

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

DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS FOTOVOLTAICOS A PARTIR DE ENSAIOS  
DE CURVAS CARACTERÍSTICAS SEM ILUMINAÇÃO

por

Alexandre José Bühler

Dissertação para obtenção do Título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Março de 2007

DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS FOTOVOLTAICOS A PARTIR DE ENSAIOS  
DE CURVAS CARACTERÍSTICAS SEM ILUMINAÇÃO

por

Alexandre José Bühler

Licenciado em Física

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

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Energia

Orientador: Prof. Dr. Arno Krenzinger

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Manuel Cid Sánchez - USP

Prof. Dr. Yeddo Braga Blauth – DELET-UFRGS

Prof. Dr. Alexandre Beluco - PROMEC

Prof. Dr. Flávio J. Lorini  
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 28 de Março de 2007

*Para Antonio e Valdete*  
*Cristiane e Ana Paula*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor Arno Krenzinger pela orientação nesta dissertação e pela paciência a mim dedicada ao longo desses anos.

A César pelo imprescindível auxílio na parte de instrumentação do laboratório e pelas questões filosóficas.

A todo o pessoal do Laboratório de Energia Solar da UFRGS em especial a Luis pelas aulas de espanhol e a Gemma pelo companheirismo.

Aos meus pais por todo o apoio e carinho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

A Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e à ELETROBRÁS.

A todos os que de alguma forma contribuíram para a elaboração deste trabalho.

## RESUMO

Com o crescente aumento na demanda de sistemas fotovoltaicos no mundo, torna-se cada vez mais importante uma correta e eficaz caracterização de módulos fotovoltaicos. A caracterização elétrica de tais dispositivos fotovoltaicos passa pela determinação da curva  $I$ - $V$  na condição padrão e por outros parâmetros, que permitem qualificar o módulo e avaliar seu desempenho em diferentes condições de operação. Entre estes parâmetros estão a resistência série ( $R_S$ ), resistência paralela ( $R_P$ ), corrente de saturação reversa ( $I_0$ ) e o fator de idealidade do diodo ( $m$ ). Convencionalmente a determinação destes parâmetros exige vários ensaios sob iluminação natural o que torna os procedimentos extremamente dependentes das condições climáticas. Por outro lado, para a correção das curvas  $I$ - $V$  medidas em diferentes condições para a condição padrão de ensaio é necessária a determinação de coeficientes que descrevem a variação da corrente de curto-circuito e da tensão de circuito aberto com a temperatura, respectivamente ( $\alpha$ ) e ( $\beta$ ). Para obter estes coeficientes são necessários muitos ensaios com o módulo fotovoltaico sob a luz solar, sendo que vários parâmetros atuam simultaneamente, o que dificulta o isolamento da influência de cada um. Trabalhando com as equações que regem o comportamento de um gerador fotovoltaico, é possível verificar que esses parâmetros, com exceção de  $\alpha$ , podem ser determinados a partir de ensaios sem iluminação. Este trabalho apresenta os resultados da pesquisa realizada no Laboratório de Energia Solar da UFRGS para a determinação de  $I_0$ ,  $m$  e  $R_S$  para módulos fotovoltaicos de silício cristalino, além do coeficiente de variação da tensão de circuito aberto com a temperatura ( $\beta$ ), obtidos através de curvas características no escuro. Os resultados obtidos para a determinação de  $\beta$  foram comparados com ensaios sob iluminação natural, apresentando boa concordância com os mesmos. Os parâmetros encontrados a partir da análise de curvas  $I$ - $V$  sem iluminação foram usados para a elaboração de curvas teóricas segundo o modelo exponencial de um diodo. Posteriormente essas curvas teóricas foram então superpostas a outras determinadas sob iluminação natural e a concordância pode ser considerada muito boa. Foi também realizada uma comparação do método aqui utilizado para a determinação da resistência série com a metodologia proposta pela norma ABNT e com o “método da pendente” de maneira que foi possível verificar a eficácia e confiabilidade do método proposto.

## ABSTRACT

### DETERMINATION OF PHOTOVOLTAIC PARAMETERS FROM DARK CHARACTERISTIC CURVES

The number of photovoltaic solar energy installations is increasing for different applications in the world. Thus, it is very important to completely and accurately characterize the photovoltaic (PV) modules. In order to determine the electrical performance of a photovoltaic module, it is indispensable to determine the current-voltage characteristic curve ( $I$ - $V$ ), as well as to find the parameters required to transpose this curve to any climatic condition. Usually the determination of these parameters, such as series resistance ( $R_S$ ), shunt resistance ( $R_P$ ), reverse saturation current ( $I_0$ ) and diode ideality factor ( $m$ ), require several tests under natural sunlight which makes this determination very dependent of the meteorological conditions. Moreover to transpose the  $I$ - $V$  curve from different temperatures conditions it is necessary the determination of the temperature coefficients of current ( $\alpha$ ) and voltage ( $\beta$ ). To determinate these coefficients, many tests are also necessary with the photovoltaic module under the solar radiation, where several coefficients and parameters act simultaneously which makes difficult the isolation of the influence of each one. Analyzing the equations that govern the electrical behavior of a PV module, it is possible to verify that some of these parameters and coefficients can be obtained from  $I$ - $V$  curves measured under dark conditions. This work presents the results from the research developed in the Laboratório de Energia Solar of the Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) for the determination of  $I_0$ ,  $m$  and  $R_S$  for crystalline silicon modules and the determination of coefficient  $\beta$  from characteristic curves measured in dark conditions. The values for  $\beta$  obtained through dark measurements were compared with tests under solar radiation. The parameters determined from the study of dark  $I$ - $V$  curves were used to plot theoretical  $I$ - $V$  curves according to the one-diode model. Furthermore the  $I$ - $V$  curves measured under solar radiation were compared to theoretical curves elaborated with the determined parameters resulting very good agreement. In this work the methods, proposed and the ABNT method, to determination of the series resistance, were compared in order to improve the proposed method of this work.

## ÍNDICE

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1.	OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO.....	4
1.2.	ESCOPO DA DISSERTAÇÃO.....	4
<b>2.</b>	<b>GERADORES FOTOVOLTAICOS.....</b>	<b>6</b>
2.1.	EFEITO FOTOELÉTRICOOBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO.....	6
2.2.	EFEITO FOTOVOLTAICO.....	7
2.3.	CÉLULAS FOTOVOLTAICAS.....	10
2.3.1.	CORRENTE DE UM DIODO NO ESCURO.....	11
2.4.	TECNOLOGIAS DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS.....	13
2.4.1.	SILÍCIO MONOCRISTALINO.....	14
2.4.2.	SILÍCIO MULTICRISTALINO.....	14
2.4.3.	SILÍCIO AMORFO HIDROGENADO.....	14
2.4.4.	TELURETO DE CÁDMIO (CdTe).....	15
2.4.5.	DISSELENETO DE COBRE GÁLIO E ÍNDIO (CIS e CIGS).....	15
2.5.	FATORES QUE INFLUENCIAM NA EFICIÊNCIA DE UMA CÉLULA DE SILÍCIO.....	15
2.5.1.	SELETIVIDADE DE ABSORÇÃO DA CÉLULA.....	16
2.5.2.	PROCEDIMENTOS DE FABRICAÇÃO.....	17
2.6.	MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....	17
2.7.	CIRCUITOS EQUIVALENTES.....	19
2.7.1.	MODELO DE 1 DIODO.....	19
2.7.2.	MODELO DE 2 DIODOS.....	21
2.7.3.	MODELO DE 2 DIODOS MODIFICADO.....	22
2.8.	CURVA CARACTERÍSTICA $I$ - $V$ .....	22
2.9.	INFLUÊNCIA DA IRRADIÂNCIA NA CURVA $I$ - $V$ .....	23
2.10.	INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA CURVA $I$ - $V$ .....	24
2.11.	EFEITO DOS PARÂMETROS FOTOVOLTAICOS NA CURVA $I$ - $V$ .....	26
2.11.1.	RESISTÊNCIA SÉRIE.....	26
2.11.2.	RESISTÊNCIA PARALELA.....	27
2.11.3.	FATOR DE IDEALIDADE.....	27
2.11.4.	CORRENTE DE SATURAÇÃO REVERSA.....	28

<b>3.</b>	<b>DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS – MÉTODOS CONVENCIONAIS.....</b>	<b>30</b>
3.1.	DETERMINAÇÃO DA CURVA $I$ - $V$ .....	30
3.2	DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES TÉRMICOS $\alpha$ E $\beta$ .....	32
3.3	DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA SÉRIE.....	33
3.3.1.	MÉTODO PROPOSTO PELA NORMA ABNT.....	33
3.3.2.	MÉTODO DA PENDENTE.....	35
<b>4.</b>	<b>CURVA CARACTERÍSTICA <math>I</math>-<math>V</math> SEM ILUMINAÇÃO.....</b>	<b>36</b>
4.1.	CIRCUITO EQUIVALENTE DE UM MÓDULO NO ESCURO.....	38
4.2.	MÉTODO PROPOSTO PARA A DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA SÉRIE... ..	38
4.3.	MÉTODO PROPOSTO PARA A DETERMINAÇÃO DA CORRENTE DE SATURAÇÃO REVERSA E DO FATOR DE IDEALIDADE DO DIODO.....	42
4.4.	MÉTODO PROPOSTO PARA A DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TENSÃO DE CIRCUITO ABERTO COM A TEMPERATURA.....	44
<b>5.</b>	<b>PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>47</b>
5.1.	EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA AQUISIÇÃO DAS CURVAS $I$ - $V$ .....	48
5.2.	DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA SÉRIE.....	50
5.3.	DETERMINAÇÃO DA CORRENTE DE SATURAÇÃO REVERSA E DO FATOR DE IDEALIDADE DO DIODO.....	55
5.4.	DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TENSÃO DE CIRCUITO ABERTO COM A TEMPERATURA.....	57
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>66</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>68</b>
	<b>TRABALHOS PUBLICADOS DURANTE A DISSERTAÇÃO.....</b>	<b>72</b>



## LISTA DE SÍMBOLOS

SÍMBOLO	UNIDADE
$a$ Constante relativa à variação da energia do <i>gap</i> com a temperatura.....	[ - ]
$A$ Constante relativa à variação da corrente de saturação reversa com a temperatura.....	[ - ]
$AM$ Massa de ar.....	[ - ]
$b$ Constante relativa à variação da energia do <i>gap</i> com a temperatura.....	[ - ]
$e$ Carga do elétron.....	[C]
$E$ Energia.....	[eV]
$E_g(0)$ Energia do <i>gap</i> de referência.....	[eV]
$E_g(T)$ Energia do <i>gap</i> a uma dada temperatura.....	[eV]
$G$ Irradiância.....	[W/m <sup>2</sup> ]
$h$ Constante de Planck.....	[J.s]
$I$ Corrente elétrica.....	[A]
$I_0$ Corrente de saturação reversa.....	[A]
$I_{01}$ Corrente de saturação reversa relativa ao fenômeno de difusão.....	[A]
$I_{02}$ Corrente de saturação reversa relativa ao fenômeno de recombinação.....	[A]
$I_{B0}$ Corrente elétrica devida ao movimento de lacunas geradas por efeito térmico, em polarização reversa.....	[A]

$I_{CR}$	Corrente de curto-circuito na célula de referência sob irradiância qualquer...	[A]
$I_D$	Corrente através do diodo.....	[A]
$I_{DB}$	Corrente elétrica devida ao movimento de elétrons, por difusão, do lado N para o lado P em um diodo.....	[A]
$I_{DE}$	Corrente elétrica devida ao movimento de lacunas, por difusão, do lado P para o lado N em um diodo.....	[A]
$I_{DT}$	Corrente elétrica devida à recombinação de elétrons e lacunas na região de depleção em uma junção PN.....	[A]
$I_e$	Corrente elétrica injetada sem iluminação.....	[A]
$I_{E0}$	Corrente elétrica devida ao movimento de elétron gerados por efeito térmico em polarização reversa.....	[A]
$I_{fg}$	Corrente fotogerada.....	[A]
$I_M$	Corrente de máxima potência.....	[A]
$I_{MR}$	Corrente de curto-circuito medida na célula de referência.....	[A]
$I_P$	Corrente através da resistência paralela.....	[A]
$I_{SC}$	Corrente de curto-circuito.....	[A]
$I_{T0}$	Corrente elétrica devida ao movimento de pares elétron-lacuna gerados por efeito térmico na região de depleção, em polarização reversa.....	[A]
$k$	Fator de correção da curva $I$ - $V$ .....	[V/°C.A]
$k_B$	Constante de Boltzmann.....	[J/K]

$m$	Fator de idealidade do diodo.....	[ - ]
$m_R$	Fator de idealidade do diodo ajustável ao fenômeno de recombinação.....	[ - ]
$N_P$	Número de células em paralelo.....	[ - ]
$N_S$	Número de células em série.....	[ - ]
$p$	Coeficiente linear da reta tangente à curva $V-I$ junto no ponto de tensão de circuito aberto.....	[ $\Omega$ ]
$P_M$	Ponto de máxima potência.....	[W]
$q$	Coeficiente angular da reta tangente à curva $V-I$ junto no ponto de tensão de circuito aberto.....	[ $\Omega$ ]
$R_P$	Resistência paralela.....	[ $\Omega$ ]
$R_S$	Resistência série.....	[ $\Omega$ ]
$T$	Temperatura.....	[°C, K]
$V$	Tensão.....	[V]
$V_1, I_1$	Coordenadas dos pontos da curva característica medida.....	[V] [A]
$V_2, I_2$	Coordenadas dos pontos da curva característica corrigida.....	[V] [A]
$V_e$	Tensão de um dispositivo fotovoltaico sem iluminação.....	[V]
$V_{OC}$	Tensão de circuito aberto.....	[V]
$V_M$	Tensão de máxima potência.....	[V]

$V_T$	Tensão térmica.....	$\frac{N_s m k_B T}{e}$
-------	---------------------	-------------------------

## LETRAS GREGAS

## UNIDADE

$\alpha$	Coeficiente de variação da corrente de curto-circuito com a temperatura para um módulo.....	[A/°C]
$\alpha_c$	Coeficiente de variação da corrente de curto-circuito com a temperatura para uma célula.....	[A/°C]
$\beta$	Coeficiente de variação da tensão de circuito aberto com a temperatura de um módulo.....	[V/°C]
$\beta_c$	Coeficiente de variação da tensão de circuito aberto com a temperatura para uma célula.....	[V/°C]
$\beta_e$	Coeficiente de variação da tensão de circuito aberto com a temperatura obtido através de ensaio no escuro.....	[V/°C]
$\Delta I$	Diferença de corrente.....	[A]
$\Delta V$	Diferença de tensão.....	[V]
$\phi$	Função trabalho.....	[eV]
$\nu$	Frequência.....	[Hz]
$\gamma$	Coeficiente de variação da potência com a temperatura.....	[W/°C]

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Representação dos níveis de energia em um semicondutor.....	8
Figura 2.2	Representação de uma junção PN.....	9
Figura 2.3	Representação de uma célula fotovoltaica de silício.....	10
Figura 2.4	Componentes internas da corrente de um diodo no escuro em polarização (a) direta e (b) reversa.....	11
Figura 2.5	Curva semilogarítmica $I$ - $V$ de uma célula de silício monocristalino descrita por duas exponenciais e retas tangentes correspondentes aos fatores de idealidade iguais a 1 e 2.....	13
Figura 2.6	Definição de massa de ar ( <i>air mass</i> ) (AM).....	16
Figura 2.7	Espectro solar e resposta espectral do silício (Hecktheuer, 2001).....	17
Figura 2.8	Corte de um módulo fotovoltaico (adaptado de catálogo Siemens, 1996).....	18
Figura 2.9	Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica – modelo de 1 diodo.....	19
Figura 2.10	Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica – modelo de 2 diodos.....	21
Figura 2.11	Curva característica ( $I$ - $V$ ) e curva de potência <i>versus</i> tensão de um módulo (m-Si, 72 células) com 100 W de potência e 24 de tensão nominal.....	23
Figura 2.12	Curvas $I$ - $V$ de um módulo de silício de 72 células a diferentes irradiâncias.....	24
Figura 2.13	Curvas $I$ - $V$ de um módulo de silício monocristalino de 72 células determinadas a diferentes temperaturas e a 1000 W/m <sup>2</sup> de irradiância.....	25

Figura 2.14	Efeito da variação da resistência série na curva $I$ - $V$ de um módulo de silício de 72 células.....	26
Figura 2.15	Efeito da variação da resistência paralela na curva $I$ - $V$ de um módulo de silício de 72 células.....	27
Figura 2.16	Efeito da variação do fator de idealidade na curva $I$ - $V$ de um módulo de silício de 72 células.....	28
Figura 3.1	Representação do método proposto para a determinação de $R_S$ pela norma NBR – 12136.....	34
Figura 4.1	Representação da corrente fotogerada (a) curva $I$ - $V$ de um diodo no escuro (b) e da diferença das duas curvas (c).....	36
Figura 4.2	Curvas $I$ - $V$ de um módulo fotovoltaico de 72 células de silício monocristalino com e sem iluminação.....	37
Figura 4.3	Superposição das curvas determinadas com e sem iluminação apresentadas na Figura 4.2.....	37
Figura 4.4	Circuito elétrico equivalente de uma célula no escuro e com corrente injetada.....	38
Figura 4.5	Representação do fluxo de corrente elétrica injetada em uma célula no escuro.....	40
Figura 4.6	Representação do fluxo de corrente elétrica em uma célula iluminada.....	41
Figura 4.7	Ilustração de um método proposto por Aberle <i>et al.</i> (1993) para determinação de $R_S$ considerando os mecanismos físicos que ocorrem com o módulo iluminado.....	42

Figura 4.8	Curva $I$ - $V$ no escuro e $\ln(I)$ versus $V$ com quatro diferentes regiões de tensão influenciadas por: $R_p$ , processo de difusão, recombinação e $R_s$ .....	43
Figura 4.9	Curvas $I$ - $V$ de um módulo de silício monocristalino de 33 células determinadas sem iluminação e a diferentes temperaturas.....	45
Figura 5.1	Aspecto do ensaio de módulos sob iluminação natural.....	47
Figura 5.2	Equipamentos utilizados no ensaio de um módulo sem iluminação.....	48
Figura 5.3	Equipamento utilizado para o ensaio de módulos fotovoltaicos.....	49
Figura 5.4	Valores de $R_s$ determinados para dois módulos de diferentes configurações através do método proposto, do método da pendente e da norma.....	52
Figura 5.5	Curvas características de um módulo de 36 células (m-Si) determinadas sob iluminação natural com resistores acrescentados em série.....	53
Figura 5.6	Curvas características do mesmo módulo da Figura 5.5 determinadas sob ausência de iluminação com os mesmo resistores acrescentados em série.....	53
Figura 5.7	Valores determinados de $R_s$ para um módulo (m-Si) de 100 W de potência e 24 V de tensão nominal através do incremento de resistores em série.....	54
Figura 5.8	Figura 5.8 – Relação entre o incremento de $R_s$ medido e as resistências em série acrescentadas.....	55
Figura 5.9	Curvas determinadas a partir de ensaio sem iluminação a 33,2 °C.....	56
Figura 5.10	Pontos medidos de $\ln(I_0)$ e $m$ para diferentes temperaturas de um módulo de 100 W de silício monocristalino.....	57
Figura 5.11	Pontos medidos e calculados para um módulo de silício monocristalino de 100 W de potência e 24 V de tensão nominal na temperatura de 49,8 °C.....	58

Figura 5.12	Curvas determinadas a partir de ensaio sem iluminação a 18 °C.....	59
Figura 5.13	Pontos medidos de $\ln(I_0)$ e $m$ para diferentes temperaturas de um módulo de 50 W de silício monocristalino.....	60
Figura 5.14	Pontos medidos e calculados para um módulo de silício monocristalino de 50 W de potência e 12 V de tensão nominal na temperatura de 32 °C.....	61
Figura 5.15	Variação de $V_{OC}$ com a temperatura (ensaio com e sem iluminação) e variação da irradiância ao longo do ensaio com o módulo iluminado.....	64



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1	Energia do <i>gap</i> para diferentes semicondutores.....	8
Tabela 2.2	Energia do <i>gap</i> para <i>Si</i> e <i>GaAs</i> com os valores das constantes <i>a</i> e <i>b</i> da Equação (2.10).....	25
Tabela 5.1	Exatidão dos equipamentos de medida.....	50
Tabela 5.2	Valores encontrados para a resistência série para diferentes módulos de silício utilizando o método proposto neste trabalho.....	51
Tabela 5.3	Valores determinados de $\beta$ , medidos e corrigidos, para ensaios com e sem iluminação.....	64

## 1. INTRODUÇÃO

Desde os tempos mais remotos até os presentes dias as diferentes formas de energia têm exercido um papel crucial para a existência da humanidade, seja para o aquecimento das casas, produção e conservação de alimentos e medicamentos ou mesmo o transporte de carga e de pessoas. Pode-se afirmar, sem exagero, que o homem tornou-se extremamente dependente da energia nas suas diferentes formas, mas principalmente da eletricidade.

É tamanha a importância que a energia elétrica tem para a sociedade de hoje que chega a ser quase impossível imaginar a vida sem o conforto, a higiene e a saúde entre tantos outros benefícios que ela nos proporciona.

Porém, num contexto social de tamanha dependência do mundo moderno para com a energia elétrica, há ainda no mundo cerca de 40% da população que não tem acesso a esse bem. No Brasil cerca de 12 milhões de pessoas não tem acesso a nenhuma alternativa de suprimento de energia elétrica, sendo 10 milhões na área rural, [Tolmasquim, 2004]. Para muitas dessas pessoas a dificuldade no suprimento da energia elétrica consiste no fato de que estas pessoas vivem em lugares remotos, demasiadamente longe das concessionárias, o que torna esse processo muito caro ou mesmo inviável segundo as formas convencionais de geração de energia.

Felizmente este cenário está mudando. Com a instalação do programa Luz Para Todos está previsto que a energia elétrica será levada para todos os brasileiros até 2008 e para tanto as fontes de energia alternativas e descentralizadas terão importante papel. Por outro, ganha cada vez mais importância no mundo toda a crescente preocupação com a poluição e os impactos ambientais gerados pelo consumo excessivo dos combustíveis fósseis e pelas fontes convencionais de energia.

As usinas hidroelétricas, que são de longe a maior fonte geradora de energia elétrica no Brasil, apresentam o grande problema referente aos impactos ambientais inerentes à sua instalação. Mesmo com o advento das pequenas centrais hidrelétricas, o impacto ambiental e mesmo social causado nas localidades próximas a essas usinas é inevitável. É fato que o Brasil possui um potencial fantástico para a produção de energia elétrica a partir dos recursos hídricos, mas é importante repensar todas as mudanças no ecossistema causadas pelo intenso uso desse recurso.

As usinas nucleares apresentam o grande problema do resíduo nuclear, bem como a constante preocupação com a possibilidade de um acidente, que mesmo considerada remota por especialistas no assunto, gera forte preocupação no mundo quando da instalação de novas usinas.

É neste cenário que a energia solar fotovoltaica vem ganhando cada vez mais espaço no mundo inteiro. A indústria de células fotovoltaicas vem experimentando um crescimento anual de 25% ao longo dos últimos anos, expandido-se também para sistemas isolados mas principalmente para sistemas conectados à rede elétrica [Tolmasquim, 2004]. Embora a tecnologia fotovoltaica ainda apresente preços elevados, o que representa um forte empecilho para sua expansão, principalmente quanto ao uso doméstico, especialistas afirmam que a tecnologia dos filmes finos poderá levar em um futuro próximo a um custo consideravelmente inferior ao atual.

Fica, então, claro que se torna cada vez mais importante uma correta e eficaz caracterização do desempenho de módulos fotovoltaicos, tanto em ensaios de resistência mecânica como de características elétricas.

Para a análise do desempenho elétrico de um módulo fotovoltaico é imprescindível a determinação da curva ( $I$ - $V$ ) de corrente e tensão denominada curva característica. Através desta curva é possível obter importantes informações sobre as características elétricas do gerador fotovoltaico como a corrente de curto circuito ( $I_{SC}$ ), a tensão de circuito aberto ( $V_{OC}$ ) e o ponto de máxima potência ( $P_M$ ). A determinação desta curva, segundo a norma NBR – 12136 [ABNT, 1991a], deve ser realizada dentro de condições específicas de temperatura e irradiação denominada condição padrão de ensaio ( $G = 1000 \text{ W/m}^2$ ,  $AM = 1,5$  e  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Fora da condição padrão, que muitas vezes é difícil de ser obtida, a curva precisa ser corrigida e aí se faz necessário o conhecimento dos coeficientes térmicos ( $\alpha$ ) e ( $\beta$ ) que correspondem à variação da corrente de curto circuito e da tensão de circuito aberto com a temperatura respectivamente. Além destes coeficientes também existem parâmetros que fornecem importantes informações sobre o desempenho elétrico e a qualidade do gerador elétrico fotovoltaico. Dentre esses parâmetros citam-se a resistência série ( $R_S$ ), resistência paralela ( $R_P$ ), fator de idealidade do diodo ( $m$ ), e corrente de saturação reversa do diodo ( $I_0$ ).

A determinação destes parâmetros muitas vezes exige inúmeros ensaios com iluminação natural e temperatura controlada e como muitos parâmetros atuam simultaneamente, torna-se difícil o isolamento da influência de cada um. No entanto é possível verificar que o comportamento de uma célula e por consequência de um módulo fotovoltaico é muito similar em condições de ausência de iluminação do que em condições de iluminação natural. Dessa forma, ensaios no escuro passam a ser uma interessante alternativa para a determinação de diversos parâmetros fotovoltaicos [Kaminski, 1997].

Muitos ensaios destinados à caracterização de propriedades elétricas em módulos dependem da não variação de parâmetros externos, como intensidade luminosa e velocidade do vento entre outros. Essa invariância ao longo dos ensaios muitas vezes é difícil de ser obtida, além do que freqüentemente se faz necessário repetir as condições de ensaio em diferentes dias.

Experimentos para caracterização de propriedades elétricas em módulos fotovoltaicos sem iluminação têm sido utilizados por diversos laboratórios do mundo por apresentarem importantes vantagens perante medidas sob iluminação natural, das quais a principal sem dúvida é a não dependência das condições climáticas. Os laboratórios Sandia, por exemplo, vem desenvolvendo pesquisas com ensaios no escuro para caracterizar módulos fotovoltaicos e utilizando esses ensaios para detectar defeitos de fabricação nos módulos [King *et al.*, 1997a]. Outra vantagem importante das medidas no escuro é a possibilidade de medição de um conjunto de módulos com melhor controle de temperatura do que na exposição à luz.

Medir a curva característica de um conjunto de módulos sob exposição à luz apresenta sérias dificuldades quanto ao controle da temperatura. Por outro lado, medições que dependam da variação de temperatura em um módulo ou célula precisam de um bom isolamento térmico, uma vez que isto influencia fortemente os resultados [King *et al.*, 1997b].

Por fim, cabe ressaltar que embora muitos pesquisadores defendam o uso de simuladores solares como uma alternativa para diminuir a dependência das condições climáticas nos ensaios de desempenho elétrico dos módulos. Tais simuladores apresentam um custo consideravelmente elevado e apresentam sérias limitações quando comparados com a luz solar. Por melhor que seja o simulador solar persiste a questão do espectro não ser igual ao da luz solar, além da questão da uniformidade da iluminação. Tais fatores podem ser determinantes para que uma curva  $I-V$  determinada sob iluminação artificial não seja a mesma do que aquela determinada sob iluminação natural [Vera *et al.*, 2006a]. Daí reside o interesse no estudo das curvas características determinadas sem iluminação e utilizadas como ferramenta para a obtenção de parâmetros e coeficientes fotovoltaicos.

Por fim, cabe ressaltar, como exemplo da importância que tem a determinação desses parâmetros fotovoltaicos, que a resistência série afeta o fator de forma da curva ( $I-V$ ) podendo causar considerável diminuição no ponto de máxima potência. O fator de forma anteriormente citado refere-se ao produto da tensão pela corrente (relativas à máxima potência) dividido pelo produto da tensão de circuito aberto pela corrente de curto circuito. O fator de forma é um importante avaliador do desempenho elétrico do módulo estando diretamente associado ao formato da curva  $I-V$ .

## 1.1. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

Os objetivos desta dissertação são sucintamente apresentados a seguir:

- Analisar as diferenças existentes entre curvas características  $I$ - $V$  determinadas com e sem iluminação.
- Determinar o coeficiente de variação da tensão de circuito aberto com a temperatura ( $\beta$ ) a partir de ensaios sem iluminação.
- Comparar os resultados obtidos na determinação de  $\beta$  a partir dos ensaios com o método aqui proposto e com o método convencional.
- Propor um método através do qual seja possível a determinação dos seguintes parâmetros fotovoltaicos: resistência série, corrente de saturação reversa e fator de idealidade do diodo também a partir de curvas características no escuro.
- Verificar a aplicabilidade destes parâmetros na equação que descreve o comportamento elétrico de um módulo fotovoltaico.
- Comparar os resultados obtidos na determinação da resistência série com a metodologia proposta pela norma ABNT e pelo método da pendente.

## 1.2. ESCOPO DA DISSERTAÇÃO

A fim de apresentar adequadamente o desenvolvimento realizado, a presente dissertação foi subdividida em seis capítulos descritos a seguir:

No capítulo 1 é apresentada a importância da determinação de parâmetros fotovoltaicos na qualificação de módulos fotovoltaicos.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão sobre o mecanismo de funcionamento de uma célula fotovoltaica bem como dos circuitos elétricos equivalentes e da influência dos parâmetros fotovoltaicos na curva  $I$ - $V$  de um módulo.

No capítulo 3 é apresentada uma revisão sobre alguns métodos convencionais para a determinação de coeficientes e parâmetros fotovoltaicos.

No capítulo 4 são apresentados os métodos utilizados neste trabalho para a determinação do coeficiente da variação da tensão de circuito aberto com a temperatura, resistência série, fator de idealidade do diodo e corrente de saturação reversa a partir de curvas características determinadas sem iluminação.

No capítulo 5 são apresentados os procedimentos experimentais e resultados obtidos neste trabalho.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões e considerações finais.

## 2. GERADORES FOTOVOLTAICOS

### 2.1. EFEITO FOTOELÉTRICO

A descoberta do efeito fotoelétrico se deu por acaso, em 1887 através do físico Heinrich Hertz. Hertz estudava a natureza eletromagnética da luz utilizando duas superfícies metálicas com uma diferença de potencial entre si. Através da produção de descargas elétricas ele verificou que uma descarga em uma superfície gerava uma descarga na outra. Como uma tentativa de melhorar a visualização da segunda descarga, Hertz construiu uma proteção sobre o experimento evitando assim a dispersão da luz. Entretanto o que verificou foi que a intensidade da segunda descarga diminuiu. No decorrer de suas experiências Hertz conclui que o fenômeno de geração da segunda descarga era devido à incidência de luz na superfície metálica.

Um ano depois Hallwachs comprovou haver emissão de elétrons quando a superfície de metais como o zinco, rubídio, potássio e sódio era iluminada. Esses elétrons eram chamados fotoelétrons, tendo-se em vista sua origem. Dessa forma o fenômeno de geração de elétrons a partir da incidência de luz passou a ser chamado de efeito fotoelétrico.

Em 1903, Lenard estudou o efeito fotoelétrico utilizando como fonte luminosa um arco de carbono. Variando a intensidade da luz por um fator 1000, provou que a energia dos elétrons emitidos não apresentava dependência da intensidade da luz. Em 1904, Schweidler mostrou que a energia do elétron era proporcional à frequência da luz incidente.

Em 1905 o físico alemão Albert Einstein desenvolveu uma teoria muito simples e revolucionária para explicar o efeito fotoelétrico. De acordo com sua teoria, a luz pode ser interpretada como partículas denominadas fótons, sem massa, porém portadoras de energia. Um *quantum* de luz transfere toda a sua energia a um único elétron, e isto independe da existência de outros *quanta* de luz. Considerando que um elétron emitido no interior de um metal gasta parte de sua energia para cruzar a superfície, Einstein propôs uma equação, que relaciona a energia do elétron ejetado ( $E$ ) na superfície com a frequência da luz incidente ( $\nu$ ), e com a energia necessária para escapar do material ( $\phi$ ). A Equação (2.1) descreve tal relação:

$$E = h\nu - \phi \quad (2.1)$$

onde  $\phi$  é também chamado de função trabalho, que é uma propriedade do material e  $h$  é a constante de Planck determinada poucos anos antes para explicar o fenômeno da emissão de radiação do corpo negro.

Segundo a teoria de Einstein existe uma frequência mínima para produzir o efeito fotoelétrico no material que está sendo estudado. Abaixo desta frequência, independentemente da intensidade da luz incidente, não há elétron emitido.

No ano de 1921 Albert Einstein recebeu o Prêmio Nobel de Física graças à sua contribuição ao estudo do efeito fotoelétrico. Através do efeito fotoelétrico a teoria corpuscular da luz passou a ser efetivamente aceita sendo posteriormente indispensável para o entendimento do efeito fotovoltaico.

## 2.2. EFEITO FOTOVOLTAICO

O efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez por Becquerel em 1839. No início do século XX, foram descobertas as propriedades do óxido de cobre, onde se observou o fenômeno da conversão direta da energia solar em energia elétrica. Em 1954, no Bell Laboratories, foi fabricada uma célula de silício com uma eficiência da ordem de 6% e um ano depois a companhia americana Western Electric começou a comercializá-las. Com o programa espacial americano, as tecnologias de fabricação de células fotovoltaicas tiveram um grande avanço e a partir de 1958 muitos satélites lançados ao espaço já possuíam módulos fotovoltaicos para seu suprimento de energia elétrica.

O efeito fotovoltaico consiste no surgimento de uma diferença de potencial entre dois materiais semicondutores de propriedades elétricas diferentes devido à incidência de luz na região de junção entre os mesmos. A grande maioria dos dispositivos que fazem uso do efeito fotovoltaico são constituídos de silício nas suas diferentes formas, principalmente na forma de silício multicristalino. Dessa forma o efeito fotovoltaico será explicado para o silício como exemplo, uma vez que nos outros materiais semicondutores o funcionamento é muito semelhante.

Um átomo de silício possui quatro átomos na última camada eletrônica, sendo, portanto, um átomo tetravalente. Quando os átomos de silício se ligam uns aos outros em redes cristalinas, todos os elétrons de valência são usados em ligações do tipo covalente, não restando, a princípio, elétrons responsáveis pela condução eletrônica. Entretanto, um material semicondutor só seria um isolante perfeito a temperatura de 0 K, pois em temperaturas acima desta alguns elétrons absorvem energia térmica e se libertam da estrutura cristalina, passando para a banda de condução como elétrons livres. Nota-se que cada elétron libertado da estrutura cristalina deixa um átomo com uma carga positiva em excesso, que podem ser interpretados como cargas positivas também responsáveis pela condução elétrica. Estas ligações incompletas



são chamadas de lacunas. A energia necessária para que um elétron salte da banda de valência para a de condução é denominada energia do *gap*. A Figura 2.1 mostra uma representação de um semicondutor com suas bandas de valência e condução e a Tabela 2.1 apresenta as energias do *gap* de alguns materiais para temperatura ambiente.



Figura 2.1 - Representação dos níveis de energia em um semicondutor.

Tabela 2.1 - Energia do *gap* para diferentes semicondutores, (Pierret, 1996).

Semicondutor	Energia do <i>gap</i> (eV)
Arsenieto de gálio	1,42
Silício	1,12
Germânio	0,66

A condutividade adquirida devido à temperatura é, no entanto, muito pequena, podendo ser drasticamente aumentada segundo um processo conhecido como dopagem. A dopagem consiste na adição controlada de átomos de elementos com mais ou com menos de quatro elétrons na banda de valência. Como exemplo, se uma amostra de silício for contaminada com átomos de boro, que possuem três elétrons na banda de valência, existirá um elétron a menos na estrutura cristalina para cada átomo de boro acrescentado. Interpretando de outra forma, tal contaminação faria surgir uma carga positiva em excesso para cada átomo de boro. A região na qual seria feita essa inserção de átomos de boro é chamada de região P. Se, por outro lado, fossem acrescentados átomos de um material pentavalente como o fósforo ter-se-ia um

elétron a mais na estrutura cristalina para cada átomo de fósforo inserido. A região na qual seriam acrescentados tais átomos de fósforo passa a ser chamada de região N.

Se uma amostra de silício puro for dopada de um lado com átomos pentavalentes e do outro com átomos trivalentes tem-se então o que é chamado de junção PN. Como de um lado da junção existe um excesso de elétrons e do outro um excesso de lacunas, ocorre uma migração de elétrons do lado N para o lado P e uma migração de lacunas no lado P para o lado N. Esta migração de cargas elétricas gera um campo elétrico que vai aumentando a medida que mais cargas se deslocam para o lado contrário da junção até que o valor desse campo se torne suficientemente forte para contrabalançar a força de atração elétrica que era responsável pela migração das cargas. A região na qual ocorre o acúmulo de íons positivos não neutralizados do lado P e íons negativos não neutralizados do lado N é chamada de região de depleção. A Figura 2.2 ilustra uma junção PN bem como a região de acúmulo de cargas elétricas migradas do lado P para o lado N e vice-versa.

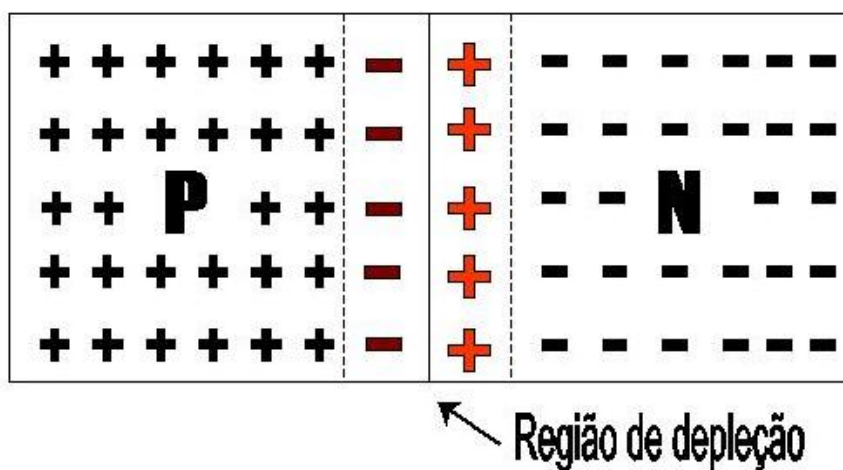


Figura 2.2 - Representação de uma junção PN.

Devido ao campo elétrico gerado na região de depleção, não há diferença de potencial entre as superfícies do lado P e do lado N. Entretanto se a junção for exposta à luz (fótons com energia maior do que o *gap*) ocorrerá a geração de pares elétron-lacuna. Se estes pares elétron-lacuna forem gerados em uma região onde o campo elétrico não é nulo, eles serão acelerados, dando origem a uma corrente através da junção e por sua vez a uma diferença de potencial entre as superfícies das regiões P e N. Este fenômeno é chamado de efeito fotovoltaico. Se as superfícies das regiões P e N forem interconectadas com um condutor, passará a circular uma corrente elétrica que perdurará enquanto a junção permanecer iluminada.

## 2.3. CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

As células fotovoltaicas são os dispositivos conversores de energia radiante em energia elétrica que funcionam segundo o efeito fotovoltaico. Na sua grande maioria, as células usadas em aplicações comerciais podem ser encaradas como diodos de junção PN de grande área. As células fotovoltaicas podem ser divididas quanto à estrutura de ligação dos átomos dos quais são constituídas. Desta forma a estrutura atômica pode ser do tipo cristalina ou do tipo amorfa. A estrutura cristalina pode ser ainda monocristalina ou multicristalina.

Quanto ao material utilizado para a fabricação das células, este pode ser composto por ligas, como sulfeto de cádmio e arsenieto de gálio entre outros ou por apenas um elemento como o silício, germânio ou selênio. Na parte frontal das células é acrescentada uma camada de um material, geralmente  $\text{TiO}_2$  ou  $\text{SiO}_2$ , a fim de minimizar as perdas por reflexão. A Figura 2.3 apresenta uma representação de uma célula de silício típica.

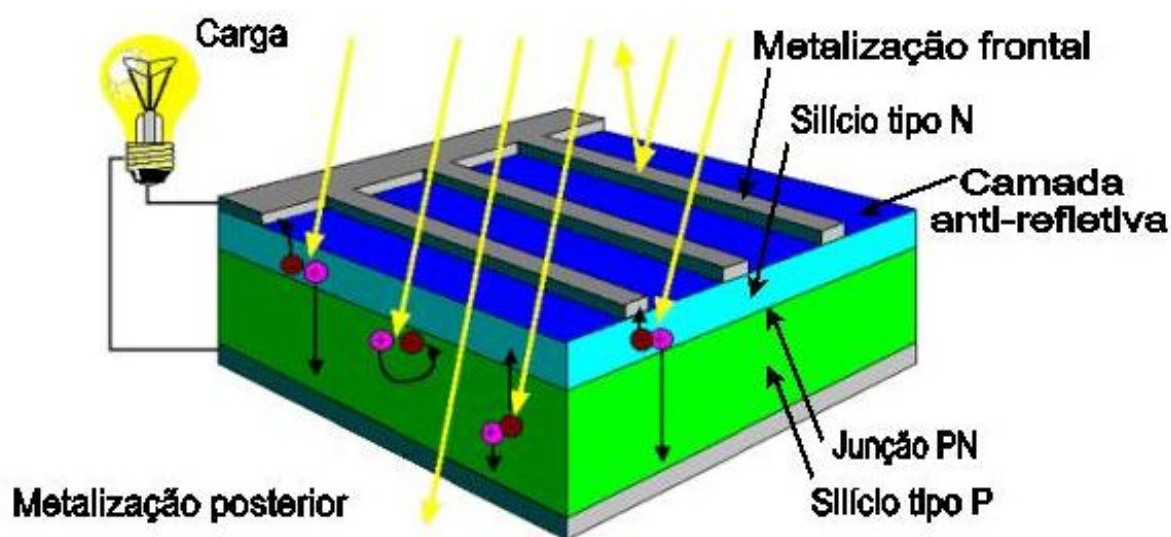


Figura 2.3 - Representação de uma célula fotovoltaica de silício  
(adaptado de CRESESB, 2006).

Normalmente a camada de Silício tipo N tem uma espessura compreendida entre valores da ordem de  $0,3 \mu\text{m}$  até  $1 \mu\text{m}$  enquanto a camada de silício tipo P apresenta uma espessura de aproximadamente  $300 \mu\text{m}$ .

### 2.3.1. CORRENTE DE UM DIODO NO ESCURO

A corrente elétrica que circula através de uma célula fotovoltaica de silício pode ser interpretada como a soma de uma corrente gerada a partir da incidência de radiação luminosa na superfície da célula com uma corrente em sentido contrário e correspondente à de um diodo no escuro. Para tanto será feita nesta seção uma descrição dos fenômenos físicos que ocorrem na corrente elétrica de um diodo no escuro.

Se for aplicada em um diodo uma tensão de polarização direta (positiva do lado P e negativa do lado N) haverá uma diminuição do campo elétrico da junção (também chamado de barreira de potencial). Como consequência dessa diminuição da barreira de potencial haverá uma injeção de portadores minoritários em ambos os lados da região de depleção. Dessa forma elétrons do lado N são injetados para o lado P avançando principalmente por difusão e desaparecendo em seguida devido à recombinação com as lacunas do lado P. Essa corrente é denominada  $I_{DB}$  e constitui parte da corrente do diodo. De forma análoga, as lacunas que avançam por difusão do lado P para o lado N sendo então “recombinadas” com elétrons dão origem a uma corrente denominada  $I_{DE}$ . Existe ainda um último componente de corrente que é devido à recombinação de elétrons e lacunas na região de depleção denominada  $I_{DT}$ . Dessa forma a corrente do diodo é a soma algébrica dessas três componentes de corrente, assim como representado na Figura 2.4(a). É conveniente ressaltar que o sentido das corrente elétricas apresentadas na Figura 2.4 leva em conta o sentido convencional de corrente, ou seja, o de avanço das cargas positivas.

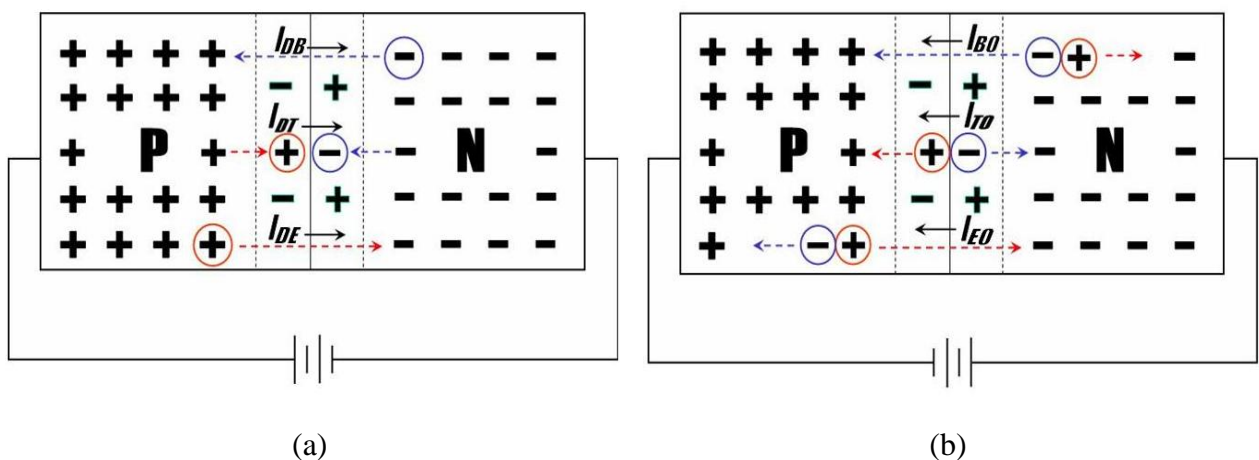


Figura 2.4 – Componentes internas da corrente de um diodo no escuro em polarização

(a) direta e (b) reversa.

Em uma outra situação, se for aplicada uma tensão de polarização reversa nos terminais de um diodo haverá um aumento da barreira de potencial e como consequência uma diminuição dos portadores minoritários em ambos os lados da região de depleção. Entretanto pares elétron-lacuna serão gerados por efeito térmico dando origem então a uma corrente devido à ação do campo elétrico da junção. Esta corrente elétrica funciona de forma análoga à corrente elétrica originada por pares elétron-lacuna gerados pela incidência de luz. Dessa forma as correntes devidas à polarização reversa são somadas à corrente fotogerada (no caso de uma célula fotovoltaica), muito embora seu valor possa ser desprezado, uma vez que é muito pequeno quando comparado com a corrente fotogerada. As correntes de polarização reversa são, portanto, correntes que circulam do lado P para o lado N, sendo denominadas  $I_{E0}$ ,  $I_{B0}$  e  $I_{T0}$ .

As componentes de corrente elétrica na região de campo elétrico nulo (zona neutra) ocorrem predominantemente devido ao fenômeno de difusão dos portadores minoritários e seguem uma relação exponencial com a tensão de polarização conhecida como a equação de Shockley para o diodo ideal, tal qual apresentada na Equação (2.2).

$$I_{DE}(V) + I_{DB}(V) = (I_{E0} + I_{B0}) \left[ \exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) - 1 \right] \equiv I_{01} \left[ \exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) - 1 \right] \quad (2.2)$$

onde  $k_B$  é a constante de Boltzmann e  $T$  é a temperatura.

A componente de corrente devido aos fenômenos de geração-recombinação que ocorrem dentro da região de depleção é apresentada na Equação (2.3). Nota-se que embora a relação entre a corrente e a tensão também seja exponencial, esta é distinta da apresentada na Equação (2.2).

$$I_{DT}(E) = I_{T0} \left[ \exp\left(\frac{eV}{2k_B T}\right) - 1 \right] \equiv I_{02} \left[ \exp\left(\frac{eV}{2k_B T}\right) - 1 \right] \quad (2.3)$$

Valores típicos de  $I_{01}$  para uma célula de silício monocristalino, na temperatura ambiente, são da ordem de  $10^{-12}$  A/cm<sup>2</sup> e  $10^{-8}$  A/cm<sup>2</sup> de para  $I_{02}$ . Dessa forma fica fácil comprovar que para tensões baixas (inferiores a 0,4 V para uma célula) a componente de recombinação na região de depleção predomina enquanto que para tensões altas (superiores a 0,4 V para uma célula), próximas às tensões de operação de uma célula, é a componente de difusão que predomina. É comum então, como uma boa aproximação, considerar apenas a componente de difusão para o estudo da corrente elétrica de uma célula. Outra possibilidade é a

adoção de um modelo que considere apenas uma componente de corrente com influência tanto dos processos de difusão quanto de recombinação. Nesse modelo é adicionado um fator de correção denominado fator de idealidade do diodo ( $m$ ). O fator de idealidade tende a 2 para tensões baixas (predomínio do fenômeno de recombinação) e tende a 1 para tensões altas (predomínio do fenômeno de difusão). A Figura 2.5 apresenta uma curva semilogarítmica teórica ( $I$ - $V$ ) para uma célula de silício monocristalino sem iluminação, destacando duas regiões de tensão para os quais o fator de idealidade apresenta valores iguais a 1 e 2.

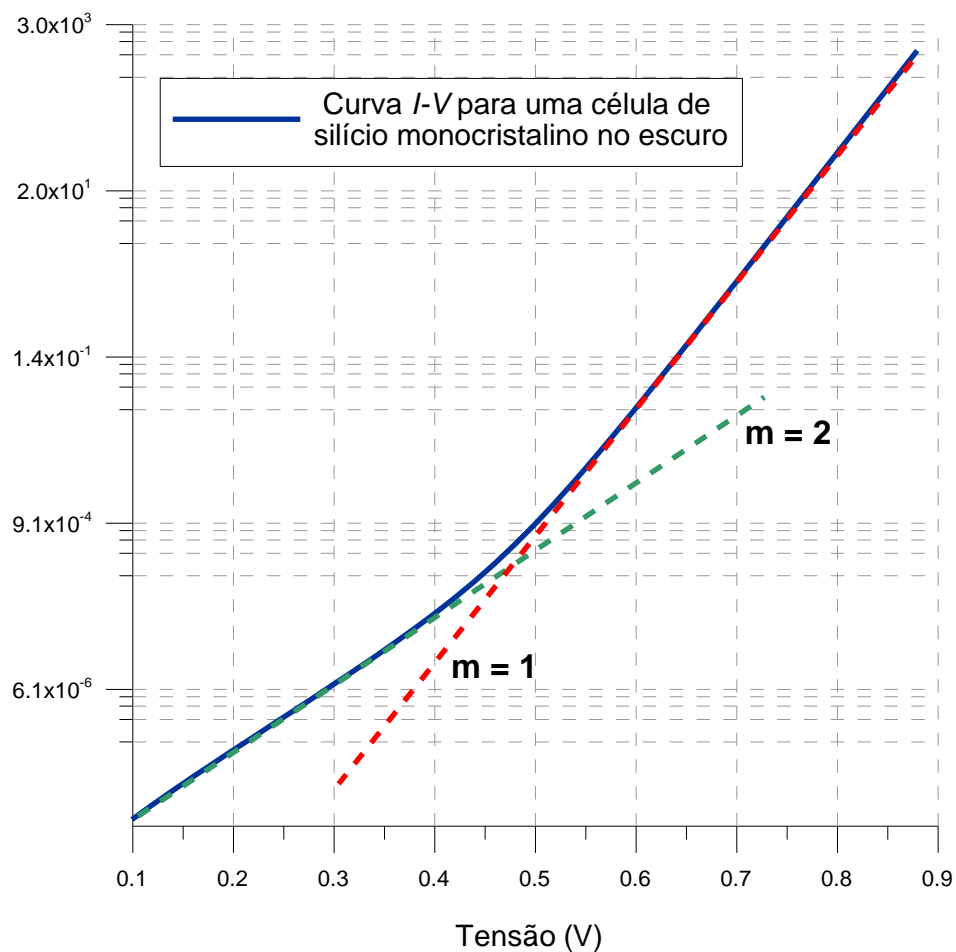


Figura 2.5 – Curva semilogarítmica  $I$ - $V$  de uma célula de silício monocristalino descrita por duas exponenciais e retas tangentes correspondentes aos fatores de idealidade iguais a 1 e 2.

## 2.4. TECNOLOGIAS DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

São apresentadas a seguir, de forma sucinta, as principais tecnologias existentes hoje em termos de células fotovoltaicas de uso comercial.

#### 2.4.1. SILÍCIO MONOCRISTALINO (m-Si)

O silício monocristalino é basicamente o mesmo material utilizado na fabricação de diodos de junção e circuitos integrados usados na microeletrônica. O silício utilizado para a fabricação das células é obtido a partir de um único cristal imerso em um banho de silício fundido de alto grau de pureza, superior a 99,9999% [Rüther, 2004]. O tarugo resultante do cristal “crescido” é então usinado e posteriormente fatiado em lâminas muito finas (*wafers*). Entre a usinagem, serrilhamento para obtenção dos *wafers*, dentre outros processos que se fazem necessário desde a fabricação do cristal até a obtenção da célula fotovoltaica, existe uma grande perda de material, da ordem de 50%. Estas perdas de material ao longo do processo de fabricação constituem um importante fator de encarecimento do produto. É comum encontrar uma eficiência na faixa de 12 a 16% em produtos comerciais para esta tecnologia de célula fotovoltaica [CRESESB, 1999].

#### 2.4.2. SILÍCIO MULTICRISTALINO (p-Si)

A principal diferença entre o silício multicristalino e o monocristalino é que enquanto o segundo é obtido a partir do crescimento de um único cristal, o outro é obtido a partir da solidificação do material fundido, originando a formação de inúmeros cristais. Desta forma o custo de produção em comparação com o silício monocristalino é consideravelmente menor, em contrapartida a eficiência das células fabricadas com silício multicristalino também é menor. Pode-se considerar, contudo, que na prática a eficiência dos produtos alcança valores muito próximos das células de silício monocristalino [CRESESB, 1999].

#### 2.4.3. SILÍCIO AMORFO HIDROGENADO (a-Si)

O silício amorfo hidrogenado consiste em uma forma de silício não cristalina empregada pela primeira vez em células solares no ano de 1974. Este material apresenta uma resposta espectral mais voltada para a região do azul do espectro eletromagnético, o que o torna mais eficiente do que o silício monocristalino sob iluminação artificial e sob radiação difusa.

Segundo Rüther e Livingstone, (1993) ao contrário de todas as outras tecnologias fotovoltaicas, em que o aumento de temperatura ocasiona uma diminuição na potência gerada, o a-Si não apresenta nenhuma diminuição em seu desempenho elétrico com o aumento de temperatura.

As temperaturas necessárias para os processos de fabricação do a-Si apresentam valores baixos, inferiores a 300 °C, o que possibilita a que estes filmes finos sejam depositados sobre camadas plásticas. Esta propriedade possibilitou com que fossem desenvolvidos módulos flexíveis, semitransparentes e com superfícies curvas abrindo um leque enorme de opções na área da arquitetura.

#### 2.4.4. TELURETO DE CÁDMIO (CdTe)

O CdTe consiste em uma forma multicristalina de filme fino. Assim como o a-Si, o CdTe apresenta um custo de produção bastante inferior ao do silício cristalino, no entanto com uma eficiência inferior, entre 7 e 11%. Este material é comumente depositado sobre o vidro, resultando num tom marron/azul escuro de interessante valor para aplicações arquitetônicas. Um problema associado à produção de células com este tipo de tecnologia é relativo à toxicidade do material envolvido na produção.

#### 2.4.5. DISSELENETO DE COBRE GÁLIO E ÍNDIO (CIS e CIGS)

Os disseleneto de cobre e índio são uma forma multicristalina de filmes finos que em 1996 atingiram uma eficiência de 17,7 % sendo que em 2004 estes materiais apresentavam a maior eficiência dentre os filmes finos. Módulos com esta tecnologia apresentam eficiências da ordem de 10%. Tal qual o a-Si ou o CdTe estes materiais apresentam uma excelente aparência estética o que possibilita seu uso em telhados e fachadas, constituindo instalações incorporadas à construção.

### 2.5. FATORES QUE INFLUENCIAM NA EFICIÊNCIA DE UMA CÉLULA DE SILÍCIO

A eficiência das células e dos módulos fotovoltaicos é definida pela relação entre a potência que os mesmos são capazes de fornecer e a irradiância solar incidente.

Comercialmente, as células de silício cristalino apresentam uma eficiência da ordem de 15%. Segundo Green, 1995, essas células possuem um limite de eficiência de aproximadamente 29%, chegando a casa dos 37% quando trabalhando com concentradores de radiação. O limite de eficiência desse tipo de tecnologia de células é devido principalmente a dois fatores: seletividade da absorção da célula e procedimentos de fabricação [Araújo, 1985]. Estes fatores são descritos a seguir.



### 2.5.1. SELETIVIDADE DE ABSORÇÃO DA CÉLULA

A radiação que chega à Terra provinda do Sol apresenta diferentes intensidades de energia em relação ao comprimento de onda. Essa distribuição espectral é afetada por absorções devido ao vapor de água e a gases presentes na atmosfera, bem como por resíduos sólidos que eventualmente estejam presentes no ar, de maneira que o espectro que chega à superfície não é o mesmo fora da atmosfera. A distribuição espectral também varia com a espessura da camada de ar que os raios de luz precisam atravessar para atingir a superfície. A relação entre esse “caminho óptico” e a espessura da atmosfera é chamada de massa de ar, do inglês *air mass* (AM).

Uma definição mais precisa para massa de ar é dada pela relação entre o caminho efetivo percorrido pelos raios solares (radiação direta) na atmosfera até atingir a superfície de um dado lugar e o caminho percorrido pelos raios solares na atmosfera até a superfície de um lugar ao nível do mar estando o Sol no zênite. A Figura 2.6 ilustra a definição de massa de ar. A massa de ar pode ser calculada, de forma aproximada, a partir da Equação (2.4).

$$AM = \frac{1}{\cos \theta} \quad (2.4)$$

onde  $\theta$  é o ângulo formado entre a direção dos raios de luz e o zênite.

Quando a radiação solar incide em uma célula fotovoltaica, boa parte dos fótons não é aproveitada para a geração de pares elétron-lacuna. A energia dos fótons pode ser inferior à do *gap* e dessa forma estes não são absorvidos pelo semicondutor. Se a energia dos fótons for superior à do *gap*, cada fóton gera apenas um par elétron lacuna e o excesso de energia é perdido. Essa perda é percebida pela resposta espectral do silício. A Figura 2.7 apresenta a curva do espectro solar bem como a resposta espectral do silício

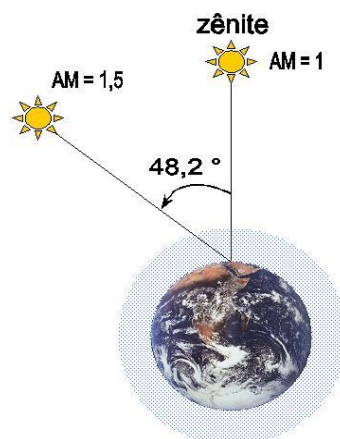


Figura 2.6 – Ilustração da definição de massa de ar (*air mass*) (AM).

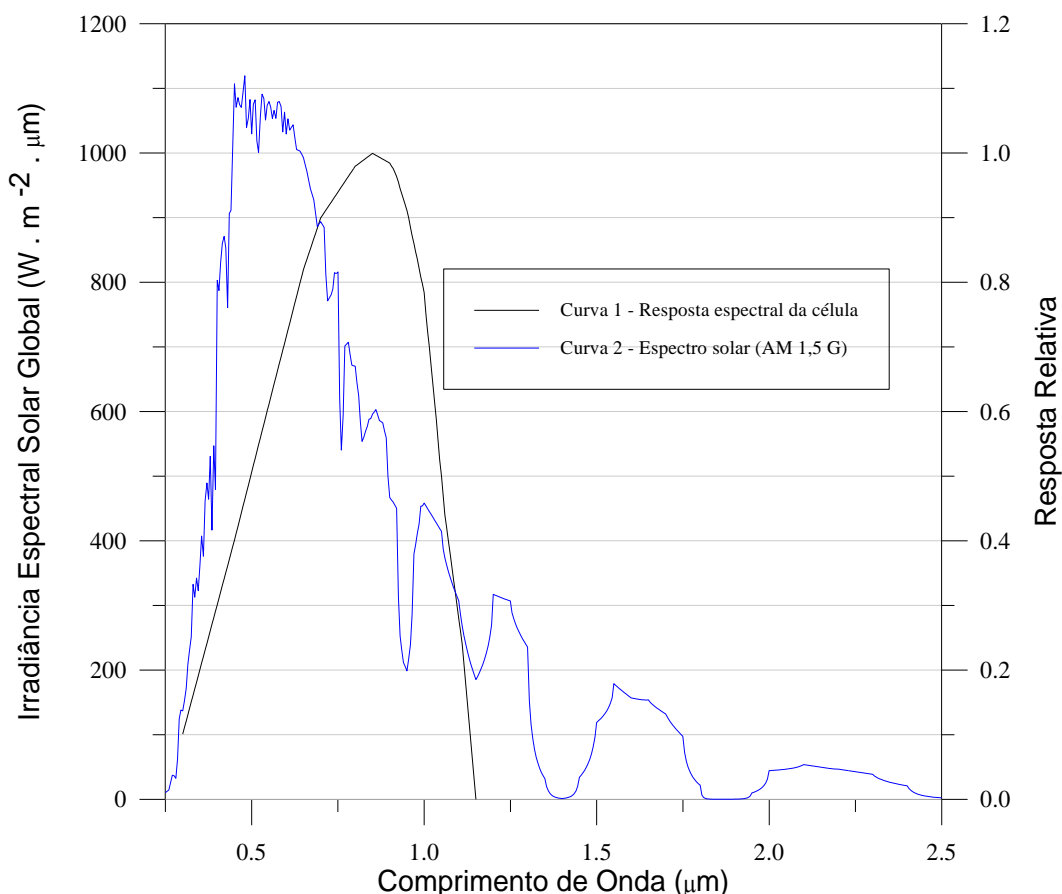


Figura 2.7 - Espectro solar e resposta espectral do silício (adaptado de Hecktheuer, 2001).

### 2.5.2. PROCEDIMENTOS DE FABRICAÇÃO

Outro mecanismo que ocasiona potencial perda na eficiência no caso do silício é a reflexão. Cerca de 30% da radiação incidente normal à superfície é refletida. Para minimizar essa perda as células são normalmente recobertas com um material anti-reflexivo e a superfície do silício é fabricada de modo a apresentar uma textura do tipo pirâmide. Essa textura faz com que um mesmo raio incidente, quando refletido, atinja a superfície duas ou mais vezes. Com esses mecanismos as perdas por reflexão acabam apresentando valores muito pequenos [Pierret, 1996]. O fenômeno de recombinação entre elétrons e lacunas também é um fator importante na limitação da eficiência de uma célula fotovoltaica. Para diminuir as perdas devido à recombinação algumas células possuem campos elétricos em sua traseira.

Existem ainda as limitações impostas pelas resistências série e paralela que ocasionam considerável diminuição na potência que o gerador fotovoltaico é capaz de fornecer. A área útil da célula na qual a radiação incide é limitada devido à grade metálica na face frontal da célula, entretanto quanto menor for a metalização frontal da célula maior será a resistência série, o que faz com que a metalização frontal seja um importante fator limitador de eficiência.

## 2.6. MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

A máxima tensão gerada por uma célula de silício em circuito aberto é da ordem de 0,6 V. Como pouquíssimos aparelhos funcionam com uma alimentação dessa ordem de tensão, faz-se necessário associar células em série a fim de aumentar a tensão fornecida pelo dispositivo fotovoltaico. Da mesma forma pode-se associar células em paralelo a fim de aumentar a corrente fornecida pelo dispositivo. Tais associações de células são denominadas módulos fotovoltaicos.

Comercialmente, os módulos fotovoltaicos, além das células geradoras de eletricidade, possuem os seguintes itens: na parte frontal uma camada de EVA (*Etil Vinil Acetato*) além de uma camada de vidro temperado, na parte posterior do módulo uma camada de Tedlar e outra camada de EVA e uma moldura (geralmente de alumínio). Estes componentes acabam por fornecer ao módulo uma estrutura rígida, garantia de maior durabilidade do conjunto. A Figura. 2.8 apresenta um corte de um módulo de silício típico.

O tempo de durabilidade de um módulo fotovoltaico de silício monocristalino é dependente das condições de operação às quais ele for submetido ao longo dos anos. Evidentemente existem inúmeros fatores ligados às condições ambientais que contribuem para a degradação dos módulos com conseqüente perda de potência. Em uma análise realizada por Vera *et al.*, (2006b) foi encontrada uma redução média da ordem de 1% ao ano (para os primeiros seis anos de operação) no valor da máxima potência fornecida pelo módulo. Entretanto é importante ressaltar que essa diminuição na potência não pode ser assumida como linear ao longo dos anos. Em média os fabricantes oferecem uma garantia não inferior a 20 anos para os módulos fotovoltaicos.

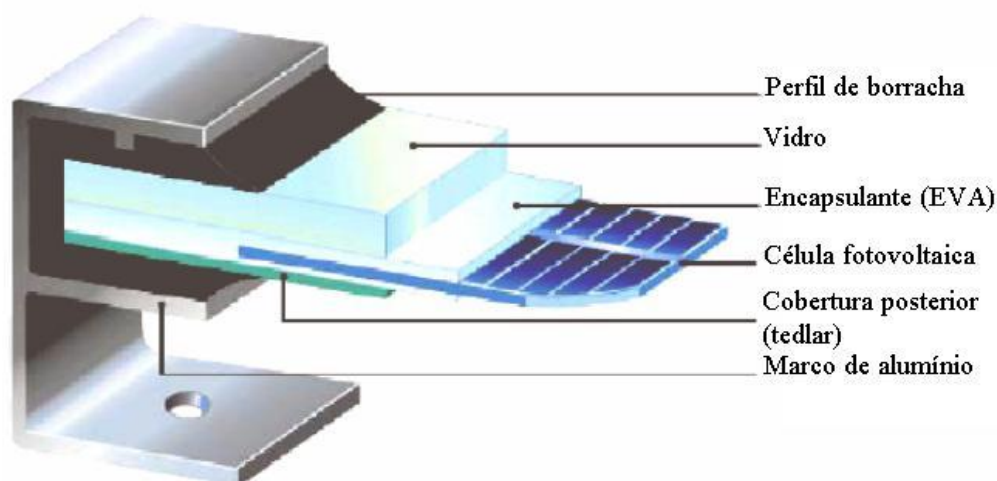


Figura 2.8 - Corte de um módulo fotovoltaico (adaptado de catálogo Siemens, 1996).

## 2.7. CIRCUITOS EQUIVALENTES

A representação de uma célula fotovoltaica através de um circuito elétrico é na grande maioria dos casos feita seguindo um dos dois modelos descritos a seguir. Entretanto muitos pesquisadores têm utilizado variações destes circuitos equivalentes alterando alguns parâmetros de forma a tornar o modelo mais adequado para o estudo em questão [King *et al*, 1997a].

### 2.7.1 MODELO DE 1 DIODO

Nesse modelo a corrente elétrica gerada a partir da radiação incidente sobre a célula é representada por um gerador de corrente. Um diodo faz o papel da junção PN, responsável pela corrente de saturação reversa e pelo fator de idealidade.

Como existe queda de tensão devida à resistência dos materiais nas células e nas ligações entre as mesmas, é acrescentada ao circuito uma resistência série. Por fim, representando uma fuga de corrente, é adicionado um resistor paralelo. A Figura 2.9 representa o circuito elétrico equivalente para uma célula fotovoltaica segundo o modelo de 1 diodo.

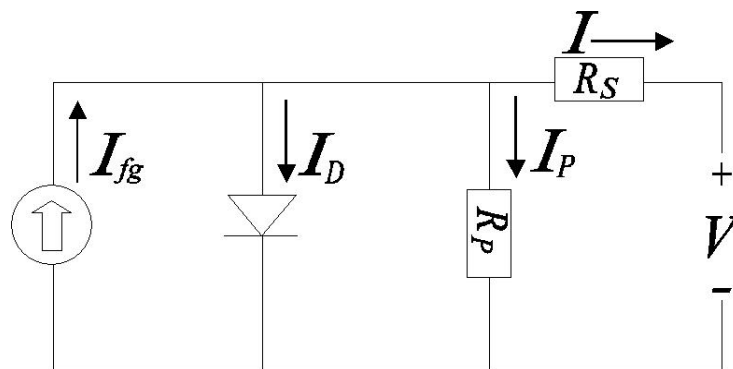


Figura 2.9 - Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica – modelo de 1 diodo.

Considerando o modelo de um diodo, que será o modelo adotado neste trabalho, obtém-se Equação (2.5) que relaciona a corrente elétrica fotogerada ( $I_{fg}$ ) com a fuga de corrente representada pelo resistor paralelo ( $I_P$ ) e com a corrente do diodo, que representa os fenômenos de recombinação e de difusão  $I_D$ .

$$I = I_{fg} - I_D - I_P \quad (2.5)$$

A corrente que passa pelo diodo, em função da tensão aplicada em seus terminais, pode ser representada pela Equação (2.6) e sua dedução pode ser encontrada em diversos livros sobre semicondutores entre os quais Pierret (1996).

$$I_D = I_0 \left\{ \exp \left[ \frac{e(V + IR_s)}{mk_B T} \right] - 1 \right\} \quad (2.6)$$

onde,  $I_0$  é a corrente de saturação reversa,  $e$  é a carga do elétron,  $m$  é o fator de idealidade do diodo,  $k_B$  é a constante de Boltzmann,  $T$  é a temperatura,  $V$  é a tensão e  $R_s$  é a resistência série.

Dessa forma, substituindo a Equação (2.6) na Equação (2.5) e fazendo as devidas considerações quanto à corrente que flui pelo resistor em paralelo, tem-se a Equação (2.7) que relaciona a corrente elétrica gerada a partir da luz incidente na junção da célula fotovoltaica em função da tensão de seus terminais e de sua temperatura.

$$I = I_{fg} - I_0 \left\{ \exp \left[ \frac{e(V + IR_s)}{mk_B T} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (2.7)$$

A Equação (2.7) é válida para uma célula fotovoltaica. No caso dos módulos fotovoltaicos, considerando pequenas alterações, tanto o circuito equivalente quanto às equações descritas acima são válidas, uma vez que os módulos são associações de células. Tais associações, na grande maioria dos módulos usados em aplicações fotovoltaicas, são feitas de maneira a ligar os terminais das células em série o que faz da tensão do módulo ser um somatório das tensões de cada célula. Sendo  $V_T$  um termo definido pela Equação (2.8), onde  $N_s$  representa o número de células associadas em série no módulo, e substituindo-o na Equação (2.7) tem-se a Equação (2.9) que representa a relação entre corrente e tensão em um módulo.

$$V_T = \frac{N_s mk_B T}{e} \quad (2.8)$$

$$I = I_{sc} - I_o \left[ \exp \left( \frac{V + IR_s}{V_T} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (2.9)$$

onde  $R_S$  e  $R_P$  representam as resistências série e paralela do módulo completo.  $I_{SC}$  é a corrente de curto-circuito do módulo que é substituída pela corrente fotogerada, tendo em vista que seus valores são praticamente iguais.

Este modelo é utilizado por inúmeros autores e pesquisadores entre os quais citam-se Kapica (1998), Singer *et. al* (1984) e Krenzinger (1994).

### 2.7.2. MODELO DE 2 DIODOS

O modelo de 2 diodos é semelhante ao modelo descrito anteriormente com a diferença que, para a representação da junção PN, são utilizados dois diodos. Um dos diodos representa o fenômeno de difusão que é predominante quando é aplicada aos terminais da célula tensões baixas, tipicamente inferiores a 0,4 V. O outro diodo representa o fenômeno de recombinação que é responsável pelo aumento de corrente quando a tensão aplicada à célula alcança tensões tipicamente superiores a 0,4 V. Cada diodo passa a ter um valor de corrente de saturação reversa próprio e um fator de idealidade pré-definido segundo a teoria de Shockley (1949) como já apresentado neste trabalho nas Equações (2.2) e (2.3). Vale lembrar que segundo essa teoria o diodo que representa a difusão apresenta fator de idealidade igual a 1, enquanto que o diodo que representa a recombinação tem fator de idealidade igual a 2.

O modelo de 2 diodos não apresenta vantagem numérica em relação ao modelo de 1 diodo, uma vez que embora os fatores de idealidade sejam pré-definidos, existe a necessidade da determinação de duas correntes de saturação reversa. Dessa forma o número total de variáveis de ambos os modelos é rigorosamente o mesmo. A Figura 2.10 representa o circuito elétrico equivalente para uma célula fotovoltaica segundo o modelo de 2 diodos.

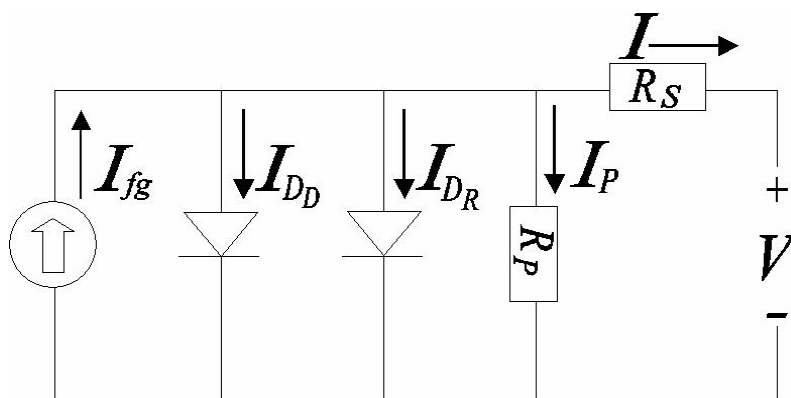


Figura 2.10 - Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica – modelo de 2 diodos.

A Equação (2.10) apresenta a relação entre corrente e tensão de acordo com o modelo de 2 diodos.

$$I = I_{sc} - I_{01} \left\{ \exp \left[ \frac{e(V + IR_s)}{k_B T} \right] - 1 \right\} - I_{02} \left\{ \exp \left[ \frac{e(V + IR_s)}{2k_B T} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (2.10)$$

### 2.7.3. MODELO DE 2 DIODOS MODIFICADO

Muitos pesquisadores, como Meyer, E. L. e van Dyk, E. E., (2004) e Roshdy, (1999), têm feito uso do modelo de dois diodos, porém considerando um parâmetro a ser determinado o fator de idealidade relativo ao fenômeno de recombinação. Essa alteração no modelo, que originalmente considera este fator de idealidade igual a 2, torna-o mais preciso e é apresentada na Equação (2.11). Existem ainda alguns casos em que ambos os fatores de idealidade são tratados como variáveis. Embora o modelo se torne mais refinado existe a desvantagem do aumento no número de variáveis a serem determinadas.

$$I = I_{sc} - I_{01} \left\{ \exp \left[ \frac{e(V + IR_s)}{k_B T} \right] - 1 \right\} - I_{02} \left\{ \exp \left[ \frac{e(V + IR_s)}{m_R k_B T} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (2.11)$$

## 2.8. CURVA CARACTERÍSTICA $I$ - $V$

A curva característica de um dispositivo fotovoltaico seja uma célula, um módulo ou um *array* (associação de módulos) consiste na representação matemática do comportamento da corrente elétrica em função da tensão. A determinação dessa curva é imprescindível na caracterização dos módulos fotovoltaicos, pois é através dela que se obtêm informações sobre o desempenho elétrico do gerador fotovoltaico como será posteriormente apresentado neste trabalho.

A Figura 2.11 representa a curva característica  $I$ - $V$  para um módulo fotovoltaico de 72 células associadas em série bem como a curva de potência *versus* tensão para este mesmo módulo.

Os pontos de potência são obtidos simplesmente multiplicando cada valor de tensão pelo correspondente valor de corrente. Nota-se que a potência é variável ao longo da tensão apresentando um valor máximo na região do joelho da curva  $I$ - $V$ . De forma simplificada, a curva  $I$ - $V$  pode ser interpretada como a curva de um diodo no escuro e sua soma algébrica com

a corrente fotogerada. Como essa corrente é negativa, a curva  $I$ - $V$  resultaria no quarto quadrante do sistema de coordenadas, porém convencionalmente essa curva é rebatida para o primeiro quadrante [Lasnier, 1990].

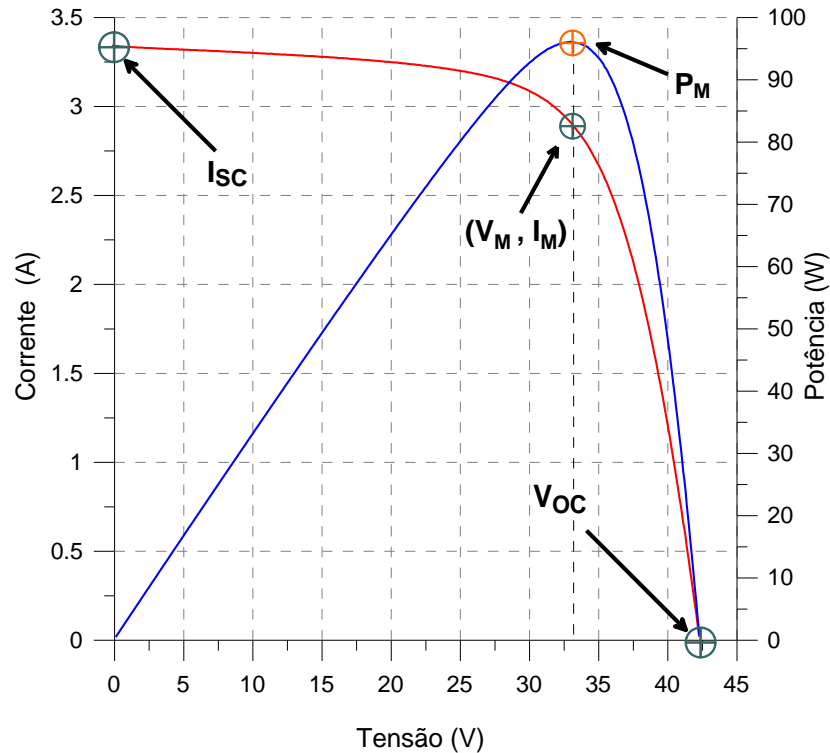


Figura 2.11 - Curva característica ( $I$ - $V$ ) e curva de potência *versus* tensão ( $P$ - $V$ ) de um módulo (m-Si, 72 células) com 100 W de potência e 24 de tensão nominal.

De acordo com a Figura 2.11,  $I_{SC}$  é a corrente de curto-circuito,  $V_{OC}$  é a tensão de circuito aberto,  $P_M$  é a potência no ponto de máxima potência na curva  $P$ - $V$ ,  $V_M$  e  $I_M$  são as coordenadas de tensão e corrente, respectivamente, correspondentes ao ponto de máxima potência.

## 2.9. INFLUÊNCIA DA IRRADIÂNCIA NA CURVA $I$ - $V$

A corrente elétrica gerada a partir da irradiância incidente na junção PN é linearmente proporcional à intensidade da mesma. Como a relação entre a corrente e tensão é dada por uma função exponencial, a variação da tensão com a irradiância se dá de forma logarítmica. A Figura 2.12 apresenta curvas  $I$ - $V$  medidas sob iluminação natural correspondentes a diferentes valores de irradiância. A condição padrão para determinação da curva característica,



segundo a norma NBR – 1386 é de 1000 W/m<sup>2</sup> de irradiância, temperatura de 25 °C e massa de ar de 1,5 [ABNT, 1991a].

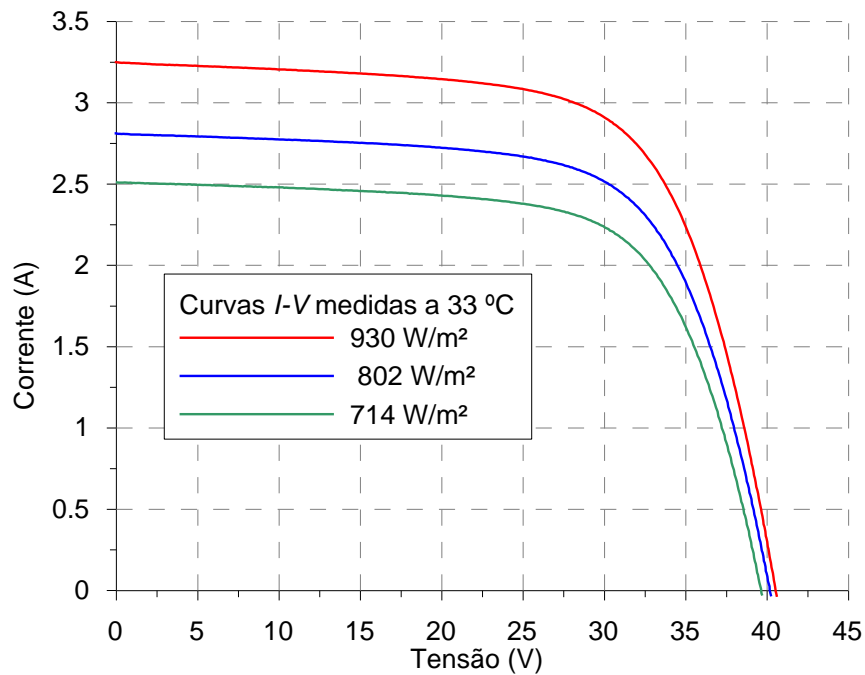


Figura 2.12 – Curvas  $I$ - $V$  de um módulo de silício de 72 células a diferentes irradiâncias.

## 2.10. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA CURVA $I$ - $V$

A temperatura é um fator de importante influência na curva característica de um dispositivo fotovoltaico. A corrente elétrica de curto-circuito aumenta ligeiramente com a temperatura, para módulos de silício cristalino, segundo um coeficiente ( $\alpha$ ) que apresenta valores típicos para o silício de 0,06% °C<sup>-1</sup> ou 0,03 mA °C<sup>-1</sup> cm<sup>-2</sup>. O coeficiente da variação da corrente de curto-circuito com a temperatura é definido pela Equação (2.12). Este aumento de corrente é devido a uma diminuição da energia do *gap* do material, expressa pela Equação (2.13):

$$\alpha = \frac{\partial I_{sc}}{\partial T} \quad (2.12)$$

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{aT^2}{T + b} \quad (2.13)$$

onde  $E_g(T)$  é a energia do *gap* do material a uma dada temperatura,  $E_g(0)$  é uma energia de referência e  $a$  e  $b$  são constantes do material. A Tabela 2.2 apresenta os valores das constantes  $a$  e  $b$  e as energias o *gap* para dois materiais, silício e arsenieto de gálio.

Tabela 2.2 - Energia do *gap* para *Si* e *GaAs* com os valores das constantes *a* e *b* da Equação (2.13) (Lesnier, 1990).

Material	$E_g(0)(\text{eV})$	$a (10^{-4} \text{eV K}^{-1})$	$b (\text{K})$
<i>Si</i>	1,16	7	1100
<i>GaAs</i>	1,52	5,8	300

A tensão, por sua vez, apresenta uma variação linear com a temperatura. Tipicamente, para módulos de silício monocristalino, a tensão decai de acordo com um coeficiente ( $\beta$ ) que apresenta valores da ordem de -2,3 mV/ °C por célula. O coeficiente da variação da tensão de circuito aberto com a temperatura pode ser definido pela Equação (2.14).

$$\beta = \frac{\partial V_{oc}}{\partial T} \quad (2.14)$$

Esta diminuição da tensão é devida principalmente ao incremento exponencial da corrente de saturação reversa. Essa corrente é fruto dos portadores de carga minoritários criados por excitação térmica. A Figura 2.13 apresenta curvas *I-V* determinadas experimentalmente para um módulo de 72 células (m-Si) relativas à mesma irradiância, mas em diferentes temperaturas .

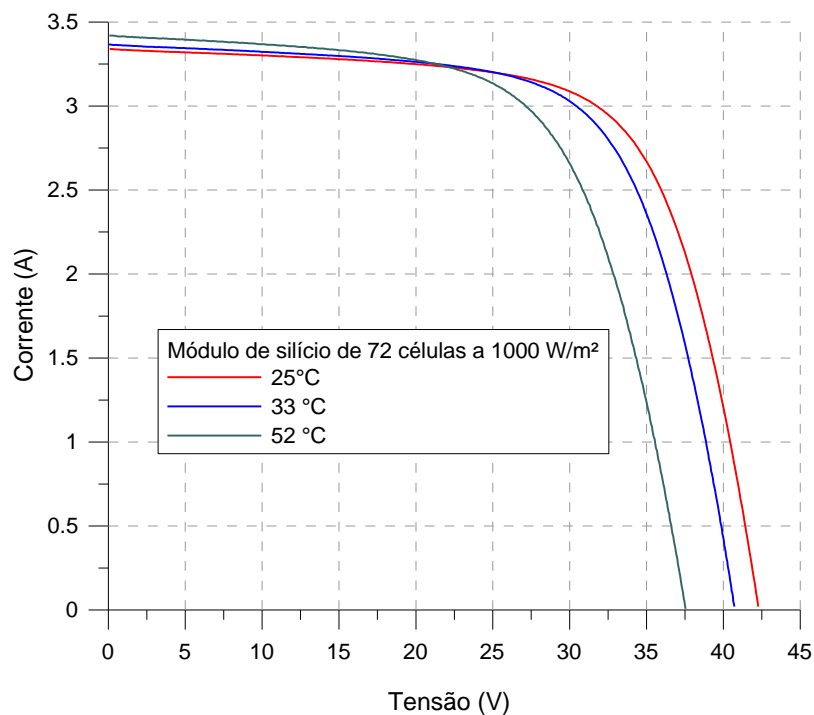


Figura 2.13 - Curvas *I-V* de um módulo de silício monocristalino de 72 células determinadas a diferentes temperaturas e a 1000 W/m² de irradiância.

## 2.11. EFEITO DOS PARÂMETROS FOTOVOLTAICOS NA CURVA $I$ - $V$

Nesta seção serão considerados os quatro parâmetros fotovoltaicos presentes na equação característica de uma célula ou módulo fotovoltaico. São apresentadas as influências de cada um destes parâmetros na curva característica  $I$ - $V$  de um dispositivo fotovoltaico.

### 2.11.1. RESISTÊNCIA SÉRIE

Este parâmetro está associado, para cada célula solar que compõe um módulo fotovoltaico, a uma resistência devida aos seguintes elementos: base das células, região do emissor, resistências de contato entre o metal e o semicondutor (lados frontal e posterior), resistência à passagem da corrente através dos dedos e do *bus-bar* da grade metálica. No caso de um módulo, existe ainda uma resistência devida às ligações entre as diversas células que compõem o circuito elétrico do mesmo. Desta forma, um resultado esperado é que módulos com maior número de células associadas em série apresentem um maior valor de  $R_S$ . O efeito desta resistência no desempenho de um módulo é o da redução na potência do mesmo. A Figura 2.14 apresenta curvas teóricas  $I$ - $V$  para um módulo de 72 células relativas à diferentes valores de  $R_S$ .

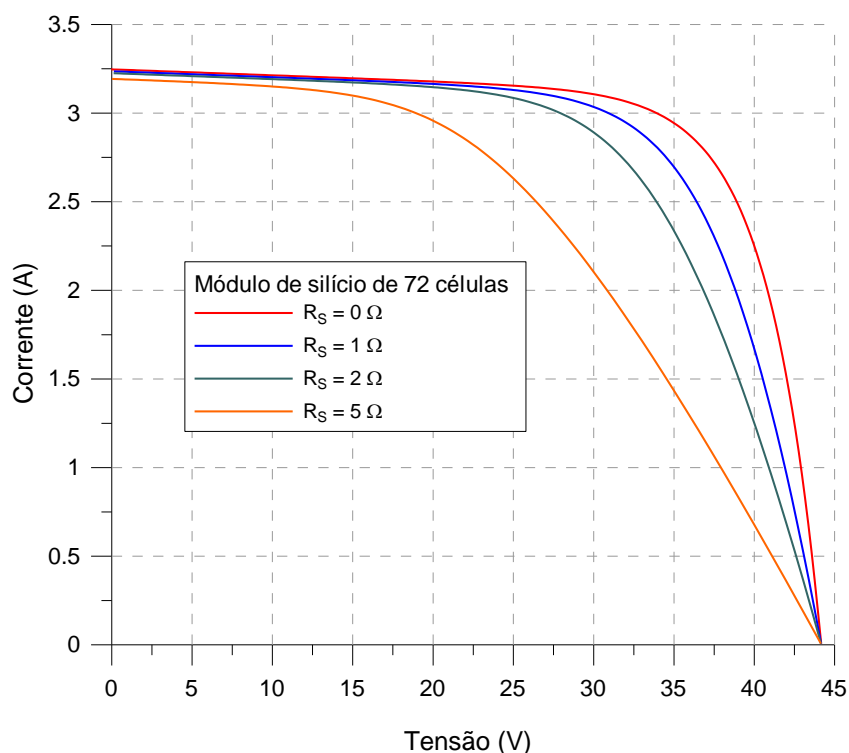


Figura 2.14 - Efeito da variação da resistência série na curva  $I$ - $V$  de um módulo de silício de 72 células.

### 2.11.2. RESISTÊNCIA PARALELA

A resistência paralela é tratada como uma representação das perdas de corrente elétrica pelo gerador fotovoltaico. Idealmente um módulo ou uma célula teriam um valor de  $R_p$  infinito, o que representaria inexistência de corrente de fuga. Valores baixos de  $R_p$  causam queda na potência fornecida pelo dispositivo fotovoltaico, devido a um caminho alternativo que a corrente elétrica fotogerada tem para circular. A resistência paralela é responsável por um incremento na inclinação da curva  $I$ - $V$  na região de curto circuito até o joelho da mesma. Verifica-se, no entanto, que valores baixos de  $R_p$  causam uma diminuição no valor da tensão de circuito aberto. A influência mais direta de  $R_p$  é observada na diminuição da potência do gerador fotovoltaico. A Figura 2.15 apresenta curvas  $I$ - $V$  teóricas para um módulo de 72 células relativas à diferentes valores de  $R_p$ .

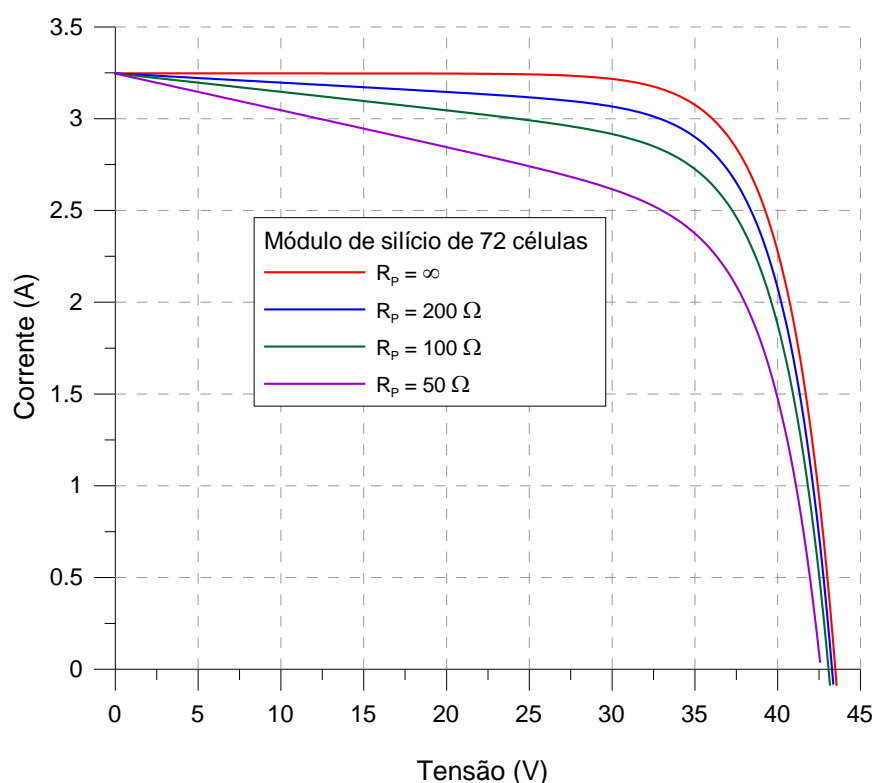


Figura 2.15 - Efeito da variação da resistência paralela na curva  $I$ - $V$  de um módulo de silício de 72 células.

### 2.11.3. FATOR DE IDEALIDADE

O fator de idealidade é um parâmetro diretamente associado com a curvatura da curva  $I$ - $V$  na região do joelho, influenciando dessa forma a potência do dispositivo fotovoltaico. Como já foi mostrado neste trabalho, o comportamento da corrente como função da tensão em

uma célula ou módulo fotovoltaico apresenta uma relação logarítmica. Entretanto é sabido que se a relação  $I$ - $V$  fosse inteiramente logarítmica (diodo ideal) uma curva  $\ln(I)$  versus  $V$  deveria corresponder a uma reta, o que não se verifica. Esse comportamento não linear na curva semilogarítmica de um diodo real (de um gerador fotovoltaico) corresponde à uma variação no fator de idealidade. Os valores para  $m$  situam-se entre 1 e 2 segundo o modelo de 1 diodo. A Figura. 2.16 apresenta três curvas  $I$ - $V$  de um módulo de silício de 72 células relativas a diferentes valores de  $m$ . Para fins de visualizar a influência de  $m$  nas curvas  $I$ - $V$  estas foram geradas numericamente com diferentes valores de corrente de saturação reversa, de forma a manter a mesma tensão de circuito aberto.

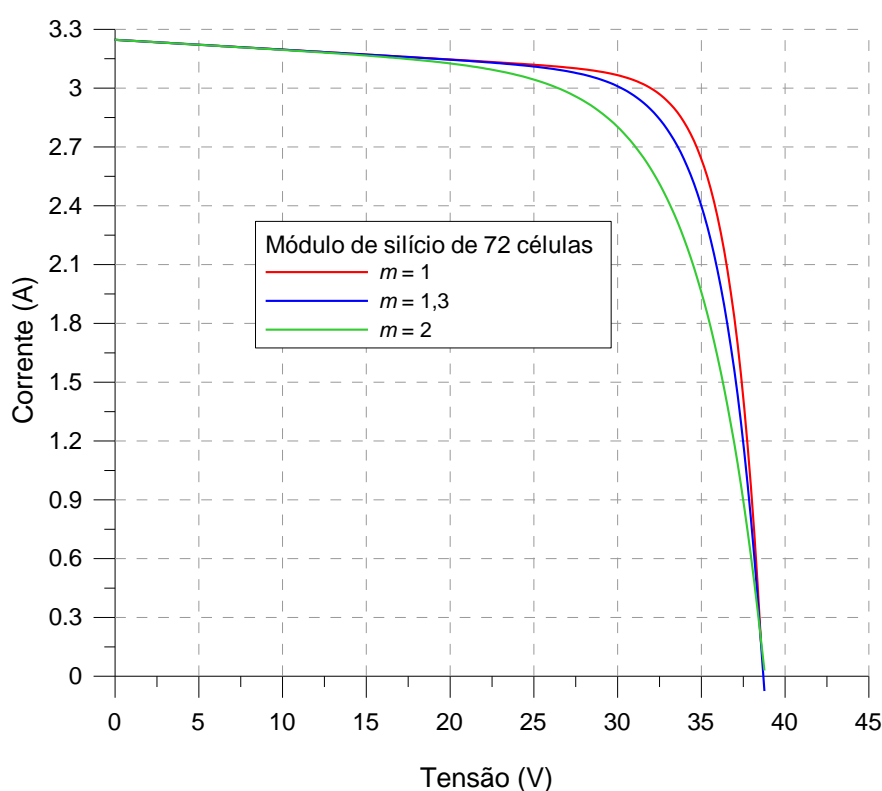


Figura 2.16 - Efeito da variação do fator de idealidade curva  $I$ - $V$  de um módulo de silício de 72 células.

#### 2.11.4. CORRENTE DE SATURAÇÃO REVERSA

O principal efeito causado pela corrente de saturação reversa, como já mencionado anteriormente, é a diminuição da tensão de circuito aberto com o aumento da temperatura. Isto acontece uma vez que a corrente de saturação reversa, originada por portadores de carga minoritários gerados por excitação térmica, aumenta exponencialmente com a

temperatura ocasionando queda na tensão da junção e por consequência nos terminais do módulo fotovoltaico. Essa variação de  $I_0$  com respeito à temperatura é apresentada na Equação (2.15).

$$I_0(T) = AT^3 \exp\left(\frac{-E_g(T)}{k_B T}\right) \quad (2.15)$$

onde  $T$  é a temperatura,  $k_B$  é a constante de Boltzmann,  $E_g$  é a energia do *gap* relativa a temperatura na qual se está calculando,  $I_0(T)$  é a corrente de saturação reversa em função da temperatura e  $A$  é uma constante independente da temperatura.

### 3. DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS – MÉTODOS CONVENCIONAIS.

A caracterização de um módulo fotovoltaico é, de um modo geral, importante para avaliar o desempenho elétrico, diretamente associado à potência que o mesmo é capaz de fornecer, bem como detectar possíveis defeitos de fabricação ou ainda demonstrar a capacidade que um módulo tem de manter as suas características ao longo dos anos. Além dos ensaios elétricos se fazem necessários também ensaios mecânicos e ambientais, a fim de qualificar completamente o dispositivo fotovoltaico. Essas duas categorias de ensaios não serão tratadas neste trabalho, uma vez que aqui o objetivo principal é a qualificação das características elétricas de um módulo.

A caracterização das propriedades elétricas de um módulo fotovoltaico passa pela determinação da curva característica  $I$ - $V$ , a qual deve ser medida sob condições específicas de temperatura, irradiância, massa de ar e velocidade do vento, condições as quais são definidas pelas normas específicas. Dentre as principais entidades responsáveis pela emissão dessas normas estão a IEC, *International Electrotechnical Commission* a ASTM, *American Society for Testing and Materials* e a ABNT, *Associação Brasileira de Normas Técnicas*.

#### 3.1. DETERMINAÇÃO DA CURVA $I$ - $V$

Para a determinação das características fotoelétricas, segundo a norma NBR – 12136 [ABNT, 1991a] as correntes de curto-circuito dos dispositivos em ensaio devem ser medidas com tensão igual a zero, usando polarização variável para compensar a queda de tensão através da resistência série. Estas correntes também podem ser determinadas através da queda de tensão em um resistor fixo de precisão com quatro terminais, desde que a medição seja realizada a uma tensão menor que 3% da tensão de circuito aberto do dispositivo em teste, dentro de uma faixa onde exista uma relação linear entre tensão e corrente. Ensaios para a determinação das características fotoelétricas de módulos fotovoltaicos podem ser executados expondo-se o módulo à luz solar ou simulada. No caso da luz simulada esta pode ser constante ou pulsante.

De acordo com a norma internacional [IEC, 1987], as medidas sob iluminação natural requerem condições estáveis de irradiância com flutuações inferiores a 1% durante a aquisição dos dados e valor superior a  $800\text{W/m}^2$ . Deve ser utilizada uma célula de referência, fabricada com a mesma tecnologia do dispositivo que está sendo testado, calibrada para a medida

da irradiância solar. As temperaturas da célula de referência e do dispositivo em teste precisam ser conhecidas, uniformes e estáveis durante a medida dos pontos da curva característica.

Segundo a norma NBR – 12136 [ABNT,1991a], é recomendado que, caso seja difícil ou pouco prático controlar as temperaturas, a célula de referência e o dispositivo em ensaio sejam cobertos de maneira que suas temperaturas entrem em equilíbrio com a temperatura do meio. Logo após retirada a cobertura procedem-se as medições. Se o ensaio for realizado fora dessas condições uma curva ( $I$ - $V$ ) medida não pode ser deslocada para a condição padrão.

As medições são realizadas registrando simultaneamente os valores de corrente, tensão, temperatura e irradiância incidente, esta última através da corrente de curto-circuito da célula de referência. Estabelece-se em seguida uma nova tensão de polarização e os registros são repetidos, até que toda a extensão da curva entre curto-circuito e circuito aberto seja varrida.

Segundo a Norma Técnica, NBR – 12302 [ABNT, 1991b] quando o ensaio ocorre em condição diferente da padrão e se deseja corrigir a curva  $I$ - $V$  para esta condição são necessárias as Equações (3.1) e (3.2):

$$I_2 = I_1 + I_{SC} \left( \frac{I_{CR}}{I_{MR}} - 1 \right) + \alpha(T_2 - T_1) \quad (3.1)$$

$$V_2 = V_1 - R_s(I_2 - I_1) - KI_2(T_2 - T_1) + \beta(T_2 - T_1) \quad (3.2)$$

onde  $I_1$  e  $V_1$  são as coordenadas dos pontos na curva característica medida,  $I_2$  e  $V_2$  as coordenadas dos pontos correspondentes na curva corrigida,  $I_{CR}$  a corrente de curto-circuito na célula de referência sob radiação padrão ou outra qualquer,  $I_{MR}$  a corrente de curto-circuito medida na célula de referência,  $I_{SC}$  a corrente de curto-circuito medida no dispositivo em teste,  $T_1$  a temperatura do dispositivo em teste,  $T_2$  a temperatura padrão ou outra desejada,  $\alpha$  é a variação da corrente de curto-circuito com a temperatura do dispositivo em ensaio,  $\beta$  a variação da tensão de circuito aberto pela temperatura do dispositivo em ensaio e  $K$  é o fator de correção da curva.

O fator de correção da curva  $K$  também requer um procedimento para sua medição, no entanto isto não será apresentado aqui uma vez que não é objeto de interesse deste trabalho.

Segundo a norma ASTM [E 1036-02], a determinação das características fotoelétricas para módulos sem concentradores exige que a precisão dos equipamentos de medida de tensão e corrente apresentem um erro total inferior a 0,1%. A medição da temperatura



exige resolução de 0,1 °C e um erro total inferior a 1 °C para mais ou para menos. Durante o ensaio, a variação da temperatura deve ser inferior a 2 °C. Para as medidas sob iluminação natural, a célula de referência deve ser fixada junto ao módulo, coplanar ao mesmo com uma diferença inferior a 2 °. A exposição aos raios de luz do sol deve ser feita de maneira que os dispositivos em ensaio estejam com uma orientação normal ao feixe central de raios luminosos.

A norma brasileira por sua vez tolera uma imprecisão de 0,5% para as medições de corrente e tensão. Os requisitos quanto às medidas de temperatura bem como quanto à célula de referência estabelecidos pela norma brasileira são similares à norma americana.

### 3.2. DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES TÉRMICOS $\alpha$ E $\beta$

A determinação dos coeficientes térmicos  $\alpha$  e  $\beta$  é importante uma vez que estes valores são necessários para a correção da curva  $I$ - $V$  das condições medidas para a condição padrão ou outra qualquer. Por outro lado estes coeficientes estão diretamente ligados com a perda de potência de um módulo com o aumento da temperatura. Sendo assim  $\alpha$  e  $\beta$  uma importante informação sobre o desempenho do módulo nas condições reais de operação que normalmente apresentam temperaturas na faixa de 45 °C a 55 °C.

Para a medida da irradiância solar ao longo do ensaio é necessária ao menos uma célula de referência de mesma área e mesma configuração que a célula na qual estão sendo medidos  $\alpha$  e  $\beta$ .

Convencionalmente a determinação destes parâmetros segue então os seguintes passos, de acordo com a norma NBR – 12136 [ABNT, 1991b].

- a) São anexados sensores de temperatura às células de maneira que apresentem um erro nas medidas inferior a 0,5 °C.
- b) As células de referência e teste são orientadas, no mesmo plano, normais aos raios solares, buscando um erro inferior a 5 °.
- c) Ajustar a radiação no plano da célula de referência à temperatura de 25 °C (com um erro inferior a 0,5 °C) de tal forma que a célula de referência produza sua corrente de curto-circuito de calibração para o nível de radiação desejado.
- d) Procede-se então com a medida da tensão de circuito aberto ( $V_{OC}$ ) e corrente de curto circuito ( $I_{SC}$ ) na célula teste uma vez estabilizada sua temperatura.
- e) Estabiliza-se a temperatura da célula teste 10 °C acima da anterior e são repetidas as medidas de  $V_{OC}$  e  $I_{SC}$  até que se tenham pontos para a elaboração de um gráfico com a resolução desejada.

- f) Plota-se um gráfico temperatura *versus* tensão de circuito aberto ( $T \times V_{OC}$ ) e outro de temperatura *versus* corrente de curto circuito ( $T \times I_{SC}$ ). Ambos os gráficos devem gerar retas, onde as inclinações fornecerão os valores de  $\alpha_C (T \times I_{SC})$  e  $\beta_C (T \times V_{OC})$ .
- g) Os valores de  $\alpha$  e  $\beta$  para um módulo são calculados segundo as Equações (3.3) e (3.4), sendo que  $N_P$  é o número de células em paralelo no módulo e  $N_S$  o número de células em série:

$$\alpha = \alpha_C N_P \quad (3.3)$$

$$\beta = \beta_C N_S \quad (3.4)$$

### 3.4 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA SÉRIE

#### 3.4.1. MÉTODO PROPOSTO PELA NORMA ABNT

A determinação da resistência série interna ao módulo, segundo a norma NBR – 12136 (ABNT, 1991a) segue os seguintes passos:

- traçar três curvas  $I$ - $V$ , cada uma com um valor diferente de irradiância, mas com a mesma temperatura dentro de uma tolerância de 1°C para mais ou para menos;
- escolher um ponto  $P_I$  na curva referente ao maior valor de irradiância correspondente a um valor de tensão ligeiramente maior do que a tensão do ponto de máxima potência;
- determinar a diferença entre o valor da corrente do ponto  $P_I$  e o valor da corrente de curto-circuito;

$$\Delta I_1 = I_{SC1} - I_{P1} \quad (3.5)$$

- determinar o ponto  $Q_I$  na curva correspondente ao valor intermediário de irradiância, em que a corrente seja igual ao valor da corrente de curto-circuito menos  $\Delta I_1$ ;

$$I_{Q1} = I_{SC2} - \Delta I_1 \quad (3.6)$$

- determinar a diferença entre as tensões dos pontos  $P_I$  e  $Q_I$ ;

$$\Delta V_1 = V_{Q1} - V_{P1} \quad (3.7)$$

- f) calcular o valor da resistência série segundo a Equação (3.8):

$$R_{S1} = \frac{\Delta V_1}{I_{P1} - I_{Q1}} = \frac{\Delta V_1}{I_{SC1} - I_{SC2}} \quad (3.8)$$

- g) repetir os passos de b) até f) tomando pontos entre as curvas correspondentes ao maior e ao menor valor de irradiação e determinar  $R_{S2}$ ;
- h) repetir os passos de b) até f) tomando pontos entre as curvas correspondentes ao valor intermediário e ao menor valor de irradiação e determinar  $R_{S3}$ ;
- i) calcular o valor médio entre  $R_{S1}$ ,  $R_{S2}$  e  $R_{S3}$  que é o valor da resistência série do módulo.

$$R_s = \frac{R_{S1} + R_{S2} + R_{S3}}{3} \quad (3.9)$$

Para melhor compreensão do método proposto pela norma brasileira apresenta-se a Figura 3.1.

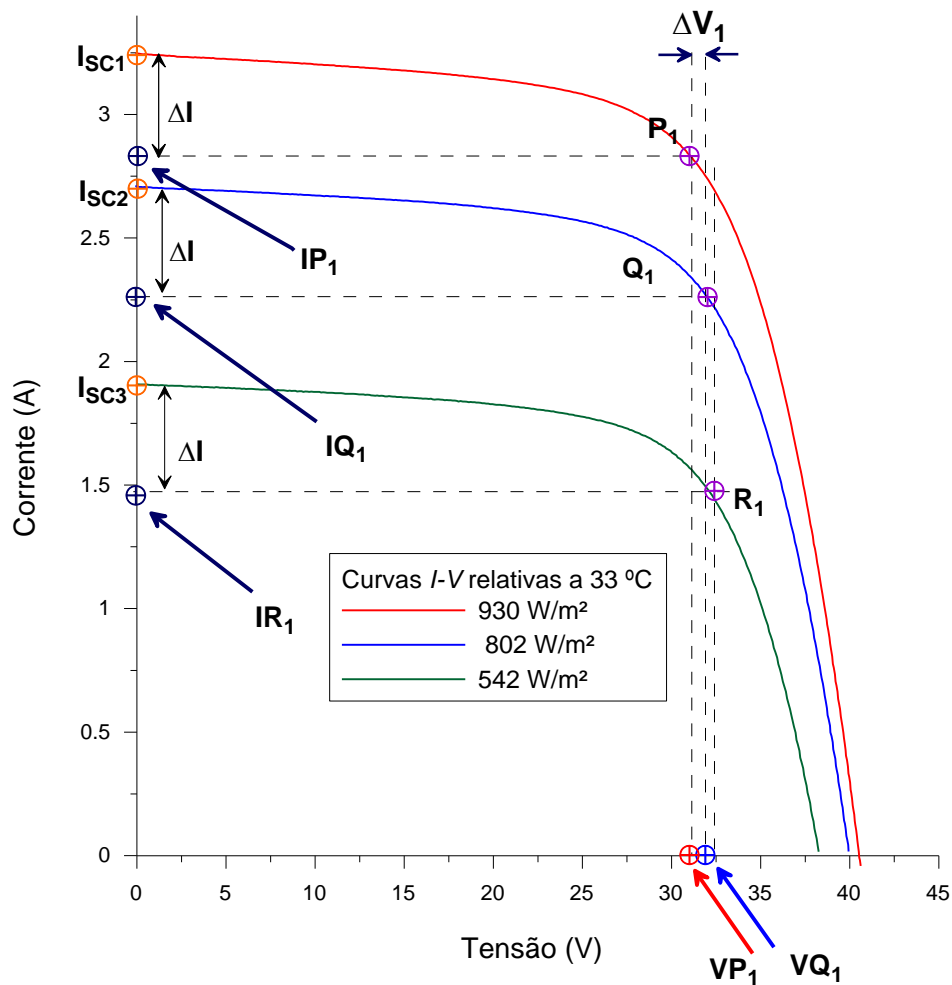


Figura 3.1 - Representação do método proposto para a determinação de  $R_s$  pela norma NBR – 12136.

### 3.4.2 MÉTODO DA PENDENTE

O método da pendente consiste na determinação de  $R_s$  por meio da inclinação da curva tensão *versus* corrente ( $V-I$ ) próximo a região da tensão de circuito aberto, uma vez que nesta região a curva é bastante linear.

A curva é determinada conforme descrito na seção 3.1, ultrapassando o ponto de tensão de circuito aberto, isto é, incluindo pontos de corrente negativa quando  $V > V_{OC}$ . Selecionam-se então cerca 10 pontos com tensão maior e 10 pontos com tensão menor que  $V_{OC}$ , cuidando para não incluir pontos próximos da tensão de máxima potência. Utilizando a metodologia de regressão linear por mínimos quadrados, determinam-se os coeficientes da reta a partir dos 20 pontos pré-selecionados.

Sendo  $p$  e  $q$  os coeficientes linear e angular da reta  $V = qI + p$ , onde  $I$  é a corrente e  $V$  é a tensão, e considerando que a corrente fotogerada é aproximadamente igual à  $I_{SC}$ , chega-se à Equação. (3.10), conforme Krenzinger (1994):

$$R_s = -q - \frac{V_T}{I_{SC}} \quad (3.10)$$

Para a determinação de  $R_s$  segundo este método faz-se necessário o conhecimento do valor do fator de idealidade uma vez que este está incluso no fator  $V_T$  apresentado na Equação (2.8).

#### 4. CURVA CARACTERÍSTICA $I$ - $V$ SEM ILUMINAÇÃO

Quando uma célula ou módulo fotovoltaico é exposto a uma determinada irradiância, este gera uma corrente elétrica que é proporcional a esta irradiância como descrito pela Equação (2.9). Segundo Lesnier, (1990) a curva  $I$ - $V$  (Figura 4.1c) pode ser estimada pela diferença entre a curva da corrente fotogerada (Figura 4.1a) e a curva de um diodo no escuro (Figura 4.1b). Dessa forma se for injetada uma corrente elétrica em um módulo fotovoltaico, monitorando cada valor de tensão correspondente à corrente elétrica e garantindo que nenhuma irradiância atinja a junção PN do dispositivo em ensaio, a curva obtida passaria a ser igual à de um diodo no escuro. A curva obtida pela diferença entre as curvas das Figuras 4.1a e 4.1c será denominada curva  $I$ - $V$  no escuro e, embora determinada sem iluminação, guarda importantes informações elétricas do módulo

A partir da análise da Figura 4.1 poder-se-ia concluir que a curva de um módulo fotovoltaico no escuro seria idêntica àquela determinada sob iluminação natural, porém invertida e deslocada no eixo das ordenadas de um valor igual à corrente fotogerada. Uma análise mais detalhada, porém mostra que este raciocínio é válido apenas para um módulo que apresenta um valor nulo de  $R_S$  e um valor infinito de  $R_P$  (situação ideal).

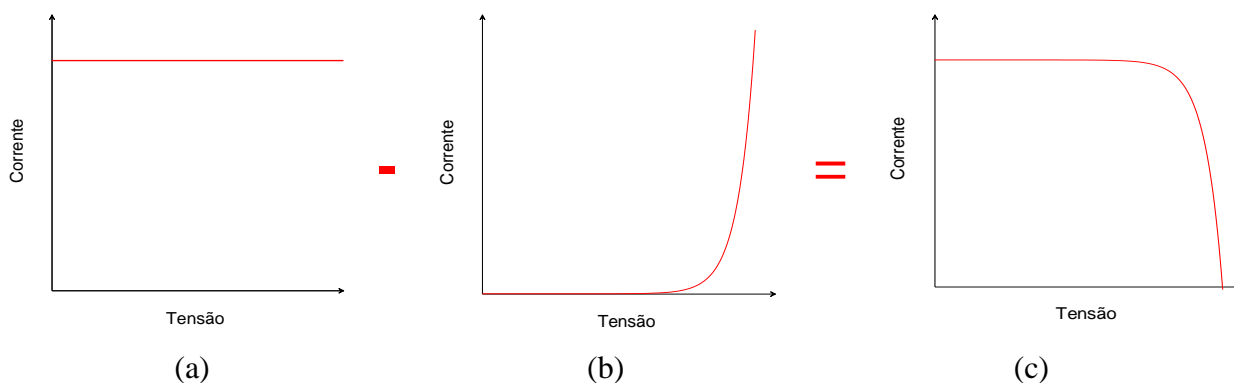


Figura 4.1- Representação da corrente fotogerada (a) curva  $I$ - $V$  de um diodo no escuro (b) e da diferença das duas curvas (c).

Em uma situação real, devido à presença de  $R_S$  e  $R_P$  a curva do módulo no escuro apresenta algumas diferenças em relação à curva obtida sob iluminação. Estas diferenças podem ser usadas para estimar os valores da resistência série e paralela do módulo, como será apresentando na sequência deste trabalho.

A Figura 4.2 apresenta as curvas de um módulo fotovoltaico de 72 células de silício monocristalino de 100 W de potência e 24 V de tensão nominal, determinadas com e sem iluminação, à mesma temperatura. Para melhor visualização das diferenças entre as duas curvas

ocasionadas pelo efeito de  $R_S$  e  $R_P$ , a curva determinada no escuro foi deslocada e superposta à curva determinada sob iluminação. Esta superposição é apresentada na Figura 4.3.

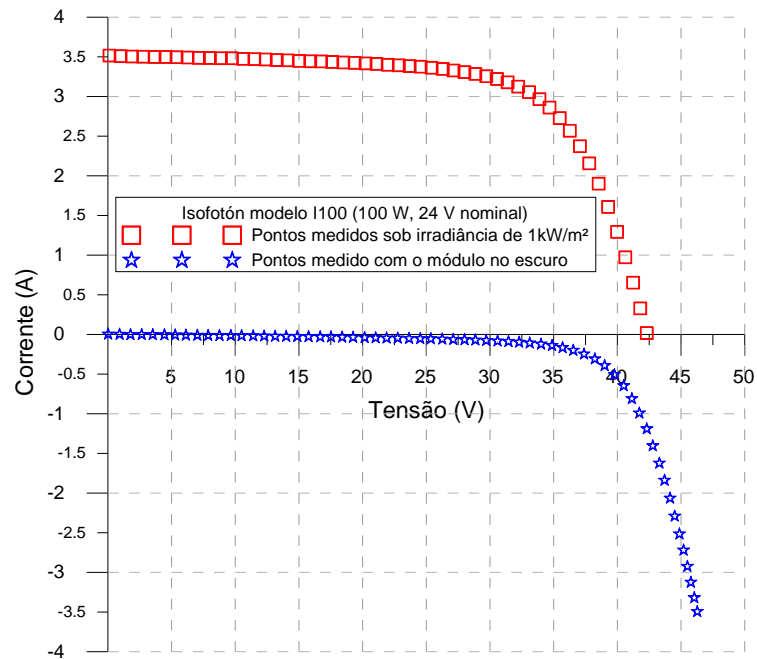


Figura 4.2 - Curvas  $I$ - $V$  de um módulo fotovoltaico de 72 células m-Si com e sem iluminação.

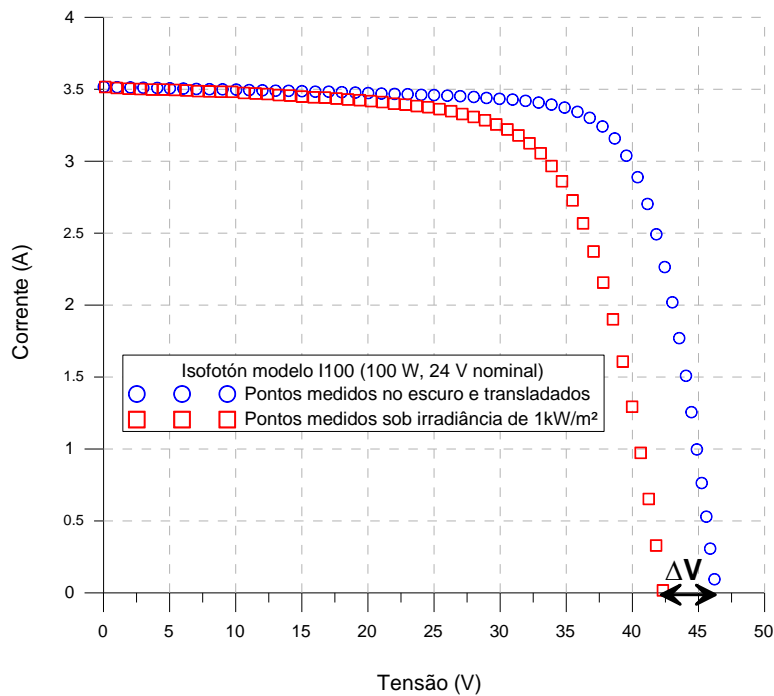


Figura 4.3 - Superposição das curvas determinadas com e sem iluminação apresentadas na Figura 4.2.

O deslocamento da curva no escuro é feito somando a cada valor de corrente um valor igual ao da corrente de curto-circuito do módulo iluminado. Essa soma de corrente tem como consequência uma variação logarítmica da tensão de circuito aberto.

#### 4.1. CIRCUITO EQUIVALENTE DE UM MÓDULO NO ESCURO

Sendo adotado o circuito da Figura 2.9 como modelo uma célula ou módulo exposto à luz. Para o estudo do comportamento de uma curva  $I$ - $V$  sem iluminação, o circuito elétrico equivalente sofre algumas mudanças. Uma vez que a corrente elétrica que gera a tensão no módulo é injetada no mesmo, seu sentido passa a ser contrário ao que teria quando há corrente fotogerada. Desta forma chega-se ao circuito equivalente apresentado na Figura 4.4 onde  $I_e$  representa a corrente que circula pelo módulo no escuro.

Da análise do circuito elétrico apresentado na Figura 4.4 obtém-se então a Equação (4.1) de corrente *versus* tensão.

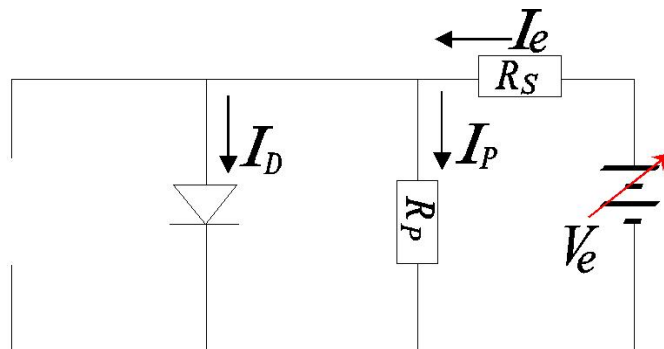


Figura 4.4 – Circuito elétrico equivalente de uma célula no escuro e com corrente injetada.

$$I_e = I_0 \left[ \exp \left( \frac{V_e - I_e R_s}{V_T} \right) - 1 \right] + \frac{V_e - I_e R_s}{R_p} \quad (4.1)$$

#### 4.2. MÉTODO PROPOSTO PARA A DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA SÉRIE

Somando o valor de  $I_{SC}$  a cada valor de corrente da curva medida no escuro, obtêm-se os pontos deslocados apresentados na Figura 4.3. Observa-se uma defasagem na tensão de circuito aberto, denotada por  $\Delta V$  na figura.

Se a condição de circuito aberto ( $I = 0$ ,  $V = V_{OC}$ ) for aplicada na Equação (2.9) obtém-se a Equação (4.2). Por outro lado, ao fazer o deslocamento da curva medida no escuro, apenas diminuindo do valor de  $I_{SC}$  o valor de  $I_e$  a cada ponto na Equação (4.1) e ainda aplicando a condição de  $I_{SC} = I_e$ , obtém-se a Equação (4.3), onde  $V_e$  é a tensão aplicada pela fonte para obter a corrente  $I_{SC} = I_e$ .

$$0 = I_{SC} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V_{OC}}{V_T}\right) - 1 \right] - \frac{V_{OC}}{R_p} \quad (4.2)$$

$$0 = I_{SC} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V_e - I_{SC}R_s}{V_T}\right) - 1 \right] - \frac{V_e - I_{SC}R_s}{R_p} \quad (4.3)$$

Da comparação entre a Equação (4.2) e a Equação (4.3) é possível concluir que  $V_e - I_{SC}R_s = V_{OC}$ , ou, usando a notação  $\Delta V = V_e - V_{OC}$  :

$$R_s = \frac{\Delta V}{I_{SC}} \quad (4.4)$$

Através da Equação (4.4) este trabalho propõe um método relativamente simples para a determinação do valor da resistência série de um módulo. O método consiste nas seguintes etapas:

- a) Colocar o dispositivo em ensaio em um lugar externo amplo, sem obstáculos próximos, com uma cobertura opaca e monitorar a temperatura do dispositivo de forma a garantir quando a temperatura do módulo entrar em equilíbrio com a temperatura ambiente.
- b) Uma vez estabilizada a temperatura, retirar a cobertura opaca e determinar uma curva  $I$ - $V$  com o módulo exposto à luz solar, desde que a irradiância seja superior a 800 W/m<sup>2</sup>.
- c) A partir da curva  $I$ - $V$ , determinar  $V_{OC}$  e  $I_{SC}$ .
- d) Colocar o módulo dentro de um ambiente construído e com o auxílio de uma fonte, aplicar corrente elétrica no mesmo até que sua temperatura seja a mesma do que no ensaio sob iluminação natural.
- e) Variar a tensão na fonte para adquirir os dados para a curva no escuro à temperatura antes estabelecida.
- f) Determinar a tensão correspondente à curva determinada sem iluminação relativa a corrente igual a  $I_{SC}$ .



g) Finalmente calcular o valor de  $R_S$  por meio da Equação 4.4.

Em um trabalho publicado por Aberle *et al.*(1993) este método para a determinação da resistência série também é proposto, entretanto este trabalho considera diferenças importantes quanto aos mecanismos físicos que ocorrem com o módulo iluminado e no escuro, ressaltando dessa forma que  $R_S$  não deve ser a mesma em condições de iluminação e de ausência da mesma.

Em uma célula convencional as perdas “ohmicas” provêm da condutividade limitada dos contatos metálicos, da resistência no contato metal-semicondutor, da resistência do substrato e da resistência do emissor (resistência de folha). As duas últimas fontes de resistência são distribuídas por natureza e os padrões de fluxo de corrente são diferentes nas condições de ensaio com luz e no escuro.

Quando uma tensão é aplicada aos terminais de uma célula no escuro, devido à “resistência de folha” a voltagem ao longo da superfície do emissor não é constante, mas decresce em direção ao centro (é menor entre dois “dedos” da célula), tal como é representado na Figura 4.5. Como consequência, a densidade de corrente é menor próxima aos dedos da célula do que entre eles.

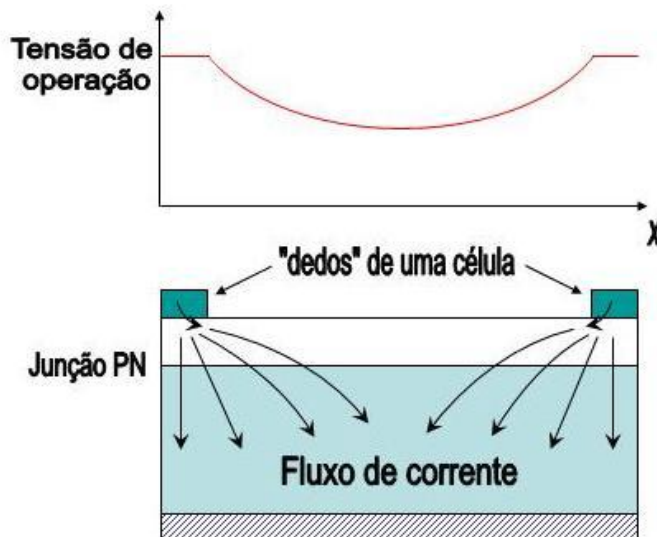


Figura 4.5 - Representação do fluxo de corrente elétrica injetada em uma célula no escuro.

Quando a célula é iluminada, a tensão apresenta um comportamento inverso do que no escuro, ou seja, aumenta em direção ao centro entre dois dedos. A densidade de corrente, portanto, é maior próxima aos dedos do que entre eles. A Figura 4.6 ilustra este fenômeno.

O método proposto por este trabalho para a determinação de  $R_S$  não é influenciado pelos fenômenos que ocorrem unicamente com o módulo iluminado uma vez que para a curva  $I$ -

$V$  medida com iluminação natural, no ponto de tensão de circuito aberto, a corrente elétrica é nula e, portanto não há influência de  $R_S$ .

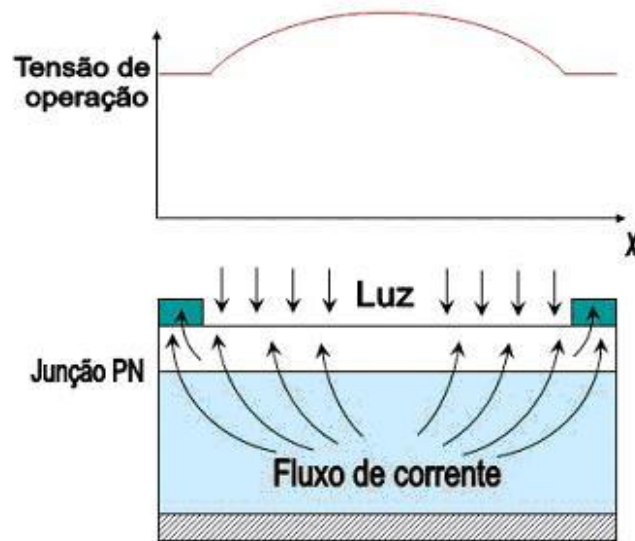


Figura 4.6 - Representação do fluxo de corrente elétrica em uma célula iluminada.

Para a determinação da resistência série de um módulo levando em conta apenas os mecanismos que ocorrem com o módulo iluminado, Aberle *et al.*(1993) propõem o uso da Equação (4.5).

$$R_{S,light} = \frac{\Delta V_M}{I_{MP}} \quad (4.5)$$

onde  $\Delta V_M$  é a diferença entre a tensão de máxima potência do módulo quando iluminado e a tensão, com o módulo no escuro, correspondente à corrente de máxima potência. A tensão correspondente no escuro pode ser obtida deslocando a curva  $I-V$  determinada sem iluminação somando a cada valor de corrente o equivalente à diferença entre a corrente de curto-circuito e a corrente de máxima potência.

A Figura 4.7 ilustra este deslocamento da curva no escuro comparando com uma curva determinada sob iluminação natural à mesma temperatura.

Nas pesquisas realizadas durante a elaboração desta dissertação, a determinação da resistência série por meio do uso da Equação (4.5) foi testada, entretanto não foram encontradas diferenças significativas entre este método e o proposto pelo uso da Equação (4.4).

Dessa forma a determinação de  $R_S$  neste trabalho foi feita apenas segundo a Equação (4.4) e como será posteriormente demonstrado, esse método se mostrou bastante confiável e eficaz.

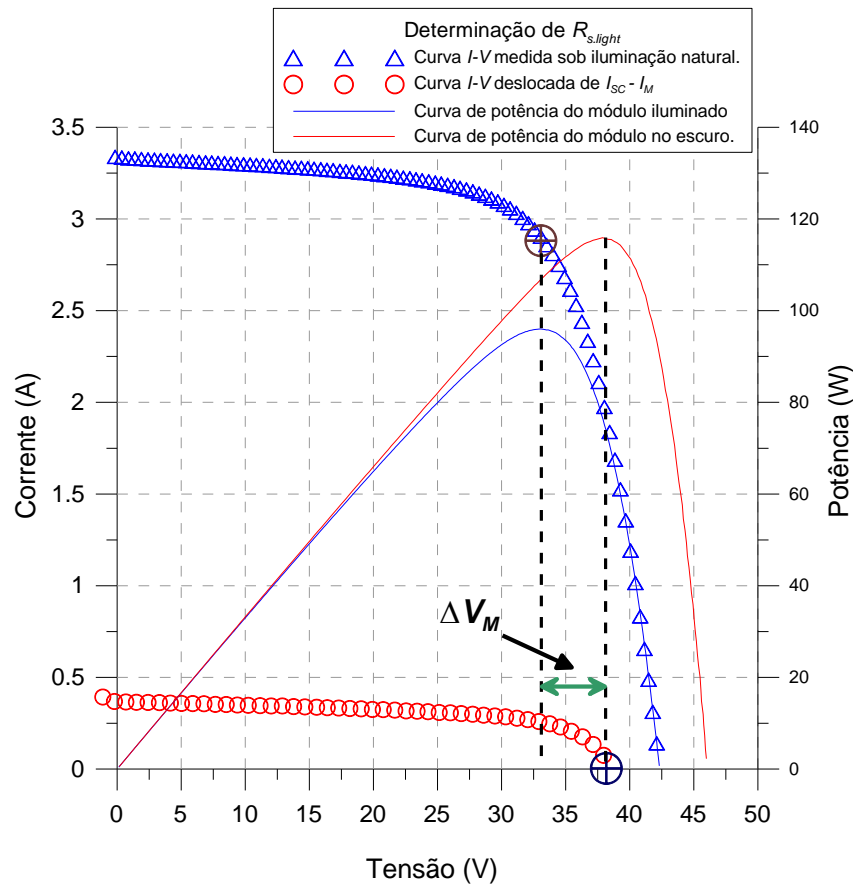


Figura 4.7 - Ilustração do método proposto por Aberle *et al.*(1993) para determinação de  $R_S$  considerando os mecanismos físicos que ocorrem com o módulo iluminado.

#### 4.3. MÉTODO PROPOSTO PARA A DETERMINAÇÃO DA CORRENTE DE SATURAÇÃO REVERSA E DO FATOR DE IDEALIDADE DO DIODO

Trabalhando com a curva  $I-V$  no escuro, é possível dividir a mesma em quatro diferentes regiões de tensão. Este tratamento na curva  $I-V$  tem sido usado como técnica para extração de parâmetros fotovoltaicos por diferentes pesquisadores, tais quais Hussein, 2001 e Mártil, 1992. Como apresentadas na Figura 4.8, as quatro diferentes regiões correspondem à influência principal da resistência paralela, fenômeno de recombinação, difusão e finalmente à influência da resistência série. Neste trabalho foi adotado o modelo de 1 diodo, dessa forma a curva da Figura 4.8 deve ser dividida em três regiões de tensão, pois é selecionada uma região na

curva onde a influência dos fenômenos de recombinação e difusão é muito parecida (região intermediária entre a predominância dos fenômenos de recombinação e difusão). A partir de uma regressão linear nesta região é extraído o fator de idealidade presente no modelo de 1 diodo.

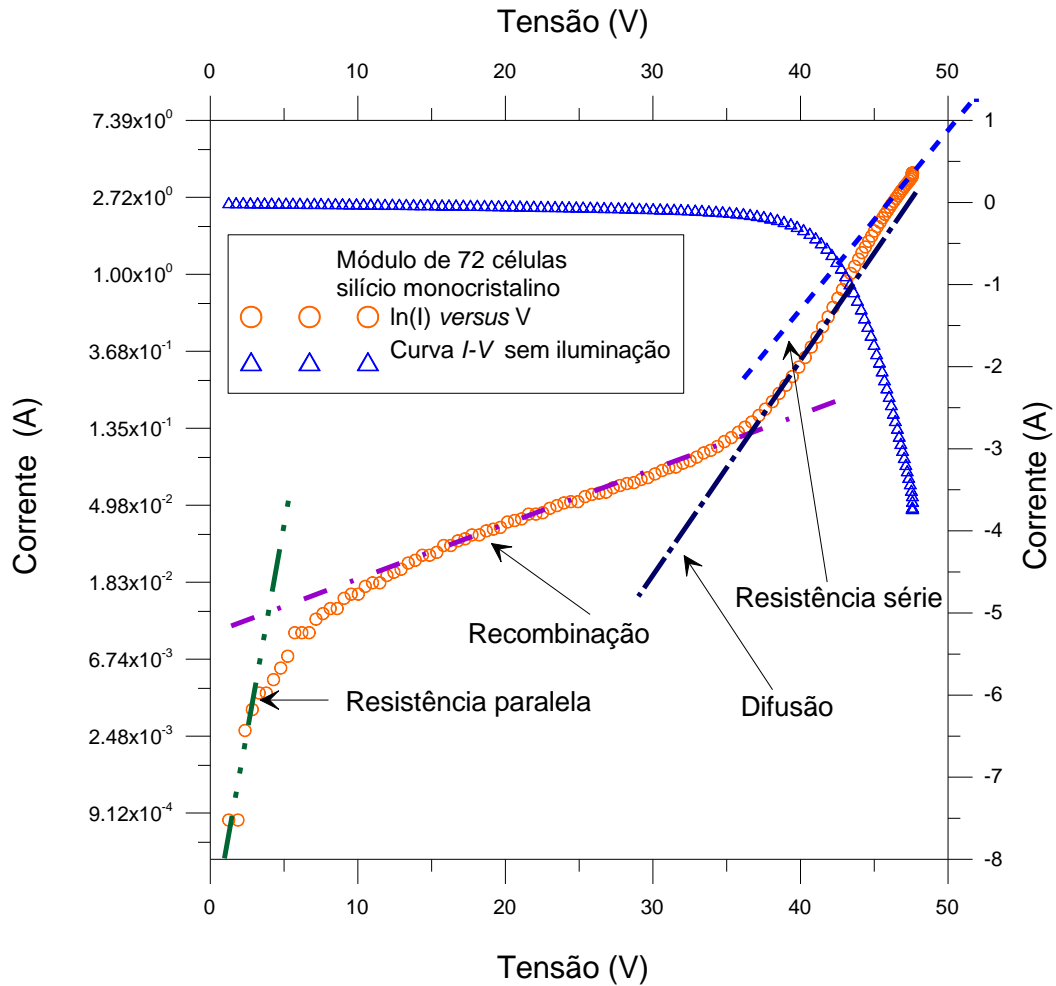


Figura 4.8 - Curva  $I$ - $V$  no escuro e  $\ln(I)$  versus  $V$  com quatro diferentes regiões de tensão influenciadas por:  $R_P$ , processo de difusão, recombinação e  $R_S$ .

Dessa forma, analisando a Equação (4.1) e considerando que a influência da resistência paralela na região de máxima potência é pequena frente aos processos de difusão e recombinação, especialmente quando  $R_P$  apresenta valores elevados e se pode desprezar o termo  $(V - IR_S)/R_P$ , a curva pode ser representada pela Equação (4.6).

$$I = I_0 \left[ \exp \left( \frac{(V - IR_S)}{V_T} \right) - 1 \right] \quad (4.6)$$

Quando o fenômeno de difusão começa a prevalecer perante a influência da resistência paralela na curva apresentada na Figura 4.5 a corrente que circula pelo módulo já é muito maior que  $I_0$ , sendo assim chega-se à Equação (4.7):

$$I = I_0 \left[ \exp \left( \frac{(V - IR_s)}{V_T} \right) \right] \quad (4.7)$$

aplicando o logaritmo tem-se finalmente:

$$\ln I = \ln I_0 + \frac{V - IR_s}{V_T} \quad (4.8)$$

Dessa forma, a partir da Equação (4.8) passa a ser possível a obtenção dos parâmetros corrente de saturação reversa e fator de idealidade do diodo, uma vez conhecido o valor de  $R_s$  do módulo em teste. O procedimento proposto para a determinação do fator de idealidade e da corrente de saturação reversa por meio da Equação (4.8) consiste nas seguintes etapas:

- a) Determinar a resistência série do dispositivo em ensaio através do método proposto na seção 4.2.
- b) A partir da curva determinada no escuro, necessária para a primeira etapa, traçar uma curva  $\ln(I)$  versus  $(V - IR_s)$ .
- c) Selecionar uma região na curva  $\ln(I)$  versus  $(V - IR_s)$  que corresponda à região de influência dos fenômenos de difusão e recombinação (região do joelho da curva  $I$ - $V$ ).
- d) Para esta região da curva, aplicar uma regressão linear obtendo, através do coeficiente linear, o valor de  $\ln(I_0)$  e, através do coeficiente angular, o valor de  $V_T$  e conseqüentemente os valores de  $I_0$  e  $m$ .

#### 4.4. MÉTODO PROPOSTO PARA A DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TENSÃO DE CIRCUITO ABERTO COM A TEMPERATURA

De maneira simples, um módulo fotovoltaico pode ser considerado como um conjunto de células agrupadas em série e ou em paralelo encapsuladas sob um vidro. As células fotovoltaicas são, em essência, diodos de junção PN de grande área. Tanto um diodo quanto uma

célula, e conseqüentemente um módulo, apresentam uma variação da tensão com a temperatura tal qual descrita no capítulo 2.

Como apresentado neste capítulo, as curvas de um módulo fotovoltaico determinadas sem iluminação guardam muitas informações a respeito do comportamento elétrico do gerador fotovoltaico. Sendo assim, da mesma forma que a tensão de circuito aberto do módulo iluminado varia com a temperatura segundo um coeficiente denominado  $\beta$ , as curvas do módulo no escuro também apresentam uma variação com a temperatura. Este fator de diminuição da tensão, como já explicado no capítulo 2, é fruto predominantemente da variação da corrente de saturação reversa. Como esta corrente não depende da iluminação, a variação da tensão com a temperatura no escuro deve, a princípio, apresentar um comportamento bastante similar do que no caso de uma célula ou módulo estarem expostos à luz. Dessa forma, pode-se considerar possível a determinação de  $\beta$  no escuro. A Figura 4.9 apresenta curvas de um módulo fotovoltaico de 33 células de silício monocristalino determinadas sem iluminação e a diferentes temperaturas.

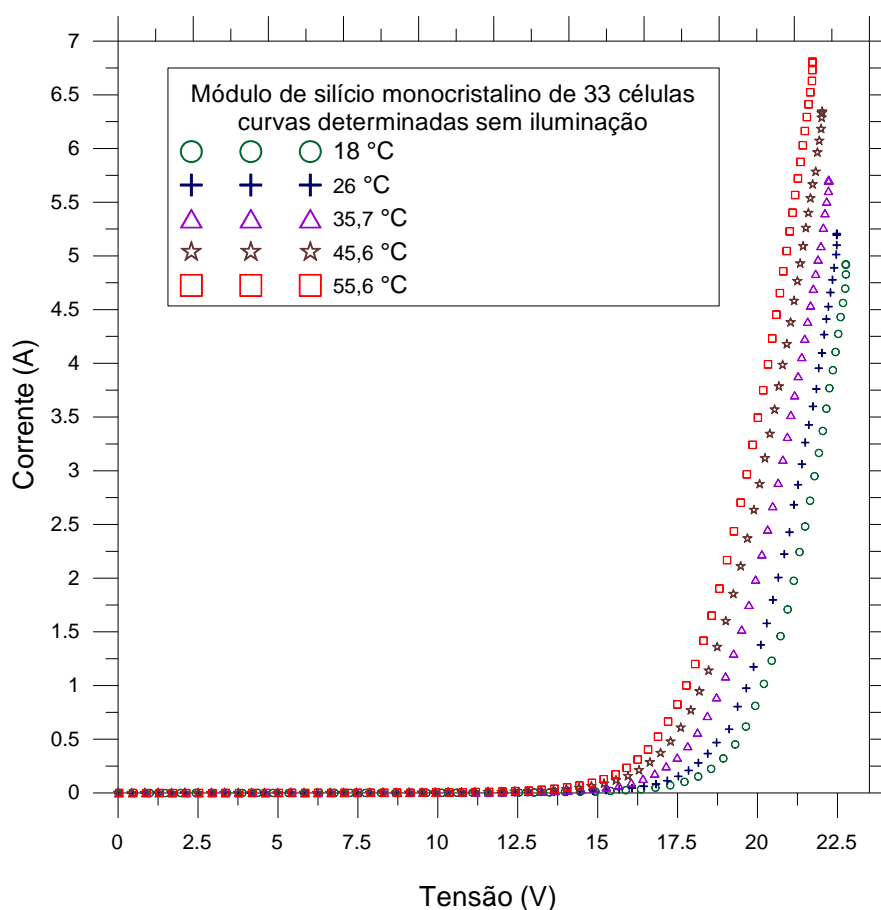


Figura 4.9 - Curvas  $I$ - $V$  de um módulo de silício monocristalino de 33 células determinadas sem iluminação e a diferentes temperaturas.

Como apresentadas nas Figuras 4.2 e 4.3 as curvas de um módulo no escuro são similares às aquelas sob iluminação, mas com um deslocamento no eixo das ordenadas correspondente à corrente de curto-circuito do mesmo e uma diferença na tensão devido à resistência série. Dessa forma, o valor de tensão medido com o módulo no escuro, que representa a tensão de circuito aberto sob iluminação é aquele correspondente à corrente de curto circuito. Embora  $V_{OC}$  não seja igual à tensão correspondente no escuro (a diferença entre eles proporciona o método para determinação de  $R_S$ ), a variação de ambas as tensões com a temperatura deve, a princípio, ser a mesma. A determinação da variação da tensão de circuito aberto com a temperatura segundo o método proposto segue as seguintes etapas:

- a) Anexar um sensor para medição da temperatura junto ao dispositivo em ensaio.
- b) Determinar uma curva  $I-V$  sob iluminação natural na menor temperatura prevista para o ensaio e medir  $V_{OC}$  e  $I_{SC}$ .
- c) Colocar o módulo no interior de um ambiente construído e isolar termicamente o dispositivo em ensaio.
- d) Cobrir o módulo com um material opaco de maneira a garantir que nenhuma irradiância atinja a superfície do mesmo.
- e) Determinar uma curva  $I-V$  uma vez que a temperatura do módulo apresente o mesmo valor daquela na qual foi determinada a curva sob iluminação natural.
- f) Medir a tensão correspondente à corrente igual a de curto-circuito  $I_{SC}$ .
- g) Aumentar a temperatura do módulo através, por exemplo através da injeção de corrente elétrica (efeito Joule), de que seja possível determinar diversas curvas  $I-V$  para diferentes temperaturas.
- h) Em cada curva correspondente a uma dada temperatura, medir a tensão relativa a  $I_{SC} + \alpha \Delta T$  onde  $\alpha$  pode ser estimado como um valor típico para a tecnologia do dispositivo em ensaio e  $\Delta T$  representa a diferença entre a temperatura do dispositivo no primeiro ensaio e a temperatura do dispositivo no ensaio em questão.
- i) Plotar os pontos de tensão medidos *versus* a temperatura do módulo em cada ensaio e obter, por meio da inclinação da reta, o valor de  $\beta$  do dispositivo em teste.



## 5. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Em todos os ensaios para a determinação de curvas  $I$ - $V$  sob iluminação natural as medidas foram realizadas observando uma variação máxima aceitável de 1% da irradiância ao longo da medida. A célula de referência é fixada junto ao módulo, coplanar ao mesmo com um erro inferior a 2 °. Durante todos os ensaios os módulos são colocados em um lugar amplo, longe de obstáculos, árvores e aproximadamente a 1 metro do solo. Estas condições são importantes, pois visam evitar que devido à reflexão de algum objeto, algumas células do módulo sejam expostas a mais irradiância do que outras. A Figura 5.1 apresenta alguns módulos em ensaio sob iluminação natural.



Figura 5.1 - Aspecto do ensaio de módulos sob iluminação natural.

As medidas de temperatura dos módulos, em cada ensaio, são realizadas duas vezes, uma antes e outra depois da aquisição da curva, com uma variação máxima aceitável, para mais ou para menos, de 2 °C.

As medidas no escuro são obtidas com o módulo coberto por um material opaco e realizadas no interior de um ambiente construído. A condição de ausência de iluminação do módulo é assumida uma vez que a tensão de circuito aberto do mesmo seja nula.



Para os ensaios feitos com o módulo iluminado, a radiação solar é usada tanto para a polarização do módulo quanto para seu aquecimento. Já para o aquecimento do módulo nos ensaios no escuro, faz-se circular pelo mesmo uma corrente elétrica da ordem de 2 A a fim de se obter um regime de aquecimento lento, o que diminui a diferença entre o valor medido pelo sensor e a temperatura real das células. Para a medição da temperatura dos módulos, tanto nos ensaios no escuro quanto nos ensaios sob irradiância solar, foi fixado um sensor PT100 na parte de trás junto ao Tedlar em uma célula central, cuja temperatura é assumida como a média da temperatura do módulo. A Figura 5.2 mostra os equipamentos utilizados no ensaio de um módulo sem iluminação.



Figura 5.2 – Equipamentos utilizados no ensaio de um módulo sem iluminação.

### 5.1. EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA AQUISIÇÃO DAS CURVAS $I$ - $V$

Para as medidas de tensão, corrente e irradiância foram utilizados multímetros da marca Hewlett Packard modelo 34401A. Estes multímetros são ligados (ligação em paralelo) a um micro-computador através de uma interface GPIB. A precisão de medida é de  $10\ \mu\text{V}$  (resolução de 4 ½ dígitos) para a tensão. Todas as medidas de corrente, tensão e irradiância são feitas simultaneamente sendo que para cada ensaio são obtidos 512 pontos num tempo total

inferior a 2 segundos. Uma descrição mais completa da técnica de aquisição de dados utilizada pode ser encontrada em Prieb (2002).

Para a polarização do módulo, a fim de se obter um conjunto de pontos com corrente variável, é utilizada uma fonte bipolar da marca Kepco BOP 50-8M, que tem a possibilidade de fornecer ao módulo tensões de  $-50\text{ V}$  a  $50\text{ V}$  e correntes de  $-8\text{ A}$  a  $8\text{ A}$ . Esta fonte é controlada por um gerador de varredura que produz um sinal em forma de rampa regulável de  $-10$  a  $+10\text{ V}$ , que são valores compatíveis com a entrada de controle externo da fonte. A Figura 5.3 apresenta o equipamento de medida utilizado para aquisição das curvas  $I$ - $V$  do Laboratório de Energia Solar da UFRGS bem como um diagrama de suas interconexões.

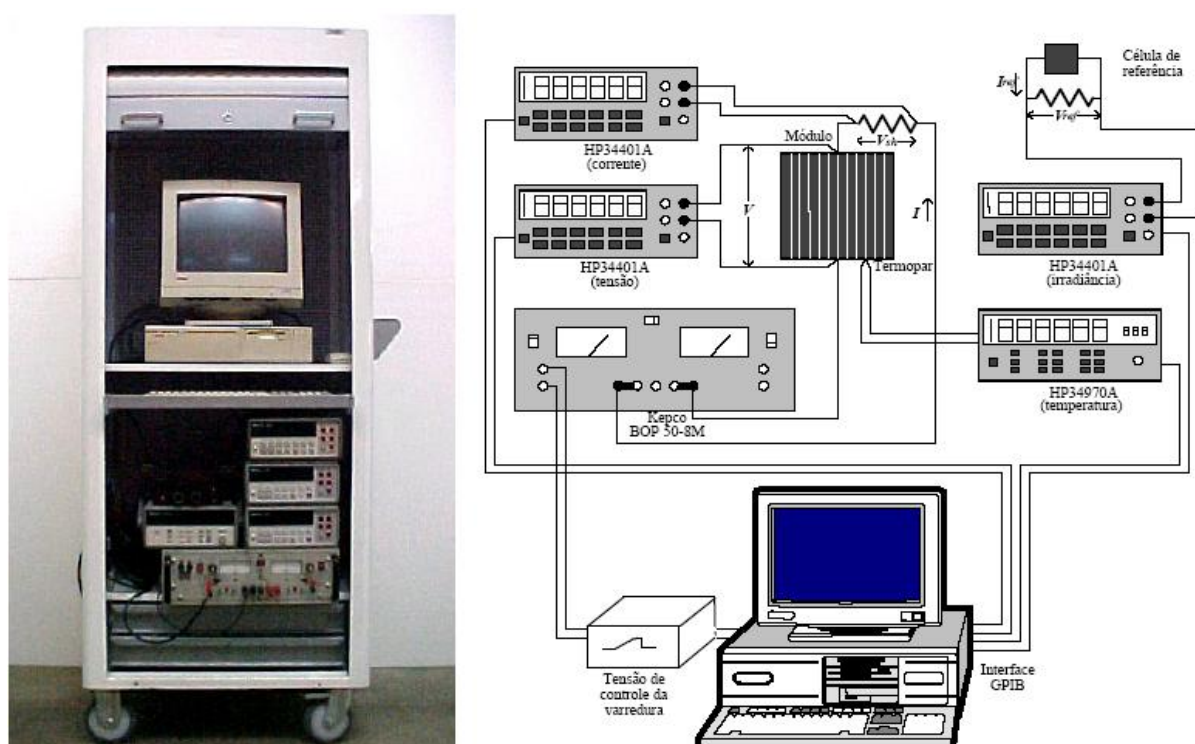


Figura 5.3 - Equipamento utilizado para o ensaio de módulos fotovoltaicos (Krenzinger e Prieb, 2005).

A irradiância é medida através da corrente fotogerada por uma célula de referência encapsulada de silício monocristalino previamente calibrada. Para medir esta corrente fotogerada é feito uso de um resistor tipo shunt, classe de precisão de 0,5% (4 A, 150 mV). Para uma irradiância de  $1000\text{ W/m}^2$  e temperatura de  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  a tensão medida no shunt é de 124 mV com um erro de 4 mV para mais ou para menos.

A medida de corrente elétrica que circula pelo módulo também é feita através de um resistor tipo shunt, classe de precisão 0,5% (10A, 300 mV).

Para a medida de temperatura do módulo nos ensaios sob iluminação natural é usado um termômetro sem contato modelo Raytek 6LXB capaz de realizar medidas com uma precisão de  $\pm 1^\circ\text{C}$ . As medidas de temperatura dos módulos nos ensaios no escuro são feitas com o uso de um sensor de platina tipo PT100 com resolução de  $0,1^\circ\text{C}$ .

A Tabela 5.1 apresenta, de acordo com o fabricante, a exatidão dos equipamentos de medida utilizados em função da escala de operação e a Figura 5.3 apresenta um esquema do equipamento utilizado para medição das curvas  $I$ - $V$ . Para os multímetros HP 34401A a exatidão apresentada na Tabela 5.1 se refere à resolução de  $4\frac{1}{2}$  dígitos.

Tabela 5.1 - Exatidão dos equipamentos de medida.

Equipamento	Grandeza	Escala	Exatidão
HP 34401A	Tensão	100 mV	$\pm 0,005\%$ leitura e $0,0135\%$ FDE
HP 34401A	Tensão	1 V	$\pm 0,004\%$ leitura e $0,0107\%$ FDE
HP 34401A	Tensão	10 V	$\pm 0,0035\%$ leitura e $0,0105\%$ FDE
HP 34401A	Tensão	100 V	$\pm 0,0045\%$ leitura e $0,016\%$ FDE
H&B shunt	Corrente	4 A, 150 mV	0,5%
H&B shunt	Corrente	10 A, 300 mV	0,5%
Raytek 6LXB	Temperatura	-	$\pm 1^\circ\text{C}$
PT100	Temperatura	-	$\pm 0,1^\circ\text{C}$

As incertezas associadas à medição da irradiância são da ordem de  $20\text{ W/m}^2$ . Na determinação da tensão de circuito aberto a incerteza é da ordem de  $0,09\text{ V}$  e para a corrente de curto-circuito  $0,07\text{ A}$ . Uma análise mais aprofundada sobre o cálculo das incertezas associadas à determinação da curva  $I$ - $V$  pode ser encontrada em Prieb (2002). Nas medições de temperatura, para os ensaios referentes à determinação de  $\beta$  a incerteza associada não é considerada tão importante quanto nos casos da determinação de  $V_{OC}$ ,  $G$  ou  $I_{SC}$ . Isto porque para este ensaio a importância maior reside na determinação da variação da temperatura e não do seu valor exato.

## 5.2. DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA SÉRIE

A Equação (4.4) possibilita um método bastante simples para a determinação de  $R_S$  com importantes vantagens perante outros. Métodos analíticos geralmente necessitam de estimativas do valor de alguns parâmetros como  $m$ ,  $\alpha$  e  $\beta$ . Por outro lado a metodologia

estabelecida pela norma é bastante sensível à escolha do ponto de referência para o qual é calculado  $R_S$ . Além disto, a norma estabelece que devem ser determinadas três curvas com mesmo espectro, mesma temperatura mas diferentes irradiâncias e isto muitas vezes é difícil de ser obtido.

Foram testados seis módulos de diferentes marcas e diferentes configurações, cinco deles de silício monocristalino e um de silício multicristalino. As curvas de todos os módulos determinadas sob iluminação natural foram medidas com condições similares de irradiância e temperatura. A Tabela 5.2 apresenta os resultados obtidos na determinação da resistência série para os seis módulos testados.

Tabela 5.2 – Valores encontrados para a resistência série para diferentes módulos de silício utilizando o método proposto neste trabalho.

<b>Módulo</b>	<b>Modelo</b>	<b>Número de células em série</b>	<b>Potência nominal (W)</b>	<b>Resistência série (<math>\Omega</math>)</b>
Isofotón, m-Si	I-100	72	100	1,268
Isofotón, m-Si	I-100	72	100	0,95
Shell, p-Si	RSM 50	36	45	0,793
Siemens, m-Si	SP65	36	65	0,612
Siemens, m-Si	SM50-H	33	45	0,666
Solartec, m-Si	M-65	30	40	0,709

Para dois dos módulos testados foram também aplicados, para a determinação da resistência série, o método proposto pela norma NBR – 12136 (ABNT, 1991a) além do método da pendente. A Figura 5.4 apresenta os resultados obtidos na determinação de  $R_S$  para estes dois módulos os quais apresentam as seguintes configurações: módulo da marca Siemens modelo SP65 de 36 células de silício monocristalino (65 W, 12 V nominal) e módulo da marca Isofotón modelo I-100 de 72 células de silício monocristalino (100 W, 24 V nominal).

A fim de verificar a coerência dos resultados obtidos segundo o método proposto para a determinação de  $R_S$  no escuro, foi realizada a seguinte metodologia: para os mesmos módulos apresentados na Figura 5.4 foram acrescentados resistores em série, previamente testados para garantir que o valor de suas resistências não variasse significativamente ao longo das medidas de tensão e corrente. Tais resistores, constituídos de uma liga de cobre e níquel (constantan) foram testados da seguinte forma: após determinada a temperatura do resistor, da

ordem de 18 °C, foi aplicada neste uma corrente variável e foram medidos 512 pontos posteriormente usados para a construção de uma curva de tensão *versus* corrente. Da inclinação desta curva resulta o valor de resistência. Numa segunda etapa o mesmo resistor foi aquecido, por meio de efeito Joule, até uma temperatura próxima de 40 °C e então foi traçada uma nova curva de tensão *versus* corrente obtendo assim novamente um valor de resistência que foi igual ao anterior considerando uma margem de erro inferior a 2%.

Foram acrescentados resistores de 0,364  $\Omega$ , 0,746  $\Omega$  e 1,11  $\Omega$ . A Figura 5.5 apresenta o efeito causado pelo incremento dos resistores nas curvas ( $I-V$ ) para um módulo de 36 células determinadas sob iluminação e a Figura 5.6 apresenta o efeito no mesmo módulo para as curvas determinadas no escuro.

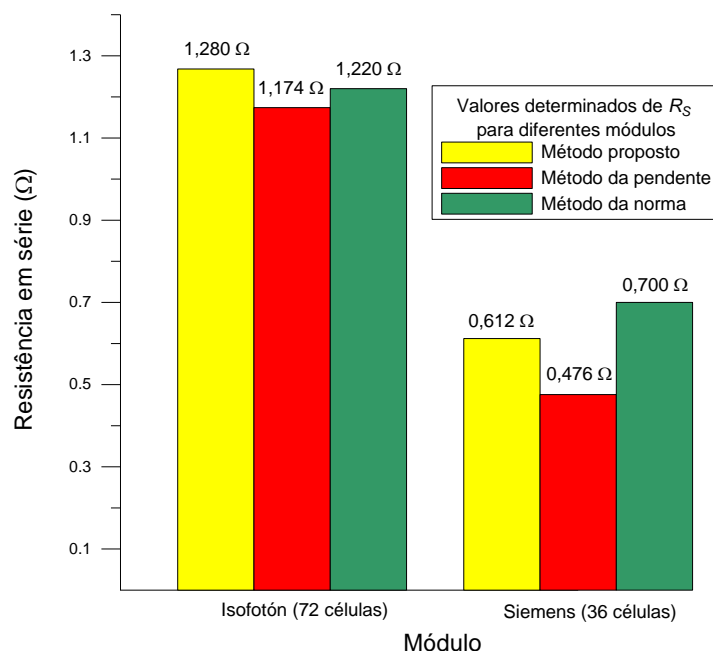


Figura 5.4 - Valores de  $R_S$  determinados para dois módulos de diferentes configurações através do método proposto, do método da pendente e da norma.

Para fins de comparação a manipulação com estes resistores foi também aplicada no método da pendente. O valor do fator de idealidade, utilizado para o cálculo de  $R_S$  no método da pendente, foi determinado segundo o método proposto neste trabalho descrito no capítulo 4. A Figura 5.7 apresenta os resultados encontrados, para o módulo da marca Isofotón modelo I-100, através da manipulação das resistências para o método proposto e da pendente. A Figura 5.8 apresenta a relação entre o incremento de  $R_S$  medido em função dos diferentes resistores acrescentados em série com os terminais do módulo, também para os métodos, proposto e da pendente.

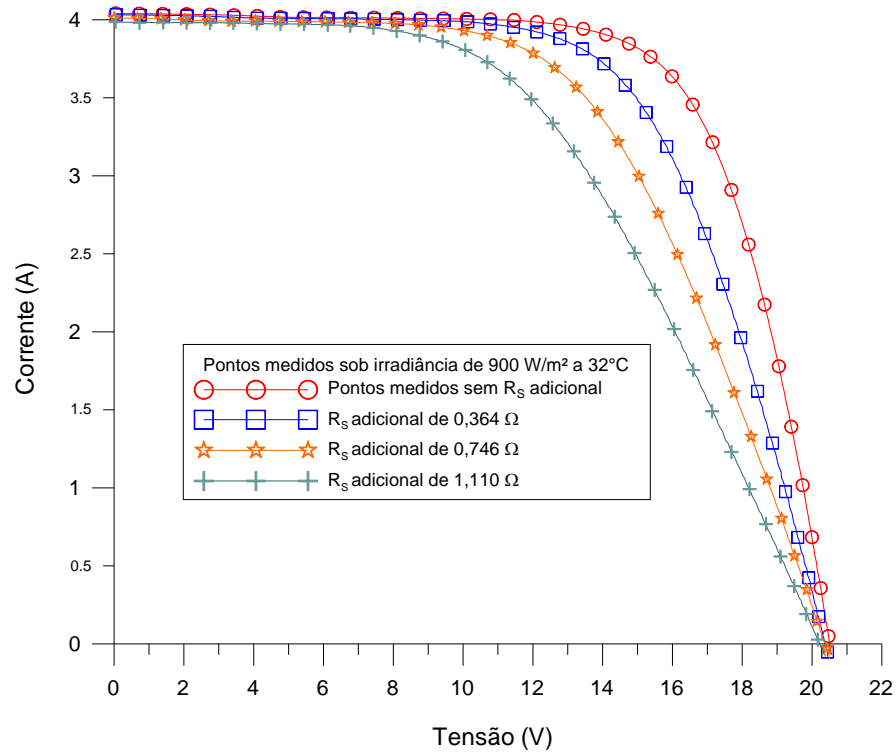


Figura 5.5 - Curvas características de um módulo de 36 células (m-Si) determinadas sob iluminação natural com resistores acrescentados em série.

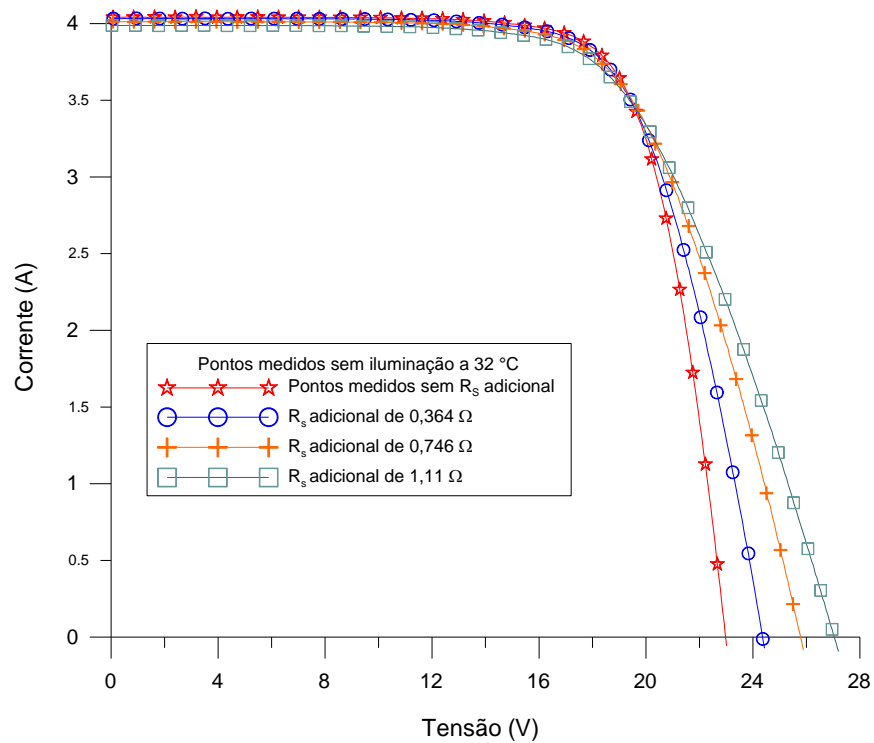


Figura 5.6 - Curvas características do mesmo módulo da Figura 5.5 determinadas sob ausência de iluminação com os mesmos resistores acrescentados em série.

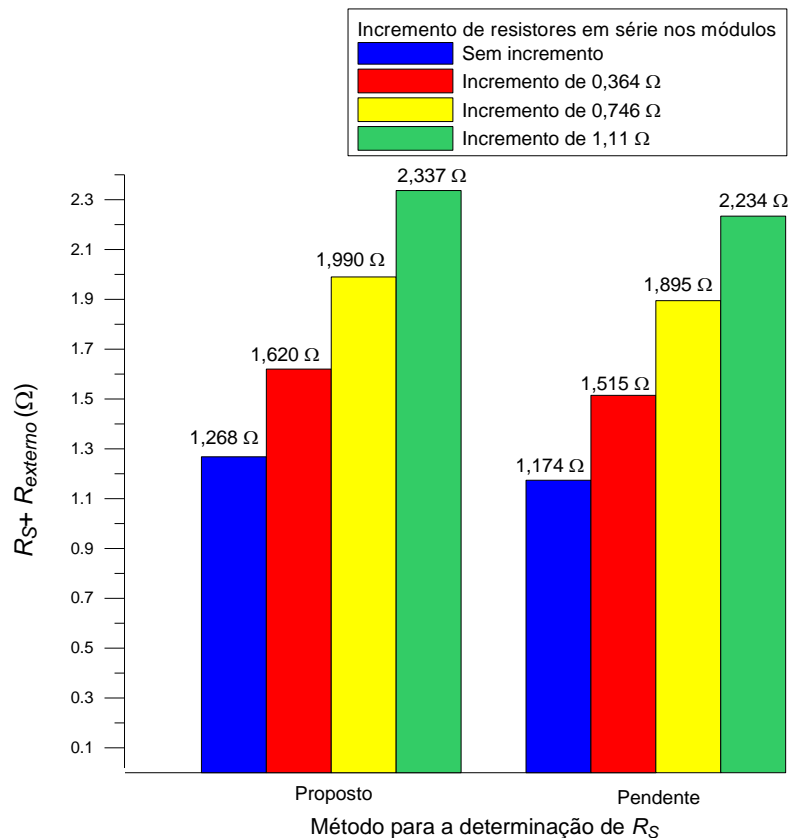


Figura 5.7 - Valores determinados de  $R_S$  para um módulo (m-Si) de 100 W de potência e 24 V de tensão nominal através do incremento de resistores em série.

Analisando os dados apresentados na Figura 5.7 nota-se que os valores determinados de  $R_S$  apresentaram uma diferença da ordem de 8% entre o método proposto e o da pendente para o módulo em teste. Parte dessa diferença pode ser atribuída ao fator de idealidade presente na Equação (5.1) por meio da qual é obtido o valor de  $R_S$  para o método da pendente. Por outro lado, a Figura 5.8 apresenta uma correlação muito parecida para estes dois métodos quanto à sensibilidade do incremento de resistência medido em função dos resistores acrescentados ao módulo. A diferença entre os métodos quanto à variação de  $R_S$  frente ao incremento dos resistores foi inferior a 0,5 % o que comprova a sensibilidade de ambos os métodos.

Pode-se concluir que ambos os métodos são igualmente sensíveis a um parâmetro fotovoltaico que é interpretado como uma resistência série acoplada ao módulo. Entretanto na determinação desse parâmetro, como nos demais, existe um conjunto de parâmetros ( $R_S$ ,  $R_P$ ,  $I_0$  e  $m$ ) que associados conseguem descrever o comportamento elétrico do módulo. Dessa forma tanto o método da pendente quanto o método proposto para a determinação da resistência série podem ser considerados eficazes.

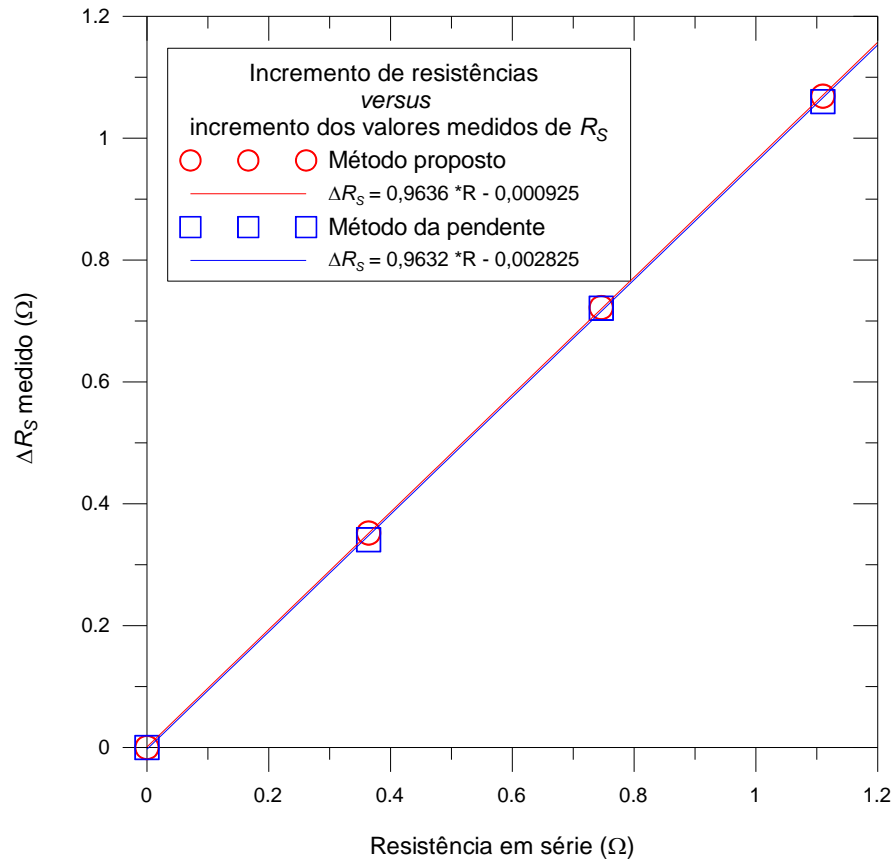


Figura 5.8 – Relação entre o incremento de  $R_S$  medido e as resistências em série acrescentadas.

### 5.3. DETERMINAÇÃO DA CORRENTE DE SATURAÇÃO REVERSA E DO FATOR DE IDEALIDADE

O método utilizado para determinar a corrente de saturação reversa e o fator de idealidade está descrito na seção 4.3.

A região para a regressão linear é obtida limitando a curva  $\ln(I)$  versus  $(V - IR_S)$  entre os valores de  $\ln(I) = 0$  e  $\ln(I) = -2$  correspondentes aos valores de corrente de aproximadamente 0,135 A e 1 A. Este critério, como será demonstrado posteriormente, mostrou-se bastante eficiente para os módulos testados uma vez que, selecionada uma região de corrente, se tem a garantia que esta varie com a temperatura acompanhando o ponto de máxima potência de cada curva.

A Figura 5.9 mostra, para um módulo sem iluminação, Isofotón I-100 (72 células 100 W / 24 V nominal), as curvas  $I$ - $V$ ,  $\ln(I)$  versus  $(V - IR_S)$  e a regressão linear para a região de interesse na determinação de  $I_0$  e  $m$ .



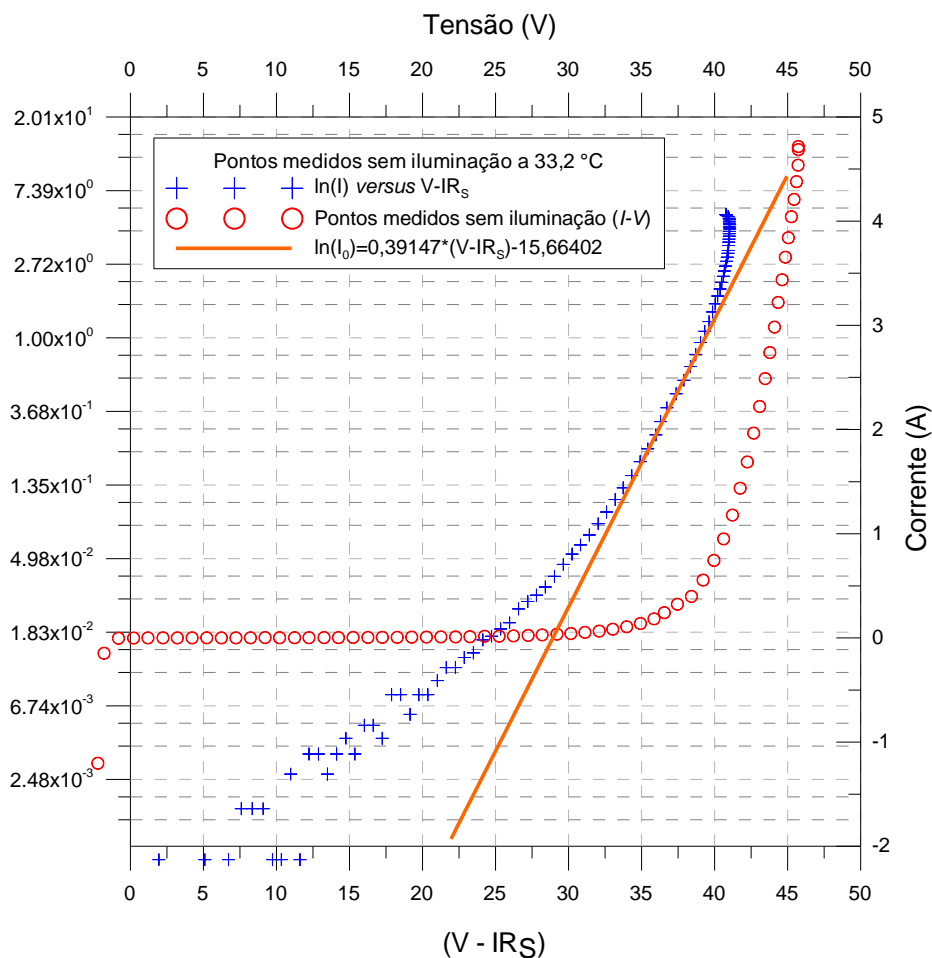


Figura 5.9 - Curvas determinadas a partir de ensaio sem iluminação a 33,2 °C.

Utilizando curvas para um mesmo módulo a diferentes temperaturas com  $R_S$  previamente determinada igual a 0,95  $\Omega$ , foram obtidos diferentes valores para a corrente de saturação reversa do diodo. Este procedimento visa a obtenção de uma equação de ajuste para a corrente de saturação reversa do diodo como função da temperatura. Dessa forma torna-se possível a elaboração de curvas características  $I$ - $V$  (teóricas), para uma célula ou módulo a diferentes temperaturas. É sabido que a variação de  $I_0$  com a temperatura não é linear, sendo que os resultados obtidos mostram, para uma faixa de temperatura aplicável a um módulo fotovoltaico em operação, que essa variação pode ser assumida como exponencial. Para uma variação de temperatura de aproximadamente 30 °C a 60 °C, a corrente de saturação reversa apresentou variação da ordem de 24 vezes. Por outro lado o fator de idealidade, assumido como constante, apresentou desvio inferior a 2% do valor médio entre as curvas de diferentes temperaturas. Isto pode ser atribuído às imprecisões nas medidas e também possivelmente ao critério de seleção da região de interesse na curva  $\ln(I)$  versus  $(V - IR_S)$ .

A Figura 5.10 mostra a variação de  $\ln(I_0)$  com a temperatura, bem como os valores de  $m$  calculados a partir das diferentes curvas de um módulo fotovoltaico de 72 células de silício monocristalino de 100 W de potência e 24 V de tensão nominal.

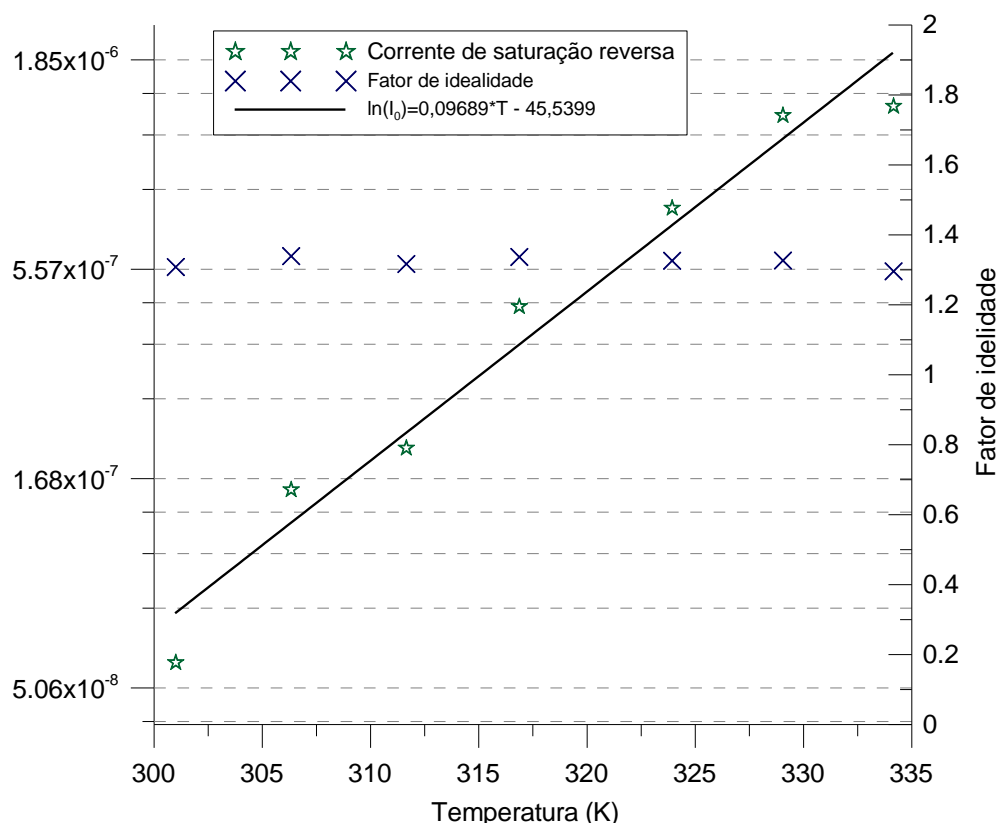


Figura 5.10 - Pontos medidos de  $\ln(I_0)$  e  $m$  para diferentes temperaturas de um módulo de 100 W de silício monocristalino.

Para o módulo testado, cujos valores de  $I_0$  e  $m$  são apresentados na Figura 5.10, foi encontrada a equação de ajuste  $\ln(I_0) = 0,09689 \cdot T - 45,5399$ , onde a temperatura é medida na escala absoluta. O valor médio de  $m$  encontrado foi de 1,32.

A fim de verificar a aplicabilidade dos parâmetros, estes foram usados para elaboração de uma curva teórica à temperatura de 49,8°C. Para esta mesma temperatura foram medidos pontos com o módulo exposto a uma irradiância próxima de 1 kW/m<sup>2</sup>. Posteriormente os pontos medidos foram corrigidos para a irradiância de 1 kW/m<sup>2</sup> e então foi feita uma superposição com a curva teórica. A Figura 5.11 mostra a superposição dos pontos medidos sob iluminação natural com a curva teórica calculada segundo os parâmetros encontrados com os métodos propostos por este trabalho para  $R_s$ ,  $I_0$  e  $m$ .

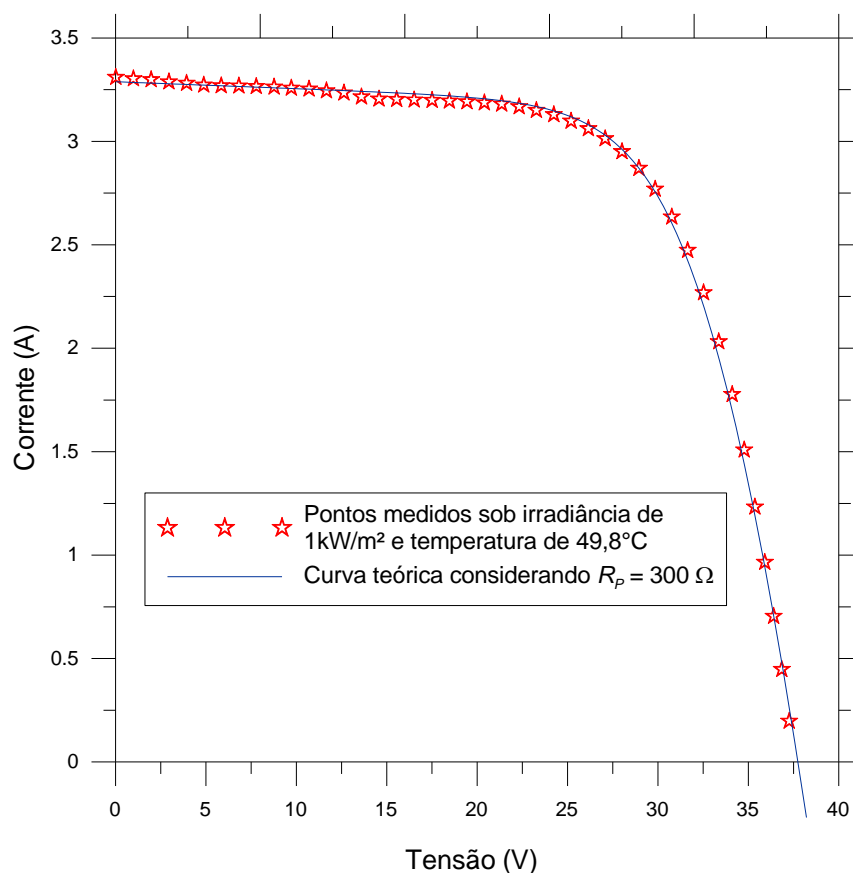


Figura 5.11 - Pontos medidos e calculados para um módulo de silício monocristalino de 100 W de potência e 24 V de tensão nominal na temperatura de 49,8 °C.

Os resultados da Figura 5.11 mostram boa concordância, no entanto verifica-se que em uma região de tensão entre aproximadamente 5 V e 20 V existe uma diferença entre a curva teórica e a medida. Esta diferença é percebida como um “degrau” na curva medida, mas isto é devido muito provavelmente a diferenças entre as células que compõem o módulo testado. Desta forma, essa diferença entre as curvas medida e calculada não pode ser atribuída à ineficácia do método proposto.

Nota-se também que pequenas mudanças no valor de  $I_0$  podem causar significativas deformações na forma da curva e que  $m$  e  $I_0$  estão atrelados de maneira que, de acordo com o método aqui proposto, variando o critério de seleção da região da curva  $m$  e  $I_0$  variam, mas não necessariamente seu efeito sobre a curva.

A tensão de circuito aberto medida para este módulo foi de 37,55 V enquanto a tensão obtida por meio da curva teórica foi de 37,74 V o que resulta em uma diferença da ordem de 0,5%.

É possível demonstrar que  $R_p$  está diretamente associada a pendente da curva nessa região tal como em Krenzinger (1994). O valor da resistência paralela adotada para a curva teórica foi estimado a partir deste método.

Verificou-se ao longo deste trabalho que a pendente da curva  $V-I$  junto ao ponto de curto-circuito apresenta considerável diferença entre a curva determinada com e sem iluminação quando  $R_p$  apresenta valores considerados baixos, inferiores a  $200\ \Omega$ . Dessa forma não é proposto aqui um método para a determinação de  $R_p$  a partir da inclinação de uma curva determinada sem iluminação, uma vez que esta seria falha para módulos com baixa resistência paralela, como é o caso dos módulos de silício multicristalino, por exemplo.

O método proposto para a determinação de  $I_0$  e  $m$  foi também aplicado em outro módulo, também de silício monocristalino da marca Siemens SM50-H, de 33 células (50 W de potência e 12 V tensão nominal). A Figura 5.12 apresenta as curvas  $I-V$ ,  $\ln(I)$  versus  $V$ ,  $\ln(I)$  versus  $(V-IR_s)$  e a regressão linear para a região de interesse na determinação de  $I_0$  e  $m$ .

Analisando a Figura 5.12 é possível observar que o critério de seleção da região para a qual é obtida a região linear não é fortemente dependente da estimativa de  $R_s$  uma vez que a reta se encontra entre as curvas  $\ln(I)$  versus  $V$  e  $\ln(I)$  versus  $(V-IR_s)$ .

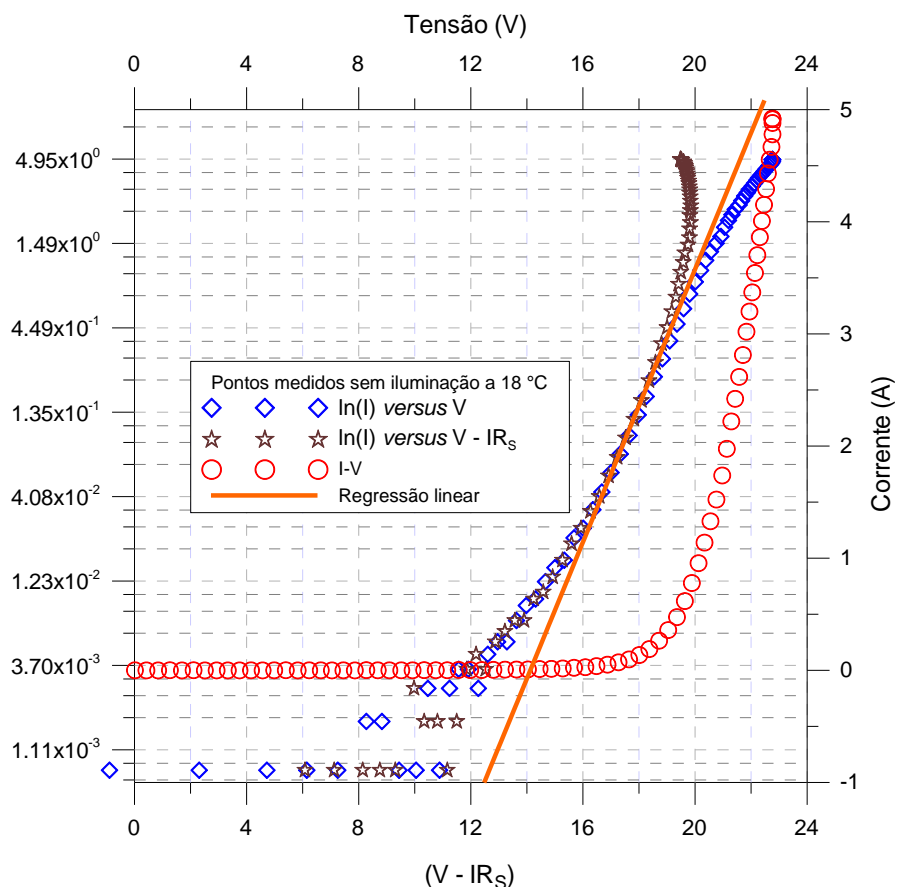


Figura 5.12 - Curvas determinadas a partir de ensaio sem iluminação a  $18\ ^\circ\text{C}$ .

Foram determinadas curvas  $I$ - $V$  sem iluminação em cinco diferentes temperaturas e novamente gerado um gráfico, apresentado na Figura 5.13, de onde é extraído o valor para o fator de idealidade e para a corrente de saturação reversa, esta última como função da temperatura. A equação de ajuste encontrada para o logaritmo da corrente de saturação reversa em função da temperatura foi  $\ln(I) = 0,15013 * T - 66,27601$  e o valor médio de  $m$  encontrado foi de 1,05. A resistência série pré-determinada foi de  $0,666 \Omega$  e a resistência paralela de  $200 \Omega$ .

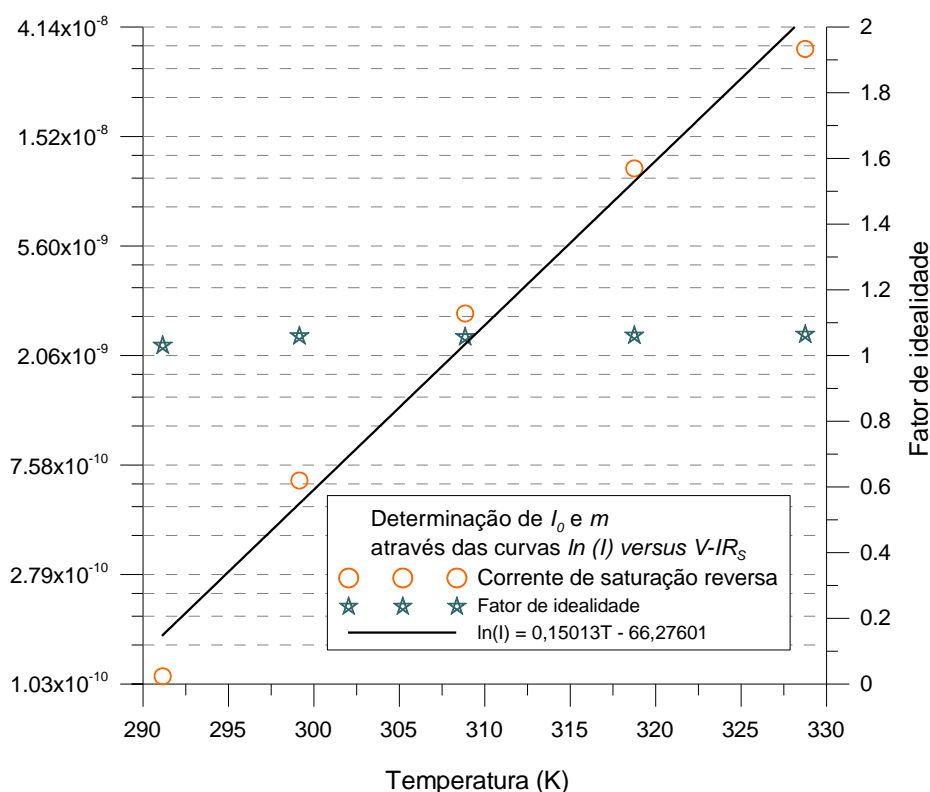


Figura 5.13 - Pontos medidos de  $\ln(I_0)$  e  $m$  para diferentes temperaturas de um módulo de 50 W de silício monocristalino.

Para este módulo, através do método proposto para a determinação de  $I_0$  verificou-se uma variação desta corrente da ordem de 300 vezes para a variação de temperatura de  $30^\circ\text{C}$  a  $60^\circ\text{C}$ .

Os valores dos parâmetros encontrados para este módulo foram também utilizados para gerar uma curva teórica de corrente por tensão de maneira que esta fosse superposta a uma curva medida. A Figura 5.14 apresenta a superposição das curvas teórica e medida para uma temperatura de  $32^\circ\text{C}$ . A curva medida corresponde a uma irradiância de aproximadamente  $1000 \text{ W/m}^2$ . A tensão de circuito aberto medida para este módulo foi de  $18,96 \text{ V}$  enquanto através da curva teórica foi obtida uma tensão de  $19,165 \text{ V}$  o que resulta em uma diferença da

ordem de 1,07%. Fica dessa forma comprovada a aplicabilidade dos parâmetros fotovoltaicos como um critério de qualificação de módulos.

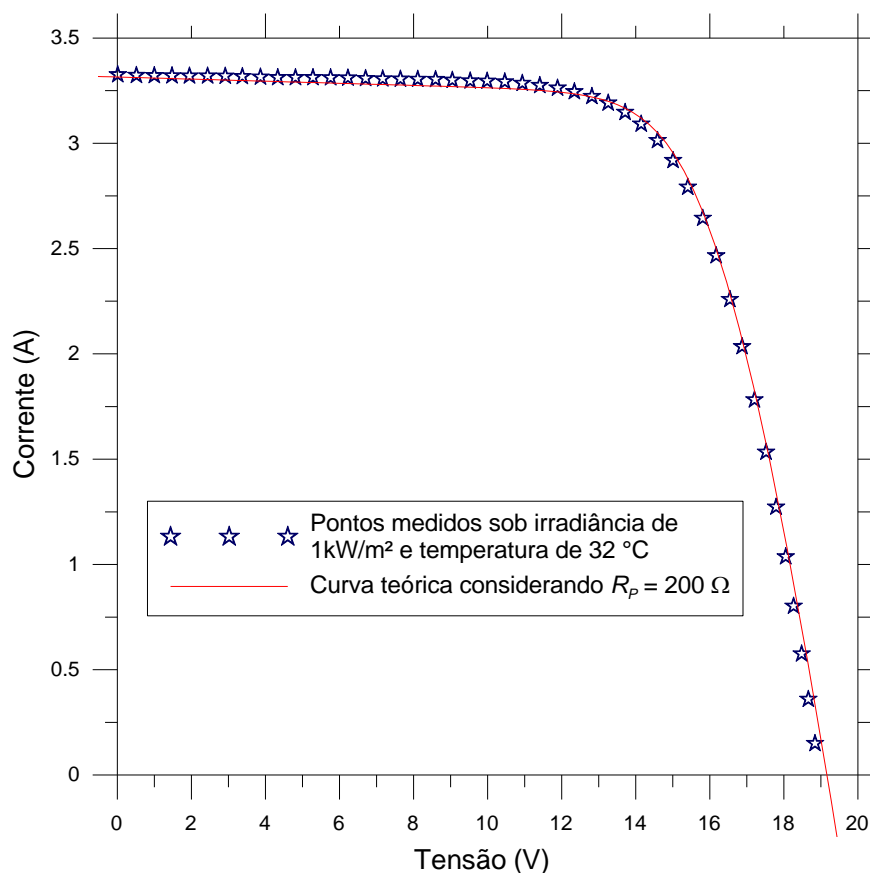


Figura 5.14 - Pontos medidos e calculados para um módulo de silício monocristalino de 50 W de potência e 12 V de tensão nominal na temperatura de 32 °C.

#### 5.4. DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TENSÃO DE CIRCUITO ABERTO COM A TEMPERATURA

Foram usados para os ensaios módulos das marcas Isotón modelo I-100 (100 W / 24 V), e Siemens modelos SP65 e SM50-H (65 W / 12 V e 50 W / 12V). Para esses módulos foi medida a variação da tensão de circuito aberto com a temperatura com os mesmos expostos à luz solar e posteriormente sem iluminação. Durante os ensaios sob iluminação natural, a irradiância medida, foi sempre maior do que 900 W/m<sup>2</sup>. A flutuação tolerada entre os valores de irradiância ao longo dos ensaios (exposição do módulo à irradiação solar com medição simultânea de da temperatura e da tensão de circuito aberto) foi da ordem de 30 W/m<sup>2</sup>.

Os valores medidos de tensão foram então posteriormente corrigidos para a condição padrão de 1000 W/m<sup>2</sup> a fim de eliminar a influência da variação da tensão devido à variação da irradiância. Para tal correção foi feito uso da Equação (5.2).

$$V_{OC2} = V_{OC1} + \frac{N_s m k_B T}{e} \ln \left( \frac{G_2}{G_1} \right) \quad (5.2)$$

Para o aquecimento do módulo durante os ensaios sob iluminação natural foi feito o uso da irradiância solar. Tal técnica permite facilmente alcançar temperaturas, mesmo no inverno, da ordem de 60 °C, isto considerando um valor mínimo de irradiância da ordem de 900 W/m<sup>2</sup>.

Com os valores de tensão e temperatura foram então traçadas curvas ( $V_{OC}$  versus  $T$ ) das quais a inclinação fornece o valor da variação da tensão para o módulo em teste. Para a análise dos resultados a variação da tensão com a temperatura de cada módulo testada foi dividida pelo número de células em série resultando assim no coeficiente  $\beta$  (mV/°C por célula).

Os ensaios sem iluminação para a determinação de  $\beta$  foram feitos segundo duas diferentes metodologias: uma delas consiste em determinar curvas  $I$ - $V$  a diferentes temperaturas e localizar em cada uma delas o valor de tensão correspondente a  $V_{OC}$ . Esse valor de tensão é aquele associado à corrente elétrica igual a  $I_{SC}$ . A outra metodologia consiste em alimentar o módulo com uma corrente elétrica igual a  $I_{SC}$  monitorando simultaneamente a tensão e a temperatura. Nota-se que para ambas as metodologias se faz necessária a determinação de uma curva  $I$ - $V$  com o módulo iluminado para que se conheça o valor de  $I_{SC}$ . Os valores encontrados de  $\beta$  nos ensaios no escuro também foram corrigidos, uma vez que  $I_{SC}$  também varia com a temperatura, em uma taxa estimada em 0,06%/°C para todos os casos.

A correção para os valores de  $\beta$  encontrados a partir dos ensaios sem iluminação é demonstrada a seguir:

Da análise realizada no capítulo 4, seção 4.2, obteve-se a seguinte expressão:

$$V_{OC} = V_e - I_{SC} R_s \quad (5.3)$$

onde  $R_s$  é a resistência série do módulo, previamente determinada,  $V_{OC}$  é a tensão de circuito aberto do módulo quando este é exposto a uma certa irradiância,  $I_{SC}$  é a corrente de curto-circuito e  $V_e$  é a tensão correspondente a  $I_{SC}$  para o mesmo módulo no ensaio sem iluminação.

Derivando a Equação (5.3) com respeito à temperatura e considerando que a resistência série não varia com a mesma, obtém-se:

$$\frac{\partial V_{oc}}{\partial T} = \frac{\partial V_e}{\partial T} - \frac{\partial I_{sc}}{\partial T} R_s \quad (5.4)$$

Considerando que o termo do lado esquerdo da Equação (5.4), bem como o primeiro termo do lado direito correspondem, respectivamente, aos valores de  $\beta$  determinados com e sem iluminação, observa-se que ambos são negativos.

$$\beta = \beta_e - \alpha R_s \quad (5.5)$$

onde  $\beta$  corresponde ao coeficiente medido com o módulo iluminado e  $\beta_e$  com o módulo no escuro. Assim, apesar do sinal negativo, o valor em módulo de  $\beta$  é maior que o valor medido no escuro ( $\beta_e$ ).

Durante as medidas no escuro, cada módulo foi termicamente isolado tanto no fundo como nas laterais e na parte superior. Para o aquecimento dos módulos a técnica adotada foi a de fazer circular uma corrente elétrica através dos mesmos. Dessa forma, os dispositivos em ensaio podiam ser aquecidos por efeito Joule até as temperaturas desejadas. Outra técnica também utilizada em alguns ensaios foi a de aquecer o módulo em teste até uma temperatura pré-fixada (a máxima temperatura para o ensaio) e posteriormente monitorar a temperatura e a tensão em intervalos regulares de tempo, durante o resfriamento do mesmo, até que a temperatura do módulo entrasse em equilíbrio com a temperatura ambiente. Esta técnica permitiu que fosse verificada a precisão das medidas de temperatura dos módulos em ensaio, uma vez que comparando para um mesmo módulo em ensaios com regimes de aquecimento e resfriamento a diferença encontrada para os valores de  $\beta$  foi da ordem de 2%.

A Tabela 5.3 apresenta os valores de  $\beta$  encontrados para os módulos testados sob iluminação natural e ausência de iluminação, já com a correção apresentada na Equação (5.5). Os valores medidos foram normalizados dividindo o resultado pelo número de células em série no módulo, para facilitar a compreensão.

A Figura 5.15 apresenta um gráfico da variação da tensão com a temperatura para um dos módulos medidos nos ensaios com e sem iluminação bem como a variação da irradiância ao longo do ensaio com o módulo iluminado.



Tabela 5.3 - Valores de  $\beta$  medidos através de ensaios com e sem iluminação, normalizados para uma célula.

Modelo	$N_S$	$R_S (\Omega)$	$\beta_{Sol}$ (mV/°C)	$\beta_{esc.}$ (mV/°C)	Variação da Irradiância solar
SP65	36	0,612	-2,27	-1,98	2,46%
SM50-H	33	0,666	-2,28	-1,80	1,15%
I-100	72	0,950	-1,97	-1,87	1,62%
I-100	72	1,166	-2,06	-1,92	2,08%

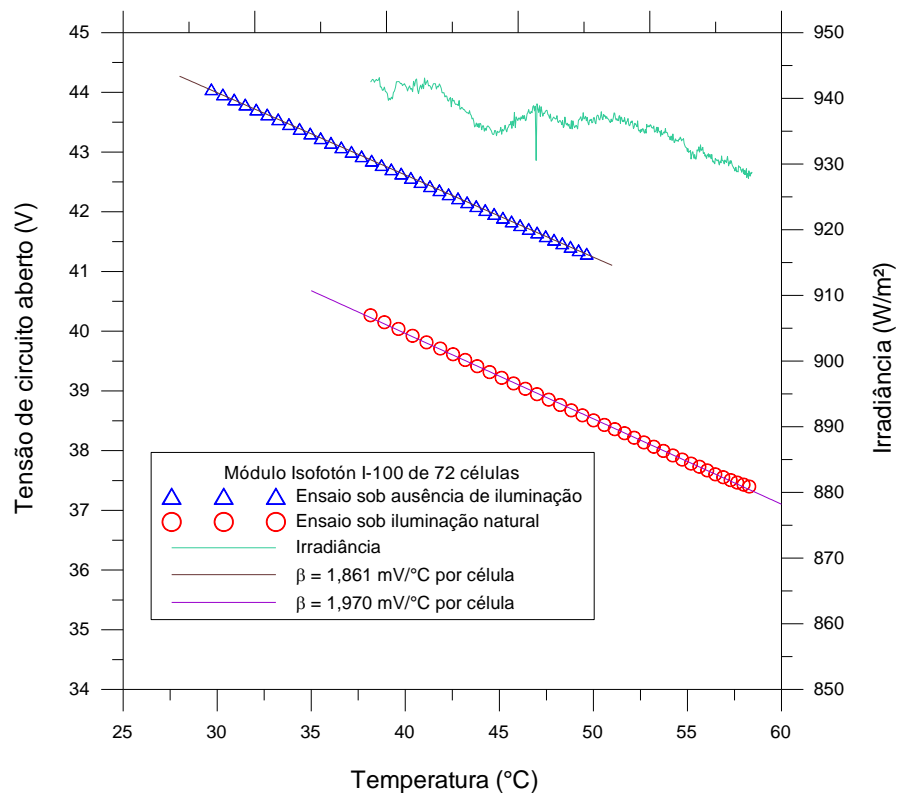


Figura 5.15 - Variação de  $V_{OC}$  com a temperatura (ensaio com e sem iluminação) e variação da irradiância ao longo do ensaio com o módulo iluminado.

Os valores de  $\beta$  encontrados para as medições sob iluminação natural foram da ordem de 2 mV/°C por célula com uma máxima diferença de 13% entre os mesmos. A diferença percentual entre os valores encontrados para  $\beta$  nos ensaios convencionais e no escuro apresentou variações entre os módulos testados. Em média essa diferença foi da ordem de 10%. Mesmo que esta diferença média para os valores de  $\beta$  determinados no escuro, tenha sido sempre para menos, os resultados podem ser considerados satisfatórios, uma vez que permitem comparar o

desempenho de diferentes módulos em diferentes condições de temperatura, sem a necessidade de diversos ensaios sob iluminação natural.

De qualquer forma persiste a necessidade da elaboração de um método de correção mais preciso levando em conta os mecanismos físicos responsáveis pela diferença sistemática entre a variação da tensão de circuito aberto com o módulo iluminado e no escuro. Embora pertinente, essa correção não será objeto de estudo desta dissertação sendo, portanto tratada como uma interessante sugestão para trabalhos futuros.

## 6. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A não dependência das condições climáticas traz vantagens para a caracterização de módulos fotovoltaicos, pois mesmo que alguns procedimentos possam ser mais complexos ou exijam mais ensaios, os mesmos podem ser feitos a qualquer hora do dia ou mesmo da noite.

As curvas características feitas sem iluminação, mesmo não apresentando o mesmo formato do que quando medidas sob iluminação, fornecem informações importantes sobre o comportamento elétrico do módulo, uma vez que diversos parâmetros elétricos não dependem da iluminação.

Para a determinação das curvas características, a técnica adotada para o aquecimento dos módulos mostrou-se bastante confiável quanto à homogeneidade da temperatura do módulo como um todo.

Os resultados obtidos para a resistência série, quando testados através do incremento de resistências em série com o módulo podem ser considerados muito bons, uma vez que apresentaram um desvio da ordem de 2 % entre os valores medidos e os preditos.

Através da comparação com o método da pendente foi possível verificar uma boa coerência dos resultados obtidos por este método e pelo proposto neste trabalho. A sensibilidade de ambos os métodos quanto ao incremento dos diferentes resistores mostrou-se muito parecida, inferior a 0,5%. Por outro lado, os valores de  $R_S$  medidos para o módulo SP65 apresentaram diferenças de até 20% entre os métodos da pendente e o método proposto. No caso do módulo I-100 a diferença entre estes métodos foi da ordem de 8%.

Métodos analíticos geralmente necessitam de estimativas do valor de alguns parâmetros como  $m$ ,  $\alpha$  e  $\beta$ . Por outro lado a metodologia estabelecida pela norma é extremamente sensível à escolha do ponto de referência para o qual é calculado  $R_S$ . Além disto a norma estabelece que devem ser determinadas três curvas com mesmo espectro, mesma temperatura mas diferentes irradiâncias e isto muitas vezes é difícil de ser obtido.

Tomando como exemplo um módulo de 72 células associadas em série (considerando  $\beta$  igual a  $-2,3 \text{ mV/}^\circ\text{C}$  por célula), erros na medição da temperatura da ordem de  $1^\circ\text{C}$  não resultam em diferenças maiores do que 4 % nos valores de  $R_S$  obtidos.

Foi apresentado um método para determinação de  $I_0$  e  $m$  a partir de ensaios com curvas  $I$ - $V$  sem iluminação, além de sua dependência com a temperatura. Os valores encontrados de  $I_0$ ,  $m$  e  $R_S$  foram usados para a elaboração de curvas teóricas, que quando comparadas com curvas determinadas sob iluminação natural apresentaram boa concordância.

Um estudo da variação de  $I_0$  em função da temperatura resultou em uma relação exponencial entre os mesmos. No entanto foi verificado que pequenas mudanças no valor de  $I_0$  podem causar significativas deformações na forma da curva. O desvio médio dos valores obtidos para o fator de idealidade em diferentes temperaturas foi da ordem de 2 % não apresentando qualquer tendência de variação. O critério para seleção da região da curva  $\ln(I)$  versus  $V-IR_s$  onde é aplicada a regressão linear, e por meio dela obtidos os valores de  $I_0$  e  $m$ , mostrou-se confiável e eficaz.

De maneira geral pode-se concluir que o modelo de um diodo, adotado para representar o circuito equivalente de uma célula ou módulo fotovoltaico, mostrou-se eficaz, demonstrando, a princípio, que não há necessidade de aplicação de um modelo mais complexo.

Os resultados obtidos para a determinação de  $\beta$  através de ensaios com o módulo no escuro mostraram que é possível a determinação deste. Mesmo que os valores de  $\beta$  obtidos a partir dos ensaios no escuro tenham sido sempre menores do que nos ensaios com luz (em média 10%), os resultados podem ser considerados satisfatórios uma vez que se torna possível a comparação de diferentes módulos em diferentes condições de temperatura sem a necessidade de inúmeros ensaios sob iluminação natural.

Um estudo sobre a influência da densidade de corrente (como função da irradiância) na resistência série é um interessante tema para estudos futuros, bem como a determinação da resistência paralela através de um método a ser proposto.

Por fim outra proposta para futuros trabalhos é a de testar os métodos aqui apresentados para a determinação de  $R_s$ ,  $I_0$ ,  $m$  e  $\beta$  para módulos de diferentes tecnologias, como os de filmes finos, buscando analisar diferenças entre estes módulos e os de silício monocristalino.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aberle, A. G., Wenham, S. R. e Green, M. A., 1993. “A New Method for Accurate Measurements of the Lumped Series Resistance of Solar cells”, **23<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference**, Louisville, KY, US, pp.133-139.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1991a. “**NBR12136 Módulos fotovoltaicos – Determinação de características fotoelétricas**”, Rio de Janeiro.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas 1991b. “**NBR12302 Módulos fotovoltaicos – Correção das curvas características corrente *versus* tensão ( $I \times V$ ), em função da temperatura e radiação**”, Rio de Janeiro.

Araújo, G. L., 1985. **Eletricidad Solar Fotovoltaica**: sistemas fotovoltaicos autónomos. Universidad Politecnica de Madrid. ETSI Telecomunicación. Parte I: Fundamentos de la electricidad solar fotovoltaica, 3 “La célula solar”, Madrid, pp. 118-176.

ASTM, American Society for Testing and Materials, 1985. “**E 1036 Standard Methods of Testing Electrical Performance of Nonconcentrator Terrestrial Photovoltaic Modules and Arrays Using Reference Cells**”, EEUU.

CRESESB-CEPEL, 1999. “Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos”, Rio de Janeiro, 204p.

CRESESB-CEPEL, 2006. “**Tutorial: Energia Solar**”, <http://www.cresesb.cepel.br>, capturado em 05/01/2007.

Green, M. A., 1995. “**Silicon Solar Cells Advanced Principles & Practice**”, Bridge Printery Pty, Sydney, 366p.

Heckthbeuer, L. A., 2001. “**Análise de Associações de Módulos Fotovoltaicos**”. Tese de Doutorado, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre RS.

Hussein, R., Borchert, D., Grabosch G. and Fahrner W. R., 2001. "Dark I-V-T measurements and characteristics of (n) a-Si/(p) c-Si heterojunction solar cells", **Solar Energy Materials and Solar Cells**, vol. 69, Issue 2, September, pp. 123-129.

IEC, International Electrotechnical Commission, 1987. "**IEC 904-1 Photovoltaic Devices**", Switzerland.

Kaminski, A., Marchand, J. J., Fave, A. and Laugier, A., 1997. "New Method of Parameters Extraction from Dark I-V Curve", **26<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference**, September 29 – October 3, Anaheim, CA, pp. 203-206.

Kapica, J., 1998. "The Influence of Selection of the Solar Cell's Model on the Accuracy of Calculation of the Current-voltage Characteristics" **2<sup>nd</sup> World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion**, 2. Vienna, pp. 160-163.

King, D.L., Hansen, B. R., Kratochvil, J. A. and Quintana, M. A., 1997a. "Dark Current-Voltage Measurements on Photovoltaic Modules as a Diagnostic or Manufacturing Tool", **26<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference**, September 29 – October 3, Anaheim, CA, pp. 1125-1128.

King D.L., Kratochvil J. A., and Boyson W. E., 1997b. "Temperature Coefficients for PV Modules and Arrays: Measurement Methods, Difficulties and Results". **26<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference**, September 29 – October 3, Anaheim, CA, pp. 1183-1186.

Krenzinger, A., 1994. "Modelos Matemáticos para la Simulación de Sistemas Fotovoltaicos por Ordenador", **I Congreso Latinoamericano sobre Energías Alternativas**, 1, Editora da Facultad Regional Córdoba, Argentina. Córdoba, pp. 21-33.

Krenzinger, A. e Prieb, C. W. M., 2005. "Clasificación y selección de módulos fotovoltaicos para una central conectada a la red", **Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente**, vol. 9, pp. 19-24.

Lasnier, F. and Ang, T. G., 1990. "**Photovoltaic Engineering Handbook**". Adam Hilger, New York. 568p.

Mártil, I. And González Díaz, G., 1992. "Determination of the dark and illuminated characteristic parameters of a solar cell from *I-V* characteristics", **Eur. J. Phys.**, vol. 13, pp. 193-197.

Meyer, E. L. and van Dyk, E. E., 2004. "Assessing the Reliability and Degradation of Photovoltaic Module Performance Parameters", **IEEE TRANSACTIONS ON RELIABILITY**, vol. 53, n° 1, pp. 83-92.

Pierret, R. F., 1996. "**Semiconductor Device Fundamentals**", Addison-Wesley, United States of America, 792p.

Prieb, C. W. M., 2002. "**Desenvolvimento de um Sistema de Ensaio de Módulos Fotovoltaicos**". Dissertação de mestrado, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre RS.

Roshdy, A. A., 1999. "Analysis of Anomalous Current-Voltage Characteristics os Silicon Solar Cells" **26<sup>th</sup> National Radio Science Conference**, D9,1-8, Cairo, Egypt.

Rüther, R., 2004. "Promoting Photovoltaics in Brazil: LABSOLAR's Activities", **Eurosun2004, Freiburg, Alemanha. Proceedings of EuroSun2004**. PSE GmbH, vol. 3, pp. 290-299, Freiburg, Alemanha.

Rüther, R. e Livingstone, J., 1993. "Amorphous and Crystalline Silicon Solar Modules: Choice of Technologies", **31st Annual Conference of the Australian and New Zealand Solar Energy Society**, Anais do 31st Annual Conference of the Australian and New Zealand Solar Energy Society, 1993. pp. 548-553, Perth.

Shockley, W., 1949. **Bell Systems Tech**, J. 28, 435.

Singer, S., Rozenshtein, B. and Surazi, S., 1984. "Chacaracterization of PV Array Output Using a Small Number of Measured Parameters", **Solar Enegy**, vol. 32, n.5, pp. 603-607.

Tomasquim, M. T., 2004. "**Alternativas Energéticas Sustentáveis no Brasil**", Relume-Dumará, Rio de Janeiro.

Vera, L. H., Andrade, A. C. e Krenzinger, A., 2006 “Metodologia para Analisar a Uniformidade da Iluminação”, Mercofrio 2006, **Anais do Congresso Mercofrio 2006: ASBRAV**, 2006. v. CD-ROM, Porto Alegre.

Vera, L. H., Prieb, C. W. M. e Krenzinger, A., 2006b. “Comparação do Desempenho de Módulos Fotovoltaicos Após Seis Anos de Operação”, **Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente**, v. 10, pp. 25-32.



## **TRABALHOS PUBLICADOS DURANTE A DISSERTAÇÃO**

Bühler, A. J., Krenzinger, A., 2006. “Análise de Curvas Características Sem Iluminação como Ferramenta para Determinação de Parâmetros Fotovoltaicos”, **Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente**, v. 10, pp. 17-24.

Bühler, A. J., Krenzinger, A., 2006. “Determinação de Coeficientes de Módulos Fotovoltaicos a partir de Ensaio de Curvas Características no Escuro”, Mercofrio 2006, **Anais do Congresso Mercofrio 2006**: ASBRAV, 2006. v. CD-ROM, Porto Alegre.

Bühler, A. J., Vera, L.H. e Krenzinger, A., 2006. “Determinação de Coeficientes Fotovoltaicos sob Ausência de Iluminação”, I CBENS - I Congresso Brasileiro de Energia Solar, **Anais do Congresso I CBENS**, Recife: ABENS, v. CD-ROM.