

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Departamento de Engenharia Elétrica
Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica

Estudo das topologias série e derivação de reguladores de
carga de baterias para painéis fotovoltaicos.

Júlio César Costa

Aluno

Maurício Beltrão de Rossiter Corrêa

Orientador

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em
cumprimento parcial às exigências para obtenção do Grau de Engenheiro
Eletricista.*

Campina Grande

Março de 2007

Avaliação do Aluno

Aluno (a):

Júlio César Costa

Matrícula: 20321226

Projeto de Engenharia

Julgado em, ___/___/___.

Nota: ___(_____).

Banca Examinadora:

Maurício Beltrão de Rossiter Corrêa

Orientador

Leimar de Oliveira

Campina Grande - PB

Março de 2007



Biblioteca Setorial do CDSA. Fevereiro de 2021.

Sumé - PB

Dedicatória

Aos meus pais que me deram todo o apoio e ajuda para a realização deste sonho, mesmo que para isso eles tivessem que se abdicar da minha presença.

Agradecimentos

A Deus, a quem sou eternamente grato pela vida e pelos bons caminhos pelos quais sempre me guiou.

A Luiz Paulo, Gilderlan, Robson, Rodrigo César, Éder e Henrique Nunes, grandes amigos, que sempre me incentivaram a continuar em busca dos meus objetivos mesmo quando os obstáculos pareciam insuperáveis.

A Nicole, pessoa muito especial.

Ao professor. Maurício Beltrão pela orientação e pelo conhecimentos transmitidos.

Ao professor Limar de Oliveira pela orientação quando da ausência de Maurício Beltrão.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram de forma positiva na minha vida, cujos nomes não citei aqui, por um simples descuido.

“Sempre faça o que você tem medo de fazer”

Ralph Waldo Emerson

Lista de Figuras

Figura 1 - Estações do ano e movimento da Terra em torno do sol.....	3
Figura 2 - Sistema de geração fotovoltaica isolado de energia elétrica	4
Figura 3 - Célula fotovoltaica.....	6
Figura 4 - Células fotovoltaicas mono-cristalinas.....	6
Figura 5 - Células fotovoltaicas poli-cristalinas.....	7
Figura 6 - Células fotovoltaicas amorfas.....	8
Figura 7 - Modelo de cinco parâmetros de uma célula fotovoltaica.....	11
Figura 8 - Modelo de cinco parâmetros com associação em série e em paralelo.....	15
Figura 9- Típico ciclo de carga de uma bateria de chumbo-ácido.....	23
Figura 10 - Topologia em série.....	24
Figura 10 – Blocos de simulação do módulo fotovoltaico.....	26
Figura 10 – Parâmetros de simulação do módulo fotovoltaico.....	27
Figura 10 – Simulação da característica I-V do módulo fotovoltaico.....	27
Figura 10 – Simulação da curva de potência do módulo fotovoltaico.....	28
Figura 11 - Modelo da fonte de corrente (I_s).....	29
Figura 12 - Parâmetros de simulação da fonte de corrente (I_s).....	29
Figura 13 - Simulação da fonte de corrente (I_s).....	30
Figura 14 - Modelo da corrente de saturação do diodo (I_0).....	31
Figura 15 - Parâmetros da simulação da corrente de saturação do diodo (I_0).....	31
Figura 16 - Simulação da corrente de saturação do diodo (I_0).....	32
Figura 17 - Modelo da corrente terminal da célula (I).....	33
Figura 18 - Parâmetros de simulação da corrente terminal da célula (I).....	34
Figura 19 - Simulação da corrente terminal da célula (I).....	34
Figura 20 - Modelo da capacidade em função da temperatura (C_nT).....	35
Figura 21 - Parâmetros de simulação da capacidade em função da temperatura (C_nT).....	35
Figura 22 - Simulação da capacidade em função da temperatura (C_nT).....	36
Figura 23 - Média anual de insolação diária no Brasil.....	39
Figura 24 – Radiação solar global – média anual típica (MJ/m^2 .dia).....	40
Figura 25 – Radiação solar global – média anual típica (Wh/m^2 .dia).....	41

Lista de Equações

Equação 1 - Corrente terminal da célula.....	11
Equação 2 - Corrente fornecida pelo fotodiodo.....	12
Equação 3 - Corrente no diodo.....	12
Equação 4 - Corrente de saturação do diodo.....	12
Equação 5 - Tensão no diodo.....	13
Equação 6 - Potencial térmico.....	13
Equação 7 - Corrente na resistência em paralelo.....	14
Equação 8 - Corrente terminal da célula - Equação completa.....	14
Equação 9 - Corrente terminal do módulo fotovoltaico.....	15
Equação 10 - Equação de Peukert do tempo de descarga.....	17
Equação 11 - Equação de Peukert da capacidade.....	18
Equação 12 - Equação da capacidade em função da temperatura.....	19
Equação 13 - Estado de carga para descarga a corrente constante.....	19
Equação 14 - Estado de carga para corrente diferente da nominal.....	20
Equação 15 - Estado de carga para corrente variável.....	20
Equação 16 - Equação de Shepherd para a tensão.....	21
Equação 17 - Equação da energia acumulada.....	21
Equação 18 - Equação da resistência interna.....	22
Equação 19 - Equação do cliço de vida.....	22
Equação 20 - Modelo da carga.....	25

Sumário

Avaliação do Aluno	i
Dedicatória	ii
Agradecimentos	iii
1. Introdução	1
1.1. Objetivos	1
1.2. Metodologia	1
2. Fundamentação Teórica	2
2.1. Energia solar	2
2.2. Radiação solar	2
2.3. Energia solar fotovoltaica	3
2.4. Sistema fotovoltaico isolado	4
2.5. Células fotovoltaicas	5
2.5.1. Células fotovoltaicas mono-cristalinas	6
2.5.2. Células fotovoltaicas poli-cristalinas	6
2.5.3. Células fotovoltaicas amorfas	7
2.6. Vantagens e desvantagens da energia solar fotovoltaica	8
2.6.1. Vantagens	8
2.6.2. Desvantagens	9
2.7. Física dos semicondutores e o efeito fotovoltaico	9
2.8. Modelos de células fotovoltaicas	10
2.8.1. Modelo de cinco parâmetros	10
2.8.2. Associação série e paralelo	14
2.9. Baterias	15
2.9.1. Introdução	15
2.9.2. Características das baterias de chumbo-ácido	16
2.10. Modelos de baterias	17
2.10.1. Modelos da bateria de chumbo-ácido	17
2.11. Controle de carga da bateria	23
2.11.1. Topologia em série	24
2.12. Modelo da carga	25
3. Simulação Digital	25
3.1. Modelo do módulo fotovoltaico	25
3.1.1. Modelo da fonte de corrente (I_s)	28
3.1.2. Modelo da corrente de saturação do diodo (I_0)	30
3.1.3. Modelo da corrente terminal da célula	32
3.2. Modelos da bateria	35
3.2.1. Modelo da capacidade em função da temperatura (C_nT)	35
3.2.2. Modelo de Shepherd da tensão (E_t)	36
4. Conclusão	37
5. Referências bibliográficas	38
6. Apêndice A	39

1. Introdução

Durante o Projeto de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica, será feito um estudo das topologias série e derivação de reguladores de carga de baterias para painéis fotovoltaicos com a finalidade de definir uma plataforma de estudo voltada para o dimensionamento de banco de baterias.

AVALIÇÃO DOS CONTROLADORES
SÉRIE E PARALELO

1.1. Objetivos

▪ Geral:

Desenvolver um programa de simulação que utiliza dados meteorológicos reais para avaliação do perfil de funcionamento de sistemas fotovoltaicos isolados.

▪ Específico:

Desenvolver uma plataforma de estudo voltada para o dimensionamento de banco de baterias através da simulação do carregamento das baterias utilizando as topologias série e derivação.

1.2. Metodologia

Inicialmente será feita uma revisão bibliográfica sobre topologias série e derivação de carregadores de baterias para painéis fotovoltaicas bem como um estudo prévio da utilização do software Matlab[®]. Será realizada uma modelagem destas topologias de carregadores de baterias para serem realizadas simulações digitais das mesmas com o uso do software Matlab[®]. Finalmente, será feita uma análise destas simulações digitais comparando as características positivas e negativas de cada topologia.

2. Fundamentação Teórica

2.1. Energia solar

O sol fornece anualmente para a atmosfera terrestre cerca de $5,51 \times 10^{24}$ J, isto é, $1,53 \times 10^{18}$ kWh por ano. Para dar uma idéia da magnitude deste valor, toda a energia primária consumida no planeta, ao longo do ano de 1993 foi de $9,06 \times 10^{14}$ kWh, cerca de 0,059% deste valor.

A energia solar é praticamente inesgotável, se levarmos em consideração a escala de tempo do homem, ela é responsável direta e indiretamente por toda a fonte de luz e calor que incide sobre a Terra.

Quase a totalidade das formas de energia utilizadas pelo homem são indiretamente derivadas da energia do sol, como por exemplo, a hidráulica, hidráulica, biomassa, eólica, combustíveis fósseis e energia dos oceanos.

A energia solar também pode ser convertida diretamente em energia elétrica através da incidência sobre determinados matériaís, principalmente os semicondutores, destacando-se a conversão termoelétrica e a fotovoltaica.

A conversão termoelétrica é caracterizada pelo aparecimento de uma diferença de potencial (tensão elétrica) entre a junção de dois metais que se encontram em temperaturas diferentes. Este tipo de conversão é empregado em instrumentos de medição de temperatura, porém seu uso como fonte de energia elétrica não é viável, pois esbarra em um elevado custo dos materiais e um baixo rendimento.

A conversão fotovoltaica, por sua vez, decorre da excitação dos elétrons de alguns materiais sob a ação da radiação solar. O custo da produção das células fotovoltaicas têm dificultado a expansão da geração de eletricidade em escala comercial.

2.2. Radiação solar

A radiação solar que incide sobre a terra, também chamada de energia total incidente, depende da latitude local e da posição da Terra em relação ao sol determinada pela inclinação em relação ao seu eixo imaginário (movimento de rotação) e em relação a trajetória elíptica que a Terra descreve entorno do sol (movimento de translação) (Figura 1). A radiação que incide diretamente sobre a superfície da Terra ainda depende

das condições climáticas e atmosféricas, tais como, nebulosidade, umidade relativa do ar etc. Assim apenas parte da radiação solar atinge a superfície da Terra, devido a reflexão e absorção da atmosfera.

A radiação que chega a superfície da Terra é proveniente de três formas: a radiação direta, que é diretamente oriunda do sol; a radiação difusa, que provém de todo o céu exceto do disco solar e a radiação refletida que resulta da reflexão no solo e nos objetos circundantes.

A duração solar do dia varia conforme a latitude local e a época do ano, podendo variar de 0 a 24 horas nas regiões polares. Grande parte do território brasileiro encontra-se próximo a linha do equador, desta forma, os dias têm uma duração bastante regular, tendo uma variação maior apenas na região sul onde os dias podem variar cerca de 3 horas e 30 minutos em diferentes dias do ano.



Figura 1 - Estações do ano e movimento da Terra em torno do sol.

2.3. Energia solar fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica é obtida através da conversão direta da energia da radiação solar em eletricidade por meio do efeito fotovoltaico.

O efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez em 1839 pelo físico francês Edmund Becquerel, numa solução de selênio. Becquerel notou o aparecimento

de uma tensão entre os eletrodos de solução condutora, quando esta era iluminada pela luz solar. Mais tarde, por volta do ano de 1870, o efeito fotovoltaico foi estudado em sólidos, tal como o selênio, e por volta de 1880, a primeira célula fotovoltaica foi construída utilizando-se o selênio. A eficiência desta célula era na faixa de 2%.

Pesquisas em aplicações práticas para a tecnologia fotovoltaica foram iniciadas nos Estados Unidos da América na década de 50. Em 1954, o Laboratório Bell produziu a primeira célula fotovoltaica de silício de junção p-n. A partir de então, trabalhou-se na obtenção de um sistema realizável e de longa duração para sistemas de alimentação de satélites.

As células fotovoltaicas rapidamente têm sido a escolha preferida para a alimentação de satélites, e permanece assim até nossos dias. A partir dos anos 70, o preço das células fotovoltaicas para aplicações espaciais tem caído, incentivando um menor custo para a geração de eletricidade em larga escala sobre o planeta. Trabalhos sobre a melhoria da eficiência das células fotovoltaicas têm sido iniciados em grandes centros de pesquisa de todo o mundo.

2.4. Sistema fotovoltaico isolado

Os sistemas fotovoltaicos isolados têm a característica de não estarem conectados a rede de energia elétrica convencional.

A Figura xx descreve os principais componentes deste sistema.

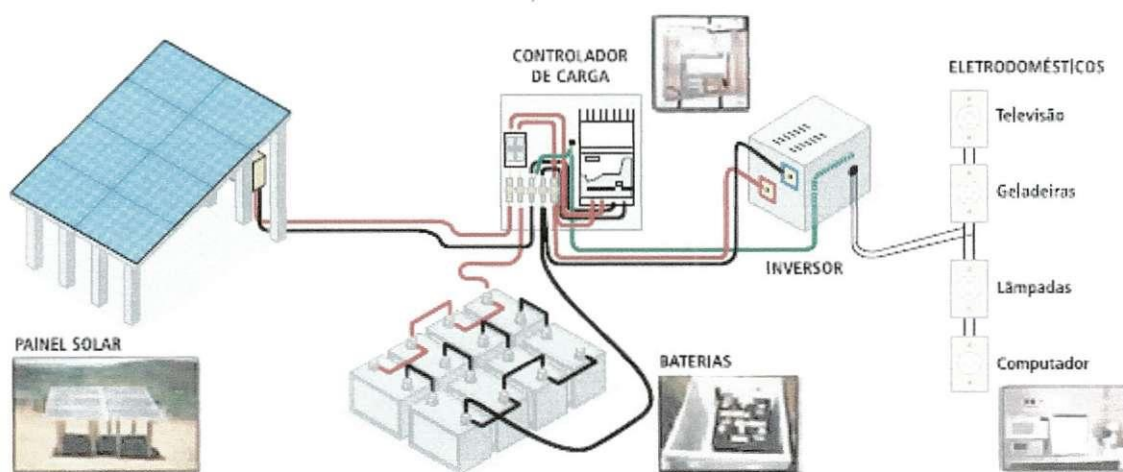


Figura 2 - Sistema de geração fotovoltaica isolado de energia elétrica
Fonte: SEI – Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia

2.5. Células fotovoltaicas

As células fotovoltaicas convertem diretamente a radiação solar em energia elétrica. A incidência de fótons solares é capaz de criar um campo elétrico interno no semicondutor que acelera os pares de elétrons-lacunas de forma a estabelecer uma corrente elétrica quando conectado a um circuito externo.

A maioria das células fotovoltaicas é fabricada a partir do silício que é um material semicondutor, possuindo características intermediárias entre um material condutor e um material isolante.

Cada célula fotovoltaica é capaz de gerar uma tensão de aproximadamente 0,45 V à 25 °C e fornecer uma corrente da ordem de 30 mA/cm². Para aplicações que exijam maiores tensões e potências associam-se várias células em série e em paralelo.

A ligação de várias células fotovoltaicas em série elevam a tensão do conjunto e a ligação de várias células em paralelo aumentam a corrente fornecida. Assim para a maioria das aplicações são usados painéis solares formados pela associação em série e paralelo de células fotovoltaicas.

A maioria dos módulos comerciais são projetados para trabalharem conectados a uma bateria de chumbo-ácido de 12 V de tensão nominal. Para assegurar que as baterias serão plenamente recarregadas são necessários pelo menos 14 V, desta forma, geralmente se utilizam de 30 a 36 células ligadas em série que proporcionam uma tensão entre 13,5 e 16,5 V.

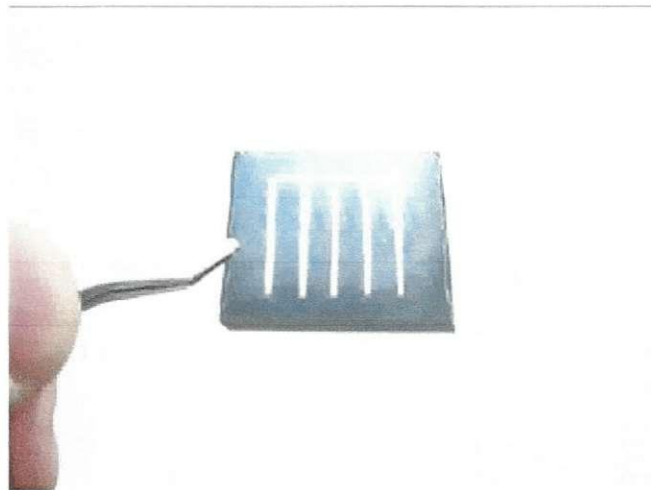


Figura 3 - Célula fotovoltaica.

2.5.1.Células fotovoltaicas mono-cristalinas

As células fotovoltaicas mono-cristalinas de silício são fabricadas através de uma junção p-n com matérias muito puros e com uma estrutura cristalinis perfeita o que ocasiona poucas recombinações elétrons-lacunas, desta forma, possuem um rendimento relativamente elevado, cerca de 16% em uso comercial e 23% em laboratório. Entretanto seu processo de fabricação é muito complexo e requer uma grande quantidade de energia e possuem baixo coeficiente de absorção, desta forma necessitam de uma espessura maior encarecendo seu custo final.

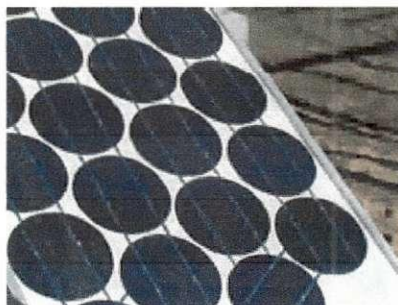


Figura 4 - Células fotovoltaicas mono-cristalinas.

2.5.2.Células fotovoltaicas poli-cristalinas

As células fotovoltaicas pol-cristalinas de silício são produzidas também por uma junção p-n, porém com matérias não tão puros e sob um processo de fabricação que utiliza menos energia, o que resulta em descontinuidades no material dificultando o movimento dos elétrons e facilitando a recombinação das lacunas, assim seu rendimento se reduz para cerca de 12% em uso comercial e 18% em laboratório. Estas células fotovoltaicas têm um custo final mais baixo.

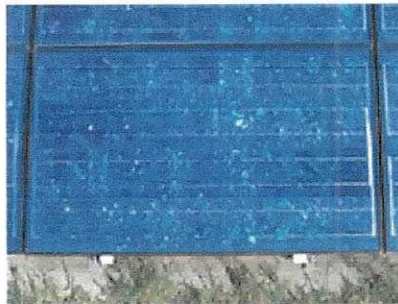


Figura 5 - Células fotovoltaicas poli-cristalinas.

2.5.3. Células fotovoltaicas amorfas

As células fotovoltaicas amorfas são constituídas de silício amorfo e este não possui estrutura cristalina o que em princípio facilitaria a recombinação dos pares elétrons-lacunas e impediriam sua utilização. Porém em seu processo de fabricação é adicionado hidrogênio em um processo chamado hidrogenização o que por sua vez reduzem os defeitos estruturais do silício formando uma junção p-i-n.

As células fotovoltaicas amorfas de silício têm alto coeficiente de absorção e são produzidas com películas bastante finas o que permite que sejam usadas como material de construção reduzindo assim o custo de fabricação. O rendimento comercial destas células fica entorno de 9% e são alcançados 13% em laboratório.

em torno



Figura 6 - Células fotovoltaicas amorfas.

2.6. Vantagens e desvantagens da energia solar fotovoltaica

2.6.1. Vantagens

A energia fotovoltaica apresenta varias características positivas frente a outras fontes de energia.

O combustível, ou seja, a radiação solar para se converter em eletricidade é universal e gratuita.

O principal material para a fabricação das células fotovoltaicas que é o silício é um dos materiais mais abundantes da crosta terrestre.

Os painéis fotovoltaicos apresentam alta ^{com}fiabilidade uma vez que não possuem partes móveis facilitando a instalação em locais de difícil acesso e não sofrem desgastes mecânicos.

A confecção dos painéis pode ser feita de modo a ^atender as mais diversas necessidades energéticas desde poucos miliwatts a alguns kilowatts.

Permitem a expansão de sua capacidade devido a sua concepção modular.

Os custos com manutenção são muito baixos, pois não há necessidade de reposição de combustível nem mão-de-obra qualificada para a instalação e manutenção.

Apesar de um investimento inicial elevado, apresentam custos atrativos quando instalados em locais de difícil acesso ou localidades remotas, como pequenos vilarejos no meio rural.

A tecnologia fotovoltaica não é poluente, é silenciosa e não perturba o ambiente.

2.6.2.Desvantagens

A tecnologia de fabricação ainda é muito sofisticada e necessita de elevados custos de investimentos.

O rendimento dos painéis fotovoltaicos é baixo comparado a outras fontes de energia ficando em 28% o limite máximo teórico nas células de silício.

Do ponto de vista econômico ainda são pouco competitivos em comparação a outros tipos de geradores de eletricidade convencionais.

2.7. Física dos semicondutores e o efeito fotovoltaico

Um cristal de silício, que é o principal material da fabricação do semicondutor, tem uma organização atômica regular em que os átomos são mantidos em suas posições por ligações, chamadas de ligações covalentes, formadas pelos quatro elétrons de valência associados a cada um dos átomos de silício. A uma temperatura suficientemente baixa, todas as ligações covalentes estão completas e não há elétrons livres para a condução de corrente elétrica. Contudo, na temperatura ambiente, algumas ligações são rompidas pela ionização térmica e alguns elétrons são libertados. Quando uma ligação é rompida, um elétron sai da órbita de seu átomo original; portanto, uma carga positiva, de valor igual à carga do elétron, fica neste átomo. Por sua vez, um elétron de um átomo vizinho pode ser atraído por essa carga positiva, deixando a órbita original de seu átomo. Esta ação preenche a “lacuna” que havia na átomo ionizado, mas cria uma nova lacuna no outro átomo. Esse processo pode repetir-se com o resultado com o resultado que temos efetivamente um portador carregado positivamente, ou lacuna, movendo-se por meio da estrutura do cristal de silício, ocasionando condução de corrente elétrica.

A dopagem de um cristal de silício para torná-lo de tipo n (as cargas majoritários são elétrons negativamente carregados) ou tipo p (as cargas majoritárias são lacunas positivamente carregadas) é obtida pela introdução de um pequeno número de átomos de impurezas. Por exemplo, introduzir átomos de impurezas de elemento pentavalente, como o fósforo, resulta em um silício tipo n porque os átomos de fósforo que substituem alguns dos átomos de silício na estrutura do cristal têm cinco elétrons de

valência, quatro dos quais formam ligações com seus átomos de silício vizinhos, enquanto o quinto torna-se um elétron livre.

Para produzir um semicondutor do tipo p, o silício de vê ser dopado com uma impureza trivalente como o boro. Cada um dos átomos de impureza do boro aceita um elétron do cristal de silício, de modo que eles formam ligações covalentes na rede da estrutura. Portanto, cada átomo de boro dá origem a uma lacuna.

As células fotovoltaicas são constituídas em sua maioria de uma junção p-n. A absorção da energia dos fótons provoca a excitação de elétrons da banda de valência para a de condução. Estes, por sua vez, são acelerados pelo campo elétrico da região de depleção, contribuindo para a geração de uma corrente através da junção. Este deslocamento de cargas dá origem a uma diferença de potencial entre as extremidades do cristal, chamado efeito fotovoltaico. Desta forma, pode-se definir as células fotovoltaicas como dispositivos semicondutores que convertem diretamente a energia luminosa em eletricidade.

A junção p-n é tipicamente formada pelo processo de difusão de uma camada muito fina de material tipo n, sobre um substrato tipo p ou o contrário. São inseridos contatos metálicos nas duas extremidades da junção, para a captação da corrente fotogerada.

2.8. Modelos de células fotovoltaicas

Os modelos de células fotovoltaicas devem ser capazes de representar a característica I-V em função da temperatura ambiente e da radiação incidente.

Um modelo bastante utilizado é deduzido através de uma base semi-física que representa a célula fotovoltaica por uma fonte dependente de corrente em paralelo com um diodo uma resistência em paralelo e uma resistência em série. Este modelo utiliza cinco parâmetros sendo I_S a corrente fornecida pela fonte de corrente, R_p a resistência em paralelo, R_S a resistência em série e as características I_0 e m do diodo.

2.8.1. Modelo de cinco parâmetros

Um modelo bastante satisfatório de uma célula fotovoltaica pode ser descrito pelo circuito de cinco parâmetros da Figura 6 abaixo.

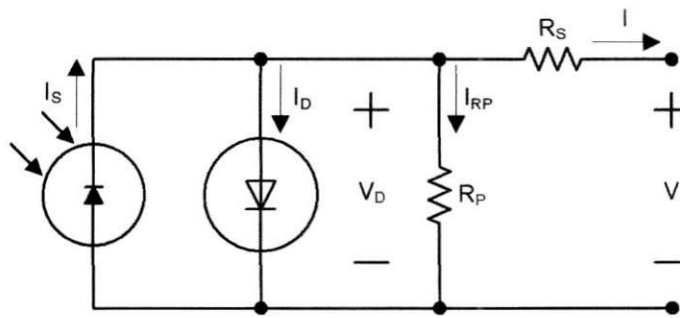


Figura 7 - Modelo de cinco parâmetros de uma célula fotovoltaica.

A corrente I_S representa a corrente elétrica gerada pela absorção da radiação solar. Esta corrente varia de acordo radiação incidente e é representada por um fotodiodo.

A corrente I_D do diodo representa a característica de recombinação da junção p-n da célula fotovoltaica sendo dependente da tensão terminal da célula (V). A característica de idealidade do diodo é representada pela constante m .

A resistência em série R_S tem a função de simular a queda de tensão interna da célula fotovoltaica.

A resistência em paralelo R_p representa as perdas parasitas da célula fotovoltaica.

A corrente terminal da célula (I) pode ser representada pela Equação(1):

$$I = I_S - I_D - I_{RP}$$

Equação 1 - Corrente terminal da célula.

(1)

Onde,

- I_S → é a corrente fornecida pelo fotodiodo [A];
- I_D → é a corrente drenada pelo diodo [A];
- I_{RP} → é a corrente drenada pela resistência em paralelo [A].

A corrente fornecida pelo fotodiodo (I_S) é função da radiação incidente, do fator de densidade da foto-corrente gerada, do coeficiente de temperatura da densidade da foto-corrente gerada, da temperatura e da área da célula, conforme Equação 2 abaixo:

$$I_s = (C_0 + C_1 \times T) \times G \times A \quad (2)$$

Equação 2 - Corrente fornecida pelo fotodiodo.

Onde,

- $C_0 \rightarrow$ é o coeficiente de densidade da foto-corrente gerada [V^{-1}];
- $C_1 \rightarrow$ é o coeficiente de temperatura da foto-corrente gerada [$V^{-1} \times K^{-1}$];
- $T \rightarrow$ temperatura absoluta da célula [K];
- $G \rightarrow$ é a radiação global incidente [W/m^2];
- $A \rightarrow$ é a área da célula considerada [m^2].

A corrente que atravessa o diodo (I_D) representa a característica de recombinação da junção p-n e é função da corrente de saturação do diodo, da tensão do diodo, do potencial térmico e do fator de idealidade do diodo, sendo representada pela Equação 3:

$$I_D = I_0 \times \left(e^{\frac{V_D}{m \times V_T}} - 1 \right) \quad (3)$$

Equação 3 - Corrente no diodo.

Onde,

- $I_0 \rightarrow$ corrente de saturação do diodo [A];
- $V_D \rightarrow$ tensão nos terminais do diodo [V];
- $m \rightarrow$ fator de idealidade do diodo;
- $V_T \rightarrow$ potencial térmico [V].

A corrente de saturação do diodo I_0 , sendo função principalmente da temperatura, pode ser representada pela Equação 4:

$$I_0 = D \times T^3 \times e^{-\frac{q \times \epsilon}{m \times k \times T}} \quad (4)$$

Equação 4 - Corrente de saturação do diodo.

Onde

$D \rightarrow$ é o coeficiente de densidade de corrente de saturação [A/K^3];

$T \rightarrow$ é a temperatura absoluta da célula [K];

$q \rightarrow$ é a carga do elétron ($1,6022 \times 10^{-19}$ [C]);

$\varepsilon \rightarrow$ é a barreira de potencial do semiconductor (1,12 [eV] para o silício);

$m \rightarrow$ é o fator de idealidade do diodo;

$k \rightarrow$ é a constante de Boltzmann ($1,3806 \times 10^{-23}$ [J/K]);

A tensão no diodo (V_D) é função da tensão e da corrente terminal da célula, desta forma pode ser representada pela Equação 5:

$$V_D = V + R_S \times I \quad (5)$$

Equação 5 - Tensão no diodo.

Onde,

$V \rightarrow$ é a tensão terminal da célula [V];

$R_S \rightarrow$ é a resistência em série [Ω];

$I \rightarrow$ é a corrente terminal da célula [A].

O potencial térmico V_T é caracterizado pela Equação 6:

$$V_T = \frac{k \times T}{q} \quad (6)$$

Equação 6 - Potencial térmico.

Onde,

$k \rightarrow$ é a constante de Boltzmann ($1,3806 \times 10^{-23}$ [J/K]);

$T \rightarrow$ é a temperatura absoluta da célula [K];

$q \rightarrow$ é a carga do elétron ($1,6022 \times 10^{-19}$ [C]).

A corrente de perdas que atravessa e resistência em paralelo é representada como uma função da tensão e da corrente terminal da célula, conforme Equação 7:

$$I_{RP} = \frac{V + R_S \times I}{R_P} \quad (7)$$

Equação 7 - Corrente na resistência em paralelo.

Onde,

V → é a tensão terminal da célula [V];

R_S → é a resistência em série [Ω];

I → é a corrente terminal da célula [A];

R_P → é a resistência em paralelo [Ω];

Agrupando todas as equações expostas anteriormente, podemos construir a Equação 8, que nos fornece um modelo bastante preciso do comportamento da corrente terminal da célula fotovoltaica:

$$I = [(C_0 + C_1 \times T) \times G \times A] - \left[\left(D \times T^3 \times e^{\frac{q \times \epsilon}{m \times k \times T}} \right) \times \left(e^{\frac{V + R_S \times I}{m \times \frac{k \times T}{q}}} - 1 \right) \right] - \left[\frac{V + R_S \times I}{R_P} \right]$$

Equação 8 - Corrente terminal da célula - Equação completa.

Esta equação é bastante complexa e se traduz em uma equação transcendente, implícita em I , que só pode ser resolvida com recurso a métodos iterativos.

2.8.2. Associação série e paralelo

O circuito equivalente da Figura xx abaixo representa um módulo fotovoltaico constituído pela associação de N_S células conectadas em série e de N_P células conectadas em paralelo:

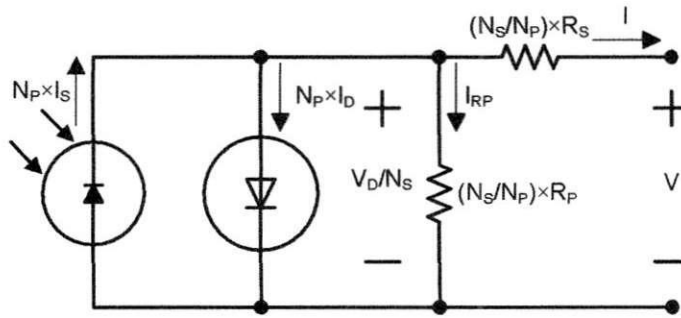


Figura 8 - Modelo de cinco parâmetros com associação em série e em paralelo.

A Equação (9) representa a corrente terminal de um módulo fotovoltaico constituído de N_S células conectadas em série e N_P células conectadas em paralelo.

$$I = N_P \times \left[(C_0 + C_1 \times T) \times G \times A \right] - N_P \times \left[D \times T^3 \times e^{\frac{q \times e}{m \times k \times T}} \times \left(e^{\left(\frac{V + \left(\frac{N_S}{N_P} \right) \times R_S \times I}{N_S \times m \times \frac{k \times T}{q}} \right)} - 1 \right) \right] - \frac{V + \left(\frac{N_S}{N_P} \right) \times R_S \times I}{\left(\frac{N_S}{N_P} \right) \times R_P} \quad (9)$$

Equação 9 - Corrente terminal do módulo fotovoltaico.

2.9. Baterias

2.9.1. Introdução

Os sistemas fotovoltaicos têm a característica de variar muito o fornecimento de potência ao longo do tempo, variando de um pico máximo de potência no horário de maior incidência de radiação solar até zero durante a noite.

O acumulador de energia é um componente de extrema importância para os sistemas fotovoltaicos isolados, sendo responsável em adaptar as diferentes taxas de produção e demanda de energia, armazenando-a quando a produção superar a demanda e entregando-a ao sistema, caso contrário. 7

Existem baterias que não podem ser recarregadas e são descartadas após descarregadas, as chamadas baterias primárias. Outras baterias podem ser recarregadas de tempos em tempos e são chamadas de baterias secundárias.

A bateria secundária é um elemento que possui a capacidade de armazenar energia elétrica na forma de energia química. A bateria de chumbo-ácido é o acumulador eletroquímico recarregável de maior importância comercial da atualidade, devido ao seu baixo custo de fabricação e de sua tecnologia ser bastante conhecida.

2.9.2. Características das baterias de chumbo-ácido

As baterias são elementos muito complexos e possuem vários parâmetros que influenciam no seu desempenho.

Podemos descrever os principais parâmetros que influenciam no desempenho da bateria:

Capacidade (C): É a quantidade de energia fornecida por uma bateria durante um período, e sob determinadas condições de funcionamento. Define-se ainda como sendo a máxima carga elétrica que pode extrair-se da bateria. Depende da temperatura, da corrente de descarga ou regime de descarga, da tensão de corte, do tempo para alcançar a tensão de corte e da idade da bateria. É medida em Ah (ampere-hora).

Estado de carga (S): É a grandeza que caracteriza a porcentagem de carga da bateria, e corresponde à razão entre a carga armazenada na bateria e a capacidade total, apresentando uma variação de zero (bateria totalmente descarregada) a um (bateria totalmente carregada).

Corrente de descarga/carga ($I_{d/c}$): É a relação entre a capacidade nominal da bateria e a corrente que se realiza a descarga ou a carga.

Tensão de corte (xx): É a diferença de potencial mínima entre os terminais da bateria para que não se tenha uma vida útil muito reduzida ou dano permanente. ←

Resistência interna (R_i): É um parâmetro interno que representa a queda de tensão nos terminais do acumulador durante o processo de carga e descarga.

Ciclos de vida (n_{ciclos}): É o processo de carga e descarga do acumulador. A capacidade da bateria diminui progressivamente com a quantidade de ciclos. Costuma-se limitar a vida útil da bateria quando a mesma diminui sua capacidade à 80% da capacidade nominal.

2.10. Modelos de baterias

O uso de expressões analíticas para descrever os vários fenômenos de uma bateria tem sido dificultado pela natureza complexa da eletroquímica da bateria.

Existem muitos fatores que afetam o desempenho da bateria tais como estado de carga (S), capacidade de armazenamento da bateria, taxa de carga e descarga, temperatura e vida útil. Para prever estes diversos fatores existem vários modelos matemáticos, porém devido a sua complexidade nenhum destes modelos são completamente exatos nem incluem todo o desempenho necessário que afetam os fatores.

2.10.1. Modelos da bateria de chumbo-ácido

Equações de Peukert

A equação de Peukert indica que a corrente de descarga da bateria diminui com o aumento do tempo de descarga à corrente constante.

A equação de Peukert é de grande importância quando necessitamos relacionar o tempo de descarga de uma bateria de chumbo-ácido a um valor constante de corrente de descarga.

A equação de Peukert aumenta o grau de informação sobre o desempenho da bateria de chumbo-ácido, uma vez que substitui o valor da capacidade nominal da bateria que é definida apenas para uma única corrente de descarga.

A equação tem a seguinte forma:

$$t_d = \frac{K}{(I_d)^n}$$

—Equação 10 — Equação de Peukert do tempo de descarga.

(10)

Onde

- $I_d \rightarrow$ é a corrente de descarga [A];
- $n \rightarrow$ é uma constante da bateria;
- $t_d \rightarrow$ é o tempo de descarga na corrente I_d ;
- $K \rightarrow$ é uma constante.

A equação de Peukert pode ser escrita para relacionar a corrente de descarga a uma capacidade à outra combinação de corrente de descarga e capacidade:

$$C_{Id1} = C_{Id2} \times \left(\frac{I_{d2}}{I_{d1}} \right)^{n-1} \quad (11)$$

Equação 11 - Equação de Peukert da capacidade.

Onde

- $C_{Idi} \rightarrow$ Capacidade da bateria através de uma descarga à corrente I_{di}
- $I_{di} \rightarrow$ Corrente de descarga.

Os índices $i = 1$ e 2 referem-se a diferentes estados de correntes de descarga e capacidade.

Modelo da capacidade em função da temperatura

O impacto que a temperatura exerce na capacidade da bateria pode ser explicado com um modelo eletro-químico simples da bateria. Enquanto a temperatura aumenta em direção para a temperatura de pico de execução de operação a viscosidade do eletrólito diminui, desta forma permitindo o aumento da difusão dos íons e então aumentado a capacidade da bateria. Como a temperatura aumenta após este ponto de pico, o eletrólito da bateria começa a desgastar-se - desta forma levando para uma redução da área ativa de eletrólito

e assim diminuindo as reações do eletrólito e reduzindo a capacidade da bateria.

Um modelo que prediz este impacto, começa com uma equação geral da capacidade da bateria:

modelo eletro-químico simples?

$$C_{nT} = C_{n298} \times (1 - \alpha \times (298 - T)) \quad (12)$$

Equação 12 - Equação da capacidade em função da temperatura.

Onde,

C_{nT} → capacidade da bateria na temperatura T [Ah];

$\eta \rightarrow ?$

C_{n298} → capacidade da bateria em 298 K [Ah];

α → coeficiente de temperatura [Ah/K];

T → temperatura atual [K]

O coeficiente de temperatura, α , o qual varia de bateria para bateria, é determinado empiricamente através de experimentos.

Estado de carga

A capacidade de descarga da bateria se reduz para altas correntes de descarga, isto se deve a incapacidade da solução livre penetrar com a necessária rapidez nos poros do material ativo. Desta forma, após um período de descanso, a bateria que foi submetida a uma intensa descarga recobra em parte sua capacidade.

O estado de carga de uma bateria descarregada durante um tempo de descarga através de uma corrente constante pode ser escrito em função da capacidade referente a esta corrente de descarga

$$S = S_0 - \left(\frac{I_d \times t_d}{C_{Id}} \right) \quad (13)$$

Equação 13 - Estado de carga para descarga a corrente constante.

Onde,

$S \rightarrow$ Estado de carga da bateria;

$S_0 \rightarrow$ Estado de carga inicial da bateria;

$C_{Id} \rightarrow$ Capacidade da bateria através de uma descarga à corrente I_d .

Podemos relacionar o estado de carga da bateria em relação a um valor nominal de capacidade e corrente de descarga.

$$S = S_0 - \left(\frac{I_d \times t_d}{C_N} \right) \times \left(\frac{I_d}{I_N} \right)^{n-1} \quad (14)$$

Equação 14 – Estado de carga para corrente diferente da nominal.

Onde,

$C_N \rightarrow$ Capacidade nominal da bateria através de uma descarga a corrente nominal I_N ;

$I_N \rightarrow$ Corrente nominal de descarga.

Para taxas de descarga não-constante a equação acima precisa ser modificada e avaliado um instante de tempo infinitesimal:

$$S = S_0 - \int \frac{I_d}{C_n} \times \left(\frac{I_d}{I_n} \right)^{n-1} dt_d \quad (15)$$

Equação 15 - Estado de carga para corrente variável.

Onde,

$C_n \rightarrow$ Capacidade nominal da bateria através de uma descarga a corrente nominal I_n ;

$I_n \rightarrow$ Corrente nominal de descarga.

A capacidade da bateria também é influenciada pela temperatura

As equações que representam a variação do estado de carga da bateria durante a sua descarga podem ser estendidas também para a carga.

⇒ ?

Equação do modelo de Shepherd

O modelo de Shepherd talvez seja o melhor, o mais conhecido e o mais usado para modelar a tensão da bateria. O modelo descreve o comportamento eletroquímico da bateria diretamente em termos de tensão e corrente. Ele é usado frequentemente em conjunto com a equação de Peukert para obter a tensão da bateria para uma dada variação de potência extraída.:

$$E_t = E_o - R_i \times I_d - K_i \left(\frac{1}{1 - \int \frac{I_d}{Q_0} dt_d} \right) \quad (16)$$

Equação 16 - Equação de Shepherd para a tensão.

Onde

- E_t → Tensão terminal da bateria [V];
- E_o → Tensão de circuito aberto da célula da bateria quando completamente carregada [V];
- R_i → resistência interna da bateria [Ω];
- K_i → resistência de polarização [Ω];
- I_d → corrente de descarga [A];

f descreve os amperes-hora acumulados durante a descarga da bateria da seguinte forma:

$$f = \int \frac{I_d}{Q_0} dt_d \quad (17)$$

Equação 17 - Equação da energia acumulada.

Onde,

$Q_0 \rightarrow$ capacidade total da bateria.

A resistência interna da bateria varia com o estado de carga SOC e pode ser modelada como sendo:

$$R_i = R_0 - K_R \times f$$

Equação 18 - Equação da resistência interna. (18)

Onde,

$R_0 \rightarrow$ resistência interna total da bateria totalmente carregada;

$K_R \rightarrow$ constante experimental.

Histórico de ciclo

Como a vida de ciclos varia com a profundidade da descarga (DOD) tem sido modelada como:

$$n_{\text{ciclos}} = n_0 \times e^{M \times DOD}$$

Equação 19 - Equação do ciclo de vida. (19)

Onde,

$n_{\text{ciclos}} \rightarrow$ número de ciclos ^{de} em vida na profundidade de descarga DOD ;

$n_0 \rightarrow$ número de ciclos em vida obtidos por extrapolação de dados de ~~de~~ ciclo de vida para zero profundidade de descarga;

$M \rightarrow$ inclinação do esboço do logaritmo natural de n_{ciclos}/n_0 versus DOD ;

$DOD \rightarrow$ profundidade de descarga.

M. Análises de dados experimentais para cada bateria para determinar n_0 e } ?

Esboços logaritmos de DOD versus ciclos de falha para vários tipos de baterias verifica a fórmula do relacionamento acima.

2.11. Controle de carga da bateria

Se continuarmos a carregar uma bateria mesmo após ela ter atingido a plena carga ela entrará em processo de sobrecarga. Neste caso iniciará a gaseificação do eletrólito, produzindo H_2 e O_2 gasosos através da decomposição eletrolítica da água. Este processo ocasiona perda de água e conseqüente corrosão das placas positivas.

Caso ocorra uma descarga muito profunda da bateria ocorre um processo de sobredescarga. Assim iniciará a sulfatação do material ativo, que consiste na formação de cristais de sulfato de chumbo nas placas impedindo a passagem do eletrólito com posterior deformação irreversível nas placas.

Para maximizar a vida útil das baterias, deve-se evitar situações de sobrecarga e sobredescarga, pois estas aceleram enormemente o envelhecimento da bateria.

Existem duas maneiras de se evitar a sobrecarga das baterias, através de uma topologia de chaves ligadas em série ou em paralelo entre o painel e a bateria.

Um típico ciclo de carga de uma bateria de chumbo-ácido é apresentada na Figura xx.

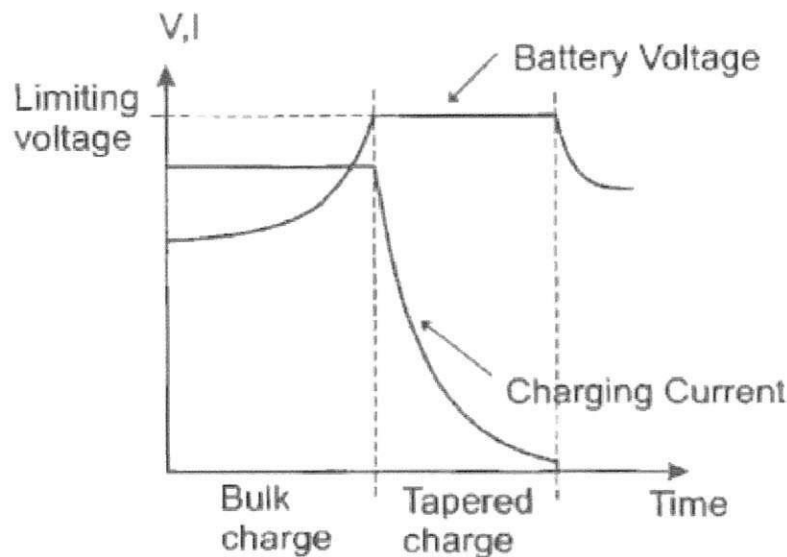


Figura 9- Típico ciclo de carga de uma bateria de chumbo-ácido.

Inicialmente a bateria é carregada com corrente constante até uma tensão pré-definida (fase de enchimento) então a tensão é mantida constante enquanto a corrente

Em sistemas fotovoltaicos há dois tipos de diodos mais comuns que geram e realiza o gerenciamento e protege a bateria contra sobrecarga.

decai (fase de estreitamento). Depois a tensão é reduzida para evitar a gaseificação e a perda de eletrólito.

Em um sistema fotovoltaico este ciclo de carga ideal é difícil de ser alcançado, pois a potência disponível é constantemente transferida para a bateria. Assim se torna necessário um regulador de carga que limite o pico de corrente de carga na fase de enchimento, limite a tensão na fase de estreitamento e retire da carga se a bateria está plenamente carregada.

2.11.1. Topologia em série

A topologia em série as chaves ligadas em série podem abrir e fechar permitindo e impedindo a passagem de corrente para a bateria, conforme Figura xx.?

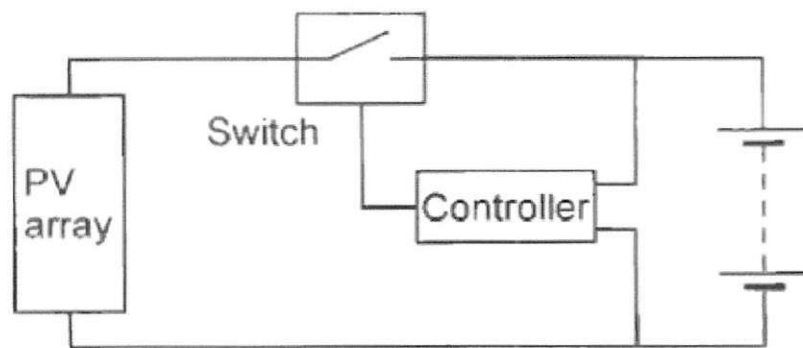


Figura 10 - Topologia em série.

A corrente média que passa pela chave depende da fração de tempo em que a mesma permanece fechada. Caso a chave seja rápida o suficiente a tensão na bateria não irá mudar, pois esta responde lentamente a mudança na corrente.?

Quando a bateria está plenamente carregada o controle de carga deve ser capaz de manter a chave aberta de forma a evitar danos a bateria. Para tanto se torna necessário algum método para estimar o estado de carga da bateria.

O estado de carga da bateria pode ser estimado pela tensão terminal, porém este método é muito pouco usado uma vez que a tensão da bateria depende de vários outros fatores tais como temperatura e histórico de carga e descarga da bateria, o que resultaria em falsas estimativas.

Outro método de se avaliar o estado de carga é através da densidade do eletrólito, porém este método é difícil de ser realizados através de técnicas eletrônicas e

também a densidade do eletrólito pode variar com a temperatura, com o excesso de gaseificação e com a estratificação.

O estado de carga também pode ser estimado pela quantidade de Ampère-horas que foram colocados e retirados da bateria, porém este método não leva em conta as perdas de energia por auto-descarga e a eficiência de carga da bateria.

2.12. Modelo da carga

Um sistema fotovoltaico é estruturado de acordo com a carga elétrica que vai abastecer. Conhecer as características da carga, qual sua magnitude e como ocorre o consumo energético permiti-nos dimensionar adequadamente o sistema.

A carga foi modelada como sendo em corrente contínua, ou seja, o inversor e as cargas individuais foram tratadas como uma potência variável no tempo com uma variação pequena na tensão. Desta forma, a variável que representa a carga é a corrente fornecida.

$$I_{carga} = \frac{P_{carga}}{V_{carga}}$$

Equação 20 - Modelo da carga.

3. Simulação Digital

Para as simulações digitais utilizamos o software para cálculos numéricos MatLab 7.0 ® juntamente com Simulink xx do Realese 14 da MathWorks.

Para facilitar a criação e a posterior depuração do programa criamos blocos ou subsistemas para cada equação que compunha a equação principal.

3.1. Modelo do módulo fotovoltaico

Para modelarmos a equação que representa o módulo fotovoltaico nos utilizamos de 7 equações que estão representadas por cada bloco da Figura xx:

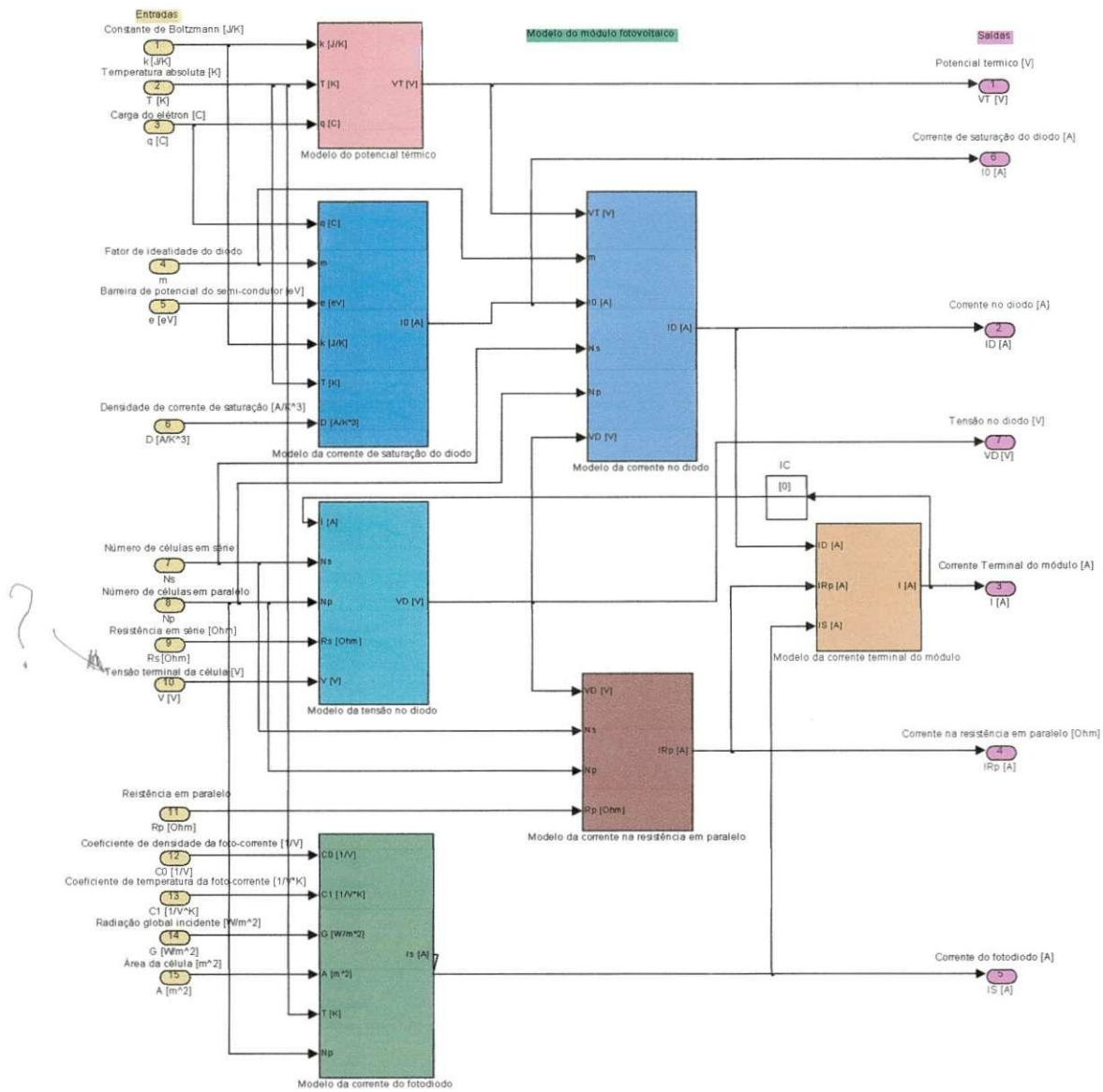


Figura 11 – Blocos de simulação do módulo fotovoltaico.

Estes blocos em conjunto representam a Equação xx e possui os seguintes parâmetros de simulação, conforme Figura xx:

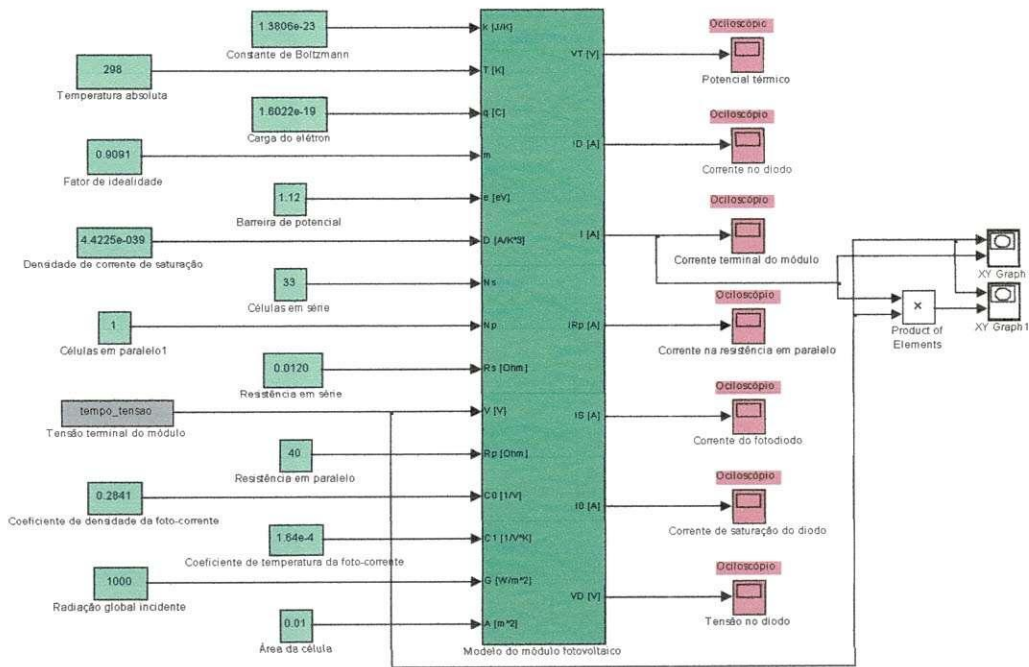


Figura 12 – Parâmetros de simulação do módulo fotovoltaico.

Para o modelo do módulo fotovoltaico simulamos suas principais características individuais, tais como curva característica I-V e a curva de potência conforme Figuras xx e xx abaixo:

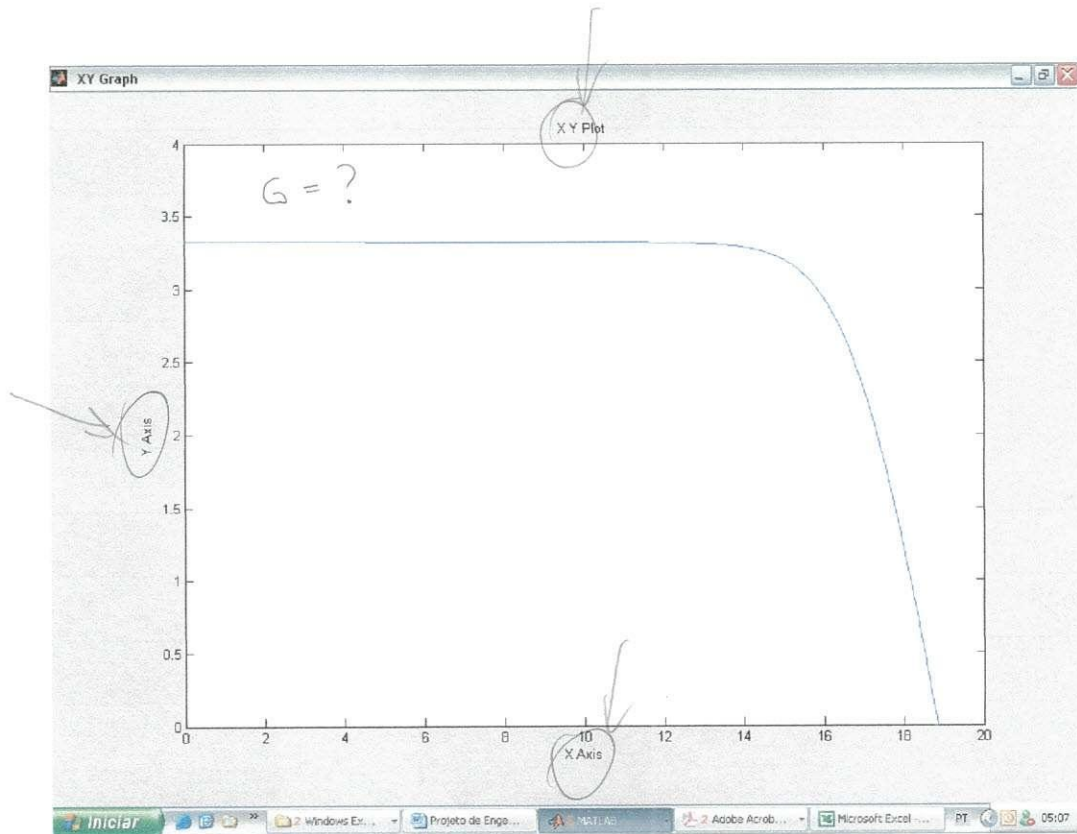


Figura 13 – Simulação da característica I-V do módulo fotovoltaico.

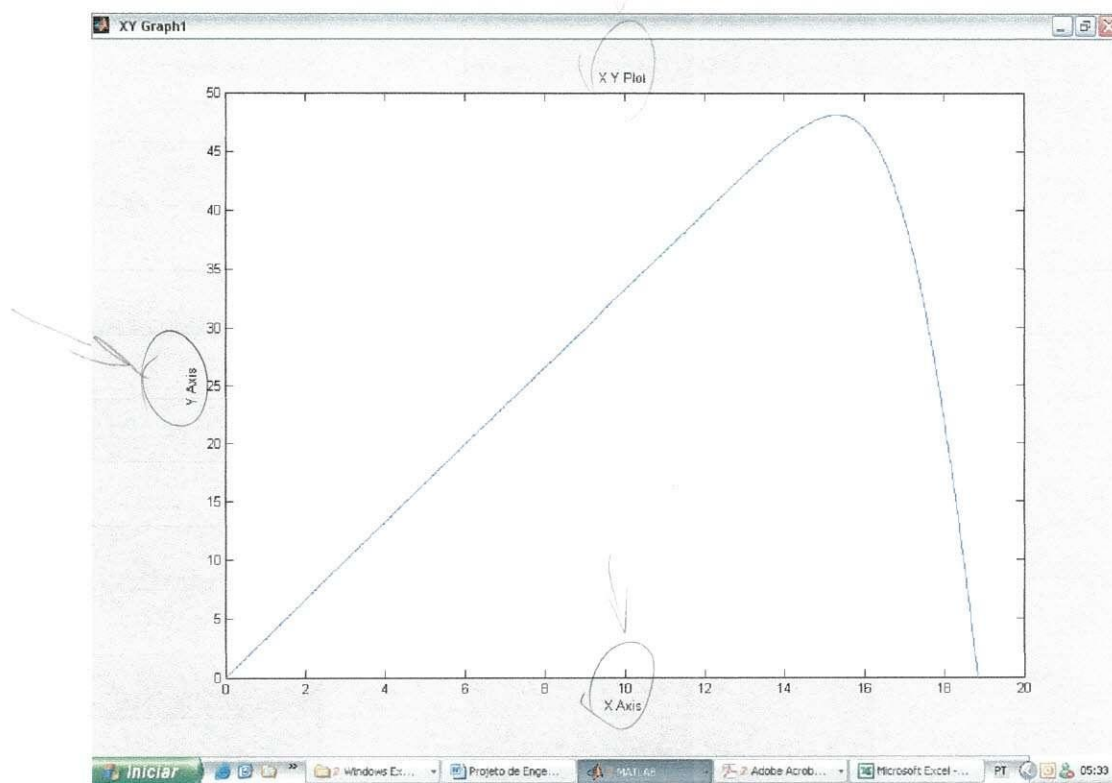


Figura 14 – Simulação da curva de potência do módulo fotovoltaico.

3.1.1. Modelo da fonte de corrente (I_s)

A fonte de corrente foi modela no Simulink do Matlab 7.0 como sendo:

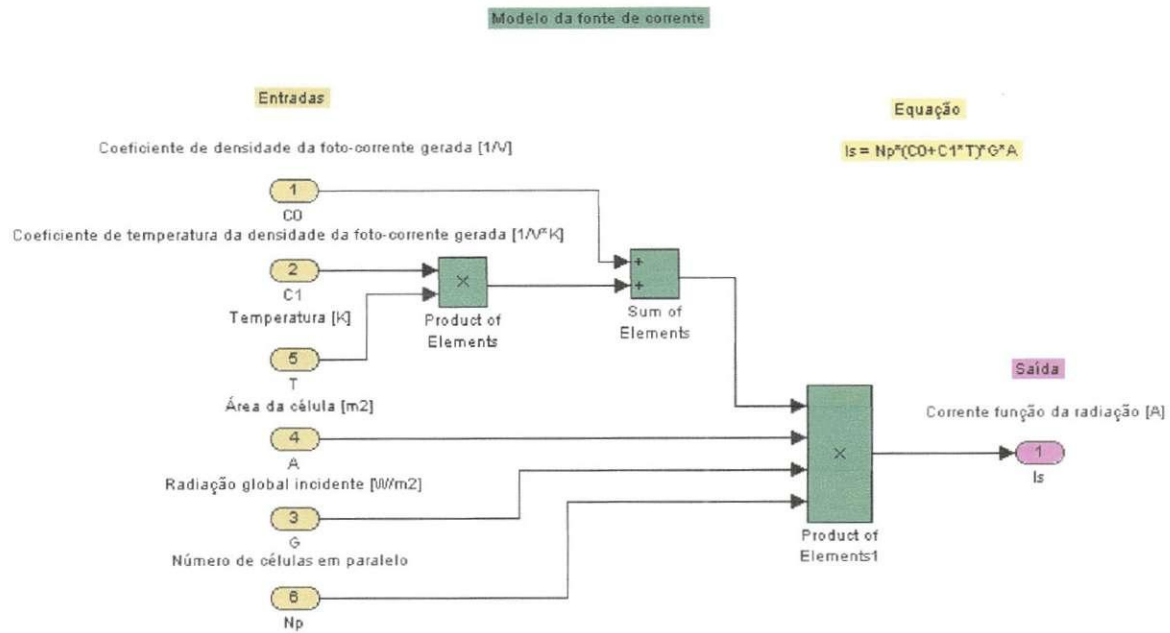


Figura 15 - Modelo da fonte de corrente (I_s).

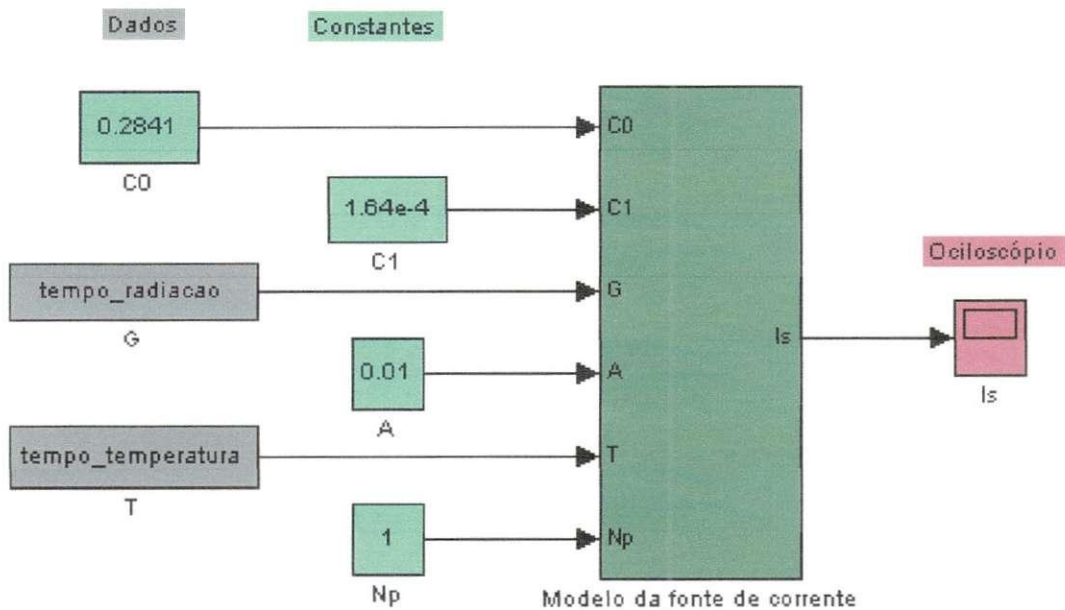
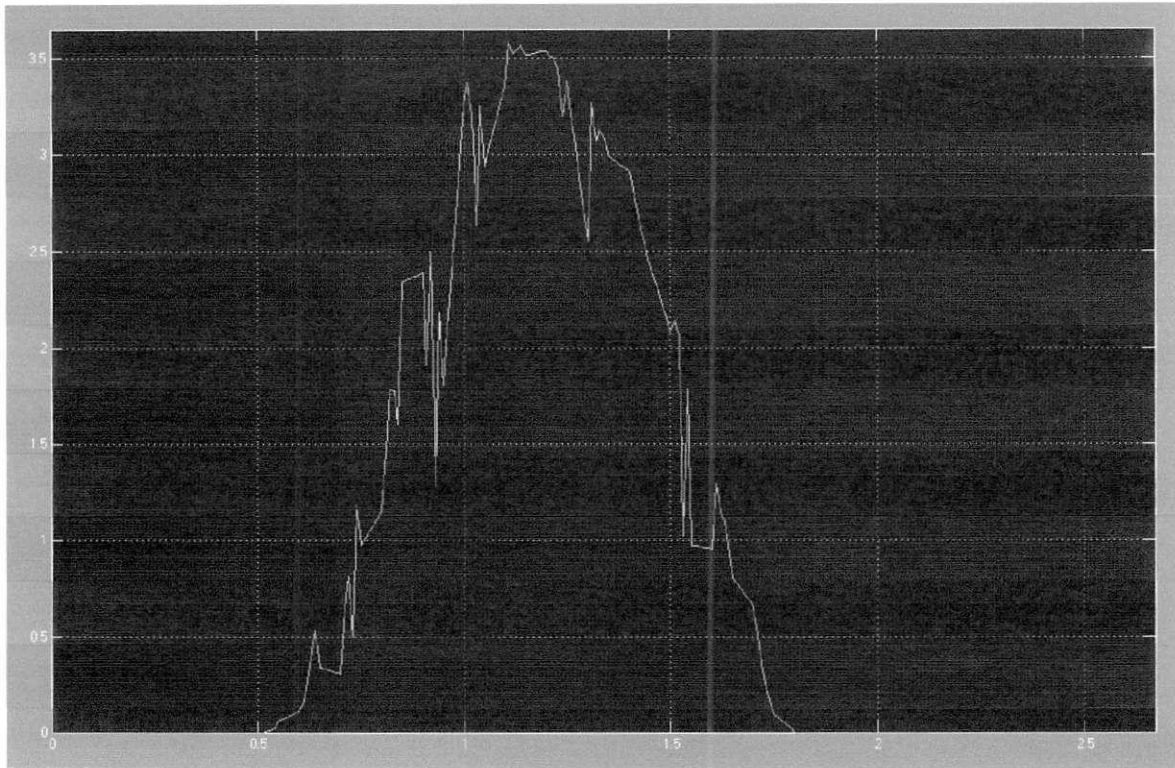


Figura 16 - Parâmetros de simulação da fonte de corrente (I_s).



?

Figura 17 - Simulação da fonte de corrente (I_s).

3.1.2. Modelo da corrente de saturação do diodo (I_0)

A corrente de saturação do diodo foi modelada no Simulink do Matlab 7.0 como sendo:

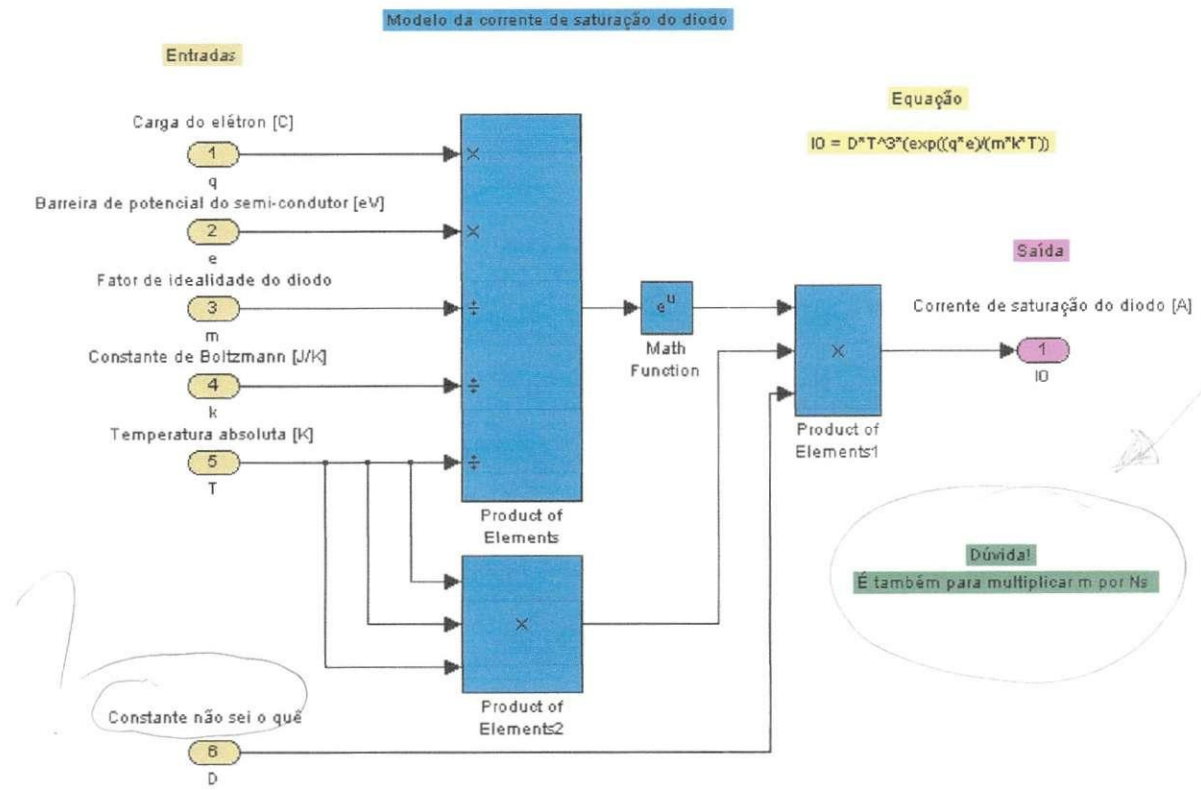


Figura 18 - Modelo da corrente de saturação do diodo (I₀).

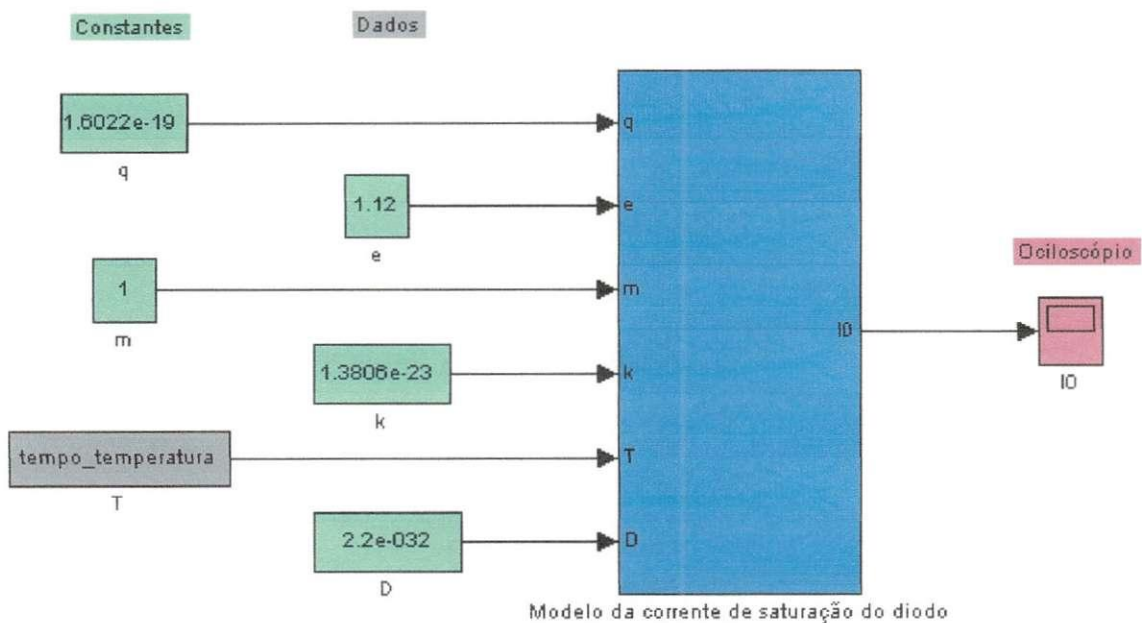


Figura 19 - Parâmetros da simulação da corrente de saturação do diodo (I₀).

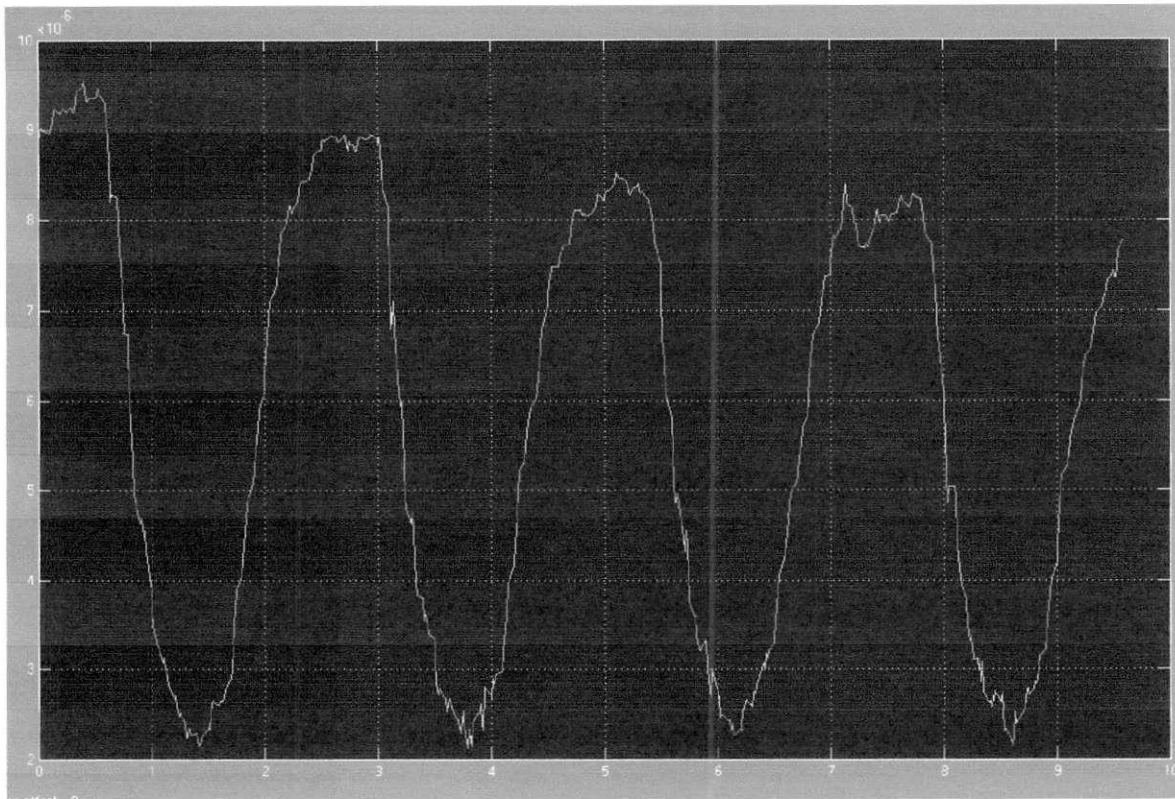


Figura 20 - Simulação da corrente de saturação do diodo (I_0).

3.1.3. Modelo da corrente terminal da célula

A corrente terminal da célula foi modelada no Simulink do Matlab 7.0 como sendo:

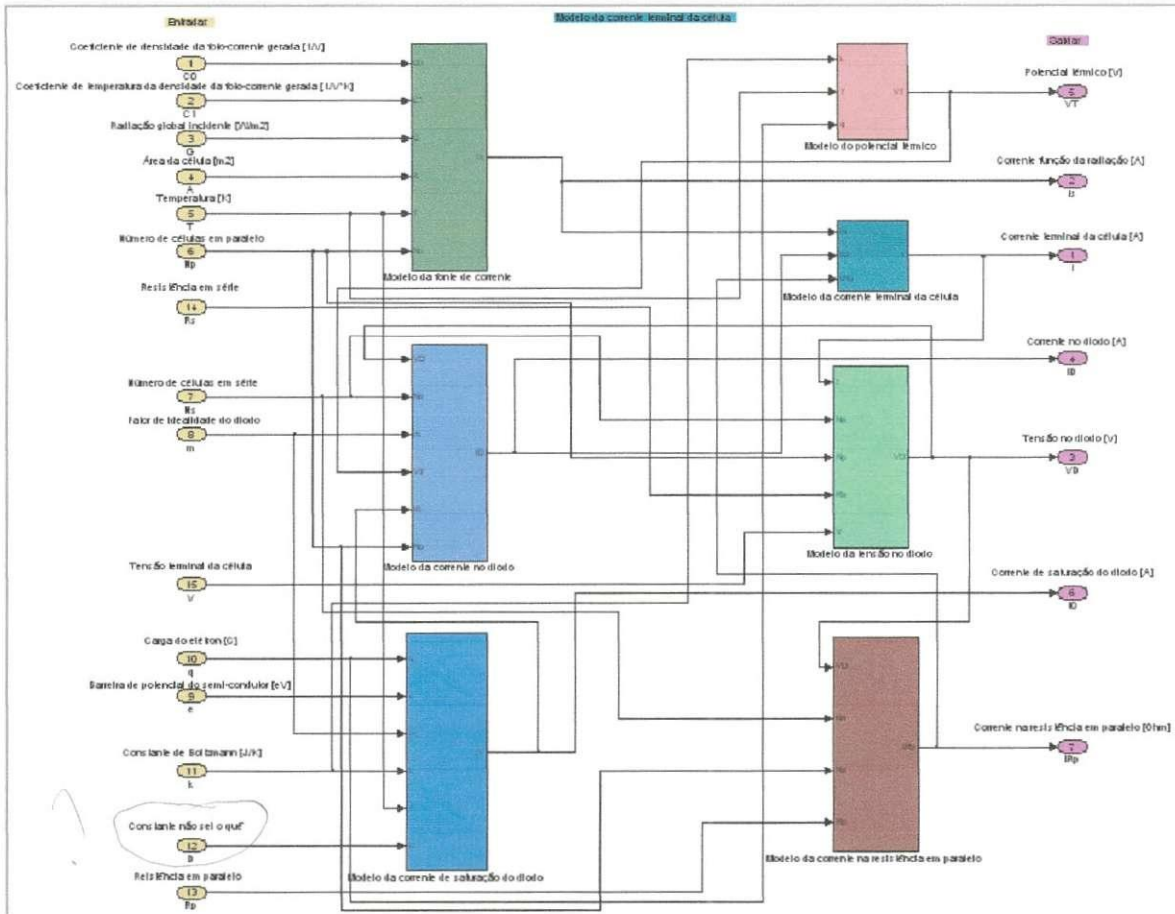


Figura 21 - Modelo da corrente terminal da célula (I).

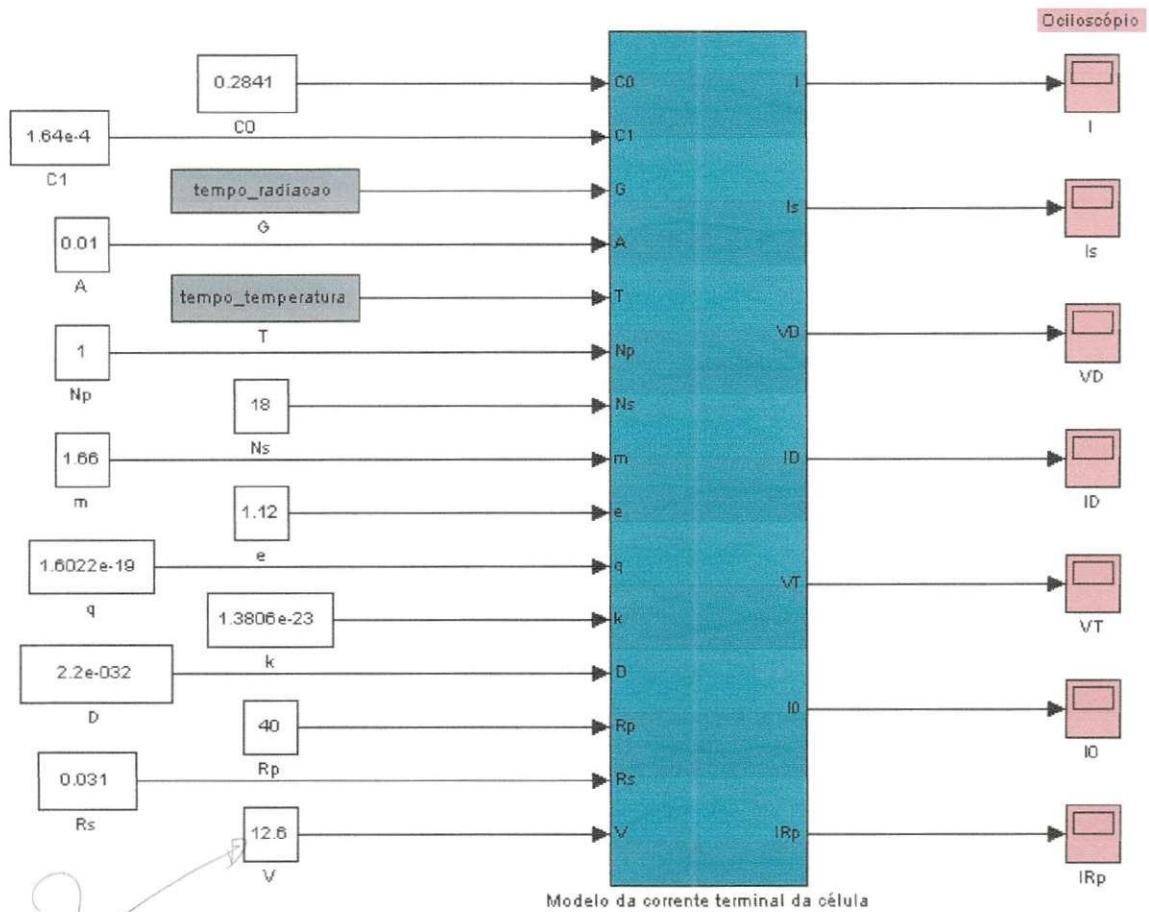


Figura 22 - Parâmetros de simulação da corrente terminal da célula (I).

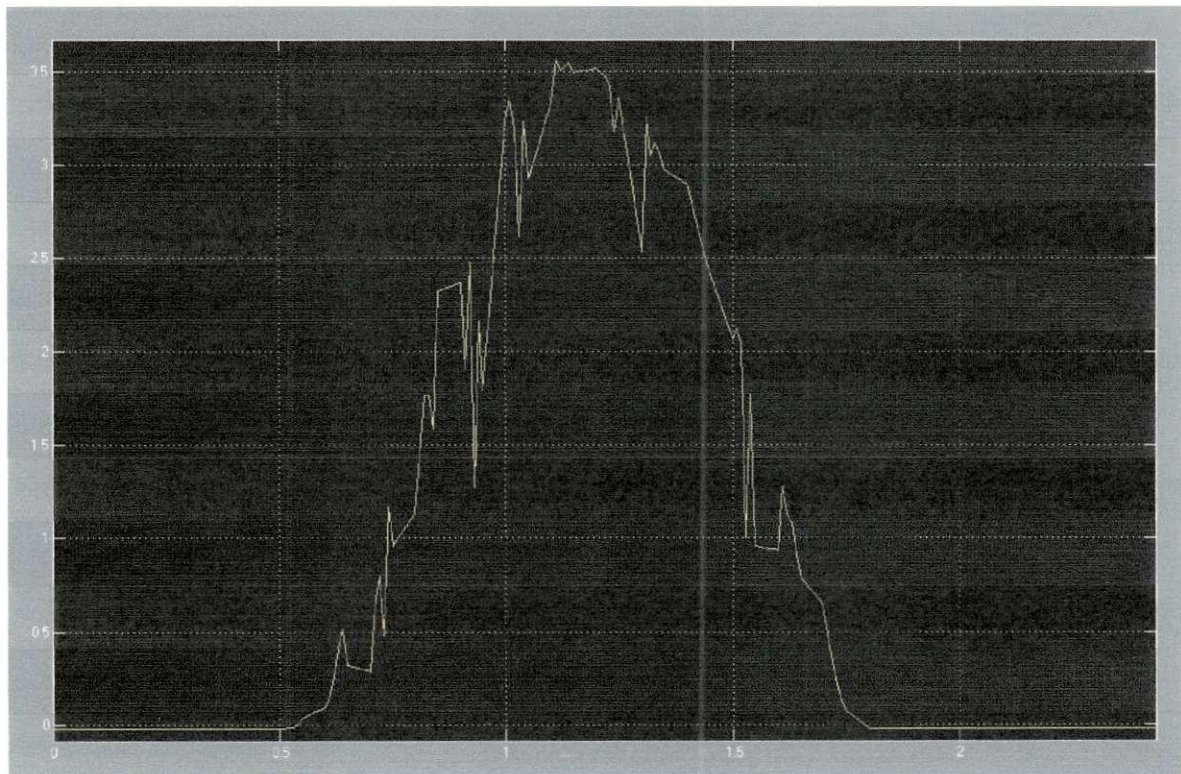


Figura 23 - Simulação da corrente terminal da célula (I).

3.2. Modelos da bateria

3.2.1. Modelo da capacidade em função da temperatura (CnT)

A capacidade em função da temperatura foi modelada no Simulink do Matlab 7.0 como sendo:

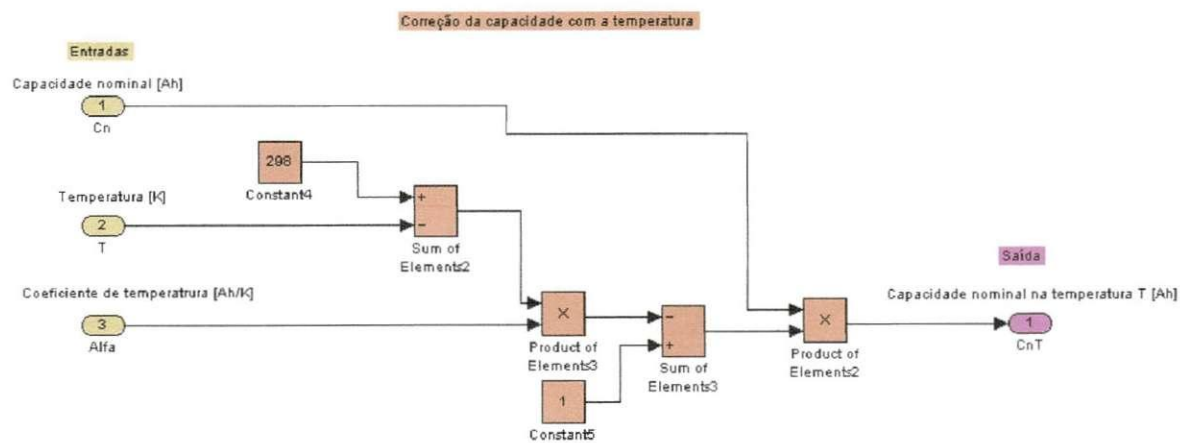


Figura 24 - Modelo da capacidade em função da temperatura (CnT).

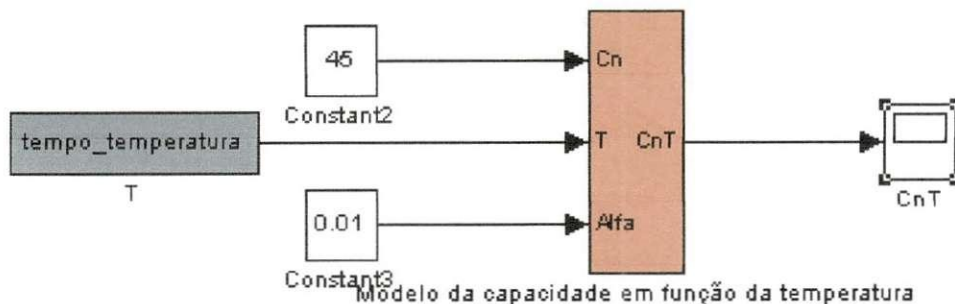


Figura 25 - Parâmetros de simulação da capacidade em função da temperatura (CnT).



Figura 26 - Simulação da capacidade em função da temperatura (CnT).

3.2.2. Modelo de Shepherd da tensão (Et)

4. Conclusão

Harmonizar, da melhor forma possível, a oferta de energia radiante proveniente do sol com a demanda de energia tornou o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos uma tarefa fundamental e complexa.



5. Referências bibliográficas

- [1] Markvart, Tom. Castañer, Luis. *Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications*. Elsevier Advanced Technology, The Boulevard. Langford Lane, Kidlington Oxford OX5 1GB, UK, Oct 2003. ISBN: 1856173909
- [2] Matsumoto, Élia Yathie. *MATLAB® 7: Fundamentos*. 1. ed. São Paulo, Érica, 2004. ISBN: 85-365-0032-8
- [3] Rashid, Muhammad H. *Power Electronics Handbook*, University of West Florida, Pensacola, Florida, Sep 2001. ISBN: 0125816502
- [4] T. R. Crompton. *Battery Reference Book - Third Edition*, NEWNES, North West Water, UK, May 2000. ISBN: 075064625X
- [5] Sedra, Adel S.; Smith, Kenneth, C. *Microeletrônica – Quarta Edição*, São Paulo, Pearson Education do Brasil, 2000. ISBN: 85.346.1044-4
- [6] Ramos, Cristina de Moura. *Procedimentos para Caracterização e Qualificação de Módulos Fotovoltaicos – Dissertação de Mestrado*, São Paulo, Universidade de São Paulo, 2006.
- [7] Barreto, Gilmar. *Veículo Elétrico à Bateria: Contribuições à Análise de seu Desempenho e de seu Projeto – Dissertação de Mestrado*, Campinas, Universidade Estadual de Campinas, 1986.
- [8] Oliveira, Sérgio Henrique Ferreira de. *Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos Autônomos: Ênfase na Eletrificação de Residências de Baixo Consumo – Dissertação de Mestrado*, São Paulo, Universidade de São Paulo, 1997.
- [9] Vitorino, Montiê Alves, *Otimização de Sistemas Fotovoltaicos*, Campina Grande, Universidade Federal de Campina Grande, 2005.

6. Apêndice A

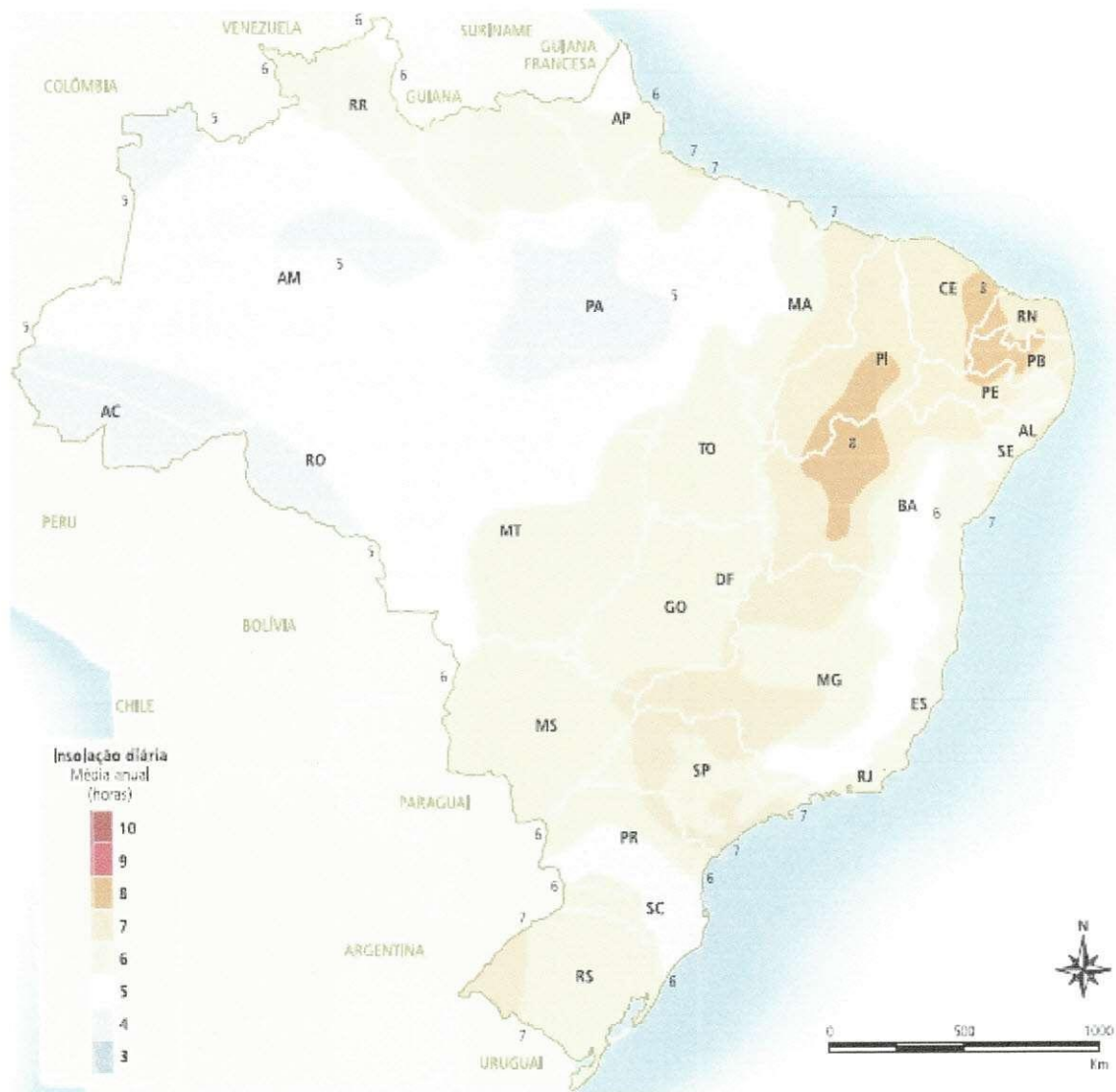


Figura 27 - Média anual de insolação diária no Brasil.

fonte?

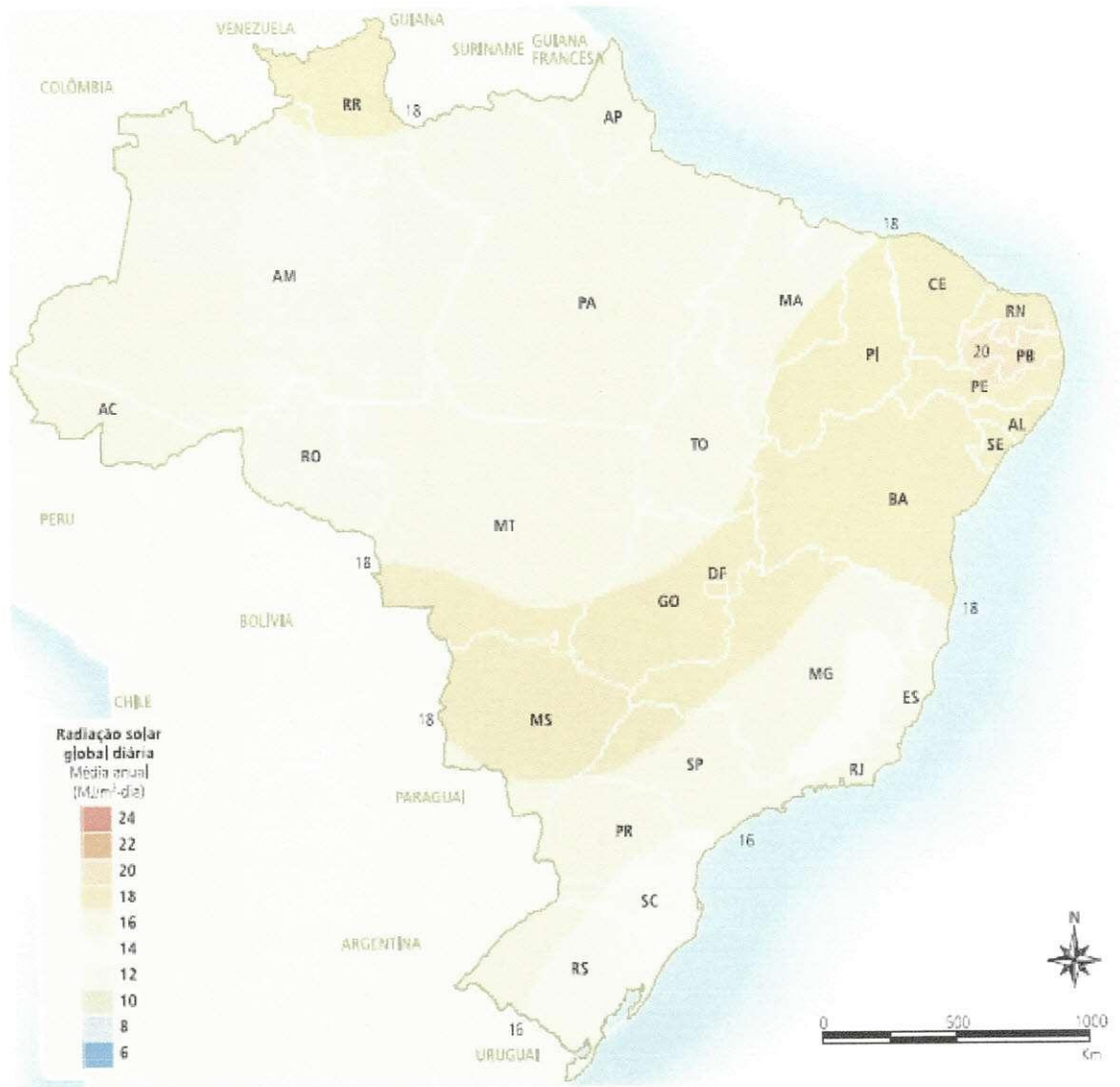


Figura 28 – Radiação solar global – média anual típica (MJ/m².dia).

fonte?



Figura 29 – Radiação solar global – média anual típica (Wh/m².dia).

fonte ?