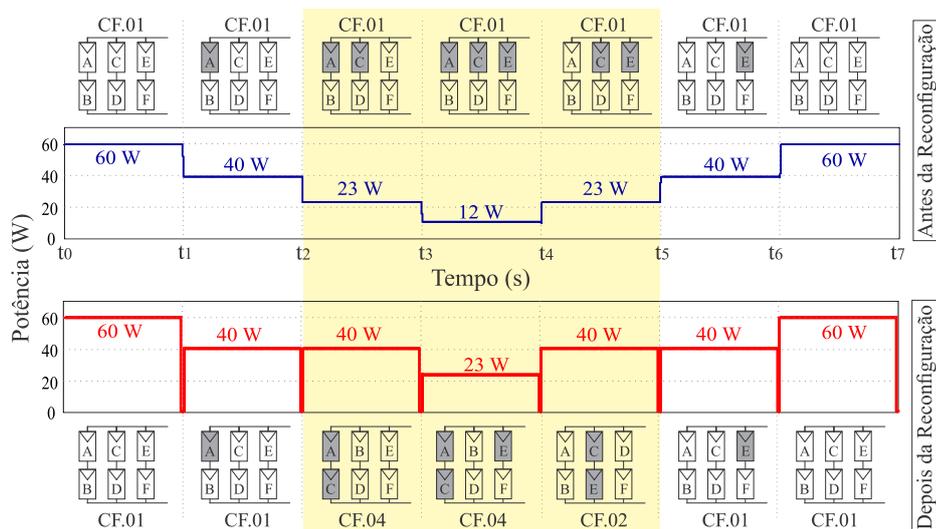


Fig. 6.30 – Potência *versus* tempo, antes e depois da reconfiguração, para o sombreamento com deslocamento horizontal de uma linha e até três módulos atingidos.

Os resultados para a simulação do padrão de sombreamento horizontal ilustrado na Fig. 6.28 (c) são apresentados na Fig. 6.31. Para este perfil de sombreamento os módulos

sombreados já se encontram concentrados nos ramos série da matriz fotovoltaica, portanto não há necessidade de reconfigurar os módulos.

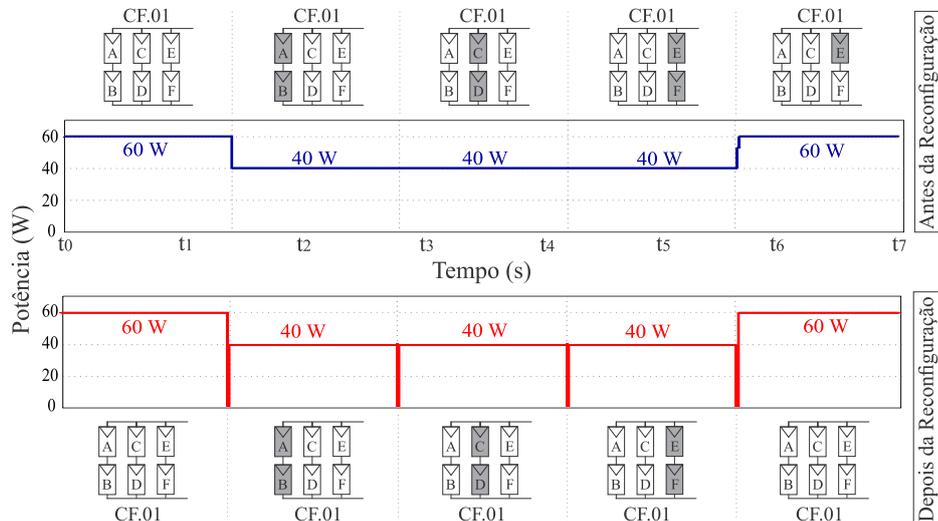


Fig. 6.31 – Potência versus tempo, antes e depois da reconfiguração, para o sombreamento com deslocamento horizontal sobre uma coluna e dois módulos atingidos.

#### ▪ Deslocamento vertical

Os sombreamentos com deslocamento vertical avaliados são apresentados na Fig. 6.32. As duas situações analisadas simulam a movimentação da sombra verticalmente sobre dois módulos (Fig. 6.32 (a)) e sobre três módulos (Fig. 6.32 (b)) simultaneamente.

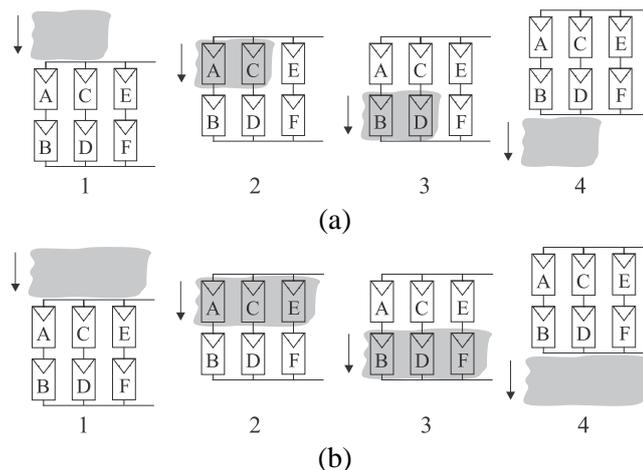


Fig. 6.32 – Sombreamento com deslocamento vertical: (a) uma linha e dois módulos atingidos; (b) uma linha três módulos atingidos.

Os resultados de simulação para os padrões de sombreamento com movimentação vertical são mostrados nas Fig. 6.33 (a) e (b) e as situações onde a reconfiguração propicia um aumento na potência do sistema são destacados.

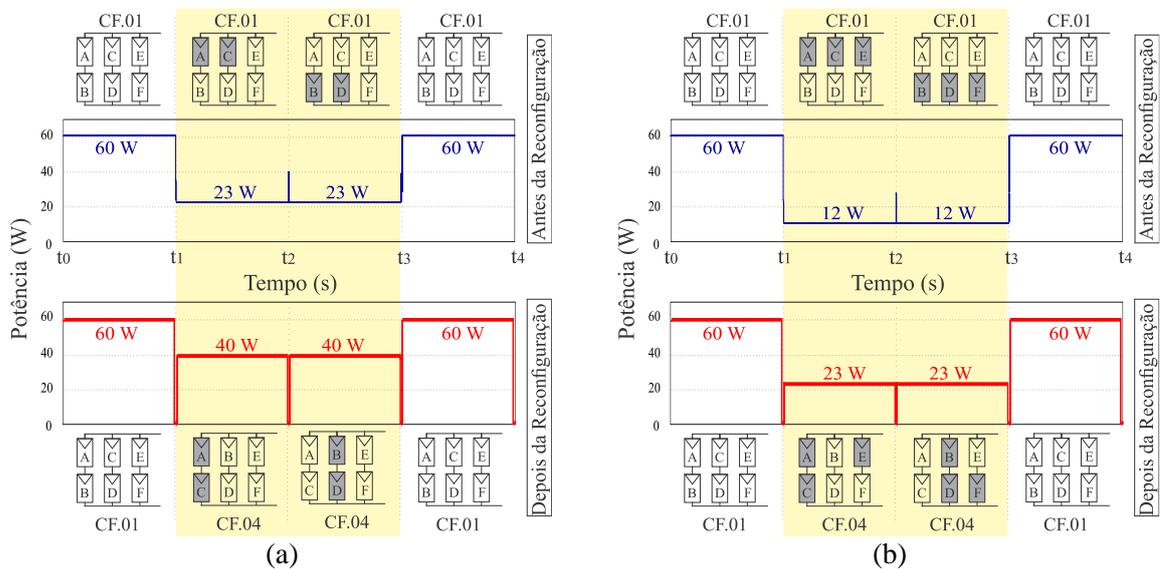


Fig. 6.33 – Potência versus tempo, antes e depois da reconfiguração, para o sombreamento com deslocamento vertical: (a) dois módulos atingidos; (b) três módulos atingidos.

#### ▪ Deslocamento diagonal

O sombreamento com movimentação diagonal é ilustrado na Fig. 6.34. Esse sombreamento é dividido em seis estágios que compreendem desde a chegada da sombra sobre a matriz até sua saída completa.

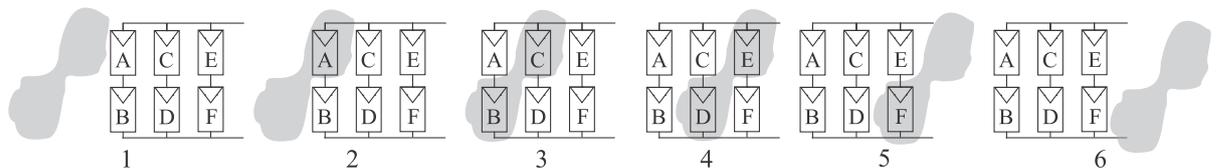


Fig. 6.34 – Sombreamento com deslocamento diagonal e até dois módulos atingidos.

As curvas de potência *versus* tempo antes e depois da reconfiguração para o sombreamento com movimentação diagonal são vistas na Fig. 6.35.

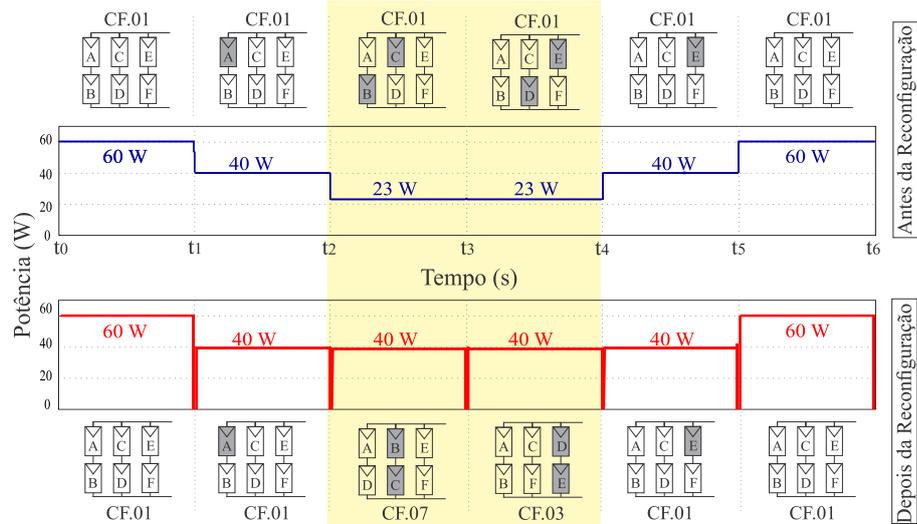


Fig. 6.35 – Potência *versus* tempo, antes e depois da reconfiguração, para o sombreamento com deslocamento diagonal e até dois módulos atingidos.

### 6.4.1.3 Sombreamentos progressivos

Por fim, os resultados para o sombreamento progressivo de todas as 64 diferentes possibilidades no painel 2x3 podem ser vistos na Fig. 6.36.

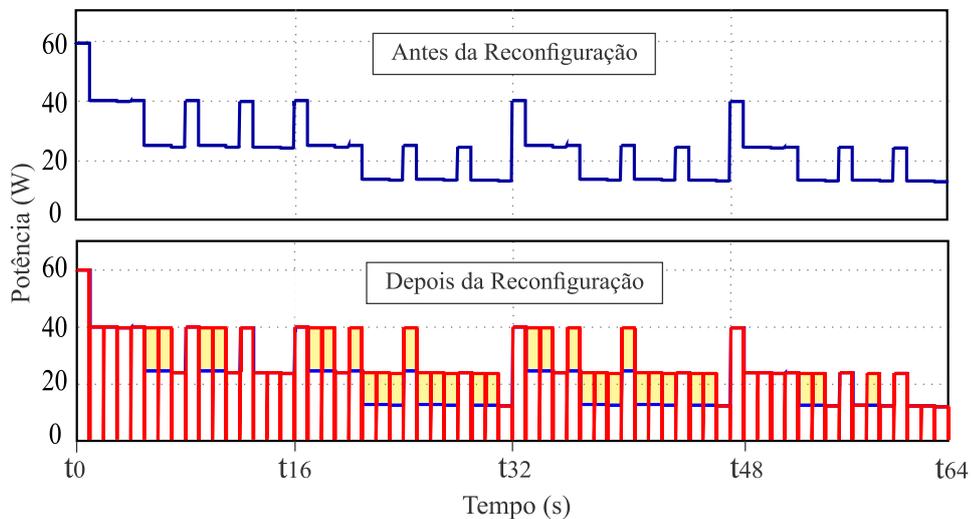


Fig. 6.36 – Potência *versus* tempo para painel 2x3, antes e depois da reconfiguração, e sombreamentos progressivos.

É importante salientar que embora o sistema 2x3 possua a mesma quantidade de módulos do sistema 3x2, os resultados finais são distintos. Por se tratar de um arranjo com maior número de colunas, o sistema de reconfiguração mostra-se mais robusto, uma vez que a reconfiguração é viável em situações com quatro módulos sombreados, o que não ocorre no sistema 3x2.

Os diferentes níveis de potência surgem em função da estrutura física do arranjo que, embora viabilize a reconfiguração em uma maior quantidade de situações, limita a concentração dos módulos em um menor número de colunas.

Por exemplo, no arranjo 3x2, o sombreamento de três módulos fotovoltaicos pode ter a degradação de energia minimizada com a concentração de todos módulos afetados em um único ramo série. Porém, no arranjo 2x3, o sombreamento de três módulos atingirá inevitavelmente duas colunas da matriz mesmo após a reconfiguração, o que reduz a potência de saída.

## **6.5 Considerações finais**

Neste capítulo pôde-se verificar, através de simulações, a viabilidade da aplicação da metodologia de reconfiguração para painéis fotovoltaicos sombreados. Foram avaliados diferentes padrões de sombreamento, em três arranjos de matriz fotovoltaica, a fim de verificar o impacto da atuação do sistema de reconfiguração. Constatou-se que em diversas situações a reconfiguração dos módulos propicia a recuperação de uma parcela da energia que é perdida devido ao sombreamento.

Em todos os sistemas simulados, o painel fotovoltaico foi conectado a uma carga de valor fixo, desta maneira não foi possível extrair a máxima potência que o sistema pôde fornecer. Optou-se pela não implementação do sistema de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) para que fosse possível avaliar a atuação do sistema de reconfiguração sem a influência de outros circuitos.

## 7 TESTES EXPERIMENTAIS

### 7.1 Considerações iniciais

Este capítulo apresenta uma avaliação experimental dos sistemas de reconfiguração propostos no capítulo anterior. Através dos testes experimentais pretende-se avaliar a atuação do sistema de reconfiguração diante de diferentes padrões de sombreamento sobre a matriz fotovoltaica.

### 7.2 Construção do protótipo

Os circuitos apresentados no Capítulo 6 para o desenvolvimento das simulações computacionais (Fig. 6.1, Fig. 6.12 e Fig. 6.25) podem ser utilizados como referência para a construção dos protótipos que realizam a reconfiguração dos painéis fotovoltaicos. Conforme indicado no capítulo precedente, o sistema de reconfiguração pode ser dividido em três blocos principais: painel fotovoltaico, microcontrolador e circuito de comutação.

#### 7.2.1 Painel fotovoltaico

O painel fotovoltaico é construído com módulos KS10 da Kyocera® ilustrado na Fig. 7.1, cujos parâmetros são apresentados na Tabela 7.1. A quantidade de módulos que constituem o painel fotovoltaico dependerá do arranjo analisado.



Fig. 7.1 –Módulo fotovoltaico KS10.

Tabela 7.1 - Parâmetros do módulo fotovoltaico KS10 Kyocera®.

Parâmetro	Valor
$I_{SC}$	0,62 A
$I_{MPP}$	0,6 A
$V_{OC}$	21,5 V
$V_{MPP}$	16,9 V
$P_{MPP}$	10,0 W

Associado ao painel fotovoltaico, encontram-se os sensores responsáveis pela identificação do sombreamento de cada módulo. A corrente fotogerada  $I_{PH}$  é proporcional à radiação incidente e seu valor é, aproximadamente, igual ao valor da corrente de curto-circuito  $I_{SC}$ , conforme indicado em (7.1). Logo, a identificação do sombreamento será realizada através de medições na corrente de curto-circuito [43].

$$I_{SC} \approx I_{PH} \quad (7.1)$$

A leitura da corrente de curto-circuito é realizada através de um amplificador de instrumentação. O componente INA193 é frequentemente utilizado para monitorar valores de corrente em diversos circuitos e apresenta bons resultados [44]. Através da queda de tensão nos terminais de um resistor *shunt*, o INA193 é capaz de estimar o valor da corrente que circula pelo resistor de acordo com a equação (7.2):

$$V_{OUT} = \frac{I_S \cdot R_{SHUNT} \cdot 100k}{5k} \quad (7.2)$$

em que,

$V_{OUT}$  = tensão de saída proporcional à corrente medida.

$I_S$  = corrente medida.

$R_{SHUNT}$  = resistor *shunt*.

A conexão do conjunto resistor *shunt* - INA193 ao módulo fotovoltaico é apresentada no circuito da Fig. 7.2. O interruptor *sm* é fechado e a corrente  $I_S$  circula pelo resistor  $R_{SHUNT}$  cujo valor escolhido é da ordem de miliohms, portanto, a corrente  $I_S$  tem valor próximo à corrente de curto-circuito.

A intensidade da radiação sobre um módulo fotovoltaico não é constante e provoca pequenas variações na corrente gerada. Para evitar reconfigurações desnecessárias diante destas situações, estabelece-se um parâmetro que classifica os módulos em sombreados ou não sombreado, dependendo dos valores das correntes medidas.

Para os sistemas propostos, considera-se uma margem de aproximadamente 20% para variação da irradiância, ou seja, os módulos só serão considerados sombreados a partir de uma queda de 20% no valor da corrente gerada.

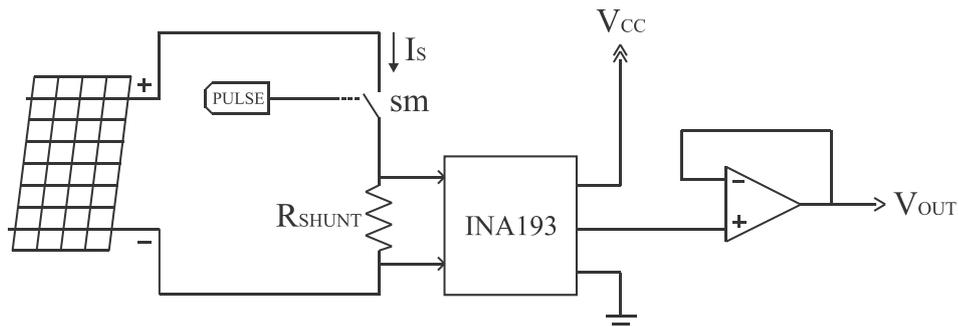


Fig. 7.2 – Sistema composto por módulo fotovoltaico e circuito de medição.

A imagem mostrada na Fig. 7.3 apresenta o circuito construído para a medição de até seis módulos fotovoltaicos simultaneamente. Esse circuito será utilizado na implementação dos sistemas de reconfiguração para as matrizes 2x2, 3x2 e 2x3.

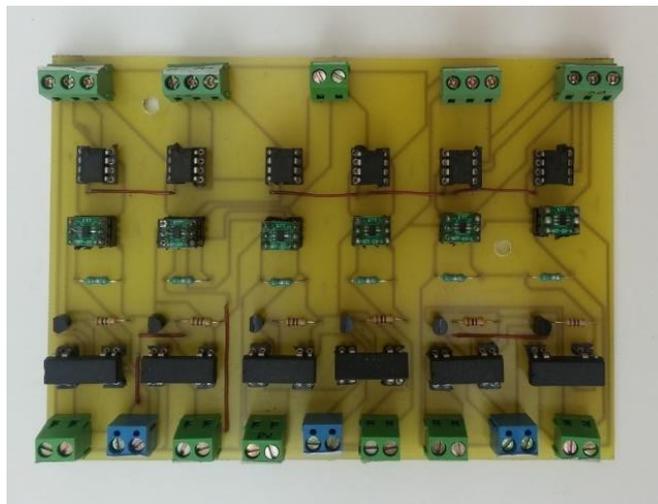


Fig. 7.3 – Circuito de medição para até seis módulos fotovoltaicos.

### 7.2.2 Microcontrolador

Após a medição e condicionamento, os sinais de saída do monitor de corrente, são enviados ao microcontrolador.

A plataforma Arduino com o microcontrolador Mega 2560 da Atmel foi escolhida para a implementação do circuito de controle conforme ilustra a Fig. 7.4. Esta escolha se deve ao fato de que este microcontrolador possui a quantidade de entradas e saídas digitais necessárias para o envio dos sinais de controle para os sistemas de reconfiguração construídos.



Fig. 7.4 – Plataforma Arduino Mega 2560.

O fluxograma do algoritmo implementado no microcontrolador é apresentado na Fig. 7.5. O microcontrolador é responsável por gerar todos os pulsos de comando do sistema de reconfiguração. O acionamento periódico do sistema de medição deve acontecer somente quando todos os interruptores da matriz de conexões estiverem desabilitados. O primeiro passo do algoritmo é desativar os pulsos de controle de todo o sistema, sendo que desta forma é possível medir a corrente proveniente de cada módulo individualmente. A medição da corrente dos módulos consome 500 ms.

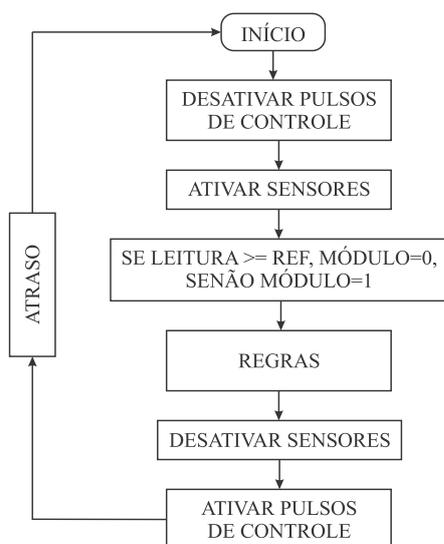


Fig. 7.5 – Fluxograma do algoritmo de controle.

Após a ativação dos sensores, os sinais resultantes são classificados em sombreado e não sombreado e na sequência são submetidos as regras criadas com a TCA onde a configuração ótima é definida. Em seguida, os pulsos de comando (para a nova configuração escolhida) são ativados e enviados aos interruptores da matriz de conexões. Todo o processo se repete após um período de tempo pré-definido em 10 s.

### 7.2.3 Circuito de comutação

A reorganização nas conexões elétricas do painel fotovoltaico é realizada através de uma matriz de conexões que possibilita associar os módulos que constituem o painel em todas as configurações de interesse.

Os interruptores escolhidos para a construção da matriz são relés do tipo *reed* (HE721A1210 – HAMLIN). Os relés *reed* são interruptores hermeticamente encerrados em ampolas de vidro e que devido à suas características construtivas podem ser acionados com a presença de um campo magnético de baixa intensidade. Essa característica é importante e reduz consideravelmente a energia empregada na manutenção do relé acionado. O baixo consumo de energia aliado a uma boa capacidade de circulação de corrente e à facilidade de controle foram fatores determinantes para a escolha desse componente.

O circuito de disparo de um relé *reed* é apresentado na Fig. 7.6. Os pulsos de controle são aplicados ao gatilho do MOSFET 2N7000, que quando acionado permite a circulação de corrente na bobina do relé.

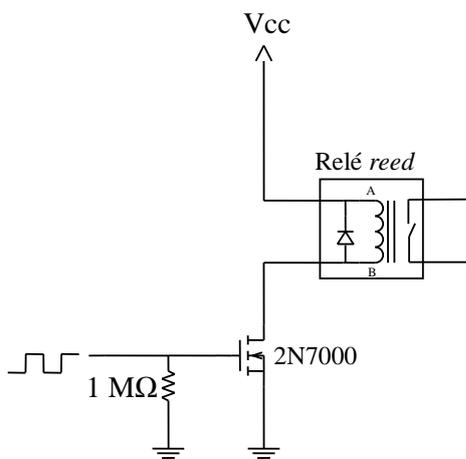


Fig. 7.6 – Circuito de disparo para o relé *reed*.

## 7.3 Sistema de reconfiguração - Matriz 2x2

A fotografia da Fig. 7.7 mostra o circuito completo do sistema de reconfiguração para a matriz 2x2. Na imagem, foram destacados os principais blocos do sistema: circuito de medição, microcontrolador e circuito de comutação, além das entradas para a conexão dos módulos e a carga resistiva que é conectada ao painel.

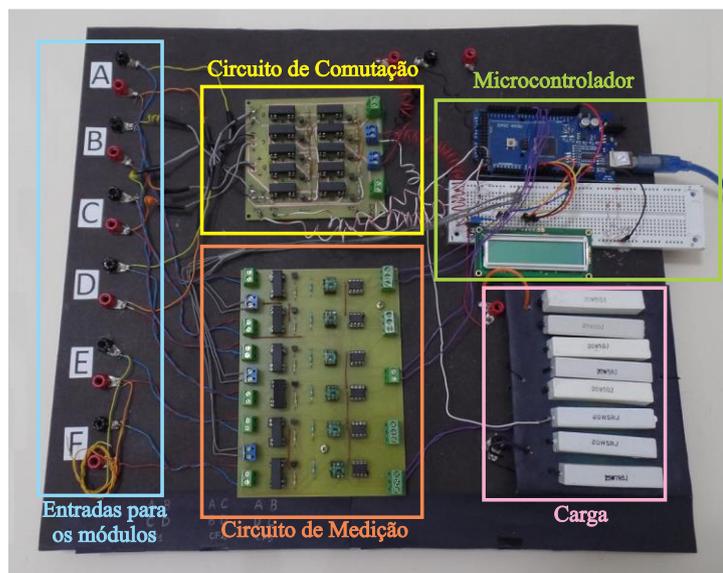


Fig. 7.7 – Circuito do sistema de reconfiguração para a matriz 2x2.

A plataforma onde estão conectados os blocos ou subcircuitos que constituem o sistema de reconfiguração, foi construída de forma que a expansão para matrizes fotovoltaicas com até seis módulos, possa ser feita apenas com a substituição do circuito de comutação e alteração da carga.

A bancada completa de testes para a matriz 2x2 é apresentada na fotografia da Fig. 7.8. O painel fotovoltaico alimenta uma carga resistiva de  $30 \Omega$  onde são realizadas todas as medições de tensão, corrente e potência apresentadas. Durante os testes, os módulos chegaram a uma temperatura de  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ , o que inevitavelmente reduziu a potência disponível pelo sistema em algumas medições.



Fig. 7.8 – Arranjo experimental do sistema de reconfiguração para a matriz 2x2.

As situações de sombreamento parcial foram criadas com o uso de três camadas de TNT (Tecido Não Tecido) que produzem um sombreamento uniforme atuando como um filtro para a radiação incidente. Embora na prática os perfis de sombreamento que acometem a matriz fotovoltaica sejam diferentes do padrão criado pelo TNT, seu uso se justifica pela necessidade de conhecer e controlar a intensidade do sombreamento criado. A imagem da Fig. 7.9 ilustra uma situação de sombreamento criada com o uso do TNT.



Fig. 7.9 – Bancada de testes do sistema de reconfiguração 2x2 - sombreamento artificial criado com o uso de TNT.

Nos testes realizados, o TNT proporcionou um sombreamento uniforme em torno 55%. Essa informação pode ser confirmada através da comparação entre as curvas características (I-V) de um módulo fotovoltaico KS10 quando este é exposto diretamente ao Sol e quando o TNT atua como uma sombra artificial, como ilustra a Fig. 7.10.

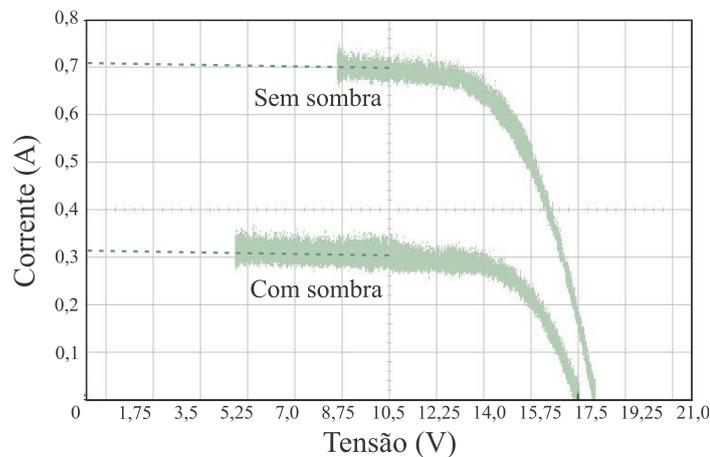


Fig. 7.10 – Curvas características I-V para um módulo fotovoltaico KS10 antes e após o sombreamento realizado com o material TNT.

As curvas apresentadas na Fig. 7.10 são obtidas com o auxílio de um conversor buck. Devido a limitações do conversor, a parte inicial das curvas não pode ser traçada [34], entretanto, com as informações obtidas é possível fazer uma projeção do comportamento do módulo (linha tracejada). Observa-se que para o módulo sem sombra, a corrente de curto-circuito fica em torno de 0,70 A. Porém, com a presença do sombreamento a corrente cai para 0,31 A.

### 7.3.1 Resultados experimentais

Conforme discutido no Capítulo 6, o sombreamento pode acontecer de diferentes maneiras e exibir padrões distintos. Para uma matriz 2x2 foram analisadas algumas dessas situações cujos resultados são apresentados a seguir.

#### 7.3.1.1 Sombreamento estático

Os testes apresentados a seguir foram realizados durante um período total de 20 segundos e podem ser divididos em quatro fases:

$t_0$  a  $t_1$  – Módulos iluminados e arranjados na configuração 01 (CF.01).

$t_1$  a  $t_2$  – Realização do sombreamento; observa-se uma oscilação transitória devido à realização do sombreamento artificial.

$t_2$  a  $t_3$  – Bloqueio de todos os interruptores da matriz de conexões e desconexão da carga para efetuar a medição periódica dos módulos.

$t_3$  a  $t_4$  – O sistema é reconectado de acordo com a configuração definida pelo sistema de controle.

##### ▪ Sombreamento de um módulo

Quando apenas um módulo fotovoltaico é sombreado nada pode ser feito pelo sistema de reconfiguração para reduzir a queda na potência causada pela sombra. Nestes casos, após a identificação do sombreamento a matriz 2x2 é mantida na configuração de referência (CF.01).

A Fig. 7.11 apresenta as formas de onda da tensão, corrente e potência para esta situação. Para facilitar a visualização do comportamento do sistema de reconfiguração, na parte superior da imagem ilustra-se o processo de mudanças nas configurações da matriz fotovoltaica ao longo do teste.

Inicialmente todos os módulos estão iluminados e em  $t_1$  sombreia-se o módulo A. Após o sombreamento o sistema realiza as medições ( $t_2$  a  $t_3$ ) e mantém o painel na configuração 01 (CF.01). Conforme o esperado, não há nenhuma mudança na potência de saída.

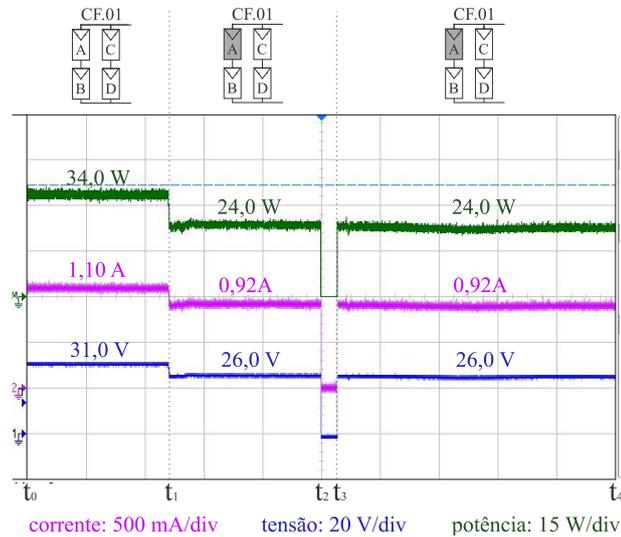


Fig. 7.11 – Tensão, corrente e potência para o sombreamento de um módulo fotovoltaico.

▪ **Sombreamento de dois módulos em uma mesma coluna**

Na Fig. 7.12 observam-se as formas de onda de tensão, corrente e potência no intervalo de tempo que compreende a realização do sombreamento dos módulos A e B.

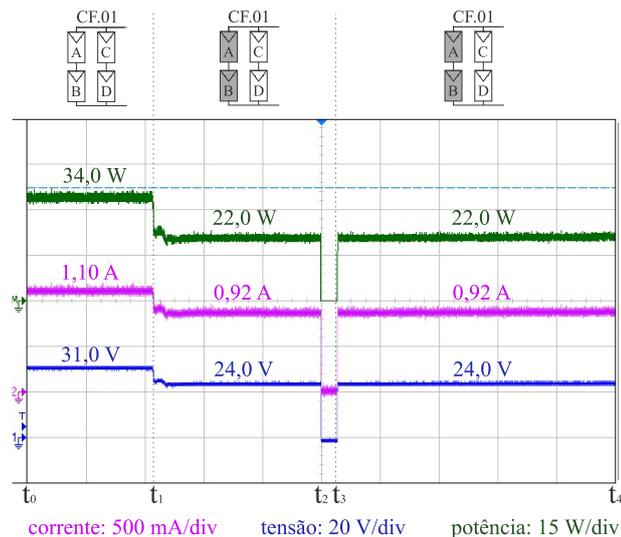


Fig. 7.12 – Tensão, corrente e potência para o sombreamento de dois módulos em uma mesma coluna.

Conforme foi apresentado no Capítulo 5, a metodologia de reconfiguração propõe que quando um painel fotovoltaico é atingido por um sombreamento parcial, a degradação de

energia é menor se os módulos atingidos estiverem concentrados no menor número possível de colunas (ramos série) da matriz.

No caso do sombreamento dos módulos A e B, os módulos atingidos já se encontram na mesma coluna, por isso, o sistema de reconfiguração mantém a matriz fotovoltaica na configuração 01 (CF.01).

▪ **Sombreamento de dois módulos em colunas diferentes**

Teste semelhante ao apresentado anteriormente é realizado para verificar o comportamento do sistema diante do sombreamento dos módulos B e C.

O sistema inicialmente encontra-se iluminado e produzindo uma potência total de 34 W. A partir do instante de tempo  $t_1$  realiza-se o sombreamento dos módulos B e C, o que reduz a potência de saída para 7,0 W. Como esperado, no instante  $t_3$  o sistema é reconfigurado (CF.03) e a potência fornecida para a carga sobe para 21,0 W, ou seja, um incremento de 14,0 W como mostra a Fig. 7.13.

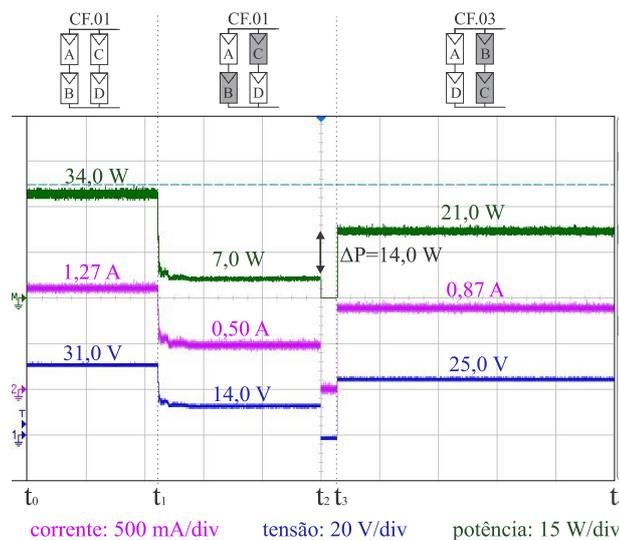


Fig. 7.13 – Tensão, corrente e potência sombreamento de dois módulos em colunas diferentes.

▪ **Sombreamento de três módulos e quatro módulos**

Assim como ocorre no sombreamento de um módulo fotovoltaico, o sombreamento de três módulos e quatro não tem seus efeitos minimizados pela reconfiguração. Os testes mostrados nas Fig. 6.14(a) e (b) mostram situações onde inicialmente o painel encontra-se iluminado e no instante  $t_1$ , os módulos passam a ser atingidos pelo sombreamento, o que provoca uma redução substancial na potência gerada.

No intervalo entre  $t_2$  e  $t_3$  o sistema realiza as medições nas correntes de cada módulo e identifica a quantidade de unidades sombreadas. Como nada pode ser feito, o painel fotovoltaico é mantido na configuração de referência CF.01.

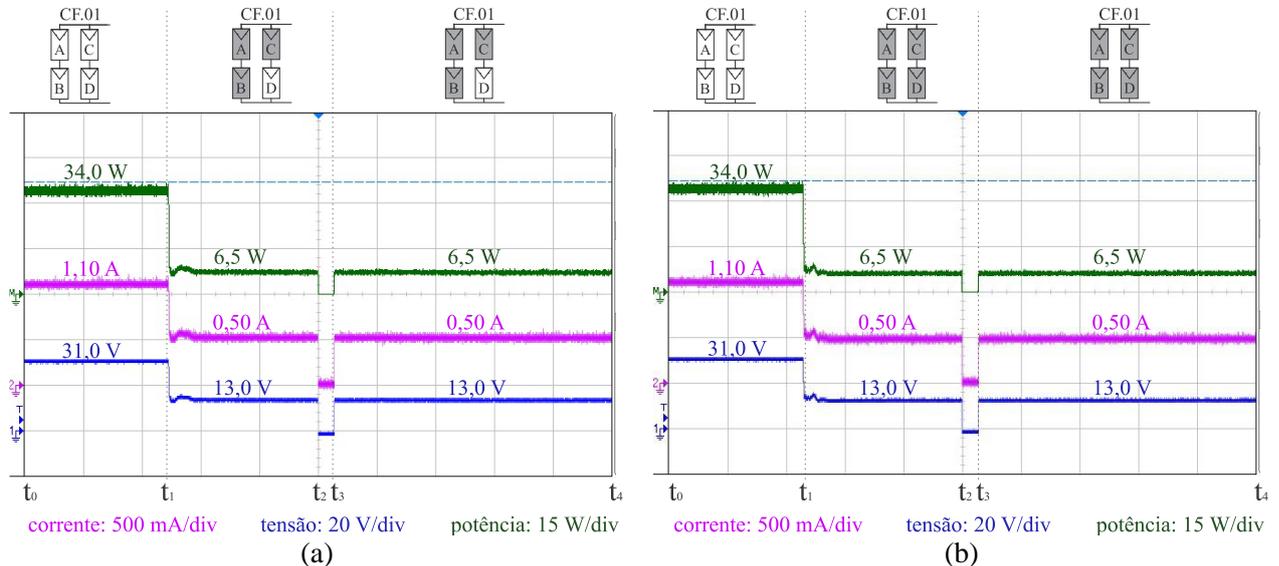


Fig. 7.14 – Tensão, corrente e potência para: (a) sombreamento de três módulos e (b) sombreamento de quatro módulos.

### 7.3.1.2 Sombreamento dinâmico

De acordo com o que foi explanado no Capítulo 6, em aplicações práticas, normalmente, a sombra possui um comportamento dinâmico, movendo-se sobre a matriz fotovoltaica. A fim de observar o desempenho do sistema de reconfiguração neste tipo de condição foram reproduzidas algumas situações de sombreamento com perfil dinâmico sobre o painel fotovoltaico.

#### ▪ Deslocamento horizontal

Neste ensaio foi reproduzido o comportamento de uma sombra com deslocamento horizontal sobre o painel fotovoltaico, onde os módulos A e C são sombreados.

Os resultados apresentados na Fig. 7.15 podem ser divididos em cinco etapas distintas conforme foi apresentado na Fig. 6.5. A passagem pelas cinco etapas é informada na parte inferior da Fig. 7.15.

- ① Módulos iluminados e arranjados na configuração 1 (CF.01);
- ② Realização do sombreamento no módulo A e abertura de todos os interruptores da matriz de conexões para medição da corrente dos módulos. Após a medição, os módulos são mantidos na configuração 01 (CF.01).
- ③ A sombra continua seu percurso sombreando o módulo C. Após a medição periódica da corrente, o sistema é reconectado de acordo com a configuração 02 (CF.02).
- ④ O módulo A volta a estar iluminado, restando somente o módulo C sombreado. Nesse caso, após as medições o arranjo volta para a configuração 01.
- ⑤ A sombra desobstrui completamente o painel que volta a estar todo iluminado.

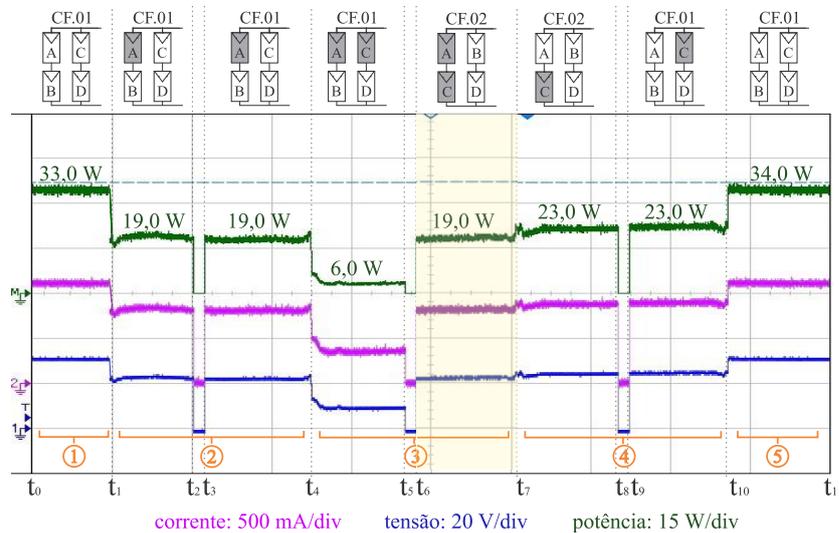


Fig. 7.15 – Tensão, corrente e potência para um sombreamento dinâmico com deslocamento horizontal.

Na parte superior da Fig. 7.15 é mostrado o processo de transição entre as configurações ótimas durante o período de realização do ensaio. Salienta-se que as imagens ilustram apenas a alteração na nas conexões elétricas da matriz fotovoltaica. Fisicamente, a posição dos módulos fotovoltaicos permanece inalterada.

O intervalo de tempo em que a reconfiguração proporcionou um ganho na potência produzida (entre  $t_6$  e  $t_7$ ) foi evidenciado através de uma faixa no gráfico. Com a análise dos resultados obtidos através do sombreamento com movimentação horizontal, constata-se que a reconfiguração dos módulos é capaz de reduzir a perda de potência decorrente da movimentação da sombra sobre o painel fotovoltaico entre os instantes de tempo  $t_6$  e  $t_7$ .

Antes do sistema de reconfiguração atuar, o sombreamento dos módulos A e C provocou uma queda de 68,5 % em relação ao intervalo anterior e somente com a reconfiguração, foi

possível retomar a produção de 19 W de potência. Durante o período de 40 s em que o ensaio foi realizado houve uma pequena variação na radiação incidente sobre o painel fotovoltaico.

### ▪ Deslocamento vertical

As curvas de tensão, corrente e potência para o ensaio em que foi reproduzido um sombreamento com movimentação vertical sobre a matriz 2x2 são mostradas na Fig. 7.16.

Diante do sombreamento dos módulos A e C ( $t_1$ ), o sistema de reconfiguração atua e a matriz fotovoltaica é conectada de acordo com a configuração 02 (CF.02). No instante  $t_4$ , a sombra se move e os módulos B e D são atingidos, entretanto, a matriz já se encontra em uma configuração que atende a este perfil de sombreamento e o sistema não chega a ter perda de potência, devido à movimentação da sombra.

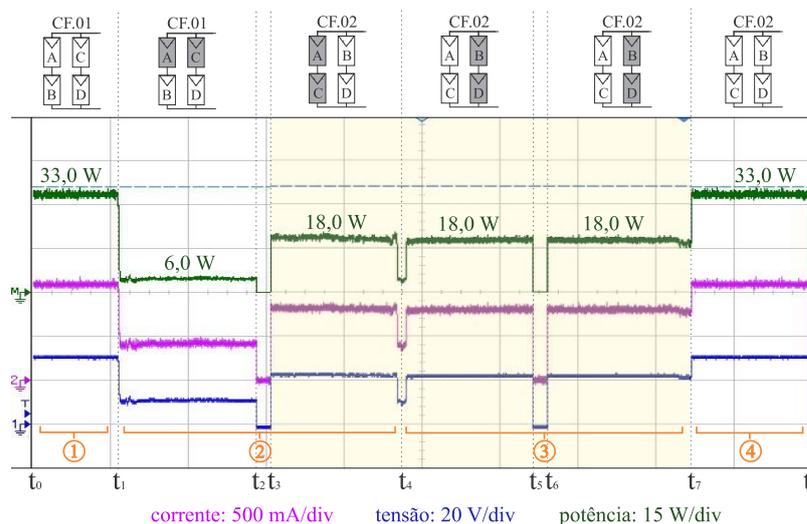


Fig. 7.16 – Tensão, corrente e potência para um sombreamento dinâmico com deslocamento vertical.

Situações em que o sombreamento se desloca verticalmente sobre a matriz fotovoltaica, quando reconfigurados, propiciam um ganho significativo na potência produzida pelo sistema. Nos resultados apresentados na Fig. 7.16, destaca-se que no intervalo entre  $t_3$  e  $t_7$ , houve ganho de 12 W função da atuação do sistema de reconfiguração.

### ▪ Deslocamento diagonal

O sombreamento com movimentação diagonal sobre a matriz 2x2 é realizado e os resultados são mostrados na Fig. 7.17.

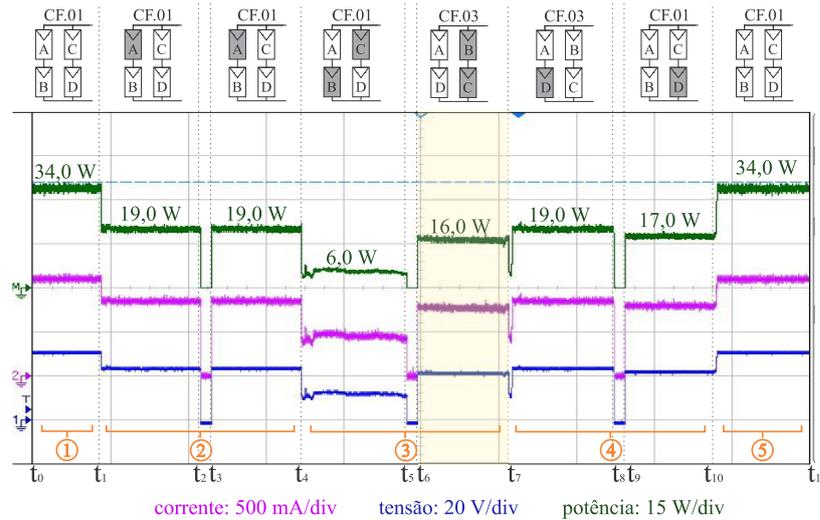


Fig. 7.17 – Tensão, corrente e potência para um sombreamento dinâmico com movimentação diagonal.

Os resultados obtidos neste ensaio são compatíveis com aqueles verificados na simulação apresentada na Fig. 6.10. A reconfiguração das conexões elétricas é habilitada diante do sombreamento dos módulos B e C e proporciona a recuperação de 10 W no intervalo entre  $t_6$  e  $t_7$ .

Situação semelhante à apresentada no ensaio com movimentação horizontal ocorre durante o período de realização desse teste em que, pequenas oscilações na radiação incidente provocaram alterações na potência produzida pelo sistema. Além disso, nesse caso, observa-se também a influência das diferenças entre os parâmetros dos módulos que compõem a matriz 2x2, quando para uma mesma situação de sombreamento são obtidos resultados diferentes diante da mudança na configuração (etapa número quatro do ensaio).

### 7.3.1.3 Comparação entre painel com e sem o sistema de reconfiguração

A fim de destacar o real ganho do painel fotovoltaico equipado com o sistema de reconfiguração, em comparação ao painel com conexões elétricas fixas, na Fig. 7.18, são mostradas as formas de onda para a matriz 2x2 sem a reconfiguração e com a reconfiguração dos módulos.

Neste ensaio, é realizado um sombreamento dinâmico com movimentação vertical sobre o painel fotovoltaico. Somente com a reconfiguração dos módulos é possível obter um aumento substancial na potência produzida pelo sistema no intervalo entre  $t_3$  e  $t_7$ .

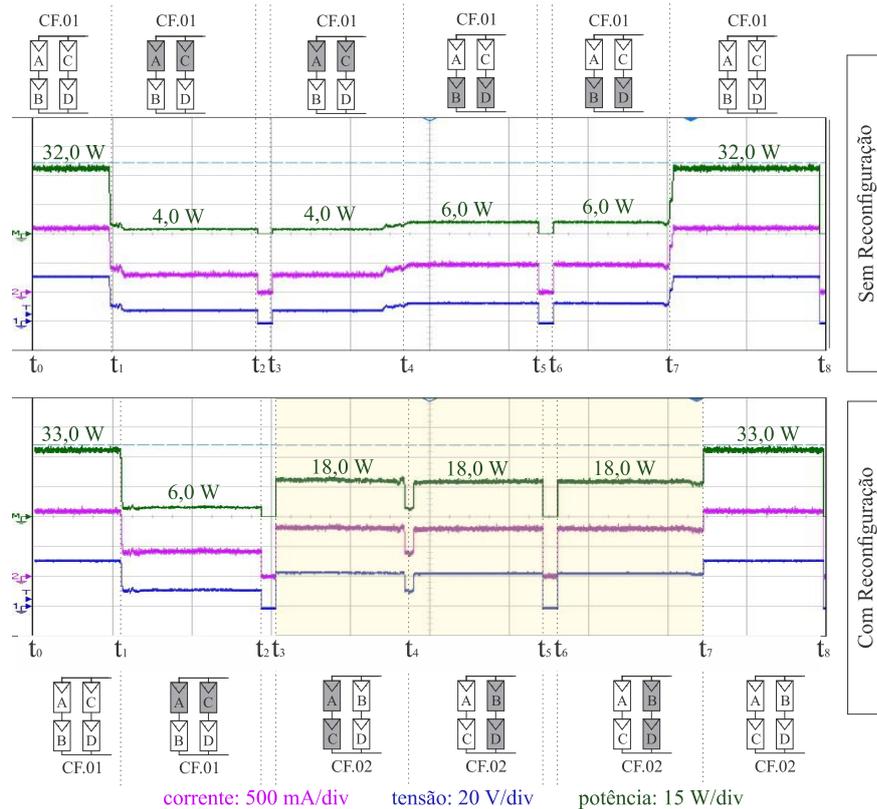


Fig. 7.18 – Tensão, corrente e potência para a matriz 2x2 sem reconfiguração e com reconfiguração.

Verifica-se que, no sistema com conexões fixas, durante o sombreamento dos módulos A e C são produzidos apenas 4 W, enquanto diante do sombreamento de B e D a potência é de 6 W. Essa diferença nos valores produzidos pelo sistema em situações equivalentes, pode ocorrer em função de pequenas desuniformidades entre os parâmetros de cada módulo, aliado a possíveis variações na irradiância incidente durante o período de testes.

## 7.4 Sistema de reconfiguração - Matriz 3x2

A bancada de testes para o circuito completo do sistema de reconfiguração para a matriz 3x2 é mostrada na Fig. 7.19 (a). A plataforma construída para o sistema de reconfiguração da matriz 2x2 (Fig. 7.7) teve o circuito de comutação substituído e a carga resistiva alterada para atender as necessidades da matriz 3x2 conforme ilustra a Fig. 7.19 (b).

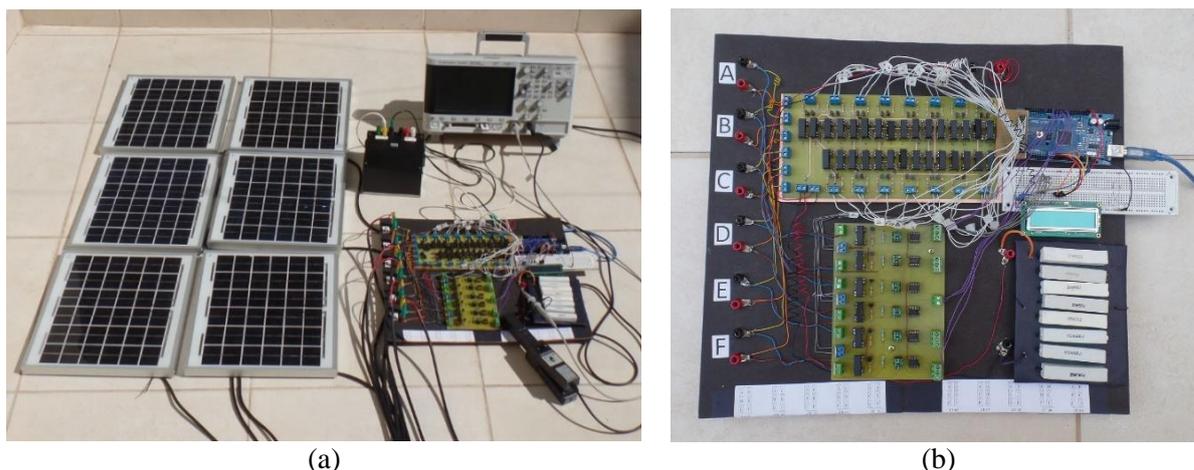


Fig. 7.19 – (a) Bancada de testes para o sistema de reconfiguração 3x2; (b) plataforma com circuitos para o sistema de reconfiguração 3x2.

## 7.4.1 Resultados experimentais

Assim como os resultados apresentados na Seção 7.3, os testes experimentais para a matriz 3x2 foram divididos em dois grupos principais: sombreamento estático e sombreamento dinâmico.

### 7.4.1.1 Sombreamento estático

Os testes para o sombreamento estático são divididos em quatro estágios distintos que compreendem desde a ocorrência da sombra no sistema inicialmente iluminado, passando pela medição e identificação dos módulos sombreados até a reconfiguração do painel. Todos os ensaios tem duração de 20 s.

De acordo com a equação definida em (5.5), para uma matriz fotovoltaica 3x2, a reconfiguração é viável quando o painel possui 2 ou 3 módulos sombreados. Em todas as outras situações (um, quatro, cinco ou seis módulos sombreados) nada pode ser feito pelo sistema.

- **Sombreamento de dois e três módulos em colunas diferentes**

As curvas de tensão, corrente e potência para o painel 3x2 diante do sombreamento de dois e três módulos, em colunas diferentes, são apresentadas na Fig. 7.20.

De acordo com a metodologia de reconfiguração exposta no Capítulo 5, se for possível concentrar todos os módulos atingidos pelo sombreamento em uma única coluna do painel fotovoltaico, a produção de energia será maior quando comparada à um painel com sombreamento distribuído.

Essa afirmação é comprovada, experimentalmente, através dos resultados mostrados na Fig. 7.20 (a) e (b). Em ambos os casos, inicialmente, o painel fotovoltaico encontra-se totalmente iluminado e no instante de tempo  $t_1$  é atingido por um sombreamento parcial que atinge as duas colunas do arranjo. Após a abertura do sistema para a medição de cada um dos módulos e identificação do sombreamento, verifica-se que a reconfiguração é viável. Após a reconfiguração há uma recuperação de potência de 18,8 e 17,5 W, respectivamente.

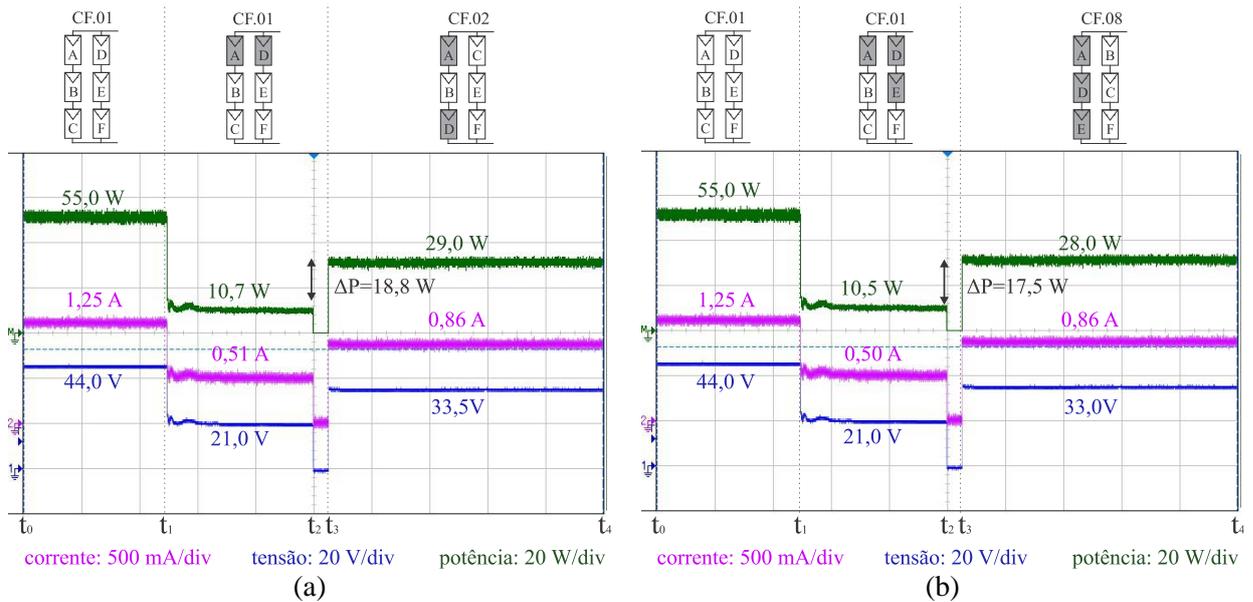
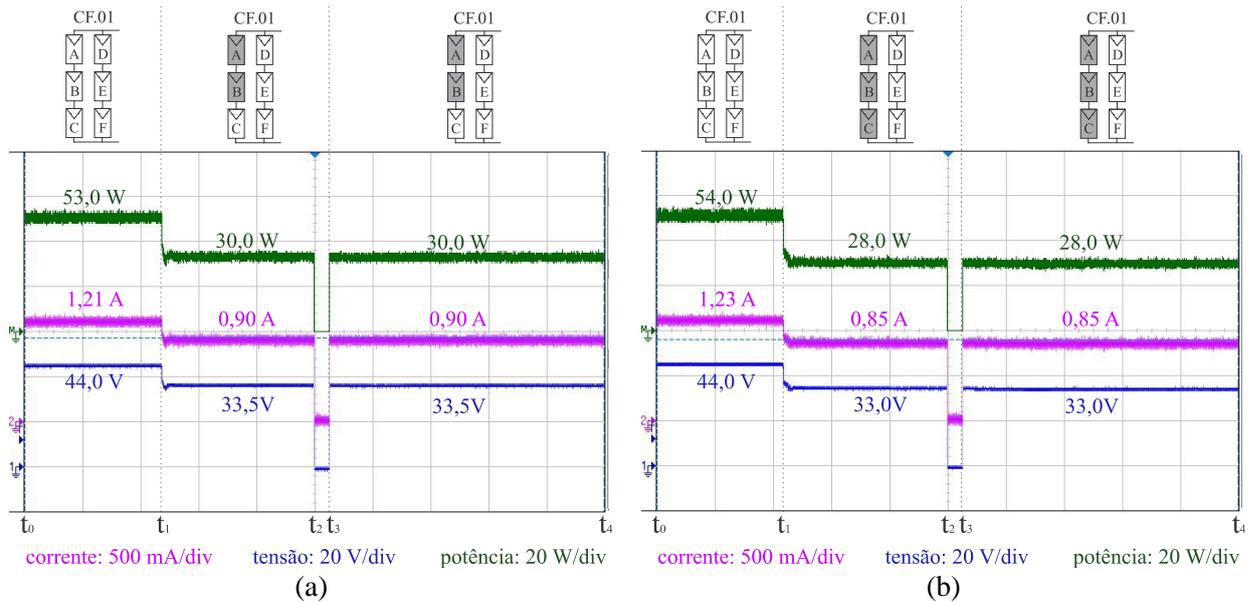


Fig. 7.20 – Tensão, corrente e potência para: (a) dois módulos sombreados; (b) três módulos sombreados.

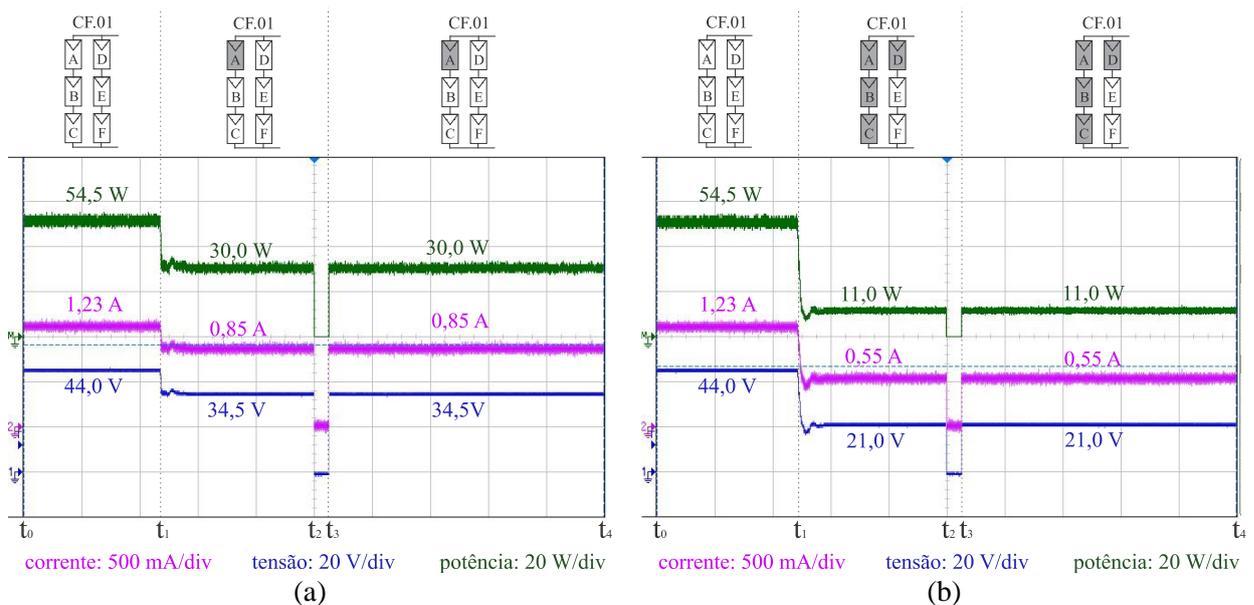
#### ▪ Sombreamento de dois e três módulos em uma mesma coluna

Quando o sombreamento de dois e três módulos ocorre de forma que apenas uma das colunas dos arranjo seja atingida, o sistema de reconfiguração mantém a matriz fotovoltaica na conexão de referência (CF.01). As formas de onda obtidas para os ensaios do sombreamento de dois e três módulos na mesma coluna do painel 3x2 são mostrados na Fig. 7.21.



▪ **Sombreamento de um, quatro, cinco e seis módulos**

São apresentados na Fig. 7.22, os resultados para o sombreamento de um, quatro, cinco e seis módulos, respectivamente, na matriz 3x2. Em todos os testes, apresentados na Fig. 7.22, a matriz permanece na configuração de referência (CF.01) após o sombreamento, pois em nessas condições a queda na potência devido ao sombreamento não poderia ser reduzida com a reconfiguração.



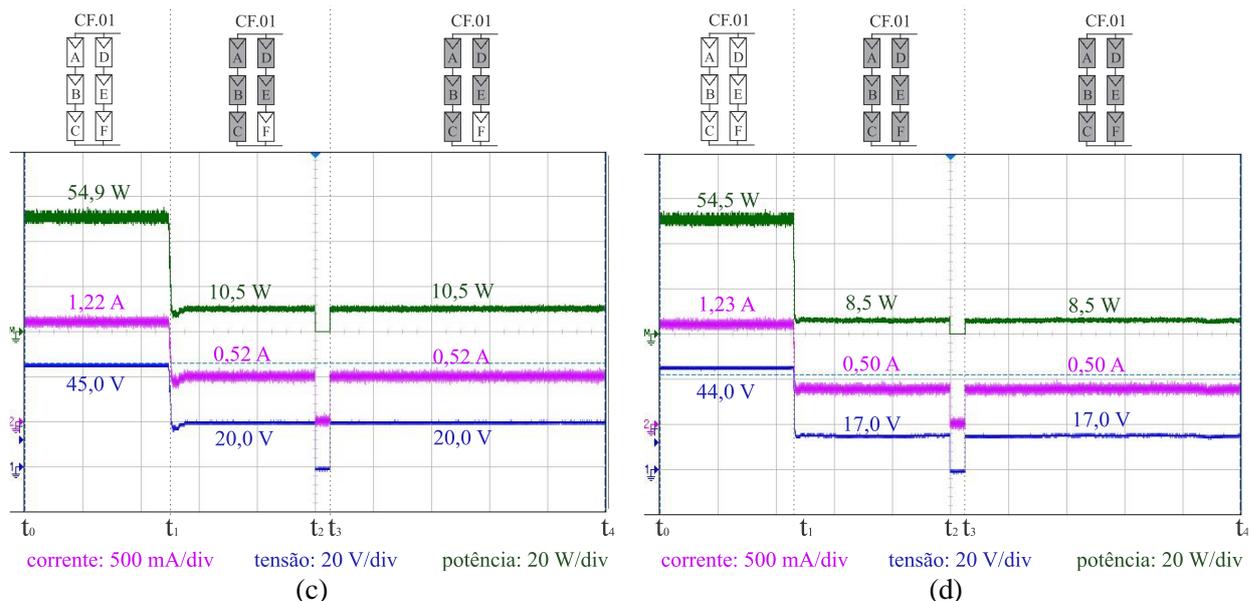


Fig. 7.22 – Tensão, corrente e potência para: (a) um módulo sombreado; (b) quatro módulos sombreados; (c) cinco módulos sombreados; (d) seis módulos sombreados.

#### 7.4.1.2 Sombreamento dinâmico

##### ▪ Deslocamento horizontal

As curvas mostradas a seguir são os resultados dos testes experimentais onde foi reproduzida a movimentação horizontal da sombra sobre o painel fotovoltaico. Nestes ensaios, os interruptores do circuito de comutação são abertos a cada 10 s para efetuar a medição dos módulos fotovoltaicos.

Para identificar os estágios de sombreamento a que a matriz é submetida, encontra-se na parte inferior das figuras o número referente a cada uma das etapas do sombreamento apresentadas na Seção 6.3.3.1. Na parte superior das imagens, ilustra-se o processo de mudança entre as configurações de interesse durante o período de teste.

As curvas de tensão, corrente e potência, para o ensaio onde o sombreamento horizontal atinge apenas uma linha da matriz fotovoltaica, são vistas na Fig. 7.23. A situação onde a reconfiguração proporcionou uma melhora na produção de energia é destacada (entre  $t_6$  e  $t_7$ ).

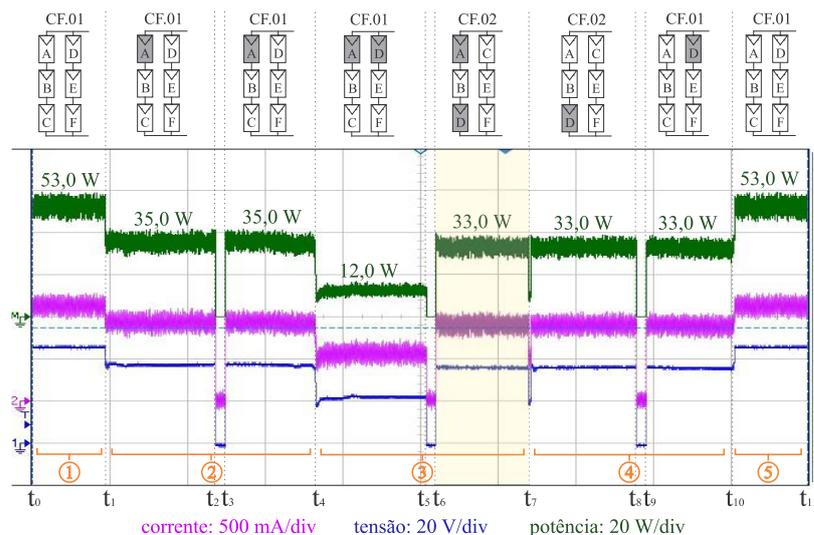


Fig. 7.23 – Tensão, corrente e potência para um sombreamento dinâmico com deslocamento horizontal da sombra em uma linha.

Os resultados para os ensaios de sombra com deslocamento horizontal, atingindo duas linhas do painel, são apresentados na Fig. 7.24. O sombreamento foi realizado seguindo os cinco estágios apresentados na Fig. 6.15 (b).

- ① Todos os módulos iluminados;
- ② Sombreamento de dois módulos na primeira coluna da matriz;
- ③ A sombra atinge as duas colunas;
- ④ A sombra se move e libera a primeira coluna;
- ⑤ O painel volta a estar todo iluminado.

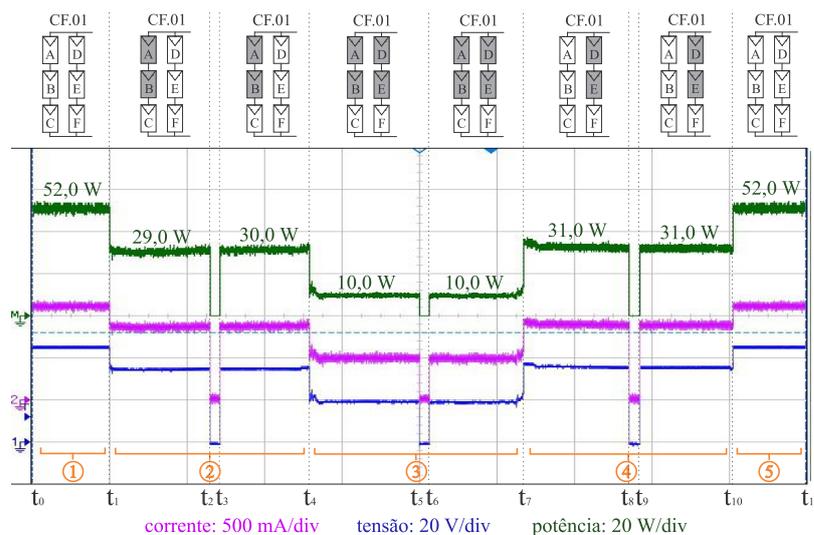


Fig. 7.24 – Tensão, corrente e potência para um sombreamento dinâmico com deslocamento horizontal da sombra em duas linhas.

Quando o sombreamento acontece de forma que os módulos afetados estejam concentrados no mesmo ramo série (coluna) da matriz fotovoltaica, o sistema de reconfiguração mantém o sistema na configuração de referência. Nesses casos, a mudança na configuração não produziria um aumento na energia produzida pelo painel.

▪ **Deslocamento vertical**

Nos ensaios apresentados na sequência, avalia-se a atuação do sistema de reconfiguração diante do sombreamento com movimentação vertical sobre a matriz fotovoltaica. Este padrão de sombreamento pode acontecer de forma que uma, duas ou as três linhas do painel sejam sombreadas durante o trajeto da sombra.

Nas Fig. 7.25 e Fig. 7.26 são vistas as formas de onda para os testes onde contemplou-se o deslocamento vertical da sombra, de cima para baixo, sobre o painel fotovoltaico conforme foi apresentado na Seção 6.3.1.1, Fig. 6.18.

No primeiro ensaio mostrado na Fig. 7.25 a sombra se move sobre o painel e atinge apenas uma linha a cada intervalo de tempo. No teste seguinte, a sombra atinge até duas linhas durante sua passagem sobre a matriz fotovoltaica como visto na Fig. 7.26.

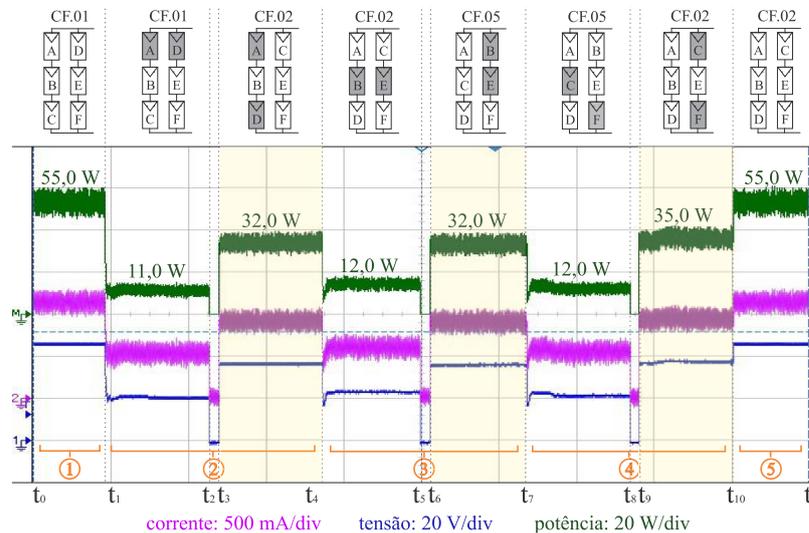


Fig. 7.25 – Tensão, corrente e potência para um sombreamento dinâmico com deslocamento vertical da sombra e dois módulos atingidos.

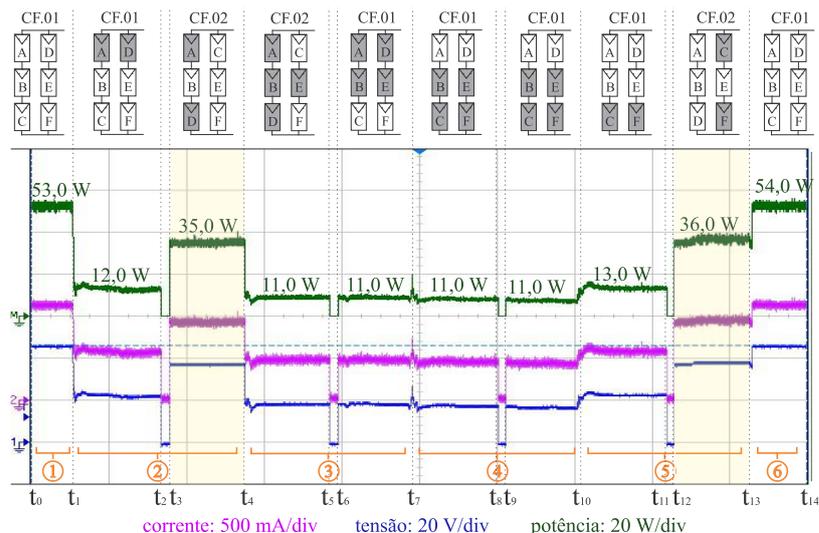


Fig. 7.26 – Tensão, corrente e potência para um sombreamento dinâmico com deslocamento vertical da sombra e até quatro módulos atingidos.

Em ambos os casos, existem situações em que é possível minimizar os efeitos do sombreamento através da mudança na configuração do painel. Essas situações são indicadas nas imagens através de uma faixa colorida.

▪ **Deslocamento diagonal**

As formas de onda dos ensaios que contemplam o sombreamento com movimentação diagonal são mostradas nas Fig. 7.27 e Fig. 7.28.

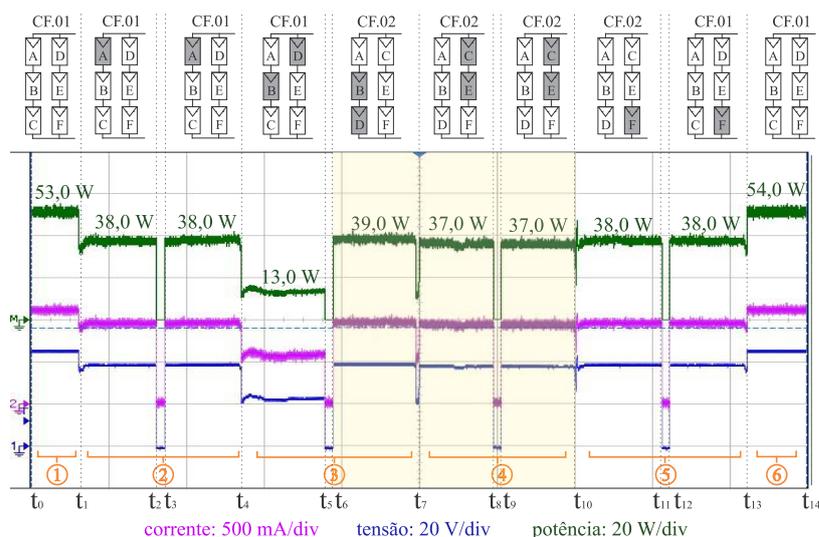


Fig. 7.27 – Tensão, corrente e potência para um sombreamento dinâmico com deslocamento diagonal da sombra e até dois módulos atingidos.

O objetivo destes testes é reproduzir o comportamento ilustrado nas Fig. 6.20 (a) e (b). É importante salientar que durante a movimentação da sombra sobre o painel fotovoltaico e atuação do sistema de reconfiguração, existirão situações em que a degradação de energia será evitada pelo fato do sistema já se encontrar na configuração ótima.

No ensaio apresentado na Fig. 7.27, os módulos B e D são sombreados. No instante de tempo  $t_6$  a matriz é conectada na configuração 02 (CF.02), essa já é a configuração ótima para o sombreamento dos módulos C e E assim o sistema não chega a passar por perda de potência no intervalo entre a mudança da sombra e a atuação do sistema de reconfiguração.

Situação semelhante à descrita anteriormente também ocorre no ensaio cujo resultado é exibido na Fig. 7.28. Após a primeira mudança de configuração o sistema se mantém em CF.08 o que evita a perda de potência diante da movimentação da sombra.

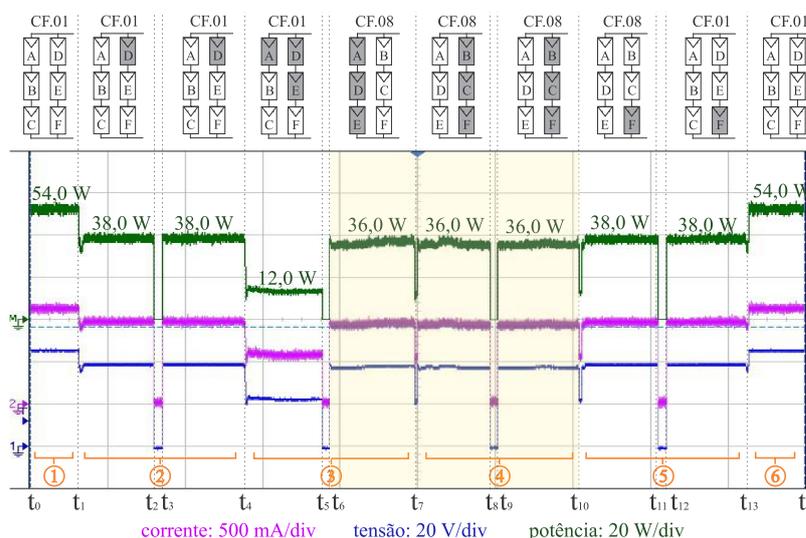


Fig. 7.28 – Tensão, corrente e potência para um sombreamento dinâmico com deslocamento diagonal da sombra e até três módulos atingidos.

### 7.4.1.3 Comparação entre painel com e sem o sistema de reconfiguração

Na Fig. 7.29 apresenta-se uma comparação entre a potência gerada pelo painel 3x2 com o sistema de reconfiguração e quando o sistema é desabilitado. Neste teste, o padrão de sombreamento escolhido foi o vertical, conforme mostrado na Fig. 7.29.

A comparação entre a potência do sistema com reconfiguração e sem reconfiguração deixa evidente a eficácia do método proposto. No instante  $t_1$ , para o sistema sem reconfiguração, o sombreamento dos módulos A e D provoca uma queda de aproximadamente 80% na potência gerada. Enquanto, para o sistema com conexões dinâmicas, a partir da atuação da reconfiguração, em  $t_3$ , essa redução fica em torno de 47 %.

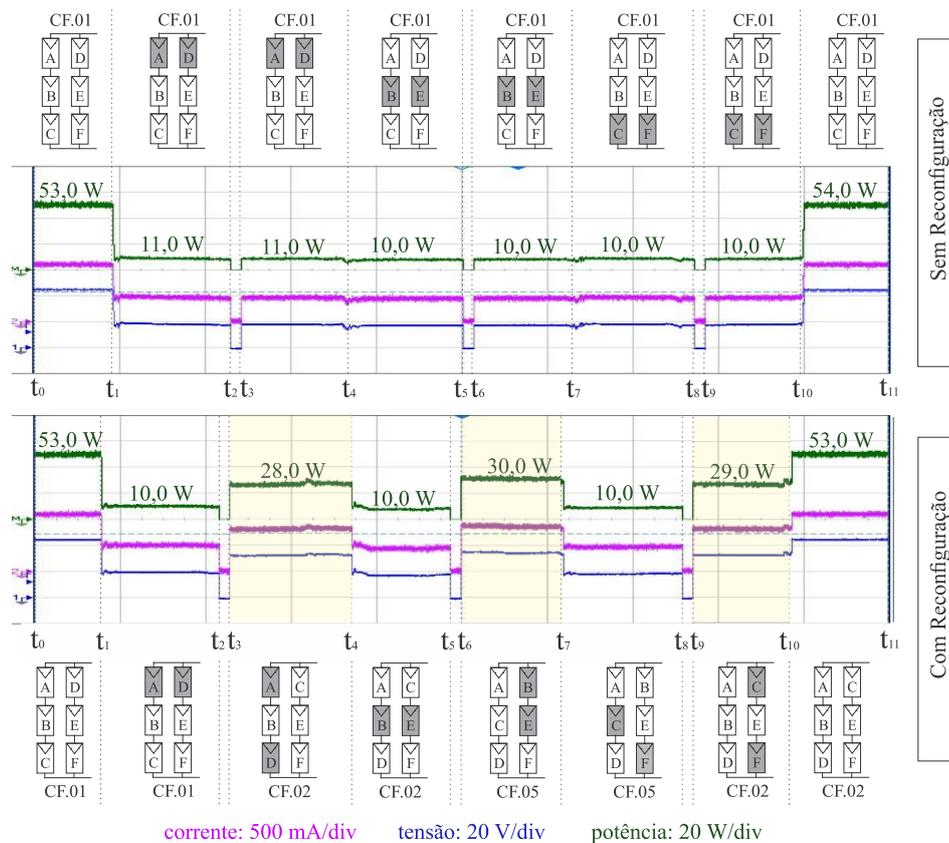


Fig. 7.29 – Tensão, corrente e potência para a matriz 3x2 sem reconfiguração e com reconfiguração.

## 7.5 Sistema de reconfiguração - Matriz 2x3

Por fim, a Fig. 7.30 lustra a bancada de testes com o circuito completo do sistema de reconfiguração para a matriz 2x3. Este sistema foi construído de forma análoga aos sistemas 2x2 e 3x2 apresentados anteriormente.



Fig. 7.30 – Bancada de testes do sistema de reconfiguração 2x3.

## 7.5.1 Resultados experimentais

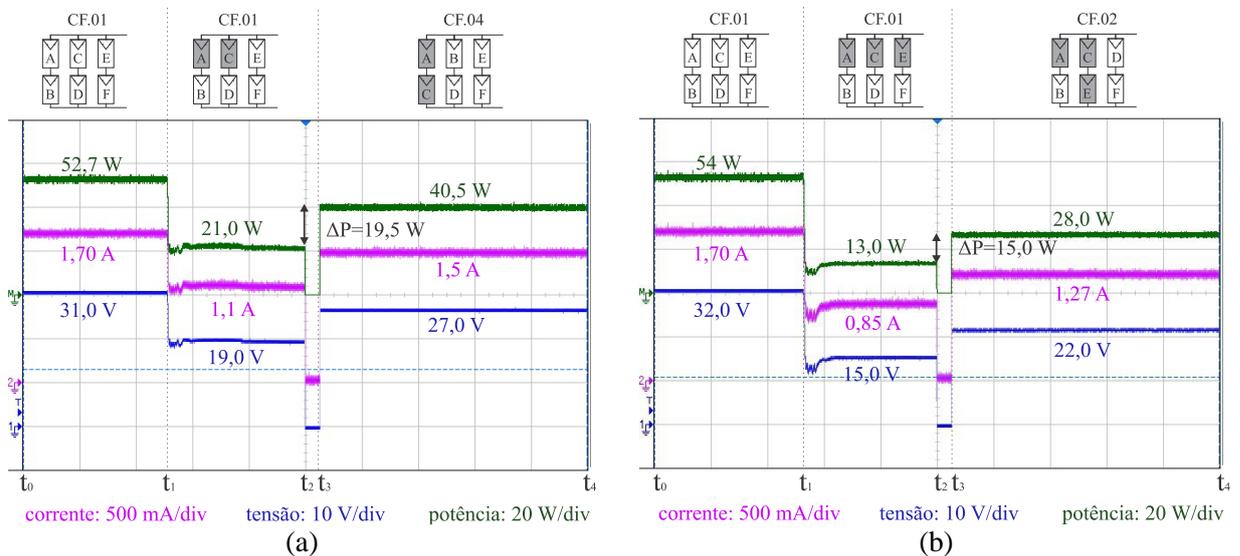
### 7.5.1.1 Sombreamento estático

#### ▪ Sombreamento de dois, três e quatro módulos em colunas diferentes

Das três matrizes fotovoltaicas escolhidas para ilustrar o comportamento e atuação do sistema de reconfiguração proposto, a matriz 2x3 é a que apresenta maior versatilidade. De acordo com o método de reconfiguração, apresentado na Seção 5, para um painel fotovoltaico SP com duas linhas e três colunas, a reconfiguração pode ser viável quando houver dois, três ou quatro módulos sombreados.

O objetivo da reconfiguração é, sempre que possível, concentrar os módulos sombreados no menor número possível de ramos série da matriz. Desta forma os módulos que não foram atingidos pelo sombreamento ficam “livres” para contribuir com a energia que estão produzindo.

Os ensaios para o sombreamento estático de dois, três e quatro módulos fotovoltaicos são mostrados na Fig. 7.31 (a), (b) e (c). Em todos os ensaios, o sombreamento ocorre de forma distribuída, atingindo duas ou mais colunas do painel. Nesses casos a reconfiguração é viável e possibilita a recuperação de 19,5 W, 15,0 W e 12,6 W, respectivamente.



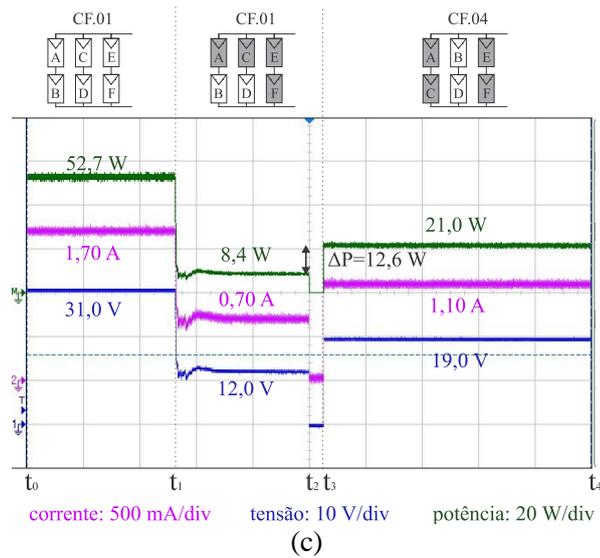
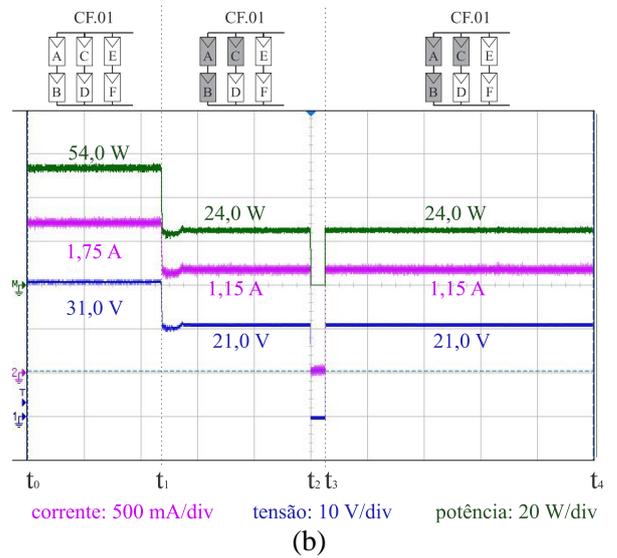
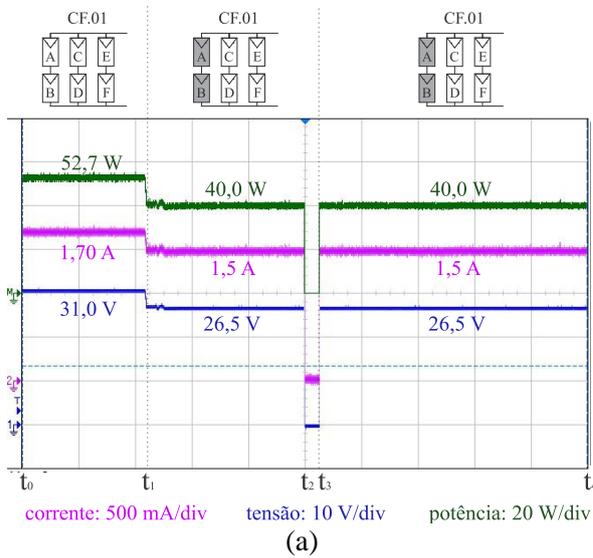


Fig. 7.31 – Tensão, corrente e potência para: (a) dois módulos sombreados; (b) três módulos sombreados; (c) quatro módulos sombreados.

▪ **Sombreamento de dois, três e quatro módulos em uma/duas colunas**

Quando a sombra acontece de forma concentrada, o sistema de reconfiguração identifica essa condição e mantém a configuração de referência conforme pode ser visto nos ensaios da Fig. 7.32 (a), (b) e (c).



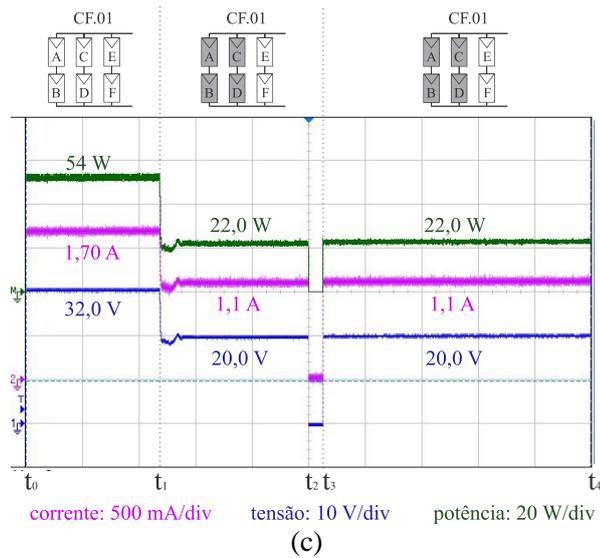
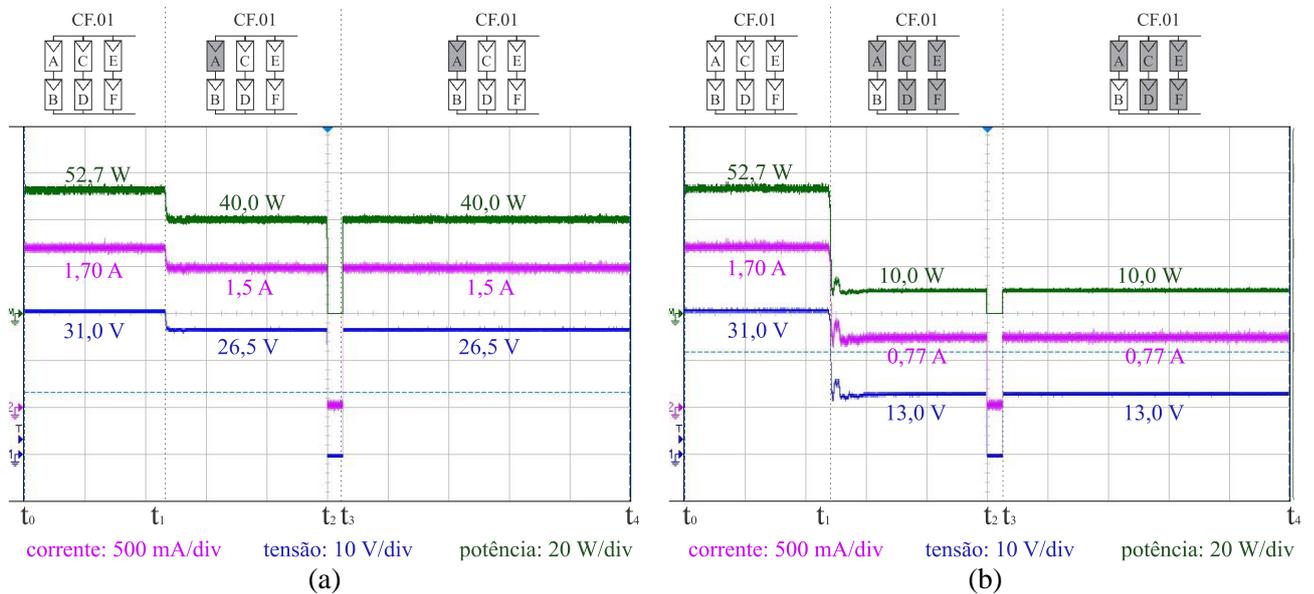


Fig. 7.32 – Tensão, corrente e potência para: (a) dois módulos sombreados; (b) três módulos sombreados; (c) quatro módulos sombreados.

▪ **Sombreamento de um, cinco e seis módulos**

Os resultados obtidos para o sombreamento de um, cinco ou seis módulos podem ser vistos na Fig. 7.33 (a), (b) e (c). Nestes casos, o sistema de reconfiguração mantém a matriz fotovoltaica na configuração de referência.



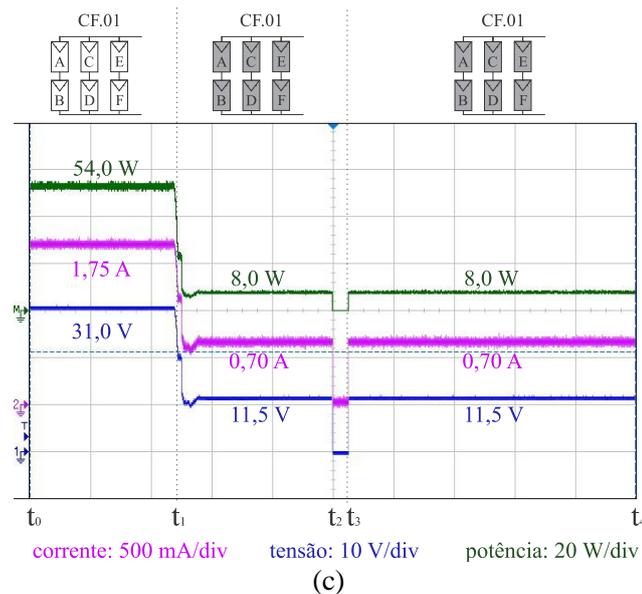


Fig. 7.33 – Tensão, corrente e potência para: (a) cinco módulos sombreados; (b) seis módulos sombreados.

### 7.5.1.2 Sombreamento dinâmico

Nessa seção o objetivo é reproduzir experimentalmente os padrões de sombreamento dinâmicos apresentados na Seção 6.4.1.2 do Capítulo 6.

#### ▪ Deslocamento horizontal

Nos resultados mostrados a seguir avalia-se o comportamento do sistema de reconfiguração para a matriz 2x3 diante da movimentação horizontal da sombra em três situações distintas: sombreamento de até dois módulos em uma única linha (ver Fig. 6.28 (a)); sombreamento de até três módulos em uma única linha (ver Fig. 6.28 (b)) e, por fim, o sombreamento de dois módulos em duas linhas da matriz (ver Fig. 6.28 (c)).

As curvas de tensão, corrente e potência dos ensaios supracitados são vistas nas Fig. 7.34, Fig. 7.35 e Fig. 7.36, respectivamente.

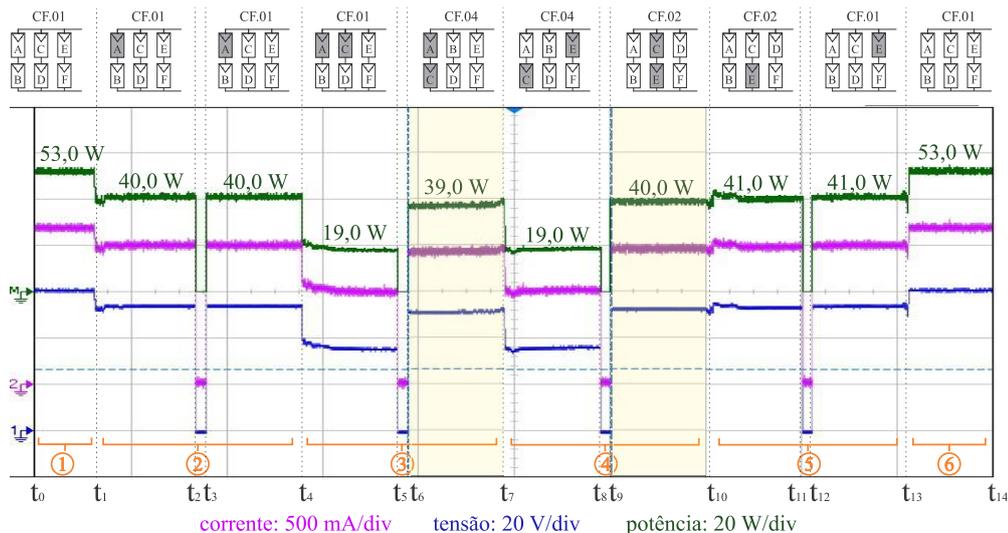


Fig. 7.34 – Tensão, corrente e potência para um sombreamento dinâmico com deslocamento horizontal da sombra em uma linha e até dois módulos atingidos.

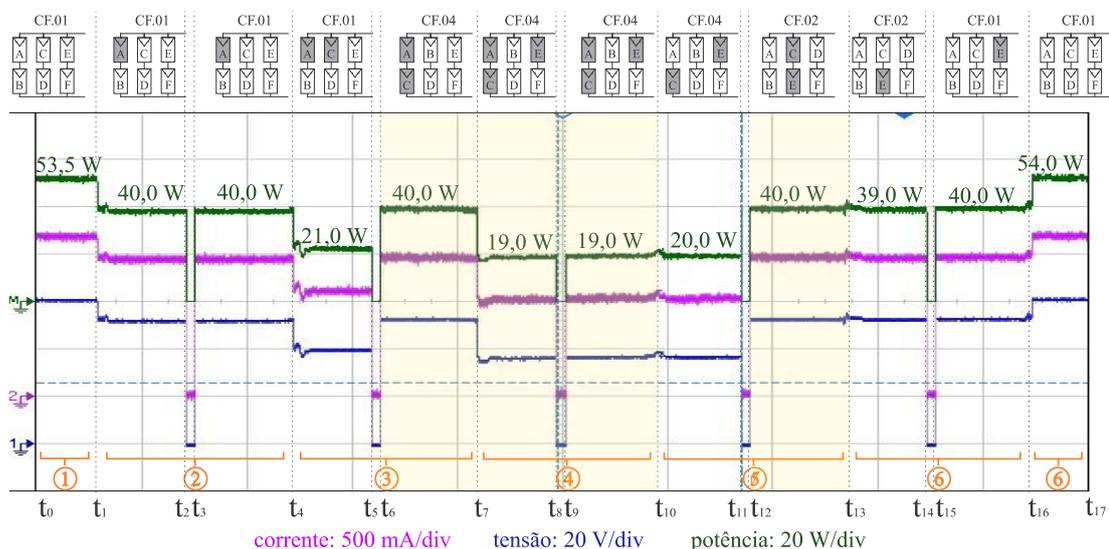


Fig. 7.35 – Tensão, corrente e potência para um sombreamento dinâmico com deslocamento horizontal da sombra em uma linha e até três módulos atingidos.

Conforme era esperado, nos testes das Fig. 7.34 e Fig. 7.35, a atuação do sistema de reconfiguração possibilita a recuperação de energia em alguns intervalos durante a passagem da sombra sobre o painel. Em contrapartida, o ensaio mostrado na Fig. 7.35 reproduz o comportamento de uma sombra que atinge os módulos de uma mesma coluna (ramo série) do painel, o que já é considerada uma configuração ótima.

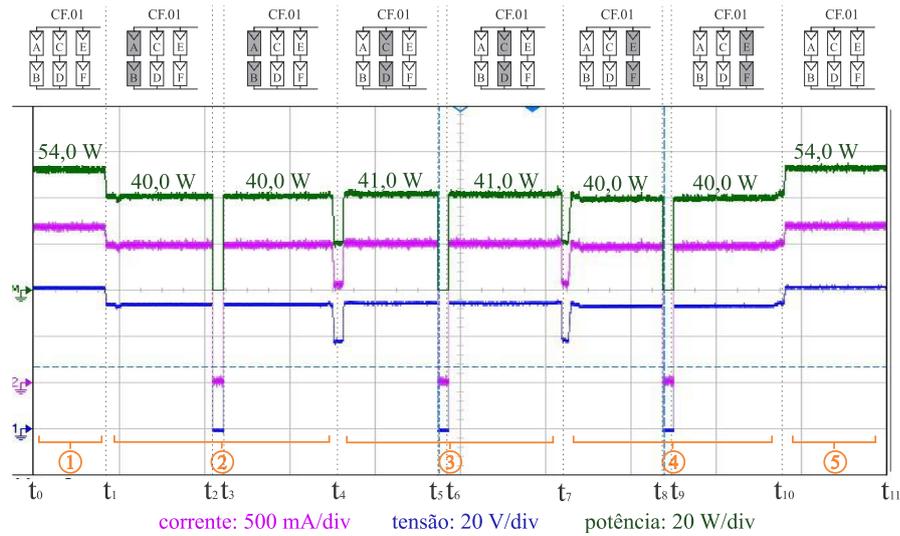


Fig. 7.36 – Tensão, corrente e potência para um sombreamento dinâmico com deslocamento horizontal da sombra em uma coluna e dois módulos atingidos.

▪ **Deslocamento vertical**

Os resultados para o sombreamento com deslocamento vertical na matriz 2x3 são vistos nas Fig. 7.37 e Fig. 7.38.

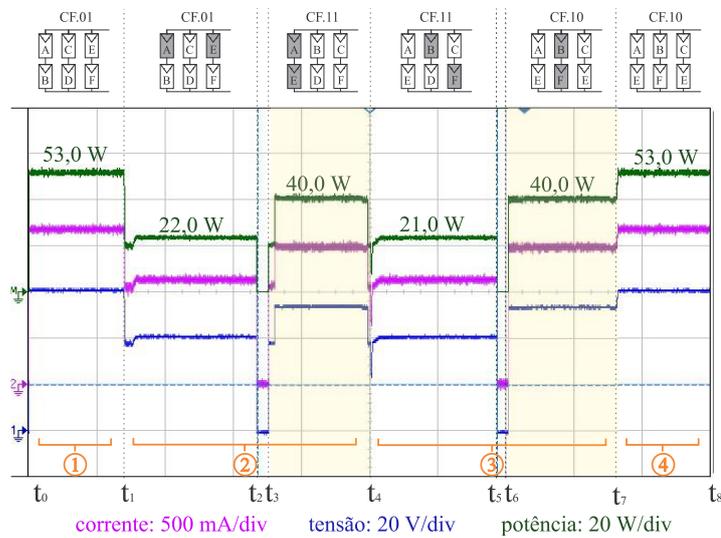


Fig. 7.37 – Tensão, corrente e potência para um sombreamento dinâmico com deslocamento vertical da sombra em uma linha e dois módulos atingidos.

Na figura Fig. 7.37, no instante de tempo  $t_1$ , realiza-se o sombreamento dos módulos das extremidades da matriz, A e E. No instante  $t_2$  são realizadas as medições para identificação dos módulos sombreados e em  $t_3$  a matriz é reconectada de acordo com a configuração 11 (CF.11). Em  $t_4$  a sombra move-se verticalmente para baixo e atinge os módulos B e F. Após as medições

a matriz é reconectada na configuração 10 (CF.10). Somente com a mudança nas configurações é possível recuperar 20 W de potência nos intervalos entre  $t_3$  e  $t_4$  e entre  $t_6$  e  $t_7$ .

Os resultados para o sombreamento de três módulos com movimentação vertical são apresentados na Fig. 7.38. Destaca-se que no instante  $t_4$ , quando a sombra muda dos módulos A, C e E para os módulos B, D e F o painel já se encontra na configuração ótima e o sistema não chega a passar por perda de potência.

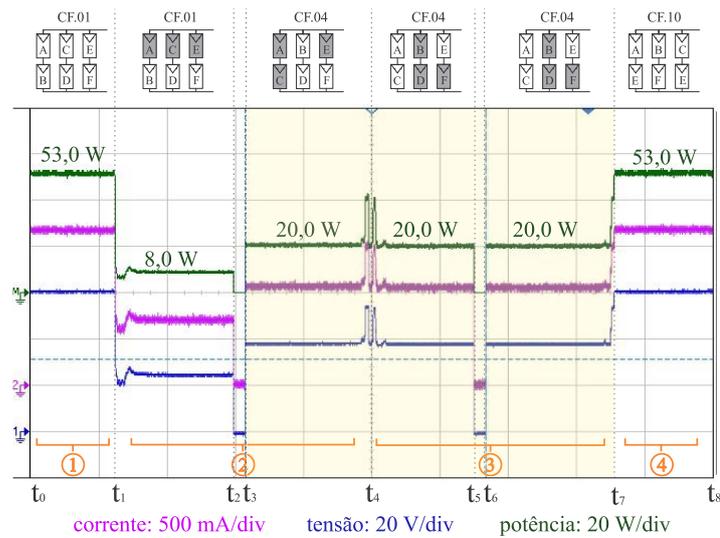


Fig. 7.38 – Tensão, corrente e potência para um sombreamento dinâmico com deslocamento vertical da sombra em uma linha e três módulos atingidos.

#### ▪ Deslocamento diagonal

O próximo ensaio apresentado reproduz a movimentação diagonal da sombra sobre a matriz fotovoltaica (ver Fig. 6.34 (c)). As curvas de tensão, corrente e potência são apresentadas na Fig. 7.39 e as situações onde há ganho na potência são destacadas no gráfico.

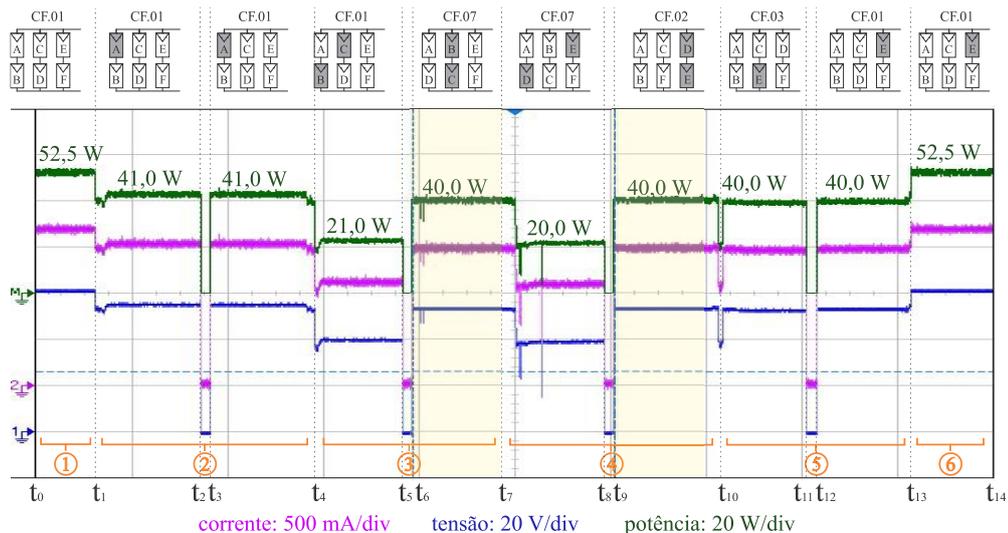


Fig. 7.39 – Tensão, corrente e potência para um sombreamento dinâmico com deslocamento diagonal e até dois módulos atingidos.

### 7.5.1.3 Comparação entre painel com e sem o sistema de reconfiguração

As curvas mostradas na Fig. 7.40 apresentam a comparação entre o comportamento do painel fotovoltaico sem a reconfiguração, e após a atuação do sistema de reconfiguração.

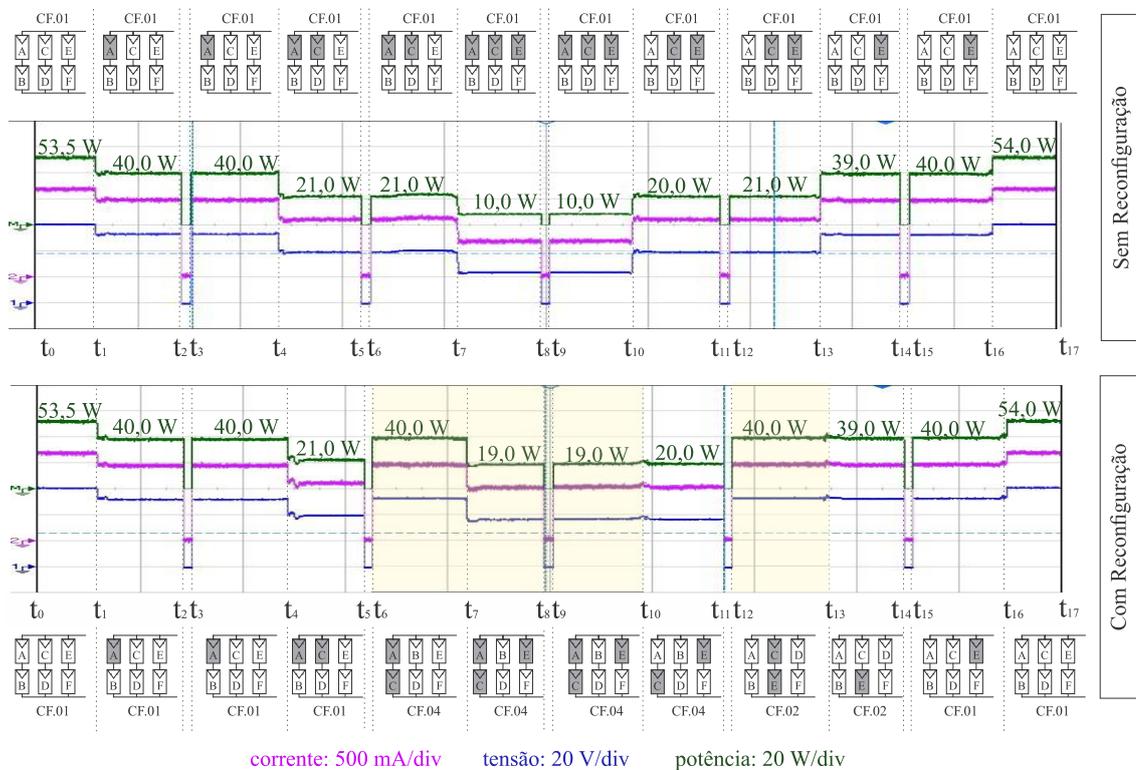


Fig. 7.40 – Tensão, corrente e potência para a matriz 2x3 sem reconfiguração e com reconfiguração.

Nas situações em que o sistema de reconfiguração atuou obteve-se até o dobro da potência gerada pelo painel sem a reconfiguração. Isso pode ser observado entre os instantes de tempo  $t_6$  e  $t_{10}$  e no intervalo entre  $t_{12}$  e  $t_{13}$ .

Assim como observou-se para as matrizes 2x2 e 3x2 nas seções anteriores, a comparação entre o comportamento do painel com e sem a reconfiguração, comprova a viabilidade da metodologia proposta.

## **7.6 Considerações finais**

Neste capítulo, o funcionamento dos sistemas propostos foram avaliados através de testes experimentais e os resultados obtidos comprovaram sua eficácia.

Quando comparados aos resultados apresentados no Capítulo 6, verifica-se que foram alcançados, na prática, respostas e comportamentos compatíveis com os obtidos através das simulações. Entretanto, alguns fatores desconsiderados nas simulações como: variações na temperatura, oscilações na irradiância, imprecisão nas resistências de carga e pequenas diferenças entre os módulos fotovoltaicos, influenciam nos valores de potência de saída do sistema. Todos os testes foram realizados ao ar livre, portanto, não foi realizado nenhum tipo de controle sobre as condições ambientais, o que inevitavelmente provoca algumas variações.

Em relação a um painel com conexões fixas, o sistema com a reconfiguração proporciona melhor aproveitamento da energia produzida pelo painel fotovoltaico sombreado. Logo, a reconfiguração das conexões elétricas resulta em um aumento significativo na potência de saída diante de diferentes situações de sombreamento.

Destaca-se que em todos os testes experimentais realizados neste capítulo, o painel fotovoltaico é conectado diretamente a uma carga de valor fixo, não sendo utilizado nenhum método para obtenção do ponto de máxima potência.

Os valores das resistências de carga foram calculados com base nos dados de catálogo para condições de teste padrão (STC), o que não garante a máxima transferência de potência diante de variações de irradiância e temperatura. Com a utilização de um sistema de MPPT associado ao sistema de reconfiguração, os resultados de ganho de potência obtidos seriam ainda mais substanciais.

## 8 CONCLUSÃO GERAL

---

Nesta tese de doutorado apresentou-se o desenvolvimento e construção de um sistema de reconfiguração para painéis fotovoltaicos sob condições de sombreamento. O sistema proposto tem a finalidade de identificar, em tempo real, os módulos fotovoltaicos que se encontram sombreados e reconfigurar as conexões elétricas do painel de forma que os módulos com pontos de operação semelhantes sejam agrupados.

Destaca-se que a metodologia proposta tem como característica principal a manutenção das dimensões da matriz fotovoltaica, ou seja, nenhum módulo é excluído ou adicionado ao painel. Além disso, o diferencial deste trabalho encontra-se na aplicação da Teoria dos Conjuntos Aproximados (TCA) para a construção do algoritmo de controle.

Com a utilização da TCA, foi possível identificar padrões e similaridades no conjunto de dados que representa um painel fotovoltaico sombreado. Além disso, o comportamento do sistema proposto pôde ser definido através de regras lógicas que relacionam a situação de cada módulo fotovoltaico (sombreado e não sombreado) com a configuração adequada para cada perfil de sombreamento.

A viabilidade do sistema foi avaliada através de simulações com painéis de quatro e seis módulos fotovoltaicos. Observou-se através das simulações que a implementação do sistema de reconfiguração resulta em um aumento considerável na potência de saída diante de diferentes padrões de sombreamento, o que comprova a eficácia da proposta.

De modo a validar os resultados de simulação, foram construídos os protótipos experimentais para os sistemas de reconfiguração para os painéis 2x2, 3x2 e 2x3. Nos testes experimentais foram avaliados diferentes padrões de sombreamento e o desempenho dos painéis fotovoltaicos diante da atuação do sistema de reconfiguração pôde ser observado. Os resultados experimentais confirmaram que a metodologia proposta reduz a perda de potência causada pelo sombreamento de módulos.

Por meio das simulações e testes experimentais, pôde-se constatar que os efeitos negativos do sombreamento em um painel fotovoltaico podem ser minimizados através da reconfiguração das conexões elétricas do painel, onde os módulos atingidos pelo sombreamento são agrupados no menor número de ramos série possível.

É importante salientar que nos sistemas em que os módulos fotovoltaicos são reconfigurados, inevitavelmente existirá maior complexidade quando comparados aos sistemas fotovoltaicos com conexões fixas. Contudo, o sistema de reconfiguração pode constituir uma alternativa eficiente para os sistemas fotovoltaicos que trabalham sob condições severas de sombreamentos parciais (em instalações urbanas por exemplo).

Como proposta para trabalhos futuros, sugere-se o desenvolvimento de um circuito integrado de aplicação específica (*ASIC - Application Specific Integrated Circuits*) para a execução da metodologia de reconfiguração para sistemas fotovoltaicos sombreados.

Outra sugestão para trabalhos futuros é a integração entre o sistema de reconfiguração e uma técnica de MPPT. Desta forma será possível extrair a máxima potência que o sistema fotovoltaico pode gerar quando submetido a situações de sombreamento.

## 9 REFERÊNCIAS

---

- [1] K. A. Kim and P.T. Krein, "Photovoltaic Hot Spot Analysis for Cells with Various Reverse-Bias Characteristics through Electrical and Thermal Simulation," IEEE 14th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics - COMPEL, 2013, pp. 1-8.
- [2] Quan Li and Wolfs P., "A Review of the Single Phase Photovoltaic Module Integrated Converter Topologies with Three Different DC Link Configurations," IEEE Transaction on Power Electronics, 2008, pp. 1320-33.
- [3] K.S. Parlak, "A New Reconfiguration Method for PV Array System," 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society – IECON, 2013, pp. 1478-1483.
- [4] P. Romano et al. "Optimization of Photovoltaic Energy Production through an Efficient Switching Matrix," Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, vol. 1, no. 3, pp. 227-236, 2013.
- [5] N.D. Kaushika and N.K. Gautam, "Energy Yield Simulations of Interconnected Solar PV Arrays," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 18, no. 1, pp. 127–134, 2003.
- [6] Z.M. Salameh and C. Liang, "Optimum Switching Point for Array Reconfiguration Controllers," IEEE 21st Photovoltaic Specialist Conference – 21st PVSEC, Kissimmee, FL, 1990, pp. 971–976.
- [7] Z.M. Salameh and F. Dagher, "The Effect of Electrical Array Reconfiguration on the Performance of a PV-Powered Volumetric Water Pump," IEEE Transaction Energy Conversion, vol. 5, no. 2, pp. 653–658, 1990.
- [8] Y. Auttawaitkul et al., "A Method of Appropriate Electric Array Reconfiguration Management for Photovoltaic Powered Car," IEEE Asia-Pacific Conference Circuits and Systems-APCCAS 98, Chiang, Thailand, pp. 201-204, Nov. 1998.
- [9] G. Velasco, F. Guinjoan and R. Pique, "Grid-connected PV Systems Energy Extraction Improvement by Means of an Electric Array Reconfiguration (EAR) strategy: Operating principle and experimental results," IEEE Power Electronics Specialists Conference – PESC, Barcelona, Spain, 2008, pp. 1983-1988.

- [10] N. Dzung and B. Lehman, "A Reconfigurable Solar Photovoltaic Array under Shadow Conditions," Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition – APEC, Boston, MA, 2008, pp. 980-986.
- [11] N. Dzung and B. Lehman, "An Adaptive Solar Photovoltaic Array Using Model-Based Reconfiguration Algorithm," IEEE Transactions Industrial Electronics, vol. 55, no.7, pp. 2644 – 2654, 2008.
- [12] Yanli Liu, Zhichao Pang and Ze Cheng, "Research on an Adaptive Solar Photovoltaic Array Using Shading Degree Model-based Reconfiguration Algorithm," Chinese Control and Decision Conference - CCDC, 2010, pp. 2356 – 2360.
- [13] M.Z.S. El-Dein, M. Kazerani and M.M.A. Salama, "Optimal Photovoltaic Array Reconfiguration to Reduce Partial Shading Losses," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol.4, no.1, pp. 145 – 153, 2013.
- [14] Ze Cheng et al., "An Adaptive Solar Photovoltaic Array Reconfiguration Method Based on Fuzzy Control," 8th World Congress on Intelligent Control and Automation - WCICA, 2010, pp. 176 – 181.
- [15] P. Wilson, J. Storey and D. Bagnall, "Improved Optimization Strategy for Irradiance Equalization in Dynamic Photovoltaic Arrays," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 6, pp. 2946–2956, 2012.
- [16] Xue Lin et al. "Near-optimal, Dynamic Module Reconfiguration in a Photovoltaic System to Combat Partial Shading Effects," 49th ACM/EDAC/IEEE Design Automation Conference - DAC, 2012, pp. 516 – 521.
- [17] P. dos Santos, E.M. Vicente and E.R. Ribeiro, "Relationship between the Shading Position and the Output Power of a Photovoltaic Panel," Power Electronics Conference - COBEP, Brazilian, 2011, pp. 676–681.
- [18] J. D. Bastidas-Rodriguez, C.A. Ramos-Paja and A.J. Saavedra-Montes, "Reconfiguration Analysis of Photovoltaic Arrays Based on Parameters Estimation," Simulation Modelling Practice and Theory, vol. 35, pp. 50-68, 2013.
- [19] B. Patnaik et al., "Reconfiguration Strategy for Optimization of Solar Photovoltaic Array under Non-uniform Illumination Conditions," 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference - PVSC, 2011. pp. 1859 – 1864.
- [20] B. Patnaik, J. Mohod and S.P. Duttagupta, "Dynamic Loss Comparison Between Fixed-state and Reconfigurable Solar Photovoltaic Array," 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference - PVSC, 2012. pp. 1633 – 1638.

- [21] M. Alahmad et al. "An Adaptive Utility Interactive Photovoltaic System Based on a Flexible Switch Matrix to Optimize Performance in Real-time," *Solar Energy*, vol.86, no. 3, pp. 951-963, March 20123.
- [22] J. Storey, P.R. Wilson and D. Bagnall, "The Optimized-string Dynamic Photovoltaic Array," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 4 , pp. 1768-1776, 2014.
- [23] Hak-Gyun Jeong et al. "Development Of Active Module Considering The Shadow Influence of Photovoltaic System," *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference - VPPC*, 2012, pp. 1362 - 1365.
- [24] P. dos Santos, E.M. Vicente and E.R. Ribeiro, "Reconfiguration Methodology of Shaded Photovoltaic Panels to Maximize the Produced Energy," *Power Electronics Conference - COBEP*, Brazilian, 2011, pp. 700 - 706.
- [25] V. Dio Dio et al., "A New Control System Prototype for the Energy Production Maximization of an Unequally Irradiated PV System," *International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies - EVER 2011 – Monaco*.
- [26] G. Cipriani et al., "Photovoltaic Plant Array Reconfiguration: Design of a New Device," *2014 Ninth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies - EVER*, March 2014, pp. 25-27.
- [27] H.H. Hauf and S. Van. (2010, Sept. 30). Method of Operation and Device for Controlling an Energy Installation with Photovoltaic Modules. U.S. patent appl. 12/773,447. [Online]. Available: <http://www.google.com/patents/US20100250018>
- [28] <http://www.bitronenergy.com> (acesso em Outubro de 2015).
- [29] R. Candela et al., "Reconfiguration Techniques of Partial Shaded PV Systems for the Maximization of Electrical Energy Production," *International Conference on Clean Electrical Power – ICCEP*, 2007, pp.716 - 719.
- [30] H. Obane et al., "PV System with Reconnection to Improve Output under Nonuniform Illumination," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol.2, no. 3, pp. 341 – 347, July 2012.
- [31] L.A.R. Tria, M.T. Escoto and C.M.F. Odulio, "Photovoltaic Array Reconfiguration for Maximum Power Transfer," *2009 IEEE Region 10 Conference - TENCON*, 2009, pp.1 – 6.
- [32] <http://www.navigantresearch.com> (acesso em Fevereiro de 2015).
- [33] R. Demonti, *Processamento da Energia Elétrica Proveniente de Módulos Fotovoltaicos*, tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

- [34] R.F. Coelho, Estudo dos Conversores Buck e Boost Aplicados ao Rastreamento de Máxima Potência de Sistemas Solares Fotovoltaicos, dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.
- [35] L.A. Hecktheuer, Análise das Associações de Módulos Fotovoltaicos, tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.
- [36] <http://www.kyocerasolar.com.br> (acesso em outubro de 2014)
- [37] Z. Pawlak, Rough Sets: Theoretical Aspects of Reasoning About Data, London: Kluwer Academic Publisher, 1991.
- [38] L.L. Tajiri, Proposição de um Controlador Digital para um Conversor Buck Usando a Teoria de Conjuntos Aproximados, dissertação de mestrado, Universidade Federal de Itajubá, 2009.
- [39] J. Komorowski et al., “Rough Sets: a Tutorial, em Rough Fuzzy Hybridization: A New Trend in Decision-making”, S. K. Pal e A. Skowron, eds, Springer-Verlag, Singapore, 1999.
- [40] J.E. Cabral, Detecção de Fraudes em Unidades Consumidoras de Energia Elétrica Usando Rough Sets. Campo Grande, dissertação de mestrado, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, 2005.
- [41] R.J. Sassi, “Aplicação dos Conceitos da Teoria dos Conjuntos Aproximados no Tratamento da Indiscernibilidade,” *Exacta - Universidade Nove de Julho*, vol. 8, no. 1, pp. 89-98, 2010.
- [42] A. Øhrn and J. Komorowski, “ROSETTA: A Rough Set Toolkit for Analysis of Data,” *Proceeding of the Third International Joint Conference on Information Sciences*, 1997.
- [43] A. Luque and S. Hegedus, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, 2<sup>a</sup> ed., John Wiley & Sons, 2011, p. 1166.
- [44] Datasheet INA193 - current shunt monitor:  
<http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/87031/BURR-BROWN/INA193.html> (acesso em março de 2014)
- [45] R. Faranda and S. Leva, “Energy Comparison of MPPT Techniques for PV Systems,” *WSEAS Transactions on Power Systems*, vol. 3, no. 6, pp. 446-455, June 2008.