



Trabalho de graduação

**Transmissão de energia proveniente de células
fotovoltaicas sem a utilização de condutores
metálicos**

Rodrigo Silva Rezende

Brasília, Dezembro de 2015

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB

FACULDADE DE TECNOLOGIA

Rodrigo Silva Rezende

**Transmissão de energia proveniente de células
fotovoltaicas sem a utilização de condutores
metálicos**

Monografia submetida ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília (UnB) como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Professor Alcides Leandro da Silva, Dr.

Coorientador: Professor Leonardo Menezes, Dr.

Brasília, Dezembro de 2015

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

Faculdade de Tecnologia

Departamento de Engenharia Elétrica

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Transmissão de energia proveniente de células fotovoltaicas sem a utilização de condutores metálicos

Rodrigo Silva Rezende

Banca Examinadora

Prof. Dr. Alcides Leandro da Silva, UnB/ ENE
(Orientador)

Prof. Dr. Leonardo R.A.X. Menezes, UnB/ENE
(Coorientador)

Prof. Dr. Lélío Ribeiro Soares Júnior, UnB/ ENE

Brasília, 2015

FICHA CATALOGRÁFICA

REZENDE, Rodrigo Silva

Transmissão de energia proveniente de células fotovoltaicas sem a utilização de condutores metálicos. [Distrito Federal] 2015.

xviii, 95 p. (ENE/FT/UnB, Graduação, Engenharia Elétrica, 2015).

Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Transmissão de energia sem uso de condutores	2. Energia Fotovoltaica
3. Transferência de energia entre antenas	4. Transmissão em RF
I. ENE/FT/UnB	II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Rezende, Rodrigo Silva (2015). **Transmissão de energia proveniente de células fotovoltaicas sem a utilização de condutores metálicos.**

Trabalho de Conclusão de Curso, Publicação, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 95.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Rodrigo Silva Rezende

TÍTULO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: Transmissão de energia proveniente de células fotovoltaicas sem a utilização de condutores metálicos.

GRAU/ANO: Graduação em Engenharia Elétrica/2015.

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta monografia do Trabalho de Conclusão de Curso e emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia do Trabalho de Conclusão de Curso pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Rodrigo Silva Rezende
SQS 216 – bloco K – apto. 605
70295-110 – Brasília – DF – Brasil
rodrigo.srezende@hotmail.com

Dedicatória

Dedico este trabalho a Nikola Tesla que sempre almejou melhorar o mundo, tentando levar energia elétrica para todos.

Agradecimentos

Primeiramente eu agradeço a Deus por tudo que ele me deu e todas as possibilidades que me ofertou. Agradeço aos meus pais e minha irmã, pois sem o apoio deles eu não conseguiria ter chegado ao lugar que estou. Minha gratidão ao professor Alcides pelos conselhos, ideias e pelas longas e produtivas conversas. E, por fim, a todos meus familiares e amigos que sempre acreditaram em mim.

*“Com apenas 7 notas, fizemos todas as músicas do mundo.
Com 26 letras, escrevemos todos os poemas.
Apenas 10 algarismos e com eles resolvemos qualquer conta.
De 3 cores básicas, criamos 256 milhões de tonalidades.
E com 116 elementos químicos construímos tudo que existe.
O conhecimento é exponencial.”*

Futura

Resumo

A produção e a transmissão de energia renovável usando o ar como meio condutor estão tendo relevante interesse atualmente. Neste trabalho serão integrados esses dois temas, assim como é feito no “Satellite Power System” (SPS). Será apresentado o estudo da transmissão de energia, proveniente de painéis fotovoltaicos sem a presença de condutores metálicos, utilizando-se campos eletromagnéticos. Para tal foi estudado com mais ênfase o sistema de transmissão de energia com o uso de microondas que, diferente do sistema de transmissão magnética por ressonância e do acoplamento indutivo, pode transmitir energia por distâncias maiores. Foi construído um protótipo de um sistema com o fornecimento de energia solar e transmissão eletromagnética dessa energia na faixa de 800-1000 MHz, e testado para distâncias de até 5 metros. Uma expressão para a transferência de potência total de sistemas desse tipo é apresentada e avaliada teoricamente e experimentalmente, com o uso desse protótipo. Embasado no estudo de vários dos subsistemas do SPS, principalmente na transmissão de energia via microondas, o autor toma a liberdade de dar a opinião sobre a possibilidade real de construção de um SPS.

Palavras-chaves: Transmissão de energia sem condutores, “Satellite power system” (SPS) , transmissão de energia com microondas

Abstract

The production and transmission of renewable energy using the air as conductor are having great interest nowadays. In this work these two ideas will be integrated, in the same way it is done with the Satellite Power System. It will be presented the study of transmission of the energy, generated by solar panels, without the use of wires, using for that electromagnetic waves. To achieve this, it was studied, with a greater focus, the wireless energy transmission system which uses microwave that, differently from the near-field magnetic resonance and inductive coupling, can transfer energy to greater distances. A prototype from a system powered by solar energy that transmits this energy wirelessly with electromagnetic waves in the frequency from 800-1000 MHz was built and tested for distances up to 5 meters. An expression for the total transferred power from a system like this was theoretically and experimentally evaluated using this prototype. With the theory and practical knowledge, especially with the wireless power transfer ideas, the author gives his opinion on the possibility of construction of a real SPS.

Keywords: Wireless power transmission, satellite power system, microwave energy transmission

SUMÁRIO

SUMÁRIO	x
Lista de figuras	xiii
Lista de gráficos.....	xv
Lista de tabelas	xvi
Lista de abreviaturas e siglas	xvii
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Estruturação do trabalho	3
2. Métodos de produção de energia elétrica	5
2.1 História da geração de energia.....	5
2.2 Principais métodos de geração.....	7
2.2.1 Geradores termoelétricos não nucleares	7
2.2.2 Geradores termoelétricos nucleares	10
2.2.3 Geradores hidráulicos	12
2.2.4 Geradores eólicos.....	15
2.3 Geração fotovoltaica de energia	17
2.3.1 História da geração de energia fotovoltaica.....	17
2.3.2 Radiação Solar	19
2.3.3 Funcionamento dos semicondutores.....	25
2.3.4 Junção PN e a célula fotovoltaica	28
2.3.5 Tipos de células fotovoltaicas.....	36
3. Noções Básicas de Eletromagnetismo	37
3.1 Breve história do eletromagnetismo	37

3.2 Campos eletromagnéticos variantes no tempo	37
3.7 Radiação de antenas.....	42
4. Métodos de transmissão de energia sem condutores metálicos.....	49
4.1 Acoplamento indutivo	49
4.2 Transmissão magnética por ressonância de campo próximo.....	51
4.3 Laser óptico	53
4.4 Microondas	55
4.4.1 Conversor DC-RF.....	56
4.4.2 Transferência de energia entre antenas.....	57
4.4.3 Conversor RF-DC.....	58
5. Descrição do Satellite Power System (SPS) e projetos	61
5.1 Subsistemas do SPS.....	62
5.1.1 Subsistema de potência.....	62
5.1.2 Subsistema de transmissão de potência via microondas.....	63
5.1.3 Subsistema da rectena.....	65
5.2 Fórmula sugerida da transferência de potência do SPS.....	66
5.3 Projeto dos EUA.....	68
5.3.1 Descrição geral do sistema	68
5.3.2 Geração de energia	69
5.3.3 Transmissão de energia via microondas e retificação	69
5.4 Projeto do Japão.....	71
6. Protótipo em menor escala do SPS	73
6.1 Equipamentos necessários para a construção do protótipo.....	73
6.1.1 Fonte solar de energia	73
6.1.2 Conversor DC-RF e transmissor de energia via microondas.....	74
6.1.3 Receptor e conversor RF-DC.....	74
6.2 Montagem do experimento e resultados	75

6.3 Comparação entre a simulação da fórmula e resultados do protótipo	84
7. Conclusões	89
7.1 Aspectos gerais	89
7.2 Principais conclusões e contribuições	90
7.3 Sugestões para trabalhos futuros	90
Referências	92

Lista de figuras

Figura 2.1: Fluxograma de uma Usina Térmica a Vapor [9]	9
Figura 2.2: Fluxograma de uma Usina Térmica a Gás [9]	9
Figura 2.3: Elementos de uma usina hidrelétrica [10]	14
Figura 2.4: Coeficiente de potência para diferentes designs de rotores [36]	18
Figura 2.5: Densidade de radiação solar no exterior da atmosfera terrestre para valores de comprimento de onda entre 200nm até 4000nm [17](modificado)	21
Figura 2.6: Diminuição da energia das ondas eletromagnéticas para diferentes comprimentos de onda e presença das duas janelas de penetração eletromagnética na atmosfera terrestre [17](modificado)	22
Figura 2.7: Densidade de radiação solar no exterior da atmosfera e na superfície terrestre para valores de comprimento de onda entre 200nm até 4000nm [17](modificado)	23
Figura 2.8: Diferentes ângulos usados nos cálculos da disposição do painel Fotovoltaico [17](modificado)	25
Figura 2.9: O diagrama momento x energia para as bandas de valência e condução do silício e do arsenieto de gálio [16]	28
Figura 2.10: Junção p-n mostrando a difusão e a corrente de deriva de elétrons e buracos [16]	29
Figura 2.11: Junção p-n iluminado mostrando a criação dos pares elétrons buracos em diversos pontos do dispositivo [16]	32
Figura 2.12: Gráfico corrente versus tensão para um diodo e para uma célula solar iluminada [17](modificado)	33
Figura 2.13: Modelo de circuito de uma célula solar e seu correspondente gráfico corrente versus tensão [17]	33
Figura 2.14: Curva corrente versus tensão de uma placa solar para diferentes níveis de radiação solar [17]	34
Figura 2.15: Curva corrente versus tensão de uma placa solar para diferentes Temperaturas [17]	35
Figura 2.16: Curva corrente versus tensão e potência versus tensão de uma placa solar [17]	35
Figura 3.1: Equivalente de Thevenin para uma antena no modo de Transmissão [22] (modificado)	44
Figura 3.2: Sistemas de coordenadas para análise de antenas [22](modificado)	46
Figura 3.3: Geometria das antenas de transmissão e recepção para a equação de Friis [22](modificado)	48
Figura 4.1: Acoplamento de indutores através da indutância mútua [23]	50

Figura 4.2 : (a) Modelo simplificado de transferência de potência entre duas bobinas (b) Circuito equivalente do circuito de “a” (c) Carga refletiva para o circuito primário na frequência ressonante [25]	52
Figura 4.3 : Teste de transmissão de energia via microondas em Goldstone, Estados Unidos [29]	56
Figura 4.4 : Etapas do processo de transmissão de energia via microondas[23]	56
Figura 4.5: Elementos básicos de uma rectena[23](modificado)	59
Figura 4.6: Exemplo de circuito de retificador e elevador de tensão [2]	59
Figura 5.1: Satellite Power System [6](modificado)	62
Figura 5.2: Valores limites para a radiação eletromagnética segundo a CENELEC 50166-2[34]	65
Figura 5.3: Configuração e geometria do modulo solar no SPS americano[6]	69
Figura 5.4: Densidade de potência na rectena como função da distância a partir do lóbulo principal[6]	71
Figura 5.5: Antenas usadas no teste de transmissão de energia via microondas realizado pela JAXA e Mitsubishi Heavy Industries. A esquerda é mostrada a antena de transmissão e na direita a de recepção. [37]	72
Figura 6.1: Módulo solar construído e conversor DC-RF e transmissor da POWERCAST	75
Figura 6.2: Receptor e conversor RF-DC e antenas de ganhos 6.1dBi e 1.0dBi	76
Figura 6.3: Disposição dos equipamentos na medição inicial	77
Figura 6.4: Teste para o sistema completo	81
Figura 6.5: Teste com o sistema completo para outro ambiente	83
Figura 6.6: Potência em função das distâncias entre as antenas e do ganho da antena de recepção	87
Observação: As figuras, gráficos e tabelas sem menção de referência foram elaboradas pelo autor.	

Lista de gráficos

Gráfico 6.1: Medição da potência a 3 metros de distância com a antena de recepção na vertical	78
Gráfico 6.2: Medição da potência a 3 metros de distância com a antena de recepção na horizontal	79
Gráfico 6.3: Medição da potência a 2.2 metros de distância com a antena de recepção na vertical	79
Gráfico 6.4 Comparação com os resultados da fórmula e do segundo teste	86

Lista de tabelas

Tabela 2.1: Eficiência em % de diferentes tipos de células solares para diferentes etapas da maturidade da tecnologia	36
Tabela 6.1: Resultados das medições para distâncias de 2.2, 3 e 4.73 metros	81
Tabela 6.2: Resultados das medições para distâncias de 2.2, 3,3.5,4,4.5 e 4.73 metros para outro ambiente	82
Tabela 6.3: Simulação da transferência de potência com a fórmula 5.4	85

Lista de abreviaturas e siglas

NASA - National Aeronautics and Space Administration

SPS - Satellite Power System

EUA - Estados Unidos da América

AC - Corrente Alternada

DC - Corrente Contínua

VSH - Vapor Super Aquecido

LWR - Light Water Reactor

PWT - Pressurised Water Reactor

BWR - Boiling Water Reactor

SINV - Sistema de Inventário Hidroelétrico de Bacias Hidroelétricas

N.A.Max - Nível máximo de armazenamento

N.A.Min - Nível mínimo de armazenamento

A.C. - Antes de Cristo

D.C. - Depois de Cristo

MPP - Ponto de máxima potência

E - Campo elétrico

D - Densidade de fluxo elétrico

H - Campo magnético

B - Densidade de fluxo magnético

fem - Força eletromotriz

IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers

MIT - Massachusetts Institute of Technology

RF - Rádio Frequência

JAXA - Japan Aerospace Exploration Agency

1 Introdução

1.1 Motivação

A energia, inclusive a elétrica, sempre existiu e foi transmitida na natureza através do ar. Descargas atmosféricas, raios gamas vindos do espaço profundo, radiação solar, esses são alguns dos exemplos que comprovam que a energia é transmitida livremente no ar. Nos dois últimos casos, a energia percorre inclusive o vácuo.

No final do século 19, os trabalhos de Nikola Tesla deram os primeiros passos para o entendimento e construção de um sistema com transmissão de energia usando-se o ar como condutor. “Aquela energia elétrica pode ser transmitida, economicamente viável, sem a presença de condutores para qualquer distância terrestre...” (Nikola Tesla, 1905). Desde a época deste trabalho muito se desenvolveu nesta área. Algumas opções foram se mostrando mais eficientes que outras e hoje em dia o foco de estudos está centrado em duas vertentes principais: a primeira delas estuda a transmissão sem condutores para pequenas distâncias, fazendo o uso de transmissão magnética por ressonância de campo próximo e de acoplamento indutivo; a segunda vertente prioriza a transmissão sem fio para distâncias maiores centralizando seus estudos basicamente em transmissão de potência por laser ótico e por transmissão via microondas [2].

A transmissão de energia é apenas uma parte da necessidade humana, uma vez que a produção dessa mesma energia é igualmente, ou talvez, mais importante. Sem energia sociedades complexas com construções grandes e populações enormes são impossíveis, por isso vivemos atualmente em uma corrida contra o relógio. A cada dia o consumo de energia, especialmente elétrica está cada vez maior e mais diversificado. A geração desta energia, porém não está tendo a devida atenção por parte da maioria dos países, especialmente no que se refere à qualidade dela, isto é, o tipo de sua matriz. A dependência de combustíveis fósseis como fonte principal da geração de energia elétrica mundial compromete a evolução humana no quesito de uso prolongado de energia, já que as reservas de tais combustíveis irão se esgotar. O petróleo é o maior exemplo disto [3]. A solução mais evidente para esta crise são as energias renováveis. O intuito delas é gerar energia com o menor nível de poluição possível e ter uma fonte de geração com característica duradoura e renovável. Mesmo sendo

insuficientes os investimentos nessas tecnologias têm atingido números expressivos, chegando aos 270.2 bilhões de dólares no ano de 2015 [4].

Na tendência trazida pelo desenvolvimento das energias renováveis novos conceitos de geração foram sendo desenvolvidos a fim de sanar alguns problemas já existentes. Um problema especialmente impactante inclusive para as tecnologias renováveis é que várias dessas tecnologias são muito dependentes das condições da natureza, como é o caso da energia solar, da produção eólica e até mesmo da energia hidrelétrica, fazendo com que a confiabilidade dessas fontes seja reduzida. Esses fatores somados levaram a ciência a buscar a geração de energia fora do planeta. A partir dessa ideia, surgiu em 1968 o conceito do “Satellite Power System” (SPS) criado por Peter Glaser [5]. Posteriormente, em 1977 um estudo completo seria realizado pela National Aeronautics and Space Administration (NASA) e pelo departamento de energia dos Estados Unidos da América (EUA) intitulado de “Satellite Power System - Concept Development and Evaluation Plan”. A ideia central desse sistema é a de posicionar em órbita geoestacionária (36000 km) um satélite contendo painéis solares de grandes dimensões. Esses painéis gerariam energia proveniente da irradiação solar, abundante no espaço, que seria convertida e depois transmitida para terra via microondas ou por um laser ótico. Para a conversão novamente em energia elétrica, haveria na estação de base na terra uma grande antena de recepção, no caso de transmissão via microondas, ou outro grande painel solar quando utilizada a tecnologia de laser ótico. A transmissão com laser ótico tem eficiência significativamente menor que o estimado com a transmissão via microondas. Além do mais, a atenuação na atmosfera é muito maior naquela tecnologia do que nesta. Por isto então, o conceito usando-se microondas é mais atrativo para transmissão de potência em órbita geoestacionária (Satellite Power System Concept Development and Evaluation Program - NASA). Testes foram realizados com sucesso, como o feito pela NASA em 1975 no centro de testes de Gold Stone. Neste teste 34 KW de potência foram transmitidos, utilizando-se microondas, por uma distância de 1.5 km com uma eficiência superior a 82% [6]. A teoria e testes como esses leva-nos a crer que o uso de tal sistema é possível e que levaria a situação de produção de energia mundial a outro patamar, tornando esta mais duradoura, segura, limpa e com o menor impacto negativo possível para o planeta.

A partir de tais ideias, este trabalho se baseou , principalmente, nas ideias de Tesla e no conceito do SPS como uma solução para a atual crise energética mundial.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo apresentar o conceito detalhado da tecnologia do SPS, contemplando estudos dos princípios dos seus subsistemas, com ênfase na transmissão de energia sem condutores metálicos, e a integração deles. Adicionalmente, a pesquisa desenvolve a construção de um protótipo do SPS realizado em menor escala. Como meta final, o estudo apresenta uma avaliação do SPS como futuro gerador de energia elétrica para suprimento de demanda em grandes proporções.

1.3 Estruturação do trabalho

O trabalho foi dividido em 7 capítulos a fim de levar ao leitor um texto conciso, fluido e que introduzisse todo conteúdo necessário para desenvolvimento de capítulos posteriores.

O primeiro capítulo é a introdução. Neste são apresentados os objetivos que levaram ao tema deste trabalho, com especial ênfase na ideia pioneira de Nikola Tesla e no conceito do SPS. Comenta-se brevemente, o que será realizado neste trabalho, qual seu objetivo e sua estrutura.

No segundo capítulo faz-se uma revisão genérica sobre os diferentes métodos de produção de energia elétrica. O destaque será o estado da arte da produção de energia solar fotovoltaica. Será realizada uma revisão mais detalhada, incluindo os temas efeito fotoelétrico, diagrama corrente versus tensão de uma célula solar e suas dependências da temperatura e da irradiação solar, entre outros.

No terceiro capítulo, uma revisão de eletromagnetismo trata de campos eletromagnéticos variantes no tempo, propagação de ondas e radiação. Os capítulos 2 e 3 serão uma importante revisão bibliográfica, contendo, no entanto, algumas menções ao SPS em temas ligados a este sistema quando oportuno.

No capítulo 4 serão discutidos os métodos mais relevantes de transmissão de energia sem condutores metálicos. Os sistemas a serem estudados serão: acoplamento indutivo, transmissão magnética por ressonância de campo próximo, sistema laser ótico e o sistema de

transmissão utilizando-se microondas. Atenção especial foi dada ao último método para aproximar o texto aos objetivos do trabalho.

No capítulo 5 ocorrerá uma descrição rigorosa do “Satellite Power System” (SPS). Todos os subsistemas serão analisados separadamente e por fim o conjunto dos subsistemas integrados também será investigado. Uma consideração maior será dada ao subsistema de transmissão sem condutores metálicos usando microondas, que é o objetivo maior deste trabalho. Neste capítulo é desenvolvida uma equação, por meio da análise dos subsistemas separados, que traz a potência total desenvolvida por um SPS a qual depende de diversos parâmetros desses subsistemas. A validação desta fórmula é realizada no capítulo 6. O capítulo 5 contém, ainda, a análise de alguns exemplos de aplicação dessa tecnologia, como os testes feitos pelo Japão e os EUA.

Com as ideias dos capítulos anteriores consolidadas o capítulo 6 traz os resultados obtidos com o protótipo de um SPS que foi construído e estudado para este trabalho. Há uma breve descrição das características desse protótipo, tais como: o tamanho desse protótipo; a potência gerada na saída; a frequência utilizada na transmissão via microondas dentre outras. Também neste capítulo encontram-se todos os métodos e materiais usados na avaliação e construção desse protótipo. Serão realizadas simulações, com as mesmas características do sistema construído, utilizando a fórmula desenvolvida no capítulo 5. Os resultados dessas simulações serão comparados com os resultados reais do protótipo a fim de validação dessa equação.

O capítulo 7 registra as conclusões finais e traz um resumo dos principais pontos desenvolvidos nos capítulos anteriores com ênfase na validação da fórmula descrita no capítulo 5. Com o conhecimento desenvolvido no trabalho, é dada a opinião do autor a cerca da possibilidade real de construção de um SPS em escala do projeto original, isto é, se este tipo de sistema pode ser construído e se pode ser economicamente viável. O capítulo é finalizado com possíveis aplicações do SPS e sugestões para trabalhos futuros.

2. Métodos de produção de energia elétrica

2.1 História da geração de energia

A eletricidade e o magnetismo como fenômenos físicos são conhecidos pela humanidade há milhares de anos. Na Grécia antiga e na Ásia há muito eram notadas importantes propriedades de materiais eletricamente carregados. Porém, apenas no ano de 1600 com os trabalhos de Willian Gilbert (1544-1603) sobre os materiais magnéticos, o conhecimento sobre essa ciência começa a ter um caminho científico trilhado. Juntamente com Gilbert nesta época, outros pesquisadores contribuíram bastante para a evolução dessa área, como é o caso de Otto von Guericke (1602-1686), Stephen Gray(1666-1736), Charles Francois Dufay(1698-1739), Charles Augustin Coulomb (1736-1806), Lougi Aloisius Galvani (1737-1798), Benjamin Franklin (1706-1790), Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta (1745-1827) , entre outros. Mesmo tendo uma evolução grande o conhecimento da eletricidade e do magnetismo nesta época estavam incipientes e carentes de certas explicações para questões mais complexas. As aplicações deste conhecimento não tinham grande efeito para a população em geral, sendo puramente acadêmicas.

A partir da experiência de Hans Christian Oersted (1777-1851) o entendimento do fenômeno elétrico e magnético começou a mudar. Oersted observou que uma corrente elétrica que percorre um condutor gera nas proximidades desse condutor um campo magnético. Esse fenômeno foi brilhantemente demonstrado teoricamente por André-Marie Ampère (1775-1836). Outros pesquisadores contribuíram tanto quanto Ampère para o maior entendimento do eletromagnetismo. George Simon Ohm (1789-1854), por exemplo, descobriu a famosa lei entre corrente, resistência e tensão que leva seu nome. Jean Batiste Biot (1774-1862) e Felix Savart (1791-1855) acharam a lei de Biot-Savat que mostra que uma densidade de fluxo magnético pode ser gerada por uma corrente. Johann Carl Friedrich Gauss (1777-1855) encontrou a famosa lei de Gauss que relaciona a distribuição de carga elétrica com o campo elétrico resultante produzido por ela. Especialmente no campo da geração de energia os experimentos de Michael Faraday (1791-1867) e Joseph Henry (1797-1878) foram muito importantes, uma vez que, independentemente eles observaram que campos magnéticos variantes produziavam correntes elétricas. Mais tarde Faraday acharia a relação que sintetiza

matematicamente o que ele e Henry observaram e que hoje é chamada de “Lei de Faraday”. Com estes conhecimentos em mente Faraday inventou os primeiros geradores elétricos que geravam tensão elétrica com base em princípios de indução magnética [8].

A partir de 1840 ocorreram várias tentativas de construção de diferentes conceitos de geradores elétricos. Alguns profissionais empenhados nessa tarefa foram: Charles Weathstone (1802-1875), Samuel Alfred Varley (1832-1921), Ernst Werner von Siemens (1816-1892), Carl Heinrich von Siemens (1829-1906) e Zénobe-Théophile Gramme (1826-1901) . Os geradores começaram, a partir de 1870, a serem usados em várias aplicações, como na iluminação de outdoors de iluminação a arco.

O aumento do uso das cargas elétricas levou a melhoria dos geradores e consequente aumento do uso da energia elétrica. Um fato marcante nesse sentido foi a invenção bem sucedida de Thomas Alva Edison (1847-1931). Em 1879 ele conseguiu construir uma lâmpada elétrica incandescente que tinha vida útil muito superior as existentes na época. Ele construiu um bulbo com vácuo contendo filamento de fio de algodão carbonizado que depois de energizado durou 44 horas até queimar. A partir dessa construção inicial Edison aprimorou-a e adicionalmente construiu geradores DC com eficiências de quase 90% [8]. Finalmente em 1882, Edison instalou geradores DC nas instalações da estação de Pearl Street em Nova Iorque, nos Estados Unidos. Essa instalação viria a ser uma das primeiras plantas de comércio de energia elétrica no mundo.

Com a melhoria da disponibilidade de energia elétrica o consumo aumentou ainda mais, gerando problemas de queda de tensão entre as linhas de transmissão. Isto acontecia, pois as correntes cresceram com o aumento da carga, logo para distâncias grandes haveria uma resistência alta o que provocaria essa queda na tensão. Para contrabalancear esse efeito a energia tinha que ser transmitida em altas tensões e ao chegar perto dos consumidores era novamente baixada por motivos de segurança. No entanto dispositivos elevadores ou abaixadores de tensão, especialmente DC, não eram muito aprimorados. Em 1887 Nikola Tesla (1856-1943), trabalhando pela Westinghouse Company, inventou o motor de corrente alternada polifásico. Este foi outro marco na história da humanidade, pois essa invenção, juntamente com outras das patentes de Tesla, permitiram revolucionar a geração, transmissão e distribuição da energia elétrica. Obviamente uma guerra entre as ideias de Edison e Tesla ocorreu no que ficou conhecido como “guerra das correntes”. A ideia de Tesla saiu vencedora e o gerador de corrente alternada (AC) começou a ser largamente utilizado desde então.

Alguns dos motivos para que a corrente AC saísse vencedora foram: os transformadores CA podiam facilmente baixar ou elevar a tensão CA, o que na época era uma tarefa difícil com a tensão DC e os geradores CA eram mais simples e mais baratos que os DC. [8]

A partir deste cenário a indústria elétrica firmou-se e evoluiu em um nível nunca antes visto, expandindo para todo o mundo. Hoje em dia os geradores são de diversos tipos e as suas matrizes energéticas são as mais variadas possíveis. Isto permite que tenhamos sistemas capazes de gerar a demanda mundial de energia. Na próxima seção serão abordados os diferentes tipos de geração de energia divididos por matriz energética.

2.2 Principais métodos de geração

Como visto na seção anterior, o desenvolvimento da geração de energia, desde os princípios do eletromagnetismo até os modernos geradores de grandes usinas foi um processo gradativo e que envolveu centenas talvez milhares de pensadores que moldaram essa área. Por isto, as várias ideias que foram surgindo foram criando novos conceitos diferentes uns dos outros. Uma prova disso é a heterogeneidade dos diversos tipos de geradores para as diferentes matrizes energéticas. Nesta seção discutiremos brevemente as diferentes matrizes energéticas e suas características.

2.2.1 Geradores termoeletricos não nucleares

A geração de energia por termoeletrica funciona com a conversão de energia térmica em energia mecânica e a partir desta gera-se, através de processos eletromagnéticos, energia elétrica. Neste tipo de geração utiliza-se a energia térmica para aquecer um fluido que se expande. Esta expansão do fluido é canalizada para turbinas que se movem, obtendo-se assim energia mecânica. Acoplado às turbinas estão geradores elétricos que aproveitam a energia das turbinas para gerar energia elétrica. A energia primária, isto é, a térmica pode ser obtida por energia química, com o uso de combustíveis fósseis, ou por energia nuclear com uso de combustíveis radioativos. No primeiro caso as chamadas usinas termoeletricas não nucleares podem ser divididas em duas categorias. A primeira é a usina de combustão externa. Nela, o combustível não se mistura com o fluido que gera o movimento das turbinas. O segundo tipo

é a usina de combustão interna a qual seu fluido de trabalho, misturado com o ar, realiza a conversão de energia térmica em mecânica.

Um exemplo das usinas de combustão externa são as termoelétricas a vapor. Os combustíveis comuns neste tipo de usina são: carvão, óleo diesel, óleo combustível, gás natural, biomassa (bagaço de cana, lixo, lenha etc). O ciclo térmico realizado nessas usinas é o ciclo de Rankine o qual tem eficiência relativamente baixa para os padrões atuais [9]. Na figura 2.1 pode-se ver o fluxograma de uma usina baseada no ciclo de Rankine.

O ciclo começa em 1 com a água desmineralizada condensada na saída do condensador. Esta água começa a ser aquecida pelos regeneradores da água de alimentação e sua pressão é elevada pela bomba de alimentação. Em seguida em 2 ela é injetada na unidade de geração de vapor ou caldeira aonde recebe energia térmica, advinda da combustão química, transformando-se em vapor superaquecido (VSH). Logo depois, na etapa 3 o VSH expande-se na turbina e ocorre a transformação de energia térmica em energia mecânica, uma vez que há rotação dos rotores das turbinas. Estas turbinas com energia mecânicas estão acopladas a geradores os quais irão gerar energia elétrica. O ciclo continua em 4 quando o vapor entra no condensador e é então resfriado pela circulação de água de resfriamento ou água de circulação do condensador. Esse resfriamento faz com que o vapor volte a sua condição original de água líquida com uma pressão consideravelmente menor do que nas outras etapas. O ciclo é fechado quando a água sai do condensador e então todo o processo se repete.

Um sistema como este tem perdas consideráveis. Aproximadamente 10% dessas perdas são relativas à caldeira e cerca de 55% ao calor presente no vapor de exaustão das turbinas. Devida à baixa eficiência desse tipo de usina, na maioria das vezes ela não é a melhor escolha, pois outras usinas possuem o custo de produção mais baixo. Atualmente, ela vem sendo construída no Brasil em plantas de pequeno porte em regime de cogeração com outra indústria, onde esta se aproveita do vapor aquecido gerado pela usina no seu processo [9].

O outro tipo de usina já citado são as usinas de combustão interna também chamadas de usinas a gás. Elas funcionam em regime aberto utilizando turbinas a gás que tem uma eficiência termodinâmica maior do que as turbinas a vapor. Isto se deve ao fato de as turbinas a gás atingirem temperaturas maiores do que as a vapor. O pico de temperatura na turbina a gás atinge 1260 °C enquanto na turbina a vapor o máximo valor é de 540°C [9].

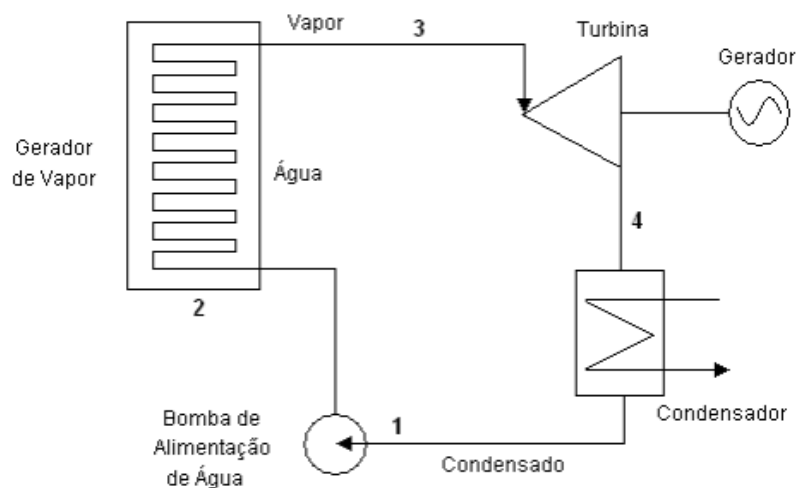


Figura 2.2: Fluxograma de uma Usina Térmica a Vapor [9]

O ciclo realizado pelas termoelétricas a gás é o ciclo de Brayton. O fluxograma de uma usina a gás que utiliza o ciclo de Brayton é mostrado na figura 2.2. Como mostrado na etapa 1 o compressor realiza a sucção do ar atmosférico que fica comprimido em uma alta pressão. O ar é injetado na câmara de combustão ou combustor e lá ocorre a mistura desse ar com o combustível utilizado. A mistura entra em combustão liberando gases a altas temperaturas e altíssimas pressões. Esses gases se expandem e movimentam as turbinas que conectadas a geradores elétricos produzem energia elétrica. Os gases depois de expandidos são liberados na atmosfera, o que faz parte do regime aberto. No entanto isto diminui consideravelmente a eficiência do processo.

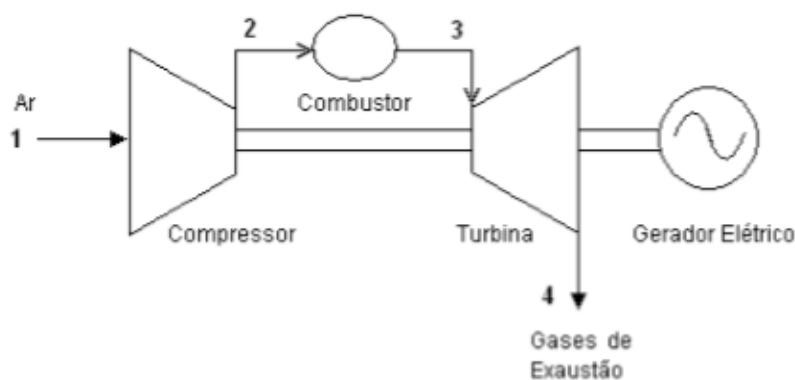


Figura 2.2: Fluxograma de uma Usina Térmica a Gás [9]

As centrais térmicas têm algumas vantagens em relação a outros tipos de geração. Alguns exemplos são: pequeno custo de investimento por KW instalado, prazos rápidos para entregas de equipamentos, construção com prazo pequeno, operação com alta segurança e disponibilidade, versatilidade média em quanto ao combustível, flexibilidade operacional no acompanhamento de cargas, isto é, por serem unidades de peso não muito elevado e compactas essas usinas podem entrar em operação segundos após seu acionamento e, em alguns minutos conseguem entregar sua capacidade máxima, o que as torna excelente para suprir a ponta da demanda [9].

Atualmente existe a tecnologia de usina térmica com ciclo combinado que é basicamente a acoplagem das usinas térmicas a gás com as usinas a vapor. Isto gera um ganho energético uma vez que os gases com altas temperaturas da turbina a gás, que seriam lançados na atmosfera, serão reaproveitados para geração de vapor no outro tipo de usina. A eficiência das usinas térmicas atuais está em torno de 35% enquanto as usinas a ciclo combinado mais antigas possuem uma eficiência superior a 50% [9]. Isto é um ganho enorme que torna as usinas de ciclo combinado mais atrativas economicamente do que as outras duas já citadas.

2.2.2 Geradores termoeletrônicos nucleares

Os reatores nucleares são classificados em relação ao combustível, ao refrigerante e ao moderador [9]. O combustível é o elemento físsil que ao ter decaimento atômico emite partículas carregadas e energia. Essa energia será transferida para o refrigerante que transferirá essa energia térmica para a turbina que acoplada a um gerador produzirá energia. O moderador se localiza no centro do reator. Sua função é controlar a velocidade do processo de fissão para que o processo permaneça controlado e o calor gerado fique constante. Outra função do moderador é garantir a máxima energia desejada que é produzida no núcleo. O combustível é escolhido a depender da eficiência do moderador.

O tipo mais comum de combustível utilizado é o urânio. Este elemento é encontrado na natureza com apenas 0,7% do seu isótopo físsil, o (U^{235}). O refrigerante mais usado nos reatores nucleares é a água comum H_2O . Tais reatores são conhecidos como Light Water Reactor (LWR). Esses reatores, desenvolvidos pelos EUA, foram inicialmente desenvolvidos para uso em propulsões de submarinos sendo posteriormente utilizados como reatores de usinas nucleares, sendo adotada pela maioria dos países possuidores de tais usinas. No

entanto, como a água tem uma eficiência pequena como refrigerante o urânio tem que ser mais enriquecido em cerca de 3,5% para que a reação em cadeia seja adequada [9].

Há dois tipos de reatores do tipo LWR que são mais comumente utilizados. O primeiro é o Pressurised Water Reactor (PWR) ou reator a água pressurizada. Como o próprio nome diz, neste tipo de reator a água é mantida a altas pressões dentro de um condutor resistente de aço também chamado de condensador. A água pressurizada e com temperatura elevada é então conduzida ao gerador de vapor que serve como um cambiador de energia térmica. Outra água de um circuito secundário, que pode entrar em ebulição, entra em contato com este gerador de vapor fazendo com que sua temperatura seja aumentada. Este processo, por fim, gerará vapor que será introduzido em uma turbina.

O outro tipo de usina LWR é a Boiling Water Reactor (BWR) ou reator a água fervente. Neste tipo de reator pode ocorrer a ebulição da água. O vapor da água é diretamente injetado nas turbinas para geração de energia elétrica. Uma vez que o BWR não precisa de circuito secundário, pois o vapor aquecido pelo combustível é diretamente injetado na turbina, este tipo de reator se torna mais simples que o PWR. No entanto, uma vez que o vapor que entrou em contato com o combustível nuclear também terá contato com outras partes internas do sistema, como a turbina, o BWR se torna um sistema de difícil manutenção.

Como alternativa ao LWR existe o Heavy Water Reactor (HWR), ou reator a água pesada. Este reator usa como moderador o deutério D_2O que é água com um isótopo mais pesado do hidrogênio. Este é mais eficiente do que água comum H_2O . Isto permite o uso de urânio não enriquecido [9]. Outros tipos de reatores menos comuns são também utilizados, por exemplo: os reatores que utilizam dióxido de carbono como refrigerante e grafite como moderador.

Todos os reatores acima citados utilizam moderadores e são por isso conhecidos como reatores térmicos. Existem também os reatores rápidos que não fazem o uso de moderadores. No lugar deles um “cobertor” de urânio não fissil encobre o núcleo. Ao ser bombardeado por partículas carregadas advindas da fissão esse cobertor não fissil pode converter-se a plutônio fissil. Este produto pode ser processo para que também seja utilizado como combustível. Isso faz com que quase todo urânio natural possa ser usado nos reatores rápidos. Embora estes reatores têm a vantagem do uso de todo o combustível, as plantas já construídas indicaram

altos custos de manutenção e produção e baixa confiabilidade. Isto tornou o investimento nos reatores térmicos muito mais seguros.

2.2.3 Geradores hidráulicos

O primeiro gerador de eletricidade hidráulico que se tem conhecimento foi instalado em 1882, no rio Fox, em Wisconsin, nos EUA. Uma roda de água foi instalada neste rio e acoplada a um gerador elétrico. No entanto, a primeira usina hidrelétrica propriamente dita foi instalada em 1896. Esta foi projetada por Nikola Tesla e foi instalada na bacia do rio Niágara [10].

Desde esta época o dimensionamento, construção e operação de usinas hidrelétricas mudou consideravelmente. Hoje em dia, em um projeto de construção de uma usina como esta, a localização é um dos fatores mais importantes. Com esta informação podem ser decididos outros parâmetros importantes como disposição física da barragem, vertedouro e casa de máquinas, o volume do reservatório, o tipo de material usado na barragem, quais turbinas e geradores de determinadas potências, subestações transformadoras, etc [10].

Os ganhos de uma usina hidrelétrica podem ser medidos através da Energia Firme, Energia Secundária e Ponta Garantida. Porém, estes ganhos não dependem somente da usina geradora em questão. Eles são influenciados por diversos fatores como a evolução da demanda da energia, da disponibilidade hidrológica, das regras de operação que condicionam o despacho entre as usinas entre outros.

Primeiramente o projeto completo de usina segue alguns requisitos para sua implementação. As etapas a serem seguidas são: estudos de estimativa, estudos de inventário, estudos de viabilidade, licitação da concessão ou autorização, projeto básico, projeto executivo/ construção, implantação do projeto e elaboração do programa de monitoramento, operação da usina e manejo, monitoramento e avaliação ambiental. As etapas e suas implicações não serão abordadas nesta tese pois isto fugiria do escopo dela.

Com todas estas etapas concluídas os benefícios da usina hidrelétrica podem ser aproveitados. Como mencionado anteriormente, estes benefícios podem ser medidos em relação a certos parâmetros. Um deles é a energia firme. Sabe-se que a disponibilidade de vazão afluente é irregular e a capacidade dos reservatórios é limitada na existência de

períodos prolongados de secas. Isto aliado à persistência de uma geração contínua que utiliza volumes de água maiores do que a vazão afluyente consegue repor, pode levar uma usina a uma catástrofe de ausência de volume útil de água para produção de energia. Dentro deste cenário define-se energia firme como sendo a geração média capaz de ser produzida pela usina durante o período mais severo de vazões afluentes observado no histórico chamado de período crítico (10). Logo, esta energia significa que a usina garante, em média, o valor de sua energia firme avaliado no período de maior seca registrado. Embora este seja um conceito importante para avaliação de garantia do suprimento, este conceito vem sendo substituído pelo conceito probabilístico de Energia Assegurada. Esta tem um cálculo mais complexo do que a primeira, porém seus dados entregam valores de potência gerada com uma confiabilidade, em porcentagem, conhecida. Estudos mostram, no entanto, que a diferença entre as duas são relativamente pequenas. Mesmo assim, no Setor Elétrico Brasileiro o conceito de Energia Assegurada vem substituindo o de Energia Firme [10].

O segundo parâmetro para medição dos benefícios de uma usina hidrelétrica é a energia secundária. Sabe-se que a geração média de energia de uma usina deste tipo é maior do que a energia firme, pois na maioria do tempo a vazão afluyente média será maior do que a vazão afluyente no período de maior seca. A diferença entre a energia média e a energia firme é definida então como energia secundária. Logo, a energia secundária é a energia disponível, em média, além da energia firme [10]. No entanto, o peso do benefício econômico da energia secundária é bem menor do que o da energia firme. Isto se deve ao fato de que aquela varia bastante. Isto é, nos períodos chuvosos a energia secundária tem grande valor e nos períodos de seca tem valor baixo, podendo ser zero quando a energia produzida é igual à firme. E mesmo na comparação de períodos iguais dos anos, os valores da energia secundária podem variar, uma vez que previsões climáticas de longa data são difíceis de serem feitas. Estes fatores tornam a credibilidade na energia secundária duvidosa, sendo assim mais seguro agregar um valor econômico menor nesta do que o valor da energia firme.

O último conceito relativo ao benefício energético de uma usina hidrelétrica é a ponta garantida. A geração máxima de uma usina, que é uma informação fundamental para o possível abastecimento de cargas suplementares, depende da queda líquida dessa usina. Quando esta é grande a geração máxima é também alta, caso a queda líquida diminuía a geração máxima também diminui. O conceito de ponta ou potência garantida mensura a variação desta geração máxima e é definida como o valor da potência máxima produzido pela

usina em 95% do intervalo de tempo que inclui todos os valores mensais de potência para o histórico de vazões. Esses valores mensais devem ser obtidos com os mesmos dados com que foi obtida a energia firme para esta usina [11].

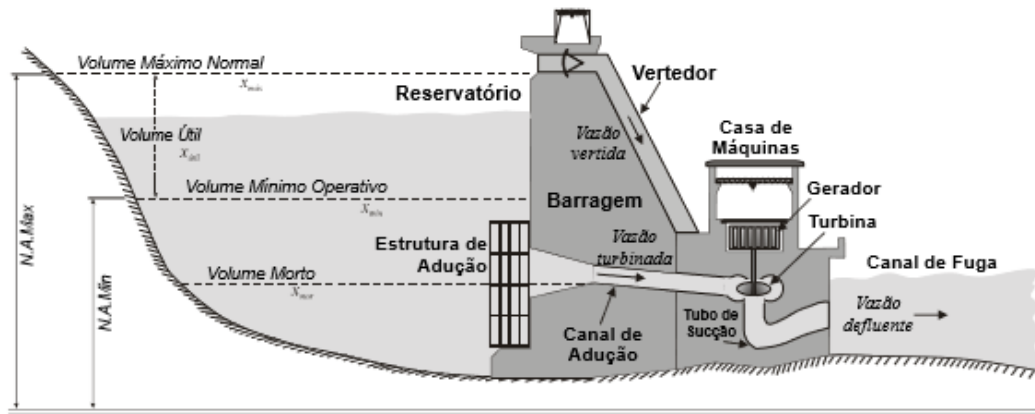


Figura 2.3: Elementos de uma usina hidrelétrica [10]

Além dos conceitos de energia firme, secundária e ponta garantida que podem avaliar os benefícios econômicos de uma usina hidrelétrica os conceitos de dimensionamento energético são fundamentais para a caracterização de uma usina deste tipo. Uma vez especificado o eixo da barragem da usina hidrelétrica, cinco são os parâmetros que definem o seu dimensionamento energético. Eles são os níveis máximo e mínimo de armazenamento, potência instalada, altura de queda de referência e de projeto de turbinas [10].

O nível máximo de armazenamento (N.A.Max) é como o próprio nome indica o nível máximo de água que o reservatório suporta. Com esse valor pode ser obtido também o volume máximo da usina. Na figura 2.3 pode-se ver um esquema de uma usina hidrelétrica com alguns parâmetros de dimensionamento. O aumento do N.A.Max faz com que o reservatório da usina aumente assim como sua queda líquida gerando maiores rendimentos de ponta garantida, energia secundária e energia firme. O vertedouro está intimamente ligado ao N.A.Max. Ele é utilizado para escoar a água em excesso, normalmente presente nos períodos de chuva.

O nível mínimo de armazenamento (N.A.Min) é o menor nível do reservatório de água que ainda permite o correto funcionamento da usina. Ao diminuir o N.A.Min aumenta-se o volume útil, a capacidade de regularização e a Energia Firme. Porém, esta diminuição do N.A.Min reduz também a queda líquida e, por consequência, a ponta garantida [10]. A

diferença entre N.A.Max e N.A.Min é o volume útil. Este parâmetro determina a capacidade de regularização das vazões afluentes [10].

A potência instalada, ou capacidade instalada, é a potência máxima que pode ser produzida por uma usina. Ela é definida como o somatório das potências instaladas e de ponta [10].

Os conceitos de queda de referência e de projeto de turbinas estão intimamente ligados. A queda de projeto é a aquela na qual a turbina escolhida apresenta a maior eficiência. Já a queda de referência é a mínima queda líquida capaz de suprir, com o distribuidor completamente aberto, o gerador com sua potência instalada. Dependendo do tipo de turbina calculam-se então as quedas de projeto e de referência. As turbinas normalmente utilizadas em projetos de hidrelétricas são Turbina de Pelton, Turbina de Francis e Turbina Kaplan.

Com o uso dos parâmetros, explicados acima, e de outros que podem ser calculados a partir destes, como vazão nominal e potência instalada, uma usina hidroelétrica pode ser dimensionada no Brasil usando um modelo conhecido como Sistema de Inventário Hidroelétrico de Bacias Hidroelétricas (SINV). Este sistema tem como objetivo automatizar métodos para realização de estudos energéticos, econômicos e ambientais e ainda permite a comparação e a seleção de alternativas de usinas [12].

2.2.4 Geradores eólicos

O uso de rodas de água para geração de energia precede, historicamente, o uso do vento. O primeiro conceito era mais simplista em quase todos os aspectos, isso certamente influenciou seu uso precoce em relação à energia eólica. No entanto, como não existem rios em todas as localidades, o vento começou a ser uma alternativa vantajosa, uma vez que dava a oportunidade de aproveitamento energético para um número maior de localidades e pessoas. Logo, vários conceitos de moinhos de ventos foram concebidos para suprir a necessidade energética incipiente da população mundial [13].

O primeiro uso relatado historicamente de energia eólica foi feito na Pérsia entre 500 e 900 A.C.. Essa energia era usada, principalmente, para bombear água no uso da agricultura.

Sustentada nos bons ganhos nas produções da agricultura, a energia eólica se espalhou para o meio oeste do continente asiático. Aproximadamente no ano 1000 D.C., no retorno das Cruzadas, os cata-ventos foram introduzidos na Europa [14]. O conceito primitivo foi largamente utilizado até o século XII quando o moinho de eixo horizontal começou a ser utilizado na Inglaterra, França e Holanda. Estes tiveram um papel fundamental na evolução da agricultura desde essa época. Eventualmente o conceito do moinho foi evoluindo e por consequência todos os aparatos para melhorar a geração de energia por meio desses [13].

No século XX a ideia do uso da energia eólica para geração de energia elétrica começou a se firmar no cenário mundial. Países como Rússia e Estados Unidos foram os pioneiros neste sentido. Charles F. Bunch teve um papel fundamental nessa transição, construindo em 1888 o primeiro cata-vento para geração de energia elétrica. Depois desse primeiro passo a ideia de geração de energia elétrica por meio da energia eólica foi se consolidando e novos conceitos foram sendo desenvolvidos e implementados. Os aerogeradores modernos foram frutos desses conceitos desenvolvidos após a primeira abordagem de Bunch. Hoje em dia a energia eólica já é importante para a produção de energia elétrica uma vez que no ano 2012 ela correspondeu a 2,4% da produção de eletricidade no planeta [15].

Com a teoria da energia cinética prova-se que a potência extraída do vento por um conjunto de pás pode ser descrita como:

$$P_{ext} = \frac{1}{2} \rho * A * v^3 * C_p \quad (2.1)$$

Em que:

P_{ext} = Potência extraída do vento [W]

ρ = massa específica do ar [Kg/m^3]

v = velocidade do vento anterior às pás do gerador [m/s]

C_p = Coeficiente de potência

O coeficiente de potência, C_p , pode ser definido como a porcentagem de aproveitamento da potência eólica disponível que é extraída pelas pás do rotor [13]. Este fator depende dos valores de entrada e saída da velocidade do vento nas pás e pode ser calculado para uma situação ideal em que seu valor é máximo, sendo conhecido nesta situação como coeficiente de Betz, tendo o valor de:

$$C_{pmax} = \frac{16}{27} = 0.59$$

Na verdade o coeficiente de potência varia também com o tipo de pá do rotor como mostrado na figura 2.4. Nesta figura observam-se diferentes tipos de rotores quanto à disposição de seus eixos com diferentes geometrias. Os principais rotores de eixo vertical são os do tipo Darrieus, Savonius e as de eixo horizontal é o rotor de 3 pás mais comumente visto na prática. Observa-se que dentre estes o rotor de 3 pás é o conceito que mais se aproxima da eficiência ideal calculada por Betz.

Para a realização de um projeto de uma turbina eólica vários elementos têm de ser levados em conta, são eles: cubo do rotor, o próprio rotor, eixo, multiplicador de velocidade, gerador elétrico, nacelle ou carcaça sobre a torre, torre entre outros. Como a velocidade do vento é variável, mecanismos de controle das pás também são indispensáveis no projeto. O controle de passo, por exemplo, é um controle efetuado no ângulo de ataque das pás em relação ao vento para evitar que a potência nominal do gerador seja ultrapassada. Já o controle de estol é um controle passivo, isto é, as pás são projetadas e montadas em um ângulo que impeçam que o rotor gire em uma velocidade superior à nominal. Conexões adequadas de motores assíncronos ou síncronos, a depender da constância ou não da velocidade dos rotores, completam um projeto de uma turbina eólica.

2.3 Geração fotovoltaica de energia

2.3.1 História da geração de energia fotovoltaica

O primeiro pesquisador a observar o efeito fotovoltaico foi o cientista francês Edmond Becquerel (1820-1891) que em 1836 desenvolveu uma placa solar rústica.

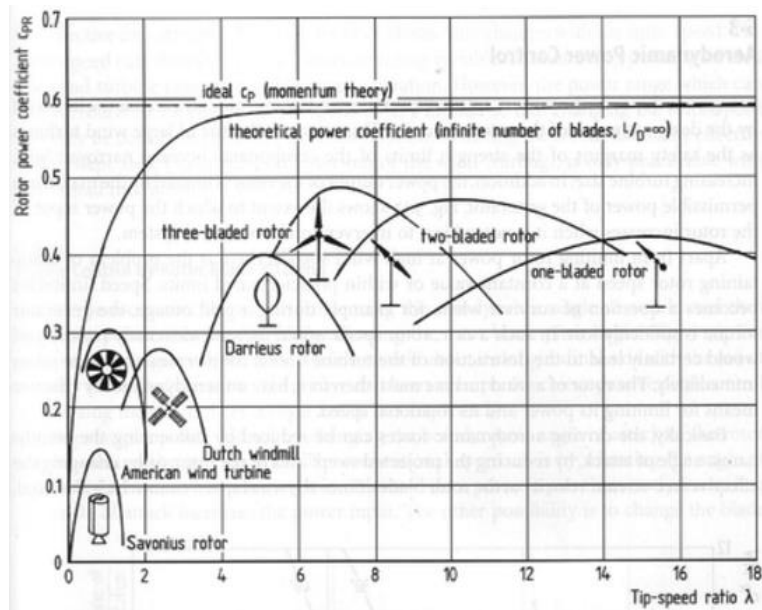


Figura 2.4: Coeficiente de potência para diferentes designs de rotores [36]

A teoria do funcionamento desse dispositivo, no entanto, começou a ser desenvolvida por Max Planck (1858-1947), que postulou a natureza quântica da luz em 1900, e por Albert Einstein (1879-1955) que em 1905 desenvolveu a teoria do efeito fotoelétrico que o levaria a ganhar o prêmio Nobel. Esses dois firmaram as bases teóricas para futuros desenvolvimentos. Outros avanços teóricos tiveram papel fundamental no aprimoramento da tecnologia como os feitos por Alan Herries Wilson (1906-1995) em 1930 que propôs a teoria quântica dos sólidos, que viria a fazer uma ligação dos fótons com as propriedades dos sólidos. Em 1940 Nevill Francis Mott (1905-1996) e Walter Hermann Schottky (1886-1976) criam a teoria do diodo de estado sólido e em 1949 John Bardeen (1908-1991) , Willian B. Shokley(1910-1989) e Walter H. Brattain (1902-1987) inventaram o transistor bipolar. Com os avanços trazidos nesses anos de desenvolvimento, os cientistas Daryl Chapin(1906-1995), Calvin Fuller (1902-1994) e Gerald Pearson (1905-1987) construíram em 1954 a primeira célula solar fotovoltaica que tinha eficiência de apenas 6%. Isto era, no entanto, um enorme avanço para a época. Apenas 4 anos depois o satélite Vanguard 1 já utilizava células solares fotovoltaicas para produzir energia para seus subsistemas [16].

Inicialmente pode-se pensar que o desenvolvimento da célula fotovoltaica demorou muito, porém, para a produção da mesma é necessária produção relativamente grandes de materiais com purezas muito elevadas a fim de obter células com uma eficiência razoável. Antes da invenção dos transistores bipolares e dos programas espaciais o avanço tecnológico

não visava à melhoria da pureza dos semicondutores, uma vez que nesta época carvão e óleo supriam a demanda energética e os tubos a vácuo satisfaziam a indústria eletrônica. Com o maior uso dos transistores nos sistemas espaciais os materiais semicondutores ganharam os holofotes do desenvolvimento e a partir deste momento a indústria de produção de células fotovoltaicas pôde ter um maior avanço tecnológico.

2.3.2 Radiação Solar

O sol é a fonte de energia do sistema solar que torna a vida possível na terra. Esse astro é uma composição de gases com predominância do Hidrogênio. A geração de energia ocorre com a fusão termonuclear de Hidrogênio em Hélio, segundo a fórmula de Einstein $E = mc^2$ [16]. A cada segundo são convertidos $6 * 10^{11}$ kg de H_2 em He, consumindo uma massa aproximada de $4 * 10^9$ Kg gerando assim $4 * 10^{20}$ Joules de energia. Desta energia, 99% são emitidas como radiação eletromagnética [8]. Esta radiação é dividida desigualmente no espectro eletromagnético, atingindo o máximo de potência no comprimento de onda de 500nm, sendo luz visível entre azul e verde. Entre os comprimentos de onda de 300nm até 1500nm está presente 90% de toda energia da radiação eletromagnética liberada pelo sol [17].

Com um raio médio de 6400 km, a Terra tem uma superfície de captação de energia solar de aproximadamente $1,28 * 10^8 \text{ km}^2$ e recebe sobre a superfície receptora da radiação $1,748 * 10^{11}$ MW. Logo, se tem disponível no planeta anualmente $1,531 * 10^{18}$ kWh/ano. Esta energia equivale a quase 78000 vezes o consumo anual de todo o planeta registrado em 2012 que foi de $1,971 * 10^{13}$ kWh/ano [15].

A radiação solar pode ser aproximadamente calculada pela radiação emitida por um corpo negro de Planck, de temperatura $T_s = 5762$ K, que é aproximadamente a temperatura da superfície do sol. Então a radiação solar G_s pode ser descrita, segundo a lei de Stefan-Boltzmann como [17]:

$$G_s * A_s = \pi * D_s^2 * \sigma * T_s^4 \quad (2.2)$$

Onde

A_s – Área da superfície do sol

D_s – Diâmetro do sol, aproximadamente igual a 1393000 Km

σ – Constante de Stefan-Boltzmann, $\sigma = 5,67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 * K^4}$

T_s – Temperatura da superfície do sol, $T_s = 5762 \text{ K}$

Logo, após efetuar os cálculos encontra-se uma densidade de radiação solar de:

$$G_s = 62,5 * 10^6 \frac{W}{m^2}$$

Considerando que a distância média entre a Terra e o sol é de $UA = 1500 * 10^6 \text{ km}$, onde UA significa unidade astronômica, então temos que a densidade de radiação solar média presente na parte exterior da atmosfera terrestre é calculada pela fórmula:

$$G_0 = G_s * \left(\frac{D_s}{UA}\right)^2 \quad (2.3)$$

Fazendo os cálculos da equação 2.3, chega-se a um valor de densidade de radiação solar na atmosfera terrestre de:

$$G_0 = 1341 \frac{W}{m^2}$$

Na figura 2.5 pode-se ver o espectro da densidade de radiação solar no exterior da atmosfera terrestre para valores de comprimento de onda de 200nm até 4000nm.

Nesta figura fica claro que, grande parte da energia da radiação solar fica na faixa do visível do espectro eletromagnético.

Dependendo das condições do sol e da distância sol-terra a densidade média de radiação solar na parte externa da atmosfera terrestre (G_0) pode variar entre $1293 \frac{W}{m^2}$ e $1412 \frac{W}{m^2}$.

No entanto, a densidade média de radiação na parte externa da atmosfera difere da densidade média na superfície terrestre. Esta é, na verdade menor do que àquela. Os fatores que causam essa diferença são a reflexão, absorção, extinção e espalhamento [17]. Para cada fenômeno citado, a radiação solar pode receber um maior ou menor efeito de degradação da energia presente nessa radiação a depender do tamanho do seu comprimento de onda. Em geral radiações com maiores comprimentos de onda, como raios x, são totalmente absorvidos.

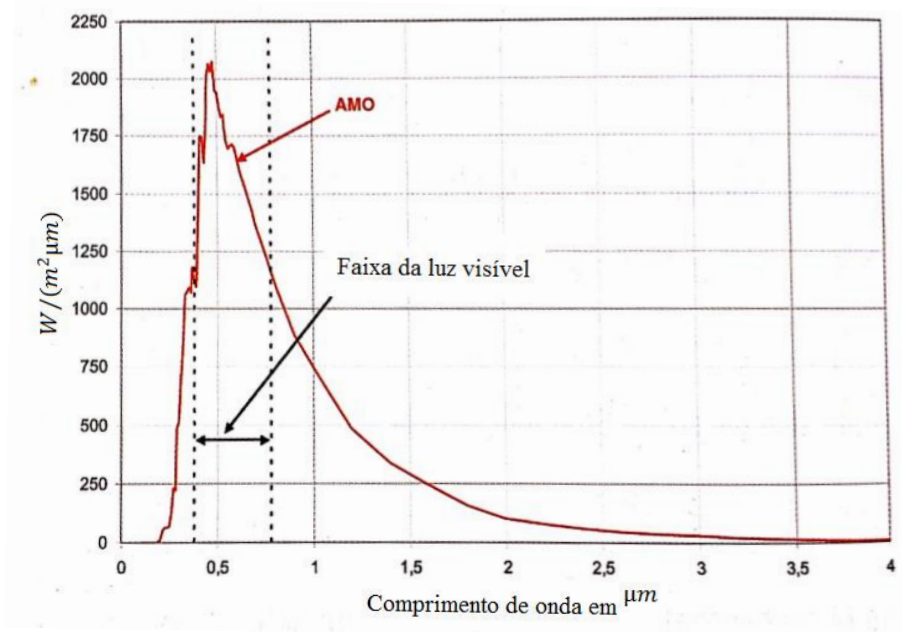


Figura 2.5: Densidade de radiação solar no exterior da atmosfera terrestre para valores de comprimento de onda entre 200nm até 4000nm [17](modificado)

A reflexão é um efeito que ocorre principalmente devido às nuvens em uma altura entorno de 12 km. Essa reflexão causa, em média, uma perda de 28% da energia da radiação e varia bastante com relação à época do ano, hora do dia, diferentes locais geográficos, das condições das nuvens, entre outros aspectos [17].

Já a absorção se faz mais presente na parte da estratosfera, algo entre 17 km e 70 km. Esse fenômeno ocorre quando diferentes partículas absorvem parte da energia da radiação solar que as atinge. Aqui, novamente o comprimento de onda de cada radiação vai definir o quanto de absorção ocorre, uma vez que esta é mais propícia quando o comprimento de onda e o tamanho da partícula são quase iguais. As partículas que desempenham o maior papel na absorção da radiação solar são: o ozônio O_3 , água, vapor e gelo H_2O , gás oxigênio, gás carbônico CO_2 e partículas de poeira [17].

Os outros efeitos como extinção que seria a redução de 100% da energia da radiação e o espalhamento de Rayleigh, ou espalhamento molecular, e o espalhamento de Mei, ou espalhamento Aerosol, também são responsáveis pela diminuição da energia da radiação recebida na superfície da Terra [17].

A combinação desses fatores leva a um comportamento peculiar da diminuição da energia da radiação solar na superfície em comparação com a radiação fora da atmosfera. A figura 2.6 traz o comportamento da variação da energia da radiação solar para diferentes comprimentos de onda. É possível identificar duas janelas em que a diminuição da energia fica em torno de 20%, para o resto dos comprimentos de onda a diminuição é total. A janela 1 fica em torno da faixa do visível e perto do infravermelho e a janela 2 fica na faixa do microondas e do VHF. Esta segunda janela vai ser especialmente importante na análise do subsistema de transmissão de energia do SPS que utiliza microondas para o envio de energia.

A densidade de energia da radiação solar na superfície terrestre é, devido aos fatores explicados acima, diferente da curva apresentada na figura 2.5.

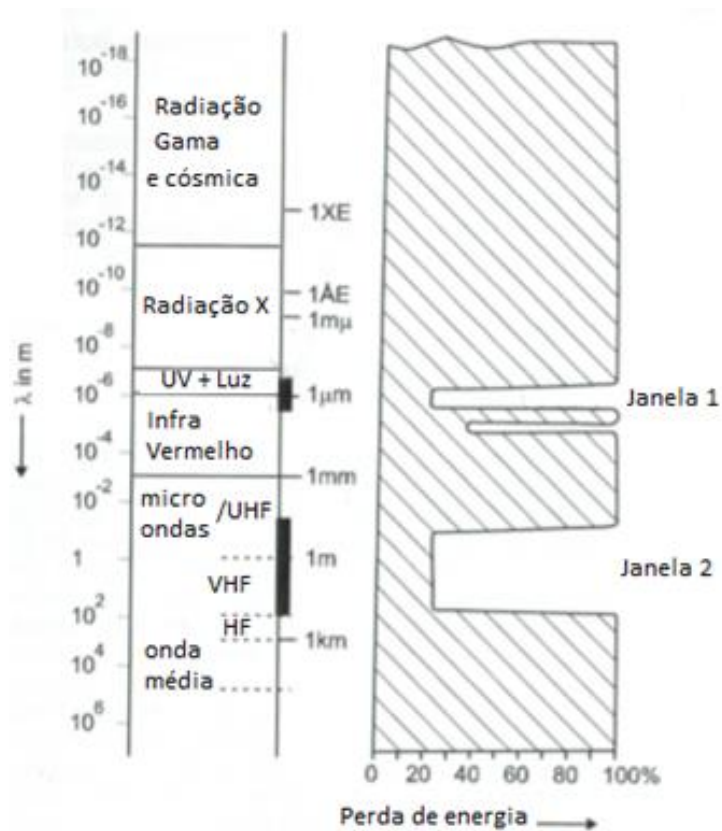


Figura 2.6: Diminuição da energia das ondas eletromagnéticas para diferentes comprimentos de onda e presença das duas janelas de penetração eletromagnética na atmosfera terrestre [17](modificado)

A figura 2.7 mostra a curva do comportamento da energia da radiação solar fora da atmosfera e na superfície terrestre, em uma localidade com ângulo de elevação do sol de 41,8°. Na figura existe a denominação AM para diferenciar as duas radiações. Esta é uma convenção para indicar a extensão de atmosfera que a radiação percorreu. AM0, por exemplo,

é a radiação na parte externa da atmosfera. AM1 é a radiação que atinge a superfície terrestre com um ângulo de 90° com a superfície horizontal. Já no exemplo da figura 2.7 um AM1,5 indica que a radiação faz um ângulo de 41,8° com o plano horizontal da superfície. Considerando então h , como o ângulo formado pelo plano da superfície e pela radiação solar, m a distância percorrida pela radiação solar desde a atmosfera até a superfície e H a distância entre a superfície, com orientação normal a esta, e a parte externa da atmosfera, então o AM de determinada localidade pode ser calculado como:

$$AM = \frac{m}{H} \quad (2.4)$$

Mas como, $m = H / \sin(h)$ (2.5)

Logo, $AM = 1 / \sin(h)$ (2.6)

Obs.: a única exceção a formula 2.6 é quando se estuda a radiação na parte externa da atmosfera. Nesta condição o $AM=0$, como já mencionado.

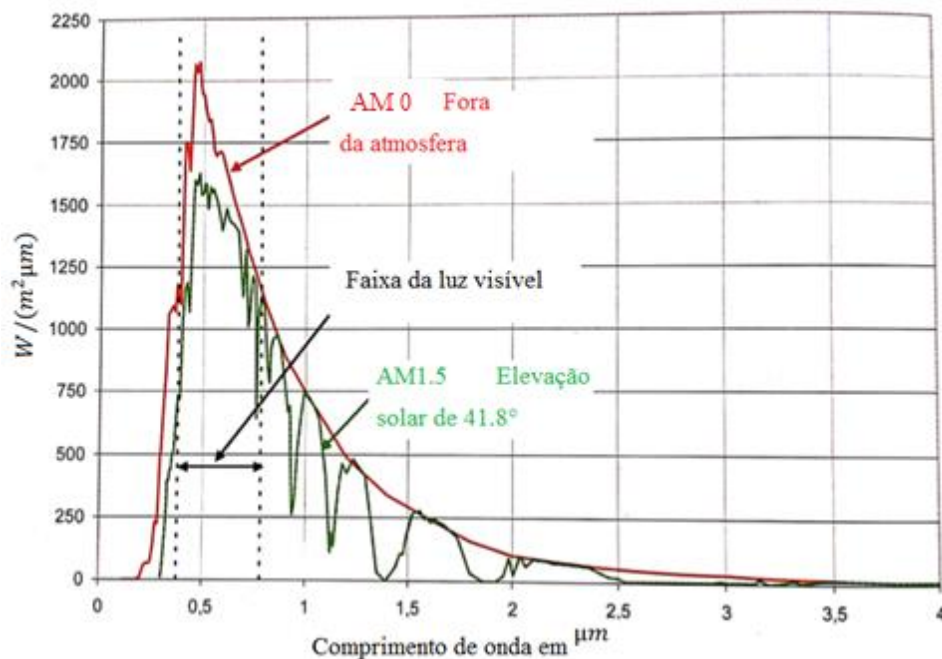


Figura 2.7: Densidade de radiação solar no exterior da atmosfera e na superfície terrestre para valores de comprimento de onda entre 200nm até 4000nm [17](modificado)

O fator AM ajuda a decidir a disposição dos painéis fotovoltaicos em uma superfície. No entanto, existem diversos fatores que complementam essa decisão para situações mais

gerais. O modo mais fácil de disposição de painéis, na ausência de qualquer informação, seria talvez coloca-los na horizontal, porém esta não seria a forma mais eficiente, pois a radiação solar coletada pelo painel é proporcional ao cosseno do ângulo formado entre a radiação solar e a normal ao plano da placa solar.

Para uma situação geral de disposição de um painel fotovoltaico em cima de uma superfície desejada, como o telhado de uma casa, faz-se uma divisão de ângulos como mostrado na figura 2.8 a fim de, na posse deles, montar da maneira mais eficiente possível esse painel solar.

Na figura os ângulos mostrados são:

β – Ângulo de inclinação do painel e da superfície horizontal que ele se encontra

b – Ângulo entre a normal da horizontal onde se encontra o painel e a superfície do horizontal do solo

α – Ângulo de azimute

α_s – Ângulo de azimute do sol

δ – Inclinação do sol

t – Ângulo-hora (meio dia: $=0^\circ$; de manha: $>0^\circ$; de tarde/noite: $<0^\circ$)

Ψ – Ângulo de incidência da radiação solar no painel

Primeiramente, na figura o painel está direcionado para o sul geométrico da Terra. Essa configuração é típica de painéis instalados no hemisfério norte. No hemisfério sul os painéis devem ser instalados direcionados para o norte geométrico da Terra.

Tomando o exemplo mostrado na figura 2.8, caracterizando uma instalação no hemisfério norte, pode-se calcular o ângulo Ψ com as demais variáveis, através da fórmula [17]:

$$\cos\Psi = \sin\delta * (\cos\beta * \sin b - \cos b * \cos\alpha * \sin\beta) + \cos\delta * \cos t * (\sin b * \cos\alpha * \sin\beta + \cos\beta * \cos b) + \sin\alpha * \sin\beta * \cos\delta * \sin t \quad (2.7)$$

Como dito anteriormente, a disposição ideal seria para $\cos\Psi = 0$, logo ao realizar os cálculos, o projetista deve modificar as outras variáveis a fim de zerar o ângulo Ψ e assim obter um melhor aproveitamento da radiação solar pelo painel.

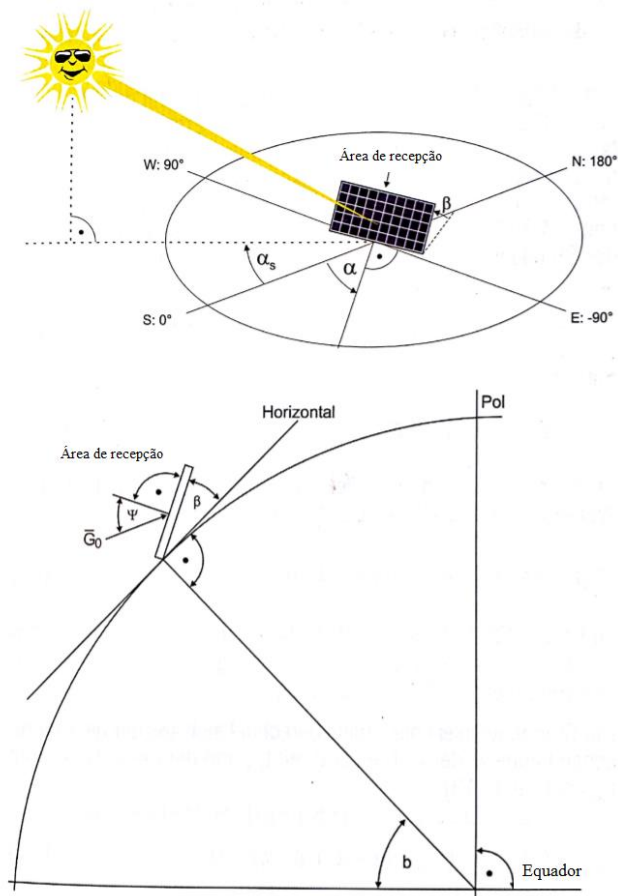


Figura 2.8: Diferentes ângulos usados nos cálculos da disposição do painel fotovoltaico [17](modificado)

2.3.3 Funcionamento dos semicondutores

Quando a luz atinge algum material ela pode ser refletida, transmitida ou absorvida. No caso da absorção a energia presente no fóton é geralmente transformada em calor no material. No entanto, para certo tipo de materiais a energia do fóton pode ser aproveitada para

gerar energia elétrica [16]. A energia do fóton seria, neste caso, absorvida por um elétron do material. Dependendo da energia do fóton esse elétron pode ocupar uma posição de maior energia no seu átomo ou pode até mesmo se desprender, tornando-se assim um elétron livre para circular no material.

Os materiais chamados semicondutores agem exatamente como descrito no parágrafo anterior. Para temperaturas acima do zero absoluto este material pode conter cargas suscetíveis à condução. A teoria quântica explica que nos semicondutores existem duas camadas as quais as cargas podem existir. Elas são a banda de valência, mais próximas do núcleo, e banda de condução, mais externa do centro do átomo. Os elétrons que estão na banda de valência ainda pertencem ao átomo e estão presos a ele, ao passo que os elétrons na banda de condução podem se movimentar livremente. As outras regiões presentes nas proximidades do átomo são regiões proibidas e nenhuma carga permanece nessas regiões.

Para temperatura de 0 K, não é possível haver movimento de elétrons em um semicondutor. Já para temperaturas superiores ao zero absoluto, os elétrons podem possuir energia suficiente para se deslocarem da banda de valência para a banda de condução. Ao realizar este deslocamento o elétron deixa um espaço vazio que é chamado de buraco e tem na teoria quântica valor de carga positivo. A ocorrência do movimento de elétrons e da presença dos buracos sempre ocorre em pares, criando o bem conhecido par elétron-buraco.

Para saber se um fóton pode levar um elétron para a banda de condução, faz-se necessário calcular a energia desse fóton com a fórmula:

$$E = h\vartheta = \frac{h*c}{\lambda} \quad (2.8)$$

Onde:

$$h = 6,63 * 10^{-34} \frac{m^2kg}{s} \text{ (constante de Planck),}$$

$$c = 2,998 * 10^8 \frac{m}{s} \text{ (velocidade da luz)}$$

ϑ (frequência do fóton em Hz)

λ (comprimento de onda do fóton em metros)

Para sabermos se essa energia será suficiente para levar o elétron à condução, deve-se comparar a energia do fóton com a energia do espaço, ou “bandgap”, existente entre as duas bandas possíveis. Na prática a energia do fóton deve ser um pouco maior que a energia do “bandgap” para que mesmo existindo perdas, ainda se tenha energia suficiente para elevar o elétron à banda de condução. Uma constatação importante é que um fóton gera apenas 1 par elétron-buraco. Isto é se um fóton altamente energético atinge um material sua energia vai ser usada para movimentar 1 elétron para a banda de condução e a energia excedente será dissipada em forma de calor[16].

Revedo as figuras 2.6 e 2.7, vê-se que o pico de energia da radiação solar ocorre justamente na faixa da janela 1. Logo, grande parte desta energia será irradiada para a superfície terrestre. O pico da energia da radiação ocorre na onda com comprimento de onda, aproximadamente, de $\lambda = 0,5\mu m$. Usando este valor na expressão 2.8 e adotando $1eV = 1,6 * 10^{-19}$ joules, obtemos uma energia para essa radiação de $E_g = 2.5$ eV. Porém, como a faixa da radiação solar é larga, existem também fótons menos energéticos que os primeiros com $E_g = 1eV$ que podem também ser absorvidos [16]. Logo deve-se achar materiais que possuam “bandgap” entre 2.5 e 1eV, pois a energia solar irradiada neste material será suficiente para levar elétrons da banda de valência para a banda de condução.

A análise da elevação do elétron da banda de valência para a banda de condução deve analisar, não somente a diferença de energia entre as bandas, mas também a diferença de momento entre as bandas. Na troca de camada o elétron muda de energia e de momento, logo a análise mais correta deve levar em conta esses dois fatores [16].

Os semicondutores podem ser classificados como “bandgap” direto ou indireto. Os semicondutores de “bandgap” indireto possuem as bandas de valência e de condução desalinhadas com relação ao momento zero. Já os semicondutores de “bandgap” direto possuem um alinhamento das bandas de condução e de valência. A figura 2.9 traz os “bandgaps” para 2 materiais semicondutores, silício e arsenieto de gálio, que dependem da energia e do momento. Pode-se ver que o silício é um semicondutor de “bandgap” indireto e o arsenieto de gálio é um semicondutor de “bandgap” direto.

No silício o “bandgap” tem uma energia de 1,1eV, porém como as bandas estão desalinhadas um fóton de energia 1,1eV, muito provavelmente, não seria capaz de excitar um elétron da banda de valência para a banda de condução. Isto acontece, pois o fóton possui um

momento muito baixo em comparação com o momento dos elétrons, possuindo para efeito prático apenas energia. Logo, para levar o elétron do silício da banda de condução para a de valência o fóton deve possuir uma energia igual ou superior a 1,1eV e o elétron deve ganhar, de uma fonte externa, o momento necessário para atingir a banda de condução [16]. Então, para análise da excitação do elétron entre as bandas é necessária a análise da energia e do momento do elétron, como já mencionado.

Já no arsenieto de gálio, a energia do “bandgap” é de 1,43eV e um fóton possuindo esta mesma energia consegue excitar um elétron entre o “bandgap” desse material. Isto significa que o arsenieto de gálio e os semicondutores de “bandgap” direto conseguem absorver fótons que contenham energias bem próximas das de seus “bandgaps”.

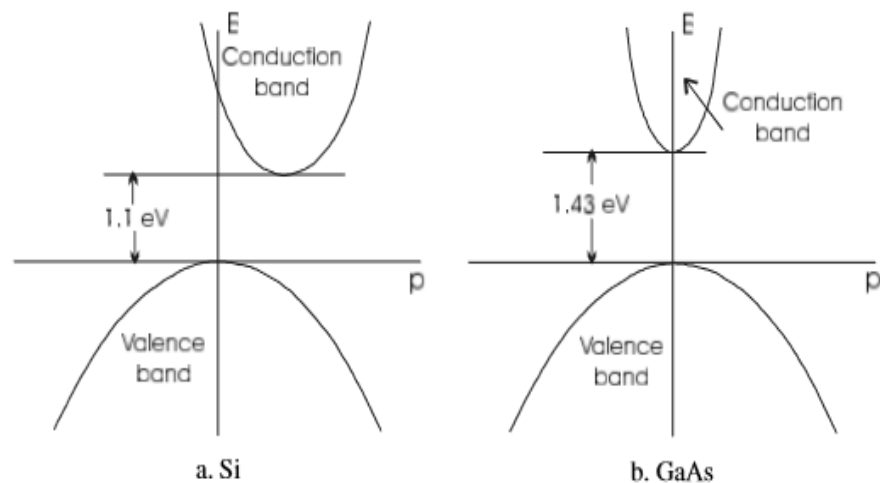


Figura 2.9: O diagrama momento x energia para as bandas de valência e condução do silício e do arsenieto de gálio [16]

2.3.4 Junção PN e a célula fotovoltaica

Os semicondutores podem ser divididos, também, como intrínsecos que são os semicondutores que possuem o mesmo número de elétrons e buracos e os extrínsecos que são aqueles que possuem número de elétrons diferente do numero de buracos. Nestes tipos de semicondutores sua carga predominante determinará se o material é do tipo n, maior presença de elétrons, ou do tipo p, indicando maior presença de buracos. O estudo das células fotovoltaicas se baseia nas propriedades dos semicondutores extrínsecos. No entanto, a

propriedade mais importante dos semicondutores extrínsecos se releva quando em um semicondutor, uma região do tipo n e outro do tipo p formam uma junção. Isto acontece, pois partes de um mesmo semicondutor podem ser dopadas com cargas n ou p. Logo, quando um semicondutor possui uma região do tipo n e outra do tipo p, separadas por uma camada de transição fina, fala-se que tal dispositivo contém uma junção p-n [18].

Na figura 2.10 pode ser vista a formação de uma junção p-n. No momento em que as duas camadas são postas juntas, os elétrons da região n tenderão a ser deslocados para a região p, e os buracos desta região serão deslocados para o lado n, em um processo denominado de difusão como indicado na figura 2.10 [16]. Após um intervalo de tempo haverá ocorrido um número razoavelmente grande de difusões, de modo que um grande número de elétrons se encontra no lado p e um grande número de buracos se encontra no lado n. Porém estas cargas ficarão alocadas bem próximas à região de transição. Na presença de concentração de cargas, um campo elétrico será criado começando nos íons positivos e terminando nos negativos, segundo a lei de Gauss, a ser estudada no capítulo 3. O número de elétrons e de buracos que serão difundidos é igual [16].

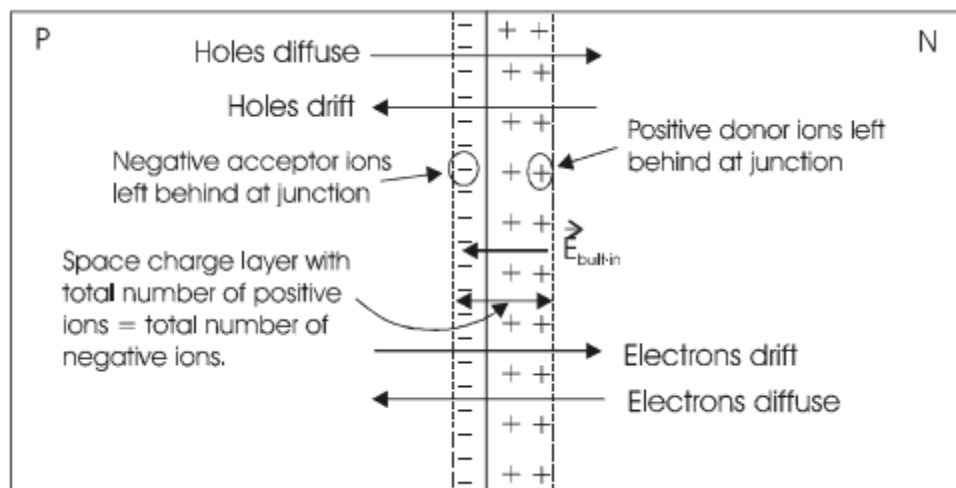


Figura 2.10: Junção p-n mostrando a difusão e a corrente de deriva de elétrons e buracos[16]

Depois que o campo elétrico é formado haverá uma tendência de formação de uma corrente de deriva na direção do campo elétrico, isto é, as cargas negativas da junção serão levadas para o lado n e vice e versa. Porém, o sentido dessa corrente é o inverso do sentido da difusão ocorrida no começo. Esses dois efeitos coexistirão até que ocorra um equilíbrio, uma vez que na condição final não há corrente na junção. O efeito final será um dispositivo que

fora da junção terá as concentrações de elétrons no lado n e buraco no lado p igual ao estado inicial. Já na junção a concentração de elétrons no lado p e de buraco no lado n é bem mais baixa que fora da junção. Isso inspira o nome para a junção, também chamada de região de depleção. No interior da junção o campo elétrico impede que cargas positivas adentrem o substrato n e que cargas negativas sejam injetadas em p. Esse efeito do campo elétrico no meio da junção é chamado de barreira de potencial e é o fenômeno físico mais importante que ocorre na junção, sendo ele o maior responsável pelas características elétricas do dispositivo [18].

Quando a luz atinge um semiconductor que contém uma junção p-n, o efeito da geração de pares elétrons buracos ocorrerá da mesma forma, como já explicado na seção anterior. A figura 2.11 mostra um semiconductor, que possui uma junção p-n, sendo iluminado. Se o par elétron buraco for formado dentro da junção p-n (pontos B e C), o elétron e o buraco serão acelerados pelo campo elétrico presente naquele espaço. O primeiro, segundo a disposição do campo elétrico, será direcionado para o lado n e o segundo para o lado p. Uma vez fora da junção p-n essas cargas farão parte da concentração de cargas majoritárias, logo o excesso de cargas majoritárias aparecerão nas bordas da junção p-n. Essa grande concentração então vai ser difundida na direção do contato externo do dispositivo, uma vez que houve aumento de cargas majoritárias apenas nas bordas da junção p-n. Logo, tanto o substrato n tanto o p terão excesso das correspondentes cargas majoritárias, o que gerará tensão nos terminais do semiconductor, ou presença de corrente no circuito externo, ou ainda, a presença de tensão com corrente externa. Se um fio for conectado nos terminais n e p do dispositivo a corrente que vai fluir será diretamente proporcional ao número de pares elétron buraco gerados [16].

O efeito será ligeiramente diferente se a luz incidente gerar um par elétron buraco no ponto A da figura 2.11, isto é, nas proximidades da junção p-n. Uma vez gerado o par elétron buraco é possível que estas cargas geradas cheguem à junção p-n, pois elas têm energia térmica para movê-las e estão próximas dessa junção. Se esse par elétron buraco foi gerado na parte n, próxima da junção, então eventualmente, o buraco conseguirá chegar à junção p-n antes de recombinar com algum portador negativo. Se isto ocorrer ele será acelerado pelo campo elétrico e o mesmo efeito observado para o caso anterior ocorrerá aqui, uma vez que o elétron já estaria no substrato n. A mesma análise vale se o par elétron buraco fosse gerado na parte p do semiconductor. Esse processo revela que após a geração de elétron buraco nos substratos o portador minoritário gerado tem que ter tempo suficiente para chegar à junção p-

n, caso contrário, acontecerá como mostrado na figura 2.11 no ponto D. Neste caso, o portador minoritário foi gerado suficientemente longe da junção p-n para que ele se recombinasse antes de chegar a esta junção. Se isto ocorrer os portadores minoritários gerados através do efeito fotovoltaico serão perdidos.

Logo, para os pontos A,B e C, houve então geração de tensão, ou corrente, ou ainda os dois que podem ser entregues a um circuito externo. Se uma fonte de tensão externa for aplicada aos terminais do dispositivo semiconductor em 2.11, pode ser mostrado que a corrente entregue pelo dispositivo para uma carga é modelado segundo a fórmula [16]:

$$I = Il - I0 * (e^{\frac{qv}{kT}} - 1) \quad (2.9)$$

$$e \quad I0 = qA \quad (2.10)$$

onde

Il – fotocorrente gerada pela luz incidente nos pontos A,B e C

$I0$ – corrente de saturação reversa

q – carga do elétron, $q = 1,6 * 10^{-19} C$

A – área da seção transversal da junção p-n

v – tensão aplicada sobre o semiconductor

k – constante de Boltzmann, $k = 1,38 * 10^{-23} m^2 * kg * s^{-2} * K^{-1}$

T – temperatura em K

A formula 2.9 é também conhecida como fórmula da corrente para uma célula fotovoltaica.

Retirando-se o termo Il da equação 2.9 teremos exatamente a equação do diodo que é:

$$I = -I0 * (e^{\frac{qv}{nkT}} - 1) \quad (2.11)$$

Onde

n – fator de idealidade, que depende da fabricação do diodo

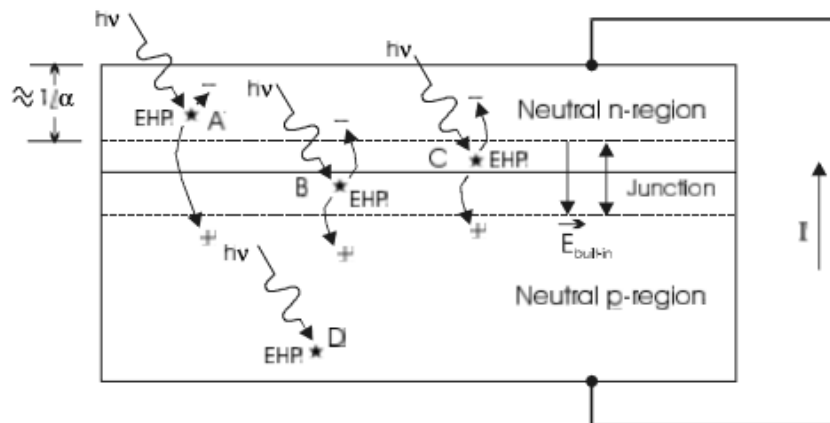


Figura 2.11: Junção p-n iluminado mostrando a criação dos pares elétrons buracos em diversos pontos do dispositivo[16]

Pode-se ver na figura 2.12 a comparação entre os gráficos de corrente versus tensão para o diodo e para a celular solar. O diodo conduz no 1º e 3º quadrantes, o que mostra que ele apenas consome potência. Para uma célula solar sem incidência de luz a equação 2.9 fica como mostrado em 2.12, pois neste caso o termo I_l , ou fotocorrente, é nulo. Caso ocorra a incidência de luz na placa a equação 2.9 tem uma queda na corrente de valor I_l , mostrada na figura 2.12, em comparação com o comportamento anterior. Isto faz com que parte da equação da célula solar esteja compreendida no 4º quadrante, onde a célula entrega potência ao invés de consumi-la. É nesta parte do comportamento da célula que se é aproveitado para obter potência na presença de incidência solar.

As características de uma célula solar podem ser modeladas através de um circuito como o da figura 2.13. O circuito representa uma fonte de corrente em paralelo com um diodo e este conjunto em série com um resistor equivalente R_{pv} o qual representa as perdas internas da célula. O gráfico da corrente versus tensão deste circuito também pode ser visto na mesma figura. Percebe-se ao comparar este gráfico com o da figura 2.12 que o comportamento da célula solar do 4º quadrante foi espelhado para o 1º. Isto reflete a tensão e a corrente oferecida à carga, nomeadas de U e I respectivamente. Dependendo da variação de U e I pode-se obter na célula o ponto de máxima potência ou MPP. Ele acontece nos pontos de tensão U_{mpp} e corrente I_{mpp} de máxima potência. Outros pontos importantes são a corrente de curto circuito I_k onde $U = 0$ V, e a tensão de circuito aberto U_l com $I = 0$ A.

No entanto, o gráfico mostrado na figura 2.13 pode ser modificado dependendo das condições da célula como temperatura e densidade de radiação solar. Uma breve análise é feita para cada situação a seguir.

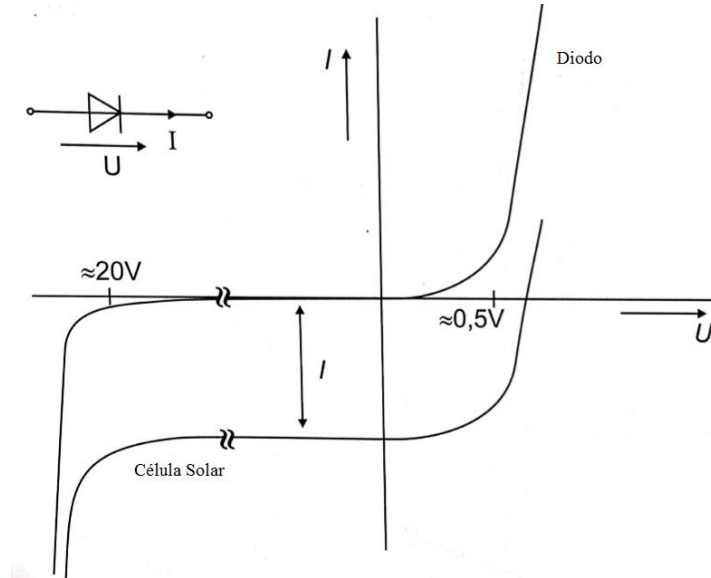


Figura 2.12: Gráfico corrente versus tensão para um diodo e para uma célula solar iluminada [17](modificado)

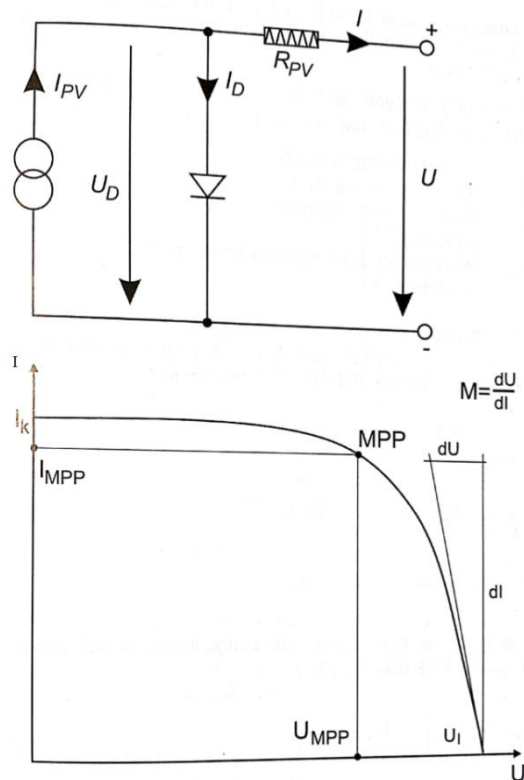


Figura 2.13: Modelo de circuito de uma célula solar e seu correspondente gráfico corrente versus tensão [17]

Foi discutido anteriormente que se a placa solar iluminada for curto circuitada, existirá uma corrente gerada por ela que será maior quanto maior for o número de pares elétron buraco gerados. Ao passo que quanto maior for a densidade de radiação incidente na placa maior será a incidência de fótons. Logo, a quantidade de pares elétron buraco gerados será maior, fazendo com que a placa gere uma maior corrente. Na figura 2.14 pode ser vista as características de corrente e tensão de uma placa solar para diferentes níveis de densidade de radiação luminosa nela incidentes. O efeito anteriormente explicado fica perceptível uma vez que com o aumento do G_{Gg} , ou incidência luminosa na placa, maior será a corrente de curto circuito e quanto menor G_{Gg} menor a corrente de curto.

Quando a temperatura da célula é elevada, existe uma pequena elevação da corrente de curto uma vez que a energia necessária para o elétron ser excitado para a banda de condução diminui um pouco em relação à energia do “bandgap” inicial. No entanto, essa dependência é muito fraca uma vez que outro efeito é mais fortemente presente. Com o aumento da temperatura há também o aumento da corrente de saturação do diodo fazendo com que a tensão de circuito aberto caia consideravelmente [17]. A figura 2.15 traz esta dependência da temperatura na curva corrente por tensão da célula solar.

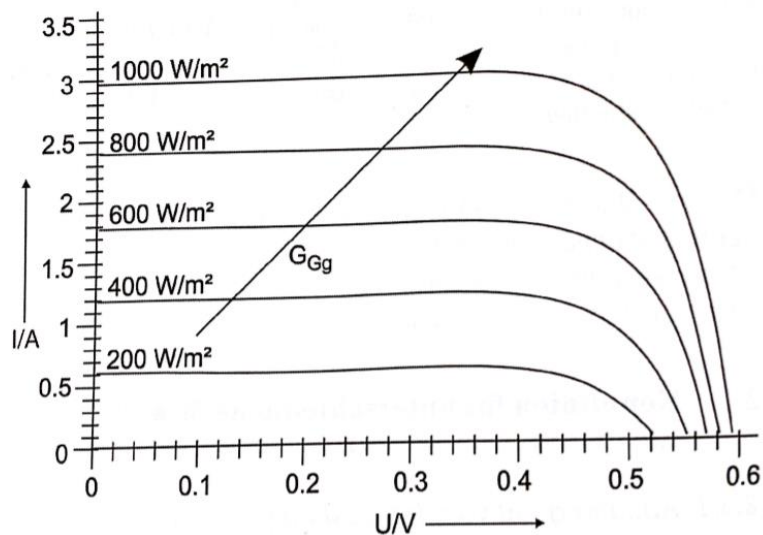


Figura 2.14: Curva corrente versus tensão de uma placa solar para diferentes níveis de radiação solar [17]

A análise de potência para os dois casos acima é simples. Pode ser visto na figura 2.16 o gráfico da potência versus tensão de uma célula plotado juntamente com o gráfico corrente versus tensão. Com este gráfico é fácil perceber que se a densidade de radiação for aumentada

na célula, logo haverá um aumento da corrente de curto circuito o que gerará um aumento também no gráfico da potência, elevando assim o ponto de máxima potência. Se houver a diminuição da radiação solar, com o mesmo raciocínio acima utilizado, o MPP irá diminuir. Já no caso do aumento da temperatura com a consequente diminuição da tensão de circuito aberto, ocorrerá uma queda do gráfico da potência e do MPP. Porém com a diminuição da temperatura tem-se um aumento do MPP.

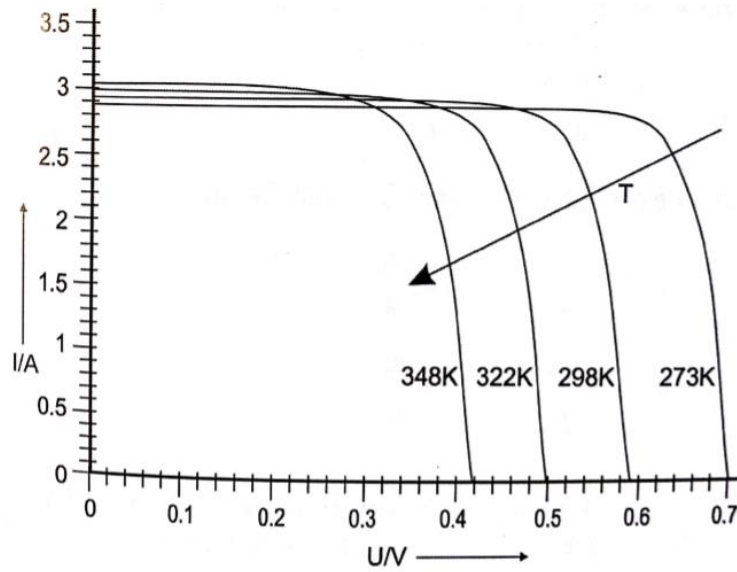


Figura 2.15: Curva corrente versus tensão de uma placa solar para diferentes temperaturas [17]

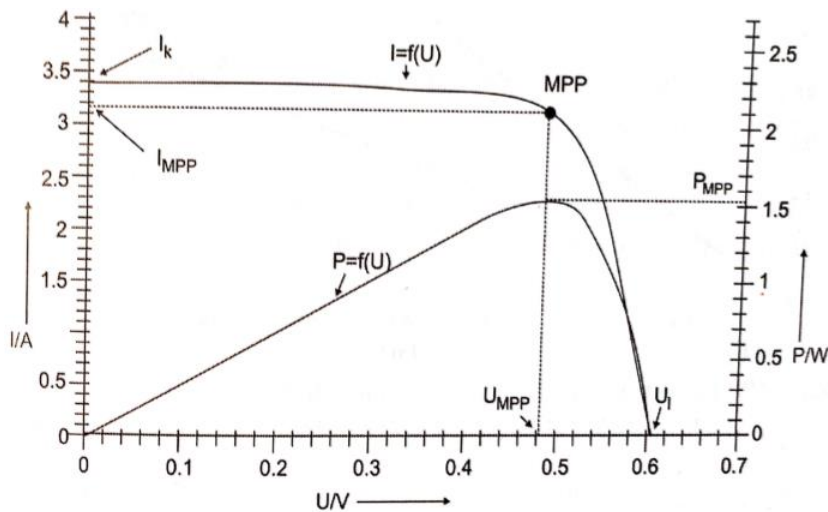


Figura 2.16: Curva corrente versus tensão e potência versus tensão de uma placa solar [17]

2.3.5 Tipos de células fotovoltaicas

O material semicondutor que servirá de base para a formação da junção p-n pode ser construído com diferentes materiais, ou com combinações de diversos elementos. No entanto, como já mencionado na seção 2.3.3 os fótons incidentes na superfície terrestre que tem maior probabilidade de serem absorvidos têm energia entre 2.5 eV e 1 eV. Logo, devem ser procurados materiais que possuam energia de “bandgap” dentro dessa faixa. Alguns materiais conhecidos que atendem esse requisitos são: o silício (Si) com energia de “bandgap” $E_g = 1,12\text{eV}$, o fosfato de índio (InP) com $E_g=1,27\text{ eV}$, o arsenieto de gálio (GaAs) com $E_g = 1,42\text{ eV}$, entre outros. A produção das células solares a partir desses elementos é um processo complicado e dispendioso energeticamente. Logo, a produção em laboratório é bem diferente da produção industrial, o que acaba afetando a eficiência de conversão da célula. A tabela 2.1 exemplifica essa diferença de eficiência para diferentes tipos de elementos ou tecnologias.

Tabela 2.1: Eficiência em % de diferentes tipos de células solares para diferentes etapas da maturidade da tecnologia [17]

Material/ Tecnologia	Laboratório	Produção única	Produção em série
Silício (Si) cristalino	24,8	21,6	17,0
Silício (Si) policristalino	20,5	16,8	14,3
Silício(Si) amorfo	13,1	10,7	7,8
Silício(Si) fino	19,6	9,5	7,8
Silício (Si) microamorfo	12,5	10,7	9,2
CIS	19,9	14,1	11,0
CaTe	16,8	10,1	9,2
InGaAs (concentrado)	39,2	27,5	26,8
Material orgânico	12,1	7,0	< 5,0
Célula HIT	21,1	18,6	16,8

3. Noções Básicas de Eletromagnetismo

3.1 Breve história do eletromagnetismo

Como já comentado anteriormente na seção 2.1, os conhecimentos do eletromagnetismo são bem antigos, porém apenas no século XIX que grande parte de suas leis foi descoberta. Isto significa que tais leis básicas formuladas por meio de experimentos, aparentemente simples para os dias de hoje, já duram 200 anos inalteradas [20]. Alguns dos cientistas importantes para esse desenvolvimento foram citados na seção 2.1, com especial atenção para Gauss, Ampère e Faraday.

Em 1873 um matemático escocês chamado James Clerk Maxwell (1831-1879) unificou as leis desenvolvidas pelos três cientistas anteriormente mencionados, fazendo ainda uma vital adição na lei de Ampère. Este trabalho foi intitulado de Eletricidade e Magnetismo e uma de suas incríveis contribuições foi a previsão teórica da existência das ondas eletromagnéticas. Esta previsão foi, em 1887, confirmada por Heinrich Hertz (1857-1894) [20]. Assim, as leis do eletromagnetismo estavam prontas para servir de base para todas as aplicações que hoje em dia conhecemos e utilizamos como radares, comunicação sem fio e mais recentemente a transmissão sem fio de energia.

A base teórica de eletromagnetismo necessária para desenvolver os temas da transmissão sem condutores de energia são basicamente as ideias ligadas aos campos variantes no tempo. Por isto serão omitidas neste trabalho os temas básicos de eletromagnetismo estático, como campos elétricos e magnéticos estáticos.

3.2 Campos eletromagnéticos variantes no tempo

O conjunto de equações para fenômenos variantes no tempo para o eletromagnetismo é chamado de equações de Maxwell. A primeira das equações para os efeitos dinâmicos foi descoberta por Faraday. Ele observou experimentalmente que ao variar um campo magnético,

que está acoplado a um circuito, é induzida uma tensão neste circuito. Matematicamente tem-se:

$$V = n \frac{d}{dt} \Psi_m \quad (3.1)$$

Observa-se da equação acima que a tensão induzida é proporcional à variação do fluxo magnético Ψ_m que está acoplado ao circuito e do número de espiras n que eventualmente este circuito tenha. Podemos reescrever a equação 3.1 de forma a generalizá-la da seguinte forma:

$$fem = \text{tensão induzida} = - \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad (3.2)$$

Onde fem ou força eletromotriz é a tensão induzida em um circuito produzida por uma variação do fluxo magnético. Substituindo 3.2 e 3.1, tem-se que:

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \frac{d}{dt} \Psi_m = - \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} \quad (3.3)$$

O sinal negativo é introduzido na equação para satisfazer os resultados experimentais. Logo, a fem será induzida de forma que a corrente produzida por ela gerará um campo magnético que vai se opor ao que produziu a fem . Este resultado também condiz com a conservação de energia [20]. Se o circuito tiver um número n de espiras a fem será o mesmo mostrado em 3.3 multiplicado pelo número de espiras. Aplicando o teorema de Stokes na equação 3.3, chega-se a forma diferencial da mesma:

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{d}{dt} \mathbf{B} \quad (3.4)$$

No entanto a fórmula 3.3 só contempla a variação da densidade de fluxo magnético produzida pela variação do campo magnético. Outra forma de variar \mathbf{B} é, por exemplo, em um sistema com movimento em que o circuito, mesmo na presença de um \mathbf{H} constante, ao mover-se vai experimentar uma variação de \mathbf{B} . Para adicionar esta contribuição pode-se reescrever 3.3 como:

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \int_S \left[\frac{d}{dt} \mathbf{B} - \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \right] \cdot d\mathbf{s} \quad (3.5)$$

O primeiro termo na integral de 3.4 é exatamente o termo de 3.3, já o segundo termo é a contribuição do movimento relativo do circuito gerando a variação de \mathbf{B} . O termo \mathbf{v} é justamente essa velocidade do circuito.

As equações de 3.1 a 3.5 definem a chamada lei de Faraday que é uma das quatro equações de Maxwell. Outra equação de Maxwell é derivada da lei de Ampère. Na época do concatenamento das equações, Maxwell percebeu que um termo estava faltando na lei de Ampère, pois caso contrário a equação e o argumento da continuidade se contradiziam. Com o acréscimo do termo essa relação ficaria correta. Logo, para campos variantes no tempo a lei de Ampère acrescida do termo de Maxwell é escrita como:

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s} + \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} \quad (3.6)$$

Na forma diferencial tem-se:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{d}{dt} \mathbf{D} \quad (3.7)$$

O segundo membro da direita em 3.6 e 3.7 é nomeado como corrente de deslocamento. Este termo contribui para o rotacional do campo magnético da mesma forma que a densidade de corrente de condução. Para muitas aplicações de baixa frequência a corrente de deslocamento pode ser ignorada. Já para casos de alta frequência ela tem papel muito importante. Na verdade ela é essencial, uma vez que juntamente com a lei de Faraday a adição do termo da corrente de deslocamento tornou possível a predição de ondas eletromagnéticas.

As outras duas equações que compõem as equações de Maxwell são as leis de Gauss para o campo magnético e para o campo elétrico. Estas permanecem inalteradas para eventos variantes no tempo. Logo as quatro equações de Maxwell escritas na forma diferencial são:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (3.8)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3.9)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{d}{dt} \mathbf{B} \quad (3.10)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{d}{dt} \mathbf{D} \quad (3.11)$$

Estas equações foram usadas por Maxwell para prever a existência de ondas eletromagnéticas. Em um meio, livre de cargas e correntes, com valores de permissividade e permeabilidade constantes, tem-se que $\rho = 0$ e $\mathbf{J} = 0$. Logo, substituindo esses dois valores nas equações 3.8 e 3.11 e assumindo-se a existência de ondas planas e uniformes, o que gera a variação dos campos em um eixo apenas, ou seja, $\frac{d}{dx} = \frac{d}{dy} = 0$, as equações 3.10 e 3.11 podem ser reescritas como [19]:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{d}{dt} \mathbf{H} \quad (3.12)$$

O que leva a três equações:

$$-\frac{d}{dz} \mathbf{E}_y = -\mu \frac{d}{dt} \mathbf{H}_x \quad (3.13)$$

$$\frac{d}{dz} \mathbf{E}_x = -\mu \frac{d}{dt} \mathbf{H}_y \quad (3.14)$$

$$0 = -\mu \frac{d}{dt} \mathbf{H}_z \quad (3.15)$$

Fazendo-se o mesmo com a lei de Ampère:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \varepsilon \frac{d}{dt} \mathbf{E} \quad (3.16)$$

Levando a:

$$-\frac{d}{dz} \mathbf{H}_y = \varepsilon \frac{d}{dt} \mathbf{E}_x \quad (3.17)$$

$$\frac{d}{dz} \mathbf{H}_x = \varepsilon \frac{d}{dt} \mathbf{E}_y \quad (3.18)$$

$$0 = \varepsilon \frac{d}{dt} \mathbf{H}_z \quad (3.19)$$

Pelas equações 3.15 e 3.19 vê-se que os campos são totalmente transversais à direção de propagação. As outras quatro equações relacionam os tipos de propagações possíveis. Uma delas para \mathbf{E}_x e \mathbf{H}_y . Ao derivar a equação 3.14 em relação à z e a 3.18 em relação ao tempo t , chega-se a:

$$\frac{d^2}{dz^2} \mathbf{E}_x = -\mu\varepsilon \frac{d^2}{dt^2} \mathbf{E}_x \quad (3.20)$$

A equação 3.20 é também chamada de equação da onda unidimensional. Assumindo $v = 1/(\mu\epsilon)^{\frac{1}{2}}$, logo, a solução para 3.20 é do tipo:

$$\mathbf{E}_x(z, t) = f_1\left(t - \frac{z}{v}\right) + f_2\left(t + \frac{z}{v}\right) \quad (3.21)$$

Essa solução mostra que o campo elétrico move-se na direção de z, uma vez que analisando um ponto específico do campo, com valor constante, para manter esse valor a expressão $t - \frac{z}{v}$ e $t + \frac{z}{v}$ tem que se manter constante. Com o passar do tempo na primeira expressão z tem de aumentar e na segunda expressão tem que decrescer. Ou seja, os pontos constantes analisados, das ondas, se movimentam em relação ao eixo z. O primeiro termo representa o movimento para z positivo e o segundo para z negativo. Há então o movimento dos campos eletromagnéticos como “ondas” com velocidade v. Esta constante presente na equação 3.21 é a velocidade da luz no vácuo que tem valor $v = 2.9979 * 10^8 \frac{m}{s}$ e, é também o valor da velocidade das ondas eletromagnéticas como descoberto por Maxwell.

Sabe-se também que essas ondas previstas por Maxwell podem carregar energia. Logo, o conceito de potência para uma onda eletromagnética se faz necessário. A densidade de potência para ondas eletromagnéticas é definida como vetor de Poynting, assim definido em homenagem ao idealizador desse conceito o físico inglês John Henry Poynting (1852-1914). O vetor de Poynting é matematicamente descrito como:

$$\mathbf{P} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \text{ W/m}^2 \quad (3.22)$$

Utilizando das equações de Maxwell acima descritas e integrando e manipulando vetorialmente a equação 3.22, esta também pode ser reescrita como [19]:

$$\int_V \left[\frac{d(\mathbf{B} \cdot \mathbf{H})}{dt} + \frac{d(\mathbf{D} \cdot \mathbf{E})}{dt} + \mathbf{E} \cdot \mathbf{J} \right] dV = - \oint_S (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) \cdot d\mathbf{S} \quad (3.23)$$

Fasorialmente a potência da onda eletromagnética descrita através do vetor de Poynting pode ser representada através de [19]:

$$P = \oint_S (\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) \cdot d\mathbf{S} = - \int_V \sigma \mathbf{E} \cdot \mathbf{E}^* dV - j\omega \int_V [\mu \mathbf{H} \cdot \mathbf{H}^* - \epsilon \mathbf{E} \cdot \mathbf{E}^*] dV \quad (3.24)$$

A equação 3.23 mostra que a potência das ondas eletromagnéticas que entra em um volume V por unidade de tempo é composta de 3 termos. O primeiro termo no lado esquerdo da equação refere-se à taxa de variação da energia armazenada no campo magnético da onda. Já o termo do meio é a taxa de variação da energia armazenada no campo elétrico. O terceiro termo no lado esquerdo da equação representa as perdas ôhmicas de potência se \mathbf{J} representar uma densidade de corrente de condução ou a potência requerida para acelerar cargas se \mathbf{J} for uma corrente de convecção formada a partir de cargas em movimento [19]. Esta relação também pode ser feita para os termos de 3.24.

3.7 Radiação de antenas

Radiação das ondas eletromagnéticas pode se um evento não desejado, causado por diversos motivos como não casamento de impedâncias em uma linha de transmissão, ou pode ainda ser um evento desejado, o qual se quer excitar ondas eletromagnéticas no espaço. Para realizar a radiação desejada são utilizados equipamentos chamados de antenas ou radiadores. As antenas são os dispositivos de transição entre a linha de transmissão e o espaço livre [22]. Um circuito equivalente de Thevenin pode ser visto na figura 3.1. Nesta figura a fonte é considerada ideal, a antena é representada como uma carga de impedância $Z_A = [(R_L + R_r) + jX_A]$, onde R_L é a resistência representando as perdas de condução e dielétrica, R_r , também chamada de resistência de radiação, quantifica a radiação da antena e a reatância X_A que representa a parte imaginária da impedância associada à radiação da antena [22].

Considera-se uma excitação senoidal neste circuito através do gerador. Para baixas frequências tem-se que o tamanho da antena é considerado pequeno em relação ao comprimento de onda do sinal, calculado através de $c = \lambda f$ onde c é a velocidade da luz já definida na seção anterior. Logo, para λ muito maior que o tamanho da antena, o tempo de propagação da onda através da antena pode ser desconsiderado assim como os deslocamentos de fases. Para maiores frequências o tamanho da antena pode ser da mesma ordem de grandeza de λ , logo o tempo finito de propagação desta onda na antena tem de ser considerado. Correntes em diferentes pontos da antena não estarão mais em fase, assim como seus campos magnéticos. A variação destes gerará campos elétricos, em determinados pontos, que podem não estar exatamente 90° defasados da corrente nestes pontos. Este cenário pode

configurar uma transferência de energia e será justamente a radiação emitida pelo circuito [19]. Esta contribuição de potência será realizada por R_r e X_A no circuito equivalente.

Na verdade a ocorrência de radiação por um elemento pode ser mais genérica do que descrito acima. Considerando a análise de cargas em um condutor pode-se ter 3 situações. A primeira é quando as cargas não estão em movimento, logo não haverá radiação. A segunda situação ocorre se as cargas estão em movimento uniforme, então não haverá radiação se o condutor for perfeitamente reto e infinito ou haverá radiação se o condutor for curvado, dobrado, descontínuo ou truncado. A terceira e última situação existe se as cargas estão oscilando no tempo, isto produzirá radiação para qualquer tipo de geometria do condutor [22].

As antenas têm diversos parâmetros que descrevem seu desempenho. A seguir serão comentados aqueles que serão importantes para desenvolvimentos futuros.

O primeiro dos parâmetros das antenas é o diagrama de radiação que é uma representação gráfica das propriedades de radiação, em campo distante, das propriedades da antena [21]. Nessas propriedades estão incluídos densidade de fluxo de potência, intensidade de radiação, valor dos campos, diretividade, fase e polarização. Estes conceitos serão ainda abordados. A propriedade mais comumente relacionado ao diagrama de radiação é a distribuição de energia irradiada em 2 ou 3 dimensões em função da posição distante da antena também chamada de diagrama de potência. Os diagramas de campo também são comuns. Estes representam a plotagem dos campos elétrico e magnético. Na figura 3.2 pode-se ver um diagrama de radiação típico. Nesta figura é possível ver a orientação do diagrama em coordenadas esféricas. Veem-se ainda as existências de lóbulos, principal e secundários, que são regiões de radiação circundadas por regiões de baixa intensidade de radiação [22]. Os diagramas podem se plotados em dB ou em escala linear.

Como citado acima o diagrama de radiação normalmente é válido apenas para campos distantes, isto é, para distâncias superiores a $2D^2/\lambda$, onde λ é o comprimento de onda e D é a maior dimensão da antena [22 e 21].

O próximo parâmetro da antena é a densidade de potência radiada. Este parâmetro já foi definido para as ondas eletromagnéticas como a integral de superfície do vetor de Poynting, através das fórmulas 3.23 e 3.24. Pode ser mostrado que para campos distantes a densidade de potência dos campos eletromagnéticos é predominantemente real [22].

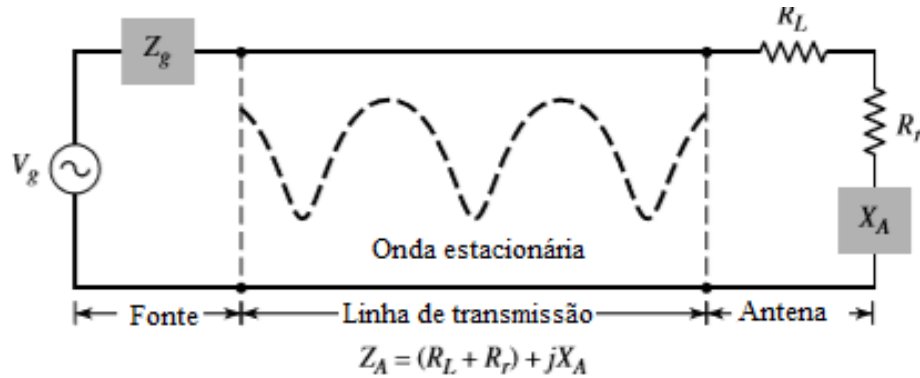


Figura 3.1: Equivalente de Thevenin para uma antena no modo de transmissão [22] (modificado)

Logo, de 3.24, a potência média radiada por uma antena pode ser escrita como:

$$P_m = \oint_S \frac{1}{2} \text{Re}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) \cdot d\mathbf{S} = - \int_V \sigma \mathbf{E} \cdot \mathbf{E}^* dV \quad (3.25)$$

Outro parâmetro importante para antenas, relacionado com a densidade de potência, é a intensidade de radiação, definida como a potência radiada de uma antena dividida pela unidade de ângulo [22]. Ela é definida matematicamente como:

$$U = r^2 P \quad (3.26)$$

Onde U é a intensidade de potência, r é a distância entre a antena e o observador e P é a parte real do vetor de Poynting na forma fasorial.

Largura de banda de meia potência de uma antena é definida pelo IEEE, como: “em um plano contendo a direção da máxima radiação da antena, o ângulo entre as direções, as quais a intensidade de radiação é a metade do valor máximo, é chamada de largura de banda de meia potência de uma antena”. Existem também outras definições de largura de banda, mas o que foi previamente definido é o conceito mais usado.

Uma importante característica de antenas é o quanto elas conseguem concentrar energia em uma direção comparando-se com a radiação total produzida por elas. Este conceito é definido como diretividade [21]. Define-se uma fonte isotrópica como um radiador ideal, sem perdas, que espalha a radiação igualmente pelo espaço, isto é, tendo como diagrama de

radiação uma esfera ideal. Logo, a diretividade de uma fonte não isotrópica pode ser matematicamente descrita como:

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{Prad} \quad (3.27)$$

Onde U é a intensidade de radiação na direção desejada, U_0 é intensidade de potência de uma fonte isotrópica e $Prad$ é a potencia total irradiada. Vê-se que $U_0 = \frac{Prad}{4\pi}$, e com a descrição de 3.27 pode-se definir diretividade também como a capacidade da antena de focar a energia irradiada em uma direção em comparação com uma fonte isotrópica.

O conceito de diretividade é intimamente ligado aos conceitos de eficiência da antena e de ganho. A eficiência da antena leva em conta todos os fatores de perdas que podem vir a diminuir a potência irradiada, como perdas ôhmicas ou reflexão por descasamento. Já o ganho da antena é definido como a intensidade de radiação da antena em uma direção dividida pela intensidade de radiação obtida se a potência total que é oferecida à antena fosse radiada isotropicamente, isto é sem perdas. Matematicamente, temos:

$$G = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{Pin} \quad (3.28)$$

Onde G é o ganho, geralmente na direção de máxima radiação e Pin é a potência de entrada da antena. A potência total radiada por uma antena não isotrópica pode ser escrita em função da eficiência da antena e da potência de entrada oferecida a ela segundo a fórmula:

$$Prad = e Pin \quad (3.29)$$

Onde $Prad$ é a potência radiada, e e é a eficiência da antena. Substituindo 3.29 em 3.28, tem-se que:

$$G = e * \left(4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{Prad} \right) \quad (3.30)$$

Analisando 3.30, vemos que a parte entre parênteses é justamente a diretividade definida acima. Então 3.30 pode ser reescrita como:

$$G = e * D \quad (3.31)$$

Isto é, o ganho absoluto de uma antena é igual a eficiência total da antena multiplicada pela sua diretividade.

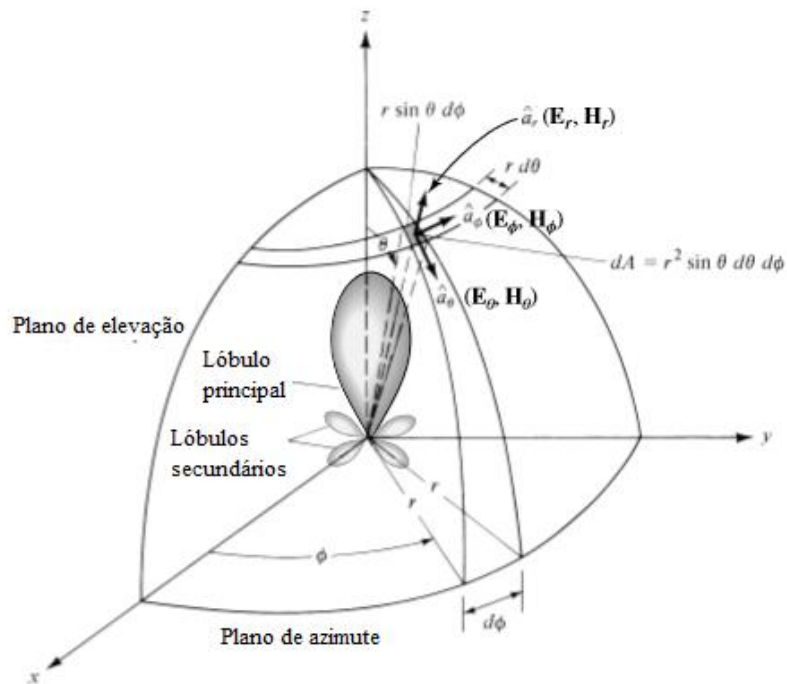


Figura 3.2: Sistemas de coordenadas para análise de antenas [22](modificado)

Antenas têm outra importante característica chamada de polarização da antena. A polarização de uma onda eletromagnética radiada é a propriedade da onda de ter uma direção e magnitude, variantes no tempo, do campo elétrico. Em outras palavras, polarização é a curva traçada pelo ponto final do vetor representando o campo elétrico instantâneo [22]. A figura mais comumente formada pela polarização de uma onda é uma elipse, chamada assim de polarização elíptica. Se a forma da polarização for uma linha, esta é dita polarização linear. Se o campo elétrico se mantiver constante em módulo, porém rotacionar em uma geometria circular a polarização será dita circular [21]. A polarização da onda realizada por uma antena é importante também para a antena receptora dessa onda. Existem coeficientes, como o fator de perda de polarização, que relacionam a diferença da polarização da antena receptora com a onda recebida. Quanto mais próxima a polarização da onda incidente for da polarização da antena receptora menor será a perda de potência referente a diferenças de polarização e, por conseguinte mais potência dessa onda será aproveitada pela antena.

Um parâmetro essencial para antenas é a chamada área efetiva ou abertura efetiva da antena. Ela é definida como a razão entre a potência disponível nos terminais de uma antena receptora pela densidade de fluxo de potência da onda plana incidente nesta antena. Geralmente esta análise é feita na direção de máxima radiação. Matematicamente tem-se:

$$A_e = \frac{P_t}{W_i} \quad (3.32)$$

Onde A_e é a área efetiva, P_t é a potência incidente disponível nos terminais da antena receptora e W_i é a densidade de fluxo de potência da onda plana incidente. Nesta equação a polarização da onda incidente e da antena são consideradas idênticas. Outro conceito importante que é a eficiência de abertura é derivado da área efetiva. Ele é definido como a razão entre o máximo valor da área efetiva pelo valor da área física da antena.

Com todos estes parâmetros definidos podemos agora estudar a relação de transferência de potência entre duas antenas. Na figura 3.3 pode-se ver uma configuração genérica de duas antenas que intercambiam potência. Se a antena de transmissão fosse isotrópica, a densidade de potência produzida por ela seria escrita como [21]:

$$W_0 = \frac{P_t}{4\pi r^2} \quad (3.33)$$

Onde W_0 é a densidade de potência em um ponto distante de r da antena transmissora e isotrópica e P_t é potência radiada pela isotrópica. Para uma antena não isotrópica a densidade de radiação nas direções θ, ϕ pode ser escrita como:

$$W_t = \frac{e_t P_t G_t(\theta, \phi)}{4\pi r^2} = \frac{P_t D_t(\theta, \phi)}{4\pi r^2} \quad (3.34)$$

Onde $G_t(\theta, \phi)$ é o ganho e $D_t(\theta, \phi)$ é a diretividade da antena transmissora na direção θ, ϕ . Sabendo que a quantidade de potência coletada pela antena de recepção é igual a densidade de potência oferecida a ela multiplicado pela área efetiva e ainda como a área efetiva da antena é relacionada a eficiência e a diretividade através de:

$$A_r = \frac{e_r D_r(\theta_r, \phi_r) \lambda^2}{4\pi} \quad (3.35)$$

Logo, pode-se obter uma expressão da potência recebida através de 3.34 e 3.35, de forma que [22]:

$$P_r = \frac{e_r D_r(\theta_r, \phi_r) \lambda^2 W_t}{4\pi} = \frac{e_r e_t P_t D_t(\theta_t, \phi_t) D_r(\theta_r, \phi_r) \lambda^2}{(4\pi r)^2} \quad (3.36)$$

A equação de potência escrita em 3.36 assume que as antenas de transmissão e recepção estão casadas com suas respectivas linhas de transmissão ou cargas, isto é, o coeficiente de reflexão é unitário, considera ainda que a polarização das duas antenas é

exatamente igual. Se esses dois fatores forem adicionados à 3.36, a transferência de potência será:

$$\frac{P_r}{P_t} = e_r e_t (1 - |\Gamma_t|^2) (1 - |\Gamma_r|^2) \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 D_t(\theta_t, \phi_t) D_r(\theta_r, \phi_r) |\hat{\mathbf{p}}_t \cdot \hat{\mathbf{p}}_r|^2 \quad (3.37)$$

Onde $(1 - |\Gamma_t|^2)$ e $(1 - |\Gamma_r|^2)$ são os coeficientes de reflexão das antenas transmissora e receptora, respectivamente, que dependem dos parâmetros S11 e S22, e $|\hat{\mathbf{p}}_t \cdot \hat{\mathbf{p}}_r|^2$ é o coeficiente de diferença de polarizações. Os subscritos r e t são relacionados à transmissão e recepção respectivamente. Para sistemas sem reflexão, com polarização iguais e alinhados para a máxima direção de radiação 3.37 pode ser simplificada a:

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 G_t G_r \quad (3.38)$$

As equações 3.37 e 3.38 são chamadas de equação de Friis e relacionam a potência recebida na carga, que foi entregue pela antena de recepção, e a potência de entrada da antena de transmissão [19, 20,21 e 22]. Esta equação considera o espaço livre como meio de transmissão, isto é não há reflexões de ondas entre as antenas. O termo $\left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2$ é comumente chamado de fator de perda do espaço livre. Ele computa a perda pelo espalhamento esférico da radiação.

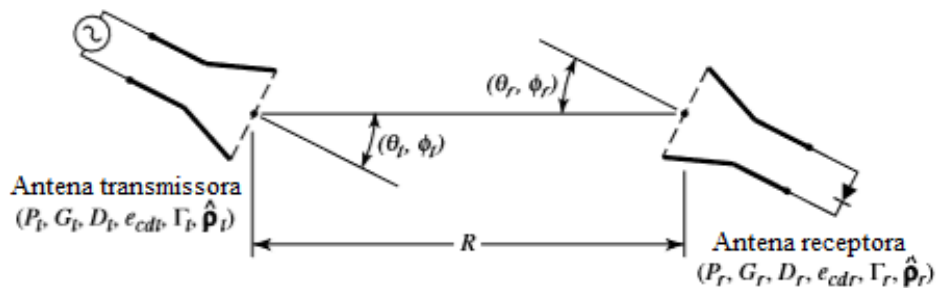


Figura 3.3: Geometria das antenas de transmissão e recepção para a equação de Friis [22](modificado)

4. Métodos de transmissão de energia sem condutores metálicos

Como mencionado na introdução vários métodos de transmissão de energia sem condutores metálicos foram sendo desenvolvidos desde a ideia pioneira de Tesla. Porém, quatro tipos de tecnologias se destacaram desde então, sendo elas: a transmissão de energia através do acoplamento indutivo, transmissão magnética por ressonância de campo próximo, que é um caso especial da primeira, a transmissão de energia por laser óptico e, por fim, via microondas. Os princípios de funcionamento das 4 tecnologias serão discutidos neste capítulo. Especial atenção será dada a transmissão via microondas, pois ela é a tecnologia utilizada no SPS.

4.1 Acoplamento indutivo

O primeiro tipo de tecnologia a ser analisado é o acoplamento indutivo. Este sistema está sendo usado como recarregador, sem condutores, de pequenas baterias que alimentam diversos equipamentos como escovas de dentes elétrica e mouses sem fio. A seguir é realizada a análise da transferência de energia para o acoplamento indutivo.

Se o campo magnético variante de uma parte do circuito está sendo “sentido” por outro circuito, logo uma tensão induzida será produzida como fórmula a lei de Faraday. Este caso é retratado com um exemplo particular mostrado na figura 4.1, em que duas indutâncias L_1 e L_2 estão acopladas através de uma indutância mútua M . O valor desta indutância mútua é definido como o fluxo magnético Ψ_{12} que está acoplado a indutância L_1 , dividido pela corrente na indutância 2, matematicamente tem-se [19]:

$$M = \frac{\Psi_{12}}{I_2} \quad (4.1)$$

Considerando que o primeiro indutor esteja excitado por uma fonte de tensão que também excitará o indutor L2 através do fluxo magnético, logo se pode descrever as tensões no domínio da frequência para um sistema de duas portas correspondente a indutâncias acopladas da seguinte maneira:

$$V_1 = j\omega L_1 I_1 + j\omega M I_2 \quad (4.2)$$

$$V_2 = j\omega L_2 I_2 + j\omega M I_1 \quad (4.3)$$

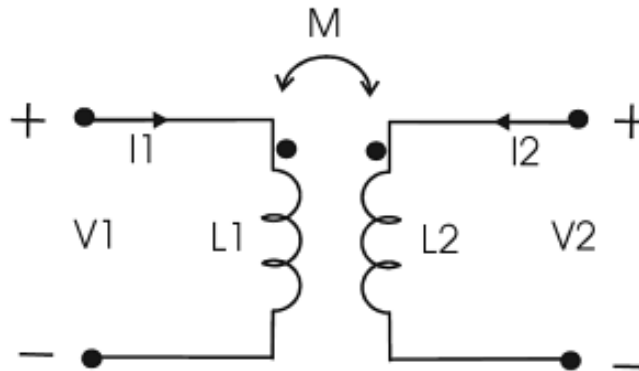


Figura 4.1: Acoplamento de indutores através da indutância mútua [23]

Há então uma transferência de energia de L1 para L2 através do ar, uma vez que esta recebe o fluxo magnético da primeira, pois elas estão acopladas através de M, e nela é induzida uma tensão que pode produzir corrente. Pode-se definir um coeficiente de acoplamento k que geralmente representa a transferência de energia do indutor L1 para L2. Este coeficiente pode ser matematicamente descrito como [23 e 24]:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (4.4)$$

A indutância mútua para o sistema da figura 4.1 pode ser reescrita em função dos raios R1 e R2 das bobinas que formam as indutâncias L1 e L2 respectivamente e de r que é a distância entre os centros das bobinas como [24]:

$$M = \frac{\mu\pi(R_1 R_2)^2}{\sqrt{((R_1 + R_2)^2 + r^2)[(R_1 - R_2)^2 + r^2]}} \quad (4.5)$$

Vê-se então que o decréscimo de M^2 , assim como o de k^2 , cai muito mais rapidamente do que o quadrado da distância. Na verdade esse decréscimo é com relação à r^{-6} . Uma vez que a eficiência da transferência de potência em sistemas desse tipo está diretamente ligada com k [24], fica claro que o acoplamento indutivo é viável apenas para distâncias muito pequenas entre as duas bobinas.

Para melhorar a eficiência da transmissão de energia em um sistema de acoplamento indutivo, mesmo para distâncias grandes em relação ao raio das bobinas, adicionam-se capacitâncias de valores previamente conhecidos nos dois lados dos circuitos a fim de tornar o circuito ressonante. Estes tipos de circuitos serão estudados no próximo tópico.

4.2 Transmissão magnética por ressonância de campo próximo

Em julho de 2007 um grupo de pesquisa do Massachusetts Institut of Technology (MIT) conseguiu realizar uma transmissão de 60 W de energia com eficiência de 40% por 2 metros de distância usando circuitos ressonantes altamente acoplados [27]. Devido à importância desse acontecimento os circuitos ressonantes tem sido desde então especialmente estudados.

Para a análise da transferência de potência nos circuitos ressonantes utilizam-se usualmente duas abordagens, do inglês, a “coupled mode theory” ou a “reflected load theory”. Os dois métodos geram basicamente o mesmo conjunto de equações. Enquanto a primeira realiza uma análise de intercâmbio energético a segunda tem uma investigação mais ligada aos conceitos de circuitos. A análise feita neste trabalho será a “reflected load theory”, pois ela se aplica a um maior número de casos [25].

Primeiramente, para iniciar a análise, tomemos o circuito da figura 4.2(a) como modelo de estudo. Pode ser mostrado que para a maior eficiência na transferência de potência através do “link” dos dois circuitos LC, estes tem que estar operando na mesma frequência de ressonância, isto é [26]:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} = \frac{1}{\sqrt{L_3 C_3}} \quad (4.6)$$

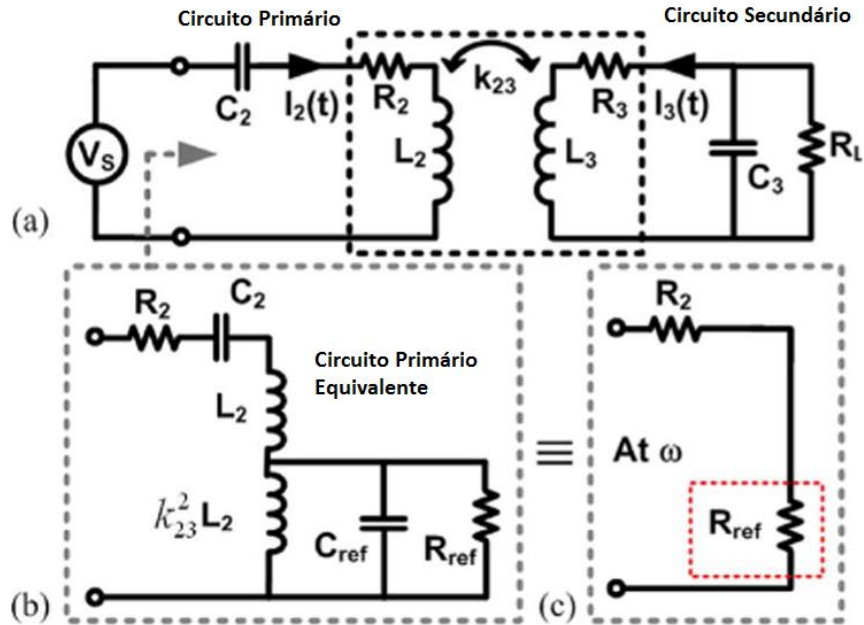


Figura 4.2 : (a) Modelo simplificado de transferência de potência entre duas bobinas (b) Circuito equivalente do circuito de “a” (c) Carga refletiva para o circuito primário na frequência ressonante [25].

Assim como no caso anterior, nos circuitos ressonantes a eficiência de transferência energética é principalmente dependente do coeficiente de acoplamento k_{23} , porém neste caso ela vai depender também dos chamados fatores de qualidade definidos como [25]:

$$Q_2 = \omega L_2 \quad (4.7)$$

$$Q_3 = \omega L_3 \quad (4.8)$$

Na frequência de ressonância a carga R_L é sentida no circuito primário como R_{REF} . Para achar este valor o circuito secundário é modelado como uma carga paralela, mostrado na figura 4.2 (b). Porém, no circuito secundário existe também a resistência do indutor L_3 , chamada de R_3 . Para considerar o valor da resistência equivalente de R_3 em paralelo com R_L a seguinte transformação faz-se necessária: $R_{P3} = Q_3^2 R_3$, onde R_{P3} será a resistência em paralelo com R_L [25]. Logo, a resistência total do segundo circuito será $R_P = R_{P3} || R_L$.

Aplicando a mesma ideia do começo do parágrafo, podemos refletir essa resistência total do circuito secundário no circuito primário como se segue [25]:

$$R_{REF} = k_{23}^2 \left(\frac{L_2}{L_3} \right) R_P = k_{23}^2 \omega L_2 Q_{3L} \quad (4.9)$$

Fazendo-se o mesmo para a capacitância do circuito secundário tem-se:

$$C_{REF} = \frac{C_3}{k_{23}^2} \left(\frac{L_3}{L_2} \right) R_P = \frac{1}{k_{23}^2 \omega^2 L_2} \quad (4.10)$$

Onde $Q_{3L} = R_P / \omega L_3$ é o chamado fator de qualidade da resistência R_P no circuito secundário. Na frequência ressonante, C_{REF} vai ressonar com $k_{23}^2 L_2$, deixando apenas a resistência R_{REF} no circuito primário. Da mesma forma L_2 vai ressonar com C_2 deixando apenas R_2 na parte superior. A figura 4.2 (c) mostra o resultado destas simplificações. Logo a potência de entrada será dividida entre R_2 e R_{REF} e uma vez que a potência consumida por R_2 é dissipada na forma de calor, então a potência realmente aproveitável será a utilizada em R_{REF} . Logo, a eficiência na transferência de potência do circuito primário para o secundário pode ser escrita como [25]:

$$\eta_{23} = \frac{R_{REF}}{R_{REF} + R_2} * \frac{R_{P3}}{R_{P3} + R_L} = \frac{k_{23}^2 Q_2 Q_{3L}}{1 + k_{23}^2 Q_2 Q_{3L}} * \frac{Q_{3L}}{Q_L} \quad (4.11)$$

Onde $Q_L = \frac{R_L}{\omega L_3}$ é o fator de qualidade da carga e $Q_{3L} = \frac{Q_3 Q_L}{Q_3 + Q_L}$ [26]. Analisando 4.11, quanto maiores os valores de k_{23} , Q_2 , Q_3 , maior será a eficiência na transferência de potência. Percebe-se, no entanto que diferentemente dos circuitos não ressonantes, os circuitos ressonantes podem atingir maiores eficiências para distâncias maiores, pois mesmo que o valor de k_{23} caia com o aumento da distância, os valores de Q_2 e Q_3 podem ser ajustados para minimizar a diminuição do valor de η_{23} .

4.3 Laser óptico

Em geral, o princípio de funcionamento da transmissão de energia sem condutores metálicos com laser óptico é bastante similar ao usado na transmissão via microondas que

será explicado na próxima seção. Estes dois métodos levam vantagem quando se estuda o sistema do SPS, pois como mostrado na figura 2.6, existem basicamente 2 janelas de mínima diminuição da energia eletromagnética transmitida do espaço para a terra causada pela atmosfera. É justamente nessas janelas que estão alocados os comprimentos de ondas usados nas transmissões sem condutores metálicos via laser óptico e microondas. Existem para cada tecnologia suas vantagens e desvantagens. Os lados positivos da tecnologia de laser óptico são: a produção, por parte dos lasers, de radiação eletromagnética coerente em fase, isto é todas ondas que compõem o feixe estão em fase; o laser pode atingir densidades de energia maiores que a radiação RF e, os equipamentos de transmissão e recepção de energia são menores do que aqueles utilizados na tecnologia de transferência via microondas [28].

Os feixes de laser podem ser produzidos através de dispositivos conversores de estado sólido, por equipamentos de laser a gás ou ainda por geradores de lasers com bombeamento da luz solar. Este tem a vantagem em relação àqueles uma vez que não necessita de energia elétrica para sua produção e, por isso, pode atingir maiores eficiências [28].

Depois da sua geração o laser é direcionado para o receptor. Este possui um painel fotovoltaico que realiza a conversão da energia eletromagnética luminosa em energia elétrica.

Os pontos negativos da tecnologia de laser óptico são as conversões, principalmente a conversão de laser para energia elétrica que é efetuada através de painéis fotovoltaicos. Analisando novamente a tabela 2.1 percebe-se que a máxima eficiência obtida em laboratório por painéis fotovoltaicos é de aproximadamente 40%. Considerando que em um sistema real a eficiência seria certamente menor do que este valor, então há uma perda considerável da energia neste processo.

Vários testes já foram realizados com transmissores, via laser óptico, de energia sem condutores metálicos. No entanto, a tecnologia de transmissão com microondas e seus testes estão mais avançados e foram mais largamente estudados do que aquela tecnologia [28]. O próximo tópico será destinado ao estudo da transmissão de energia sem condutores metálicos via microondas.

4.4 Microondas

Os primeiros avanços no sentido de realização de transmissão eficiente de grande quantidade de energia via microondas foram realizados no final dos anos de 1950. Provavelmente, o primeiro teste de transmissão de energia utilizando-se microondas foi realizado no Raytheon's Spencer Laboratory em 1963. Neste experimento 100 W de potência DC foram transmitidos por uma distância de pouco mais de 6 metros com uma eficiência DC-DC de aproximadamente 13% [19]. Logo após, em 1964 William C. Brown realizava o vôo teste do helicóptero para o qual era fornecida energia através de microondas enviadas de um transmissor no solo. O vôo durou 10 horas com uma altitude do helicóptero em relação ao transmissor superior a 18 metros.

Estes primeiros passos impulsionaram a continuidade dos estudos com a transmissão de energia via microondas. Nos anos que se sucederam vários testes foram realizados e maiores eficiências DC-DC eram obtidas a cada teste.

No ano de 1975, quando já existia o conceito do SPS feito por Peter Glaser, a NASA realizou em Goldstone nos Estados Unidos, no laboratório a céu aberto do Jet Propulsion Lab, uma das mais complexas transmissões de energia com microondas já feita. Neste teste foi transmitida energia por uma distância de 1.6 km com uma potência de saída do receptor de 30 kW. A disposição dos equipamentos no teste pode ser vista na figura 4.3. Como pode-se observar a energia DC de saída foi utilizada para iluminar um conjunto de lâmpadas. Para realizar esta transmissão foi utilizada uma antena parabólica de 26 metros de diâmetro como transmissora e um "phased array" de 270 elementos de dipolo.

Desde o começo do desenvolvimento deste tipo de tecnologia várias montagens com diferentes combinações de equipamentos foram testadas. No entanto, uma estratégia se sobressaiu às demais tornando-se o padrão. Este é um processo de 3 etapas as quais são: conversor DC-RF da energia, transmissão da energia sem condutores metálicos através das antenas de transmissão e de recepção e por fim conversão RF-DC. A figura 4.4 traz esse processo com as 3 etapas bem definidas.



Figura 4.3 : Teste de transmissão de energia via microondas em Goldstone, Estados Unidos [29]

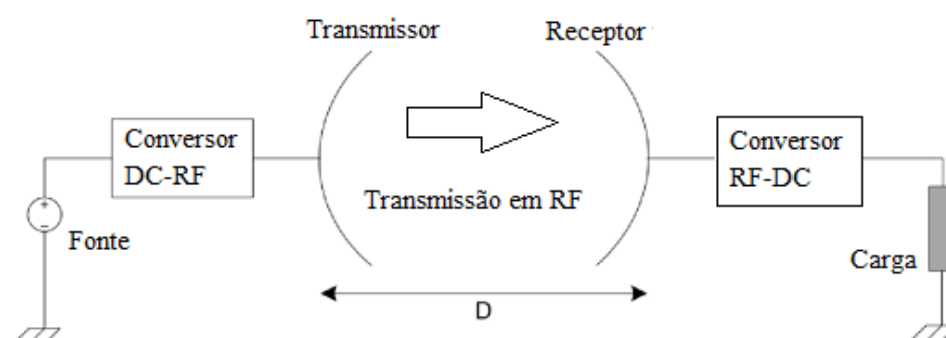


Figura 4.4 : Etapas do processo de transmissão de energia via microondas [23]

Para analisar a eficiência total de transmissão de energia via microondas é necessário que se estude cada etapa do processo em separado, só então é possível a obtenção da eficiência total do sistema.

4.4.1 Conversor DC-RF

A primeira análise a ser feita é a do conversor DC-RF. Os conversores DC-RF mais comuns são: o magnetron, klystron, tubo de ondas progressivas e dispositivos

semicondutores. Estes são largamente utilizados, porém tem uma limitação grande de potência para altas frequências [23]. O magnetron tem uma eficiência relativamente boa e pode atingir altos valores de potência de saída. Estudos recentes mostram que dependendo das condições os magnetrons podem atingir eficiências próximas de 90%, porém com uma alta dependência da temperatura, uma vez que com o aumento desta a eficiência do dispositivo diminui. No entanto, na existência de controle térmico a eficiência do magnetron pode ser constante [31]. Por esses motivos em projetos de alta potência os magnetrons são frequentemente usados. O funcionamento dos magnetrons é relativamente simples. Um filamento que se encontra em uma cavidade ressonante é aquecido por uma corrente externa. Com o aquecimento, elétrons serão liberados através do processo de emissão térmica. Atravessando a cavidade ressonante na direção paralela ao filamento existe um campo magnético que desvia os elétrons fazendo com que estes viajem em uma trajetória circular dentro da cavidade. Esta corrente produzida dentro da cavidade ressonante irá produzir radiação eletromagnética que será então radiada. A frequência da onda produzida depende das dimensões físicas do ressonador [30].

O magnetron ou qualquer outro conversor é acoplado à antena de transmissão que é a segunda parte do sistema de transmissão de energia via microondas. A análise do fluxo de energia entre as antenas de transmissão e recepção será feita no próximo tópico.

4.4.2 Transferência de energia entre antenas

A análise da transferência de energia entre antenas para este sistema é a mesma feita na seção 3.7, isto é, a equação de Friis é também válida para os estudos de transmissão de energia por microondas. No entanto, para o desenvolvimento da equação de Friis na seção 3.7 foi considerado que as antenas de transmissão e recepção se encontravam no espaço livre. Em outras palavras, foram desconsiderados os múltiplos caminhos que as ondas podem percorrer. Para um sistema como o SPS esta consideração pode ser feita sem maiores interferências no resultado final. No entanto, para sistemas de transmissão na terra essa aproximação não pode ser feita, uma vez que há diversas possibilidades de reflexão da onda na superfície. Logo, um termo adicional deve ser introduzida na equação 3.37, a fim de contemplar a possível existência de múltiplos caminhos para as ondas radiadas. A nova equação com o termo de múltiplos caminhos da onda pode ser escrita como:

$$\frac{P_r}{P_t} = e_r e_t (1 - |\Gamma_t|^2)(1 - |\Gamma_r|^2) \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 D_t(\theta_t, \phi_t) D_r(\theta_r, \phi_r) |\widehat{\mathbf{p}}_t \cdot \widehat{\mathbf{p}}_r|^2 \alpha \quad (4.12)$$

O termo adicional α no final da equação contabiliza justamente os diferentes caminhos que podem existir entre a antena transmissora e a receptora. Esse termo é descrito matematicamente como [23]:

$$\alpha = \left| 1 + \sum_{n=1}^N \Gamma_n \frac{D}{D_n} e^{-\frac{j2\pi}{\lambda}(D_n - D)} \right|^2 \quad (4.13)$$

Onde n é a n -ésima onda que saiu do transmissor e atingiu o receptor, Γ_n é o coeficiente de reflexão de cada anteparo ou obstáculo presente no caminho da n -ésima onda e D_n é o comprimento total do caminho que a n -ésima onda percorre. D é o comprimento do caminho direto, isto é sem reflexões, da transmissora para a receptora. A análise desta fórmula indica que o cálculo completo de todas as possíveis rotas das ondas da transmissora requer que saibamos exatamente todas as peculiaridades do ambiente no qual está acontecendo a transmissão [23]. Isso na prática é muito complicado, sendo a simulação uma abordagem mais recomendada.

A equação 4.12 já é uma expressão de eficiência da transferência entre as duas antenas, uma vez que o lado esquerdo traz a divisão da potência da receptora com a da transmissora. Essa fórmula leva em conta vários termos, dentro os quais: a eficiência de transmissão das antenas; se estas estão casadas com as respectivas linhas de transmissão; o comprimento de onda da transmissão; a distância entre receptor e transmissor; as diretividades das antenas; o termo comparativo entre as polarizações das antenas, e por fim, as possíveis contribuições dos múltiplos caminhos.

4.4.3 Conversor RF-DC

A terceira e última etapa da transmissão de energia via microondas é a conversão RF-DC. Os elementos que fazem parte dessa conversão são a antena de recepção, um filtro passa banda de entrada, um circuito retificador e por fim um filtro DC de saída como mostrado na figura 4.5 [2]. Os filtros são necessários para evitar problemas de reflexão com frequências diferentes das projetadas para os circuitos. Esse conjunto é geralmente denominado em inglês como “rectenna”. Pela similaridade dos termos, neste trabalho esse sistema será chamado de rectena. Para o cálculo da eficiência da rectena será desconsiderada a eficiência da antena,

uma vez que este fator já está inserido na fórmula 4.12. A eficiência do conjunto é basicamente a potência que é oferecida para a carga, dividida pela potência que a antena de recepção entrega ao circuito. Matematicamente tem-se:

$$\eta_{RF-DC} = \frac{P_{outDC}}{P_{in}} = \frac{V_{outDC}^2}{R_L P_{in}} \quad (4.14)$$

Onde V_{outDC} é a tensão nos terminais da carga e R_L é a resistência da carga. A tensão presente nos terminais da carga vai depender da topologia usada para o circuito retificador. A retificação pode ser feita de várias maneiras. Considerando que a tensão que é disponível na entrada do circuito retificador geralmente não é a tensão adequada para a carga, isto é a tensão é baixa para o nível pedido na carga, é sugestivo então que o circuito retificador seja também um elevador de tensão. Na figura 4.6 pode ser visto uma topologia de circuito retificador elevador de tensão chamado de Cockcroft-Walton / Greinacher / Villard charge pump.

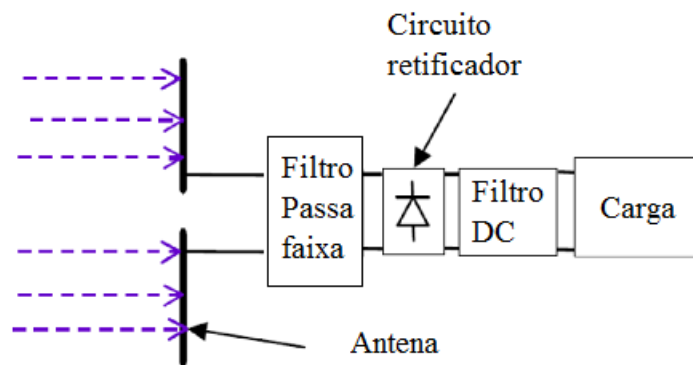


Figura 4.5: Elementos básicos de uma rectena[23](modificado)

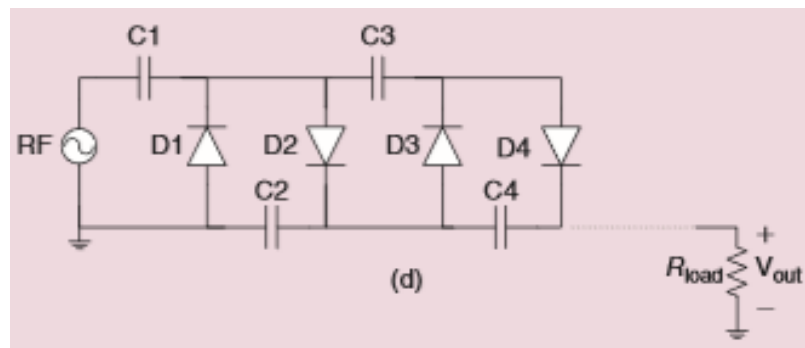


Figura 4.6: Exemplo de circuito retificador e elevador de tensão [2]

Como o objetivo da transmissão sem condutores de energia é obter a maior eficiência possível, os circuitos retificadores como o da figura 4.6 utilizam, na maioria das vezes, diodos Schottky. Estes dispositivos têm menor tensão de ativação e menores valores de capacitância de junção quando comparados com outros tipo de diodo, o que aumenta a eficiência do sistema [2]. Testes recentes de circuitos com diodos Schottky, feitos com arsenieto de gálio e platina, mostram que a eficiência de retificação está ultrapassando os 90% dependendo das condições do sistema [2].

Depois da análise das 3 partes separadas do sistema de transmissão via microondas, pode-se obter a expressão da eficiência total do conjunto. Esta eficiência será basicamente a eficiência dos subsistemas multiplicadas, como se segue:

$$\eta_{total} = \eta_{DC-RF} * \eta_{transmissao} * \eta_{DC-RF} \quad (4.15)$$

Onde $\eta_{transmissao}$ é a equação 4.12 e os outros dois termos vão depender dos equipamentos utilizados para montagem do sistema, como mencionado nos parágrafos acima.

A transmissão de energia sem condutores metálicos via microondas é a tecnologia mais comumente usada no SPS, pois sua capacidade de transmissão eficiente para grandes distâncias é alta e, dependendo da frequência utilizada na onda, a atenuação na atmosfera é baixa. O transmissor de energia via microondas é na verdade um dos subsistemas do SPS. No próximo capítulo os subsistemas do SPS serão melhor analisados.

5. Descrição do Satellite Power System (SPS) e projetos

O “Satellite Power System” é um conceito de gerador de energia elétrica. A geração de eletricidade é feita por um satélite alocado fora do planeta em uma órbita geossíncrona. Essa energia seria transmitida via radiação eletromagnética, especificamente microondas, que seria coletada em uma estação na terra. Nesta estação ocorreria a conversão de energia eletromagnética em energia elétrica que poderia ser utilizada. Este conceito foi mostrado em 1968 em "Power from the Sun: Its Future, Science", (Vol. 162, November 22, 1968, pp 857-861) do Dr. Peter E. Glaser. Esta ideia pode ser vista na figura 5.1

São grandes as vantagens do sistema como descrito no parágrafo anterior em relação a sistemas fotovoltaicos na terra. Talvez os melhores pontos desse tipo de tecnologia são: como a geração é realizada no espaço e a disponibilidade de radiação solar é maior do que em solo, logo a produção de energia é superior do que se fosse gerada na terra com a mesma área de painel solar; dependendo da órbita e da disponibilidade de outros equipamentos pode-se obter uma geração de 24 horas por dia; e por último como está localizado fora da terra o SPS seria imune a condições da natureza que prejudicassem a produção de energia. Isto nos revela que o SPS poderia garantir geração de energia eficiente e segura.

Este capítulo objetiva estudar os subsistemas do SPS e a transferência de potência total do sistema, assim como os projetos de implementações desse sistema por parte da NASA e da Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA).

5.1 Subsistemas do SPS

O SPS pode ser dividido em duas partes. A primeira é o conjunto do satélite que fica na órbita geoestacionária, no espaço. A segunda é o conjunto em solo, o que recebe a energia.

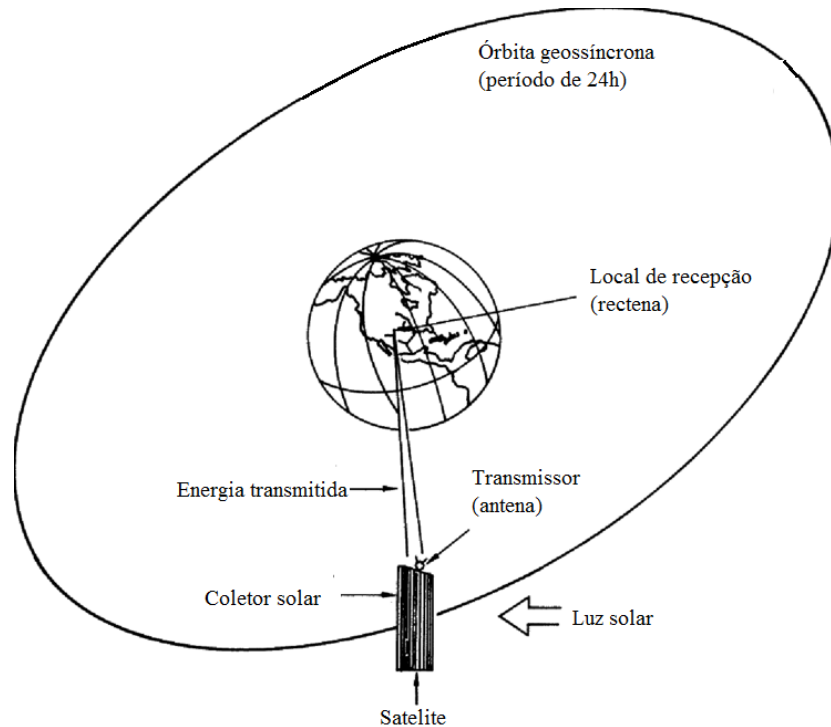


Figura 5.1: Satellite Power System [6](modificado)

O sistema do satélite pode ser dividido em subsistemas, dentre os quais: geração de potência, distribuição de potência, transmissão de potência via microondas, estrutura, controle da atitude e do sistema estacionário, controle térmico e comunicação e gerenciamento de dados [32].

No sistema em terra a divisão em subsistemas é: rectena ou recepção e retificação e distribuição de potência [32].

Neste trabalho serão abordados apenas os subsistemas de geração de potência, transmissão de potência via microondas e rectena.

5.1.1 Subsistema de potência

O subsistema de potência é formado basicamente de um gerador que proverá a energia para todo o sistema. Vários conceitos já foram contemplados em projetos de SPS. Alguns dos conceitos são: gerador fotovoltaico, gerador térmico e gerador nuclear. Para a análise

consideraremos o gerador de energia fotovoltaico que é o mais comum e segundo estudos o mais promissor. Um dos motivos é que este gerador possui a melhor relação $\frac{kW}{Kg}$ [6].

Os tipos mais comuns de painéis fotovoltaicos no SPS são os de arsenieto de gálio GaAs; os arsenieto de gálio-alumínio GaAlAs; silício ou os de multijunção. Dependendo do tipo as eficiências dos painéis podem variar. Para o arsenieto de gálio, por exemplo, a eficiência é de 18,2% para uma temperatura de 125°C.

Tendo a eficiência total do SPS e a potência desejada na saída que será entregue para a carga, a área dos painéis solares pode ser dimensionada como descrito na fórmula:

$$A_{\text{painéis}} = \frac{\frac{P_{\text{saídaSPS}}}{\eta_{\text{total}}}}{G_{\text{espaco}}} m^2 \quad (5.1)$$

Onde $P_{\text{saídaSPS}}$ é potência de saída entregue à carga, η_{total} é a eficiência total do SPS, isto é de todos os subsistemas e G_{espaco} em $\frac{W}{m^2}$ é a densidade de energia da radiação solar no espaço, ou seja, onde os painéis do SPS estão localizados. Depois de calculada a área dos painéis, outro parâmetro importante a se calcular será o arranjo dos painéis. Este arranjo dependerá dos requisitos de tensão e corrente dos outros subsistemas [32].

Outros equipamentos fazem parte do subsistema de geração de potência, como por exemplo, os refletores para aumentar a área equivalente dos painéis; os filmes protetores de radiação solar ou cósmica que prejudicam os painéis solares e etc [6]. Tais equipamentos são essenciais para o bom funcionamento dos painéis, porém a análise de cada um deles será omitida neste texto.

5.1.2 Subsistema de transmissão de potência via microondas

Após a geração da energia pelos painéis fotovoltaicos, ela será direcionada para os conversores DC-RF. Mais tarde a energia em RF será injetada na antena aonde ocorrerá a radiação, justamente como já explicado na seção 4.4. Este subsistema lida com o problema de transmitir energia de uma órbita geossíncrona para terra por uma distância de aproximadamente 36000 km. Foi visto anteriormente que a potência da onda recebida caia com o quadrado da distância. Como a distância é muito grande, técnicas elaboradas deverão ser empregadas no sistema de transmissão de energia via microondas para que uma

quantidade de energia suficiente chegue ao receptor. Os elementos importantes na parte da transmissão são: os conversores DC-RF, a antena e sua geometria, o controlador de fase da onda na antena e o tamanho e geometria da reatena.

Os conversores DC-RF comumente usados são os klystrons e os magnetrons por causa da grande capacidade de potência de saída destes dispositivos [32]. Estes conversores devem alimentar as antenas de forma a obedecer a uma distribuição de potência previamente dimensionada. A distribuição pode ocorrer na forma de uma Gaussiana, a fim de se obter uma concentração maior de densidade de potência no centro da antena [32]. Estes conversores podem trabalhar com eficiências constantes se o controle térmico for realizado nas suas proximidades [31].

As antenas utilizadas na transmissão no SPS são os chamados “phased arrays”. Com elas é possível realizar o chamado controle de fase, permitindo grande precisão na concentração e direcionamento do lóbulo principal da radiação, mesmo sob condições não homogêneas e variantes no tempo da ionosfera [6]. O controle de fase permite ainda que os lóbulos secundários sejam diminuídos ou até suprimidos, aumentando assim, a eficiência e a segurança da transmissão, uma vez que a presença de tais lóbulos pode ser prejudicial aos sistemas de comunicação na terra [33].

O projeto do “phased array” juntamente com o controle de fase tem que levar em conta diversos fatores. Talvez esta seja uma das partes mais importantes do sistema. Esse dimensionamento definirá, por exemplo, como será irradiada a energia e por isso quanto de energia chegará à antena de recepção. Além disso, a densidade de potência na antena de recepção e nos seus arredores é um parâmetro de projeto sensível, uma vez que níveis não adequados de densidade de radiação podem afetar seres humanos e a natureza. O nível máximo de intensidade de radiação para a frequência de 2.45 GHz, por exemplo, padronizado nos Estados Unidos assim como no European standard CENELEC 50166-2 é de $10 \frac{mW}{cm^2}$ em locais públicos [6 e 34]. Na figura 5.2 podem ser vistos os limites para a radiação eletromagnética propostas pela CENELEC 50166-2. Logo o projeto deve dimensionar o sistema a fim de se obter uma intensidade de radiação fora da reatena, em solo, abaixo dos valores limites.

A transferência de potência entre a antena de transmissão e a reatena será regida pela fórmula desenvolvida na seção 4.4.

5.1.3 Subsistema da rectena

A rectena (antena e circuito retificador) recebe a energia transmitida pelo satélite em órbita. Para que a rectena receba energia suficiente sua área efetiva tem que ser grande, da ordem de dezenas de quilômetros quadrados [6].

A rectena deve ser também um “phased array” para que grandes ganhos sejam alcançados. A energia eletromagnética recebida é convertida em energia elétrica e é então retificada pelos circuitos retificadores. Para tal, diodos Schottky são muito recomendados [2]. Os equipamentos que compõem a rectena são basicamente aqueles apresentados na seção 4.4.3. Depois que a energia é convertida em DC, ela pode ser convertida para energia AC e assim ser injetada na rede para o consumo. Com isto finaliza-se a cadeia de geração do SPS.

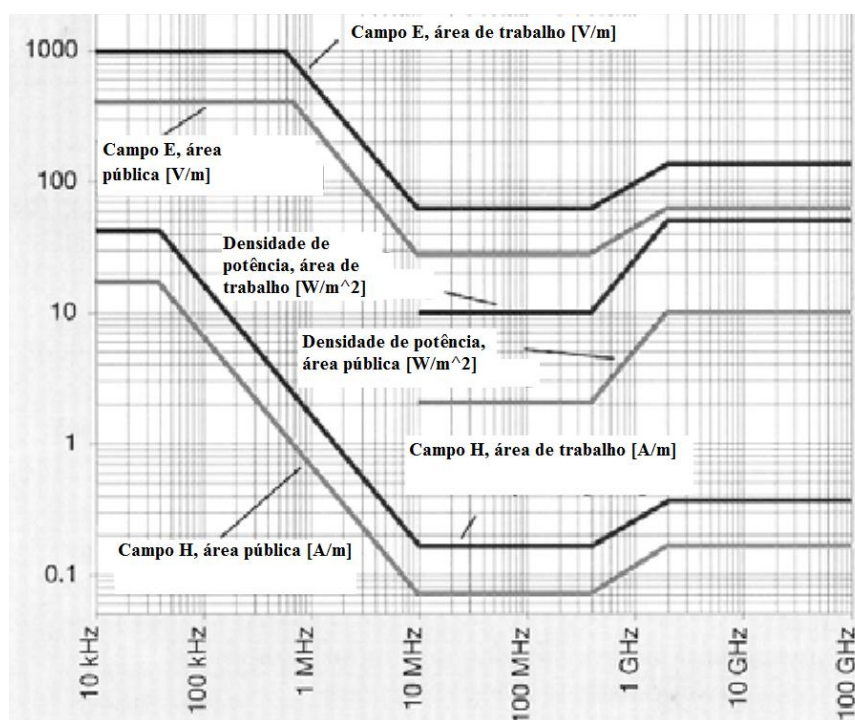


Figura 5.2: Valores limites para a radiação eletromagnética segundo a CENELEC 50166-2[34]

5.2 Fórmula sugerida da transferência de potência do SPS

Com a análise dos principais subsistemas do SPS, pode-se então desenvolver uma fórmula da entrega de potência total do sistema, desde a geração de energia DC até a entrega da energia DC para a utilização. O procedimento para obter tal fórmula foi analisar o comportamento da eficiência de cada subsistema, isto é, como variam essas eficiências. Depois dessa análise inicial, fez-se um estudo das eficiências dos subsistemas em conjunto vendo assim como as eficiências conjuntas variavam para então poder calcular a transferência de potência total do SPS. A seguinte análise considerou apenas os subsistemas de geração de energia, o de transferência de energia via microondas e o sistema da rectena. Porém, para uma análise mais detalhada os subsistema foram divididos da seguinte maneira: geração de energia; conversor DC-RF; transferência de energia via microondas; a qual as antenas de transmissão e de recepção estão incluídas e por fim conversor RF-DC.

A entrada de energia do sistema será propiciada pelos painéis fotovoltaicos. Logo após o dimensionamento de suas áreas, pode-se calcular a potência gerada através da fórmula:

$$P_{\text{painéis}} = G_{\text{espaco}} * A_{\text{painéis}} * \eta_{\text{painéis}} \quad (5.2)$$

Onde $P_{\text{painéis}}$ é a potência gerada pelos painéis, G_{espaco} é a densidade de radiação solar no espaço, onde estão localizados os painéis, $A_{\text{painéis}}$ é a área total dos painéis e $\eta_{\text{painéis}}$ é a eficiência dos painéis que depende do tipo do material dos painéis.

Como já dito anteriormente, a potência dos painéis é entregue ao conversor DC-RF. Dependendo do conversor e das condições de operação o conversor DC-RF pode ter uma eficiência constante. Admitindo este caso, a potência de saída do conversor DC-RF pode ser escrita em função da potência de entrada e da eficiência como:

$$P_{\text{saídaDC-RF}} = P_{\text{entradaDC-RF}} * \eta_{\text{conversorDC-RF}} \quad (5.3)$$

Esta potência de saída será injetada na antena de transmissão, então ocorrerá a radiação dessa energia que será captada pela antena de recepção. Essa transferência energética pode ser quantificada, como já mostrado através da equação 4.12, logo:

$$P_{rsáida} = P_{tentrada} e_r e_t (1 - |\Gamma_t|^2)(1 - |\Gamma_r|^2) \left(\frac{\lambda}{(4\pi r)} \right)^2 D_t(\theta_t, \phi_t) D_r(\theta_r, \phi_r) |\widehat{\mathbf{p}}_t \cdot \widehat{\mathbf{p}}_r|^2 \alpha \quad (5.4)$$

Onde $P_{rsáida}$ é a potência de saída da antena de recepção e $P_{tentrada}$ é a potência de entrada na antena de transmissão. Os demais termos foram explicados na seção 4.4.2 e 3.7.

A potência de saída da antena de recepção será introduzida no conversor RF-DC. Se o valor de potência de entrada nos retificadores for relativamente maior do que um valor mínimo estabelecido, como é o caso do SPS, então a eficiência desses conversores pode ser considerada também constante mesmo que esse valor de potência varie [32]. Logo, a potência de saída do conversor RF-DC é descrita como:

$$P_{saídaRF-DC} = P_{entradaRF-DC} * \eta_{conversorRF-DC} \quad (5.5)$$

Onde $P_{saídaRF-DC}$ é a potência de saída do conversor RF-DC, e também do SPS, que será entregue à carga, $P_{entradaRF-DC}$ é potência de entrada nesse conversor e $\eta_{conversorRF-DC}$ é sua eficiência.

Com a análise de cada subsistema, pode-se pensar agora no conjunto. Com isto, percebe-se que a potência de entrada em cada subsistema, dada certas circunstâncias esclarecidas acima, não interferirá na eficiência desse sistema em específico. Em outras palavras a divisão $\frac{P_{saída}}{P_{entrada}}$ será uma constante, conservando as condições necessárias, para todos os subsistemas analisados. Isto indica que a eficiência de cada subsistema dependerá de suas próprias características e condições sendo independente dos outros subsistemas. Com esse pensamento podemos escrever assim a fórmula de transferência de potência de um SPS como se segue:

$$P_{saídaSPS} = G_{espaco} * A_{paineis} * \eta_{paineis} * \eta_{conversorDC-RF} * e_r e_t (1 - |\Gamma_t|^2)(1 - |\Gamma_r|^2) \left(\frac{\lambda}{(4\pi r)} \right)^2 D_t(\theta_t, \phi_t) D_r(\theta_r, \phi_r) |\widehat{\mathbf{p}}_t \cdot \widehat{\mathbf{p}}_r|^2 \alpha * \eta_{conversorRF-DC} \quad (5.6)$$

Os termos da equação 5.6 são os mesmos das equações 5.3, 5.4 e 5.5. Essa fórmula é uma expressão que tenta quantificar a potência de saída de um SPS, levando em consideração os subsistemas de geração de energia, conversão DC-RF, transmissão de energia via microondas e conversão RF-DC. Os demais sistemas não são contemplados por esta fórmula. No entanto, se os subsistemas restantes também tiverem eficiências constantes para determinadas situações, uma simples adição do termo da eficiência de cada subsistema na equação 5.6 poderia levar em conta seus efeitos. Esta expressão será validada para um caso específico no próximo capítulo com testes reais e simulações.

5.3 Projeto dos EUA

O estudo dos EUA através da NASA de construir um SPS foi, talvez, o mais completo projeto de um SPS já desenvolvido. Porém, aparentemente, o SPS americano nunca saiu do papel. As discussões a cerca do projeto começaram nos anos 70 e se estenderam pelos anos 80. O resultado dessas análises foi uma grande quantidade de informação reunida em diversos documentos como o “Satellite Power System Concept Development and Evaluation Program” de 1978. Esses trabalhos descrevem um projeto de construção de um SPS para produção de energia a ser injetada na rede de transmissão de energia elétrica nos EUA. Os pontos mais importantes do projetos serão aqui discutidos.

5.3.1 Descrição geral do sistema

O SPS americano deveria estar operante no ano 2000 e geraria 5GW de energia elétrica por ano. O sistema no espaço operaria em uma órbita geoestacionária. A frequência de operação seria 2.45 GHz, dentro da janela de pouca atenuação da radiação por parte da atmosfera terrestre. Esta frequência traria também um bom compromisso entre tamanho da antena necessário e nível de atenuação do espaço livre que dependem do comprimento de onda. Isto é, se se tentar aumentar a potência gerada através do aumento do comprimento de onda é necessário também que se aumente o tamanho das antenas, o que gera custos adicionais. Por outro lado se diminuirmos o tamanho das antenas, o comprimento de onda tem

que ser diminuído, reduzindo, por conseguinte, a troca de potência entre as antenas. Logo, a frequência de 2.45 GHz balanceia essas duas características. O sistema seria projetado para durar 30 anos. A seguir serão comentadas as especificações de cada subsistema separadamente [6].

5.3.2 Geração de energia

O gerador de energia primária seria um gigantesco painel solar, preferencialmente, de GaAIAs. As suas dimensões seriam 10500 metros de comprimento por 5250 metros largura. A espessura seria superior a 450 metros. A figura 5.3 mostra essas dimensões.

Logo, a área total de painel seria de $55,13 \text{ km}^2$. Pode ser visto ainda na figura 5.3 a antena de transmissão em formato circular. A eficiência das placas seria de 18,2% a 125°C .

5.3.3 Transmissão de energia via microondas e retificação

Os conversores DC-RF usados seriam os klystrons de eficiência 80,85% que alimentariam, na frequência de 2.45 GHz, um “phased array” de 1 km de diâmetro com distribuição de potência Gaussiana de 10 dB sobre sua área. O seu ganho seria entre 83-85 dB. O projeto previa uma densidade de energia máxima na antena de $22 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$. A concentração de potência no lóbulo principal e a diminuição ou supressão de lóbulos secundários seria feita pelo controle de fase no “phased array”. A potência total injetada na antena seria aproximadamente de 6.96 GW. A eficiência de transmissão seria algo em torno de 96%.

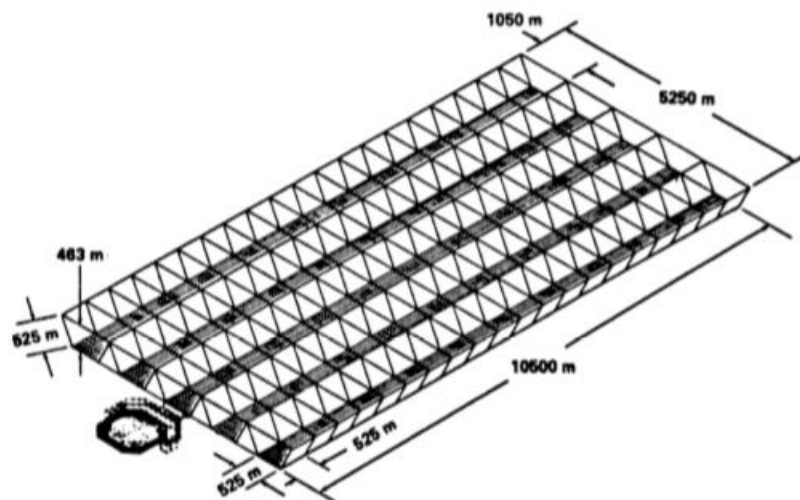


Figura 5.3: Configuração e geometria do módulo solar no SPS americano [6]

A rectena usaria diodos schottky para realizar a retificação da energia e seria também um “phased array” de painéis dentados perpendiculares à radiação incidente. Somados os painéis teriam área efetiva total de $78,5 \text{ km}^2$ e área total de aproximadamente 130 km^2 . A potência captada pela rectena é de 5.79 GW , com eficiência de 89%. A densidade de energia na rectena teria a seguinte característica: no centro ela teria um valor máximo de $23 \frac{\text{mW}}{\text{cm}^2}$ e nas bordas essa densidade seria de $1 \frac{\text{mW}}{\text{cm}^2}$ seguindo um decaimento não linear. O primeiro lóbulo secundário teria $0.08 \frac{\text{mW}}{\text{cm}^2}$. Isto deixaria uma margem de duas ordens de magnitude do limite praticado pelos EUA de $10 \frac{\text{mW}}{\text{cm}^2}$, sendo assim totalmente seguro para humanos e para a natureza [6]. Na figura 5.4 é mostrada a variação da densidade de potência na rectena em função da distância do centro do lóbulo principal que é coincidente com o centro da rectena. Dada a entrada de potência na antena transmissora e a potência de saída captada pela receptora, mencionadas acima, então a eficiência do sistema de transmissão de energia via microondas no SPS americano seria de $\frac{5.79}{6.96} = 83\%$. Se usarmos a equação de Friis para este sistema, assumindo o casamento das antenas com as linhas de transmissão, a igualdade de polaridade das antenas e a ausência de caminhos múltiplos, pode-se calcular o ganho da antena de recepção. Então, o ganho da rectena seria de aproximadamente de 106 dB, considerando o ganho da transmissora como 85 dB.

A eficiência total do SPS depois da geração de energia seria de 63%. Isto é da entrada DC antes do conversor DC-RF até a saída do conversor RF-DC, os subsistemas juntos teriam uma eficiência total de 63% [6]. Este número demonstra a incrível capacidade desse sistema para transmissão de energia sem a necessidade de condutores.

Como antes mencionado o SPS americano, aparentemente, nunca foi construído. No entanto, alguns testes de sistemas foram realizados com o propósito de estudo das tecnologias presentes no SPS. O teste em Goldstone, mostrado na figura 4.3, foi um dos ensaios de estudo para o SPS.

Regularmente estudos do SPS são refeitos pelos americanos, sem no entanto, mostrarem qualquer movimento para a construção real do SPS.

5.4 Projeto do Japão

O Japão por meio da sua empresa aeroespacial, a JAXA, também planeja construir um SPS. Mesmo não tendo descrições de projetos e estudos detalhados iguais aos feitos pela NASA, a JAXA juntamente com a Mitsubishi Heavy Industries têm realizado testes em solo de transmissão de energia via microondas. O teste de mais sucesso até agora realizado em conjunto com essas duas empresas foi feito em março de 2015. No ensaio foram enviados 10 kW de potência por 500 metros [35]. O princípio de funcionamento desta tecnologia é o mesmo já estudado na seção de transmissão de energia via microondas. Na figura 5.5 podem ser vistas as antenas de transmissão na esquerda e de recepção na direita as quais foram usadas nos testes.

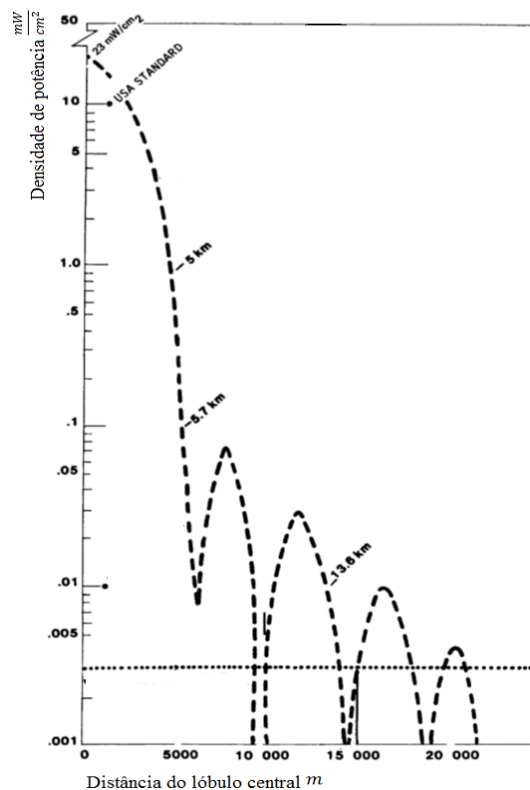


Figura 5.4: Densidade de potência na rectena como função da distância a partir do lóbulo principal [6]

O plano da JAXA é ter um SPS em funcionamento em 2030 com capacidade de produção de 1 GW [35].



Figura 5.5: Antenas usadas no teste de transmissão de energia via microondas realizado pela JAXA e Mitsubishi Heavy Industries. A esquerda é mostrada a antena de transmissão e na direita a de recepção. [37]

6. Protótipo em menor escala do SPS

O estudo do tema de transmissão de energia via microondas, como parte integrante do SPS, requereu que fosse desenvolvido um protótipo em menor escala que pudesse simular na prática alguns dos subsistemas do SPS. Com este protótipo foi possível testar, apenas em solo terrestre, o funcionamento desse sistema. Os subsistemas do SPS contemplados no protótipo construído foram: subsistema de geração de energia, conversor DC-RF, transmissão de energia via microondas e conversão RF-DC.

Com este protótipo além de analisar partes técnicas da transmissão de energia sem condutores metálicos foi possível ainda analisar, para este teste, a fórmula desenvolvida na seção 5.2. Os detalhes da construção, desenvolvimento e análise dos experimentos são descritos a seguir.

6.1 Equipamentos necessários para a construção do protótipo

O uso de alguns equipamentos já prontos foi necessário no desenvolvimento do projeto, uma vez que a construção de tais equipamentos exigiria um nível elevado de infraestrutura. Outras partes do protótipo foram montadas. Todos os equipamentos utilizados serão explicados nesta seção.

6.1.1 Fonte solar de energia

Assim como no SPS, a fonte geradora de energia no protótipo foi um módulo solar. Esse módulo foi composto de 6 painéis que geram, cada, 2V de tensão de circuito aberto e 0.7 A de curto circuito para condições de irradiância de $1000 \frac{W}{m^2}$ e de temperatura de 25°C. A disposição dos painéis no módulo foi especialmente montado para este experimento, o qual 3 painéis foram colocados em série, fazendo-se assim 2 conjuntos que foram ligados em paralelo. O módulo gera assim 6 V de tensão de circuito aberto e 1.4 A de corrente de curto circuito. No entanto para atender os requisitos dos demais equipamentos era necessária uma geração de 5 V. Para tal, foi usado um controlador de tensão 7805. Embora o datasheet deste equipamento alerte que a tensão mínima de funcionamento é de 7 V, o dispositivo funcionou perfeitamente com a tensão de 6V de entrada.

6.1.2 Conversor DC-RF e transmissor de energia via microondas

O conversor DC-RF e transmissor do protótipo foi adquirido já pronto na empresa POWERCAST. O produto comprado foi o TX91501 que recebe 5V DC e 1A, realiza a conversão para energia em RF e depois a transmite para o meio. A transmissão da energia ocorre na frequência de 915 MHz, na faixa de microondas. O aparelho tem uma potência de saída de 3 W “Equivalent Isotropic Radiated Power” EIRP. O lóbulo principal tem largura de 60° e ângulo de inclinação de 60°. A polarização é vertical. Este produto possui ainda um modo de comunicação que não foi usado nos experimentos. A eficiência total de conversão DC-RF e transmissão de potência neste equipamento pode ser determinada como:

$$\eta = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} = \frac{3}{5} = 60\%$$

O datasheet não informa, mas muito provavelmente o conversor DC-RF é um dispositivo de estado sólido, pois estes são os mais apropriados para a conversão neste nível de potência. Embora o conversor seja diferente do normalmente utilizado no SPS, a análise continua sendo válida uma vez que a onda eletromagnética de mesma frequência e potência produzida com outro dispositivo não teria nenhuma alteração em relação à gerada neste experimento. A figura 6.1 mostra o gerador fotovoltaico, o conversor DC-RF e transmissor da POWERCAST e sua fonte original.

6.1.3 Receptor e conversor RF-DC

A terceira parte do protótipo é o receptor e conversor RF-DC que também foi comprado da POWERCAST. O produto adquirido foi a P1110-EVB. Esta plataforma na verdade faz a conexão de dois sistemas, a antena de recepção e o conversor RF-DC. O conversor RF-DC, o P1110 receiver, tem uma eficiência de conversão entre 20 - 70%, baixo consumo de potência, tensão de saída configurável e operação com potência de entrada mínima de -5dBm e máxima de 23 dBm. Juntamente com a plataforma, existe a possibilidade do uso de duas antenas da própria POWERCAST. A primeira antena é omnidirecional, tem polarização linear e com ganho linear de 1.25 ou 1.0 dBi. A segunda antena é direcional com polarização vertical. O diagrama de radiação possui orientação azimutal de 122° e vertical de 68°. O ganho desta é 4.1 linear ou 6.1 dBi. As duas antenas são projetadas para funcionar com

maior rendimento na frequência de 915 MHz, assim como o conversor RF-DC. Na figura 6.2 podem ser vistos os equipamentos descritos nesta seção e os leds usados nos testes que serão esclarecidos em breve. Os circuitos internos do conversor RF-DC são , ao que tudo indica, algo similar ao circuito apresentado na figura 4.6, uma vez que será necessário elevação e controle da tensão para níveis variados de potência de entrada nesse conversor.

A partir desses equipamentos foi montado o experimento para simulação de um SPS em solo. Os detalhes do experimento serão esclarecidos na próxima seção.



Figura 6.1: Módulo solar construído e conversor DC-RF e transmissor da POWERCAST

6.2 Montagem do experimento e resultados

Nos testes iniciais foi utilizada a fonte do TX91501, ao invés do módulo solar construído, para se obter resultados mais constantes. Logo, era fornecida energia para o

conversor DC-RF e transmissor através da fonte que gera 5 V DC quando ligada à rede de 220V. Estes dois equipamentos representam, comparativamente com o SPS, a geração de energia, conversão dela de DC para RF e sua transmissão no ar. Iniciamos o experimento energizando o sistema e medindo a potência do sinal para distâncias de 2,2 e 3 m entre o transmissor e receptor.

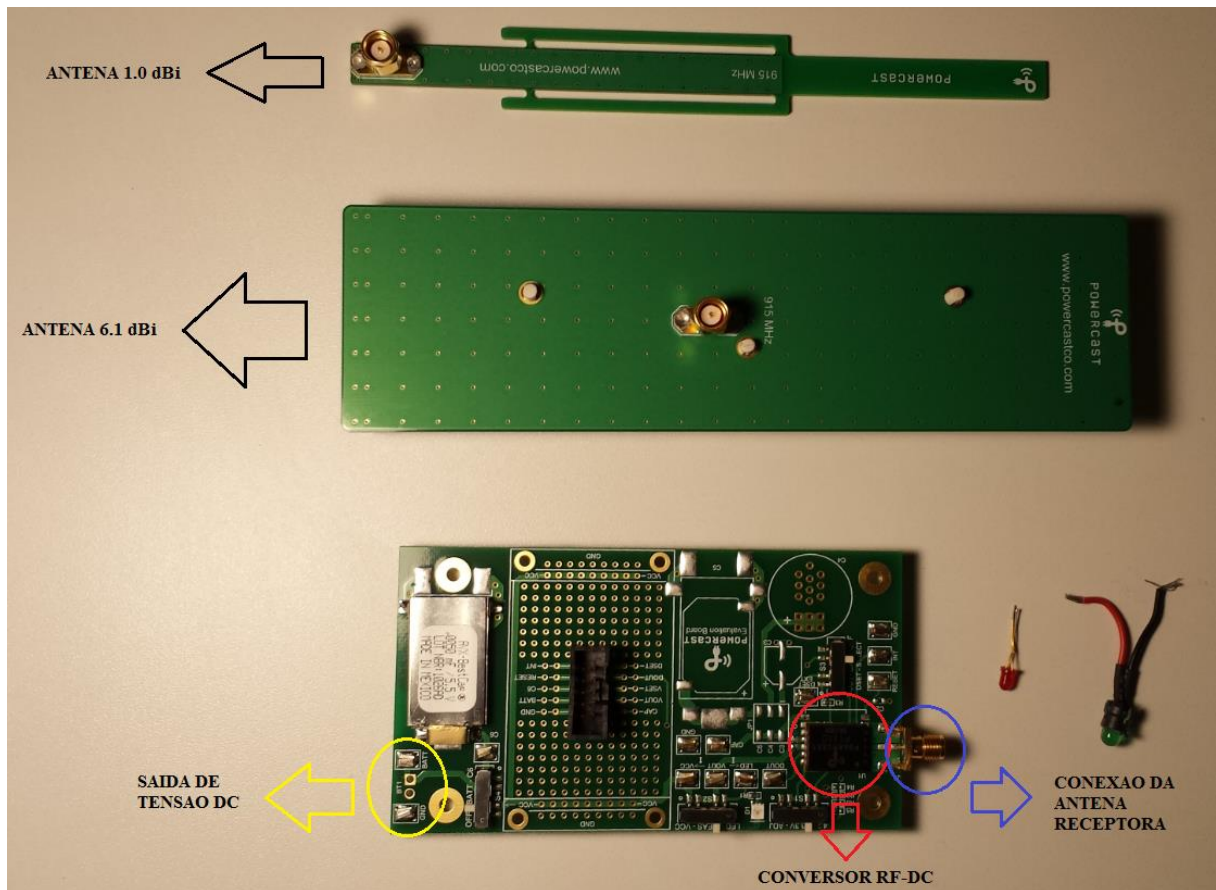


Figura 6.2: Receptor e conversor RF-DC e antenas de ganhos 6.1dBi e 1.0dBi

Para captar a energia que será medida por um analisador de espectro foram utilizadas as antenas mostradas na figura 6.2. Isto geraria uma melhor comparação, já que as antenas mencionadas seriam utilizadas no teste com todos os equipamentos. O analisador de espectro foi o N9912A da Agilent Technologies. Este equipamento tem impedância de entrada nominal de 50Ω que pode ser modificada dependendo da ligação do aparelho com a antena. A disposição dos equipamentos foi feita como mostrado na figura 6.3. Como pode ser visto nessa figura o conversor DC-RF e transmissor foi energizado, logo ele está no modo transmissão, isto é, radiando energia no meio. A 3 m de distância se encontra o analisador de espectro com antena de entrada de ganho 6.1 dBi. Neste teste a disposição da antena fez com que as polarizações da transmissora e da própria receptora fossem iguais, uma vez que a

polarização delas é vertical. Com isso garantiu-se um maior nível de potência medido. Além da medição mostrada na figura 6.3 outras duas foram realizadas. Uma outra medição foi também feita a 3 m de distância, porém com a antena de recepção fixada horizontalmente. Isto faria com que o nível de energia captado por esta antena caísse bastante, uma vez que as polarizações das duas antenas seriam ortogonais entre si. A última medição foi feita para uma distância de 2.2 m e com a antena de recepção na vertical.



Figura 6.3: Disposição dos equipamentos na medição inicial

O resultado das medições para as configurações anteriormente descritas podem ser vistos nos gráficos 6.1, 6.2 e 6.3.

O gráfico 6.1 mostra que nas proximidades da frequência central, 915 MHz, foi captado aproximadamente 0 dBm, ou 1 mW, de potência. Percebe-se que a onda radiada é de banda curta.

Já no gráfico 6.2 pode ser notada a grande diferença em relação ao gráfico 6.1. A diferença da disposição da antena e, por conseguinte as diferentes polarizações das antenas, gerou um queda de mais de 20 dBm do pico do sinal de potência. O pico em 915 MHz para este caso tem uma potência de 0.01 mW ou -20dBm . Em outras palavras, a potência perdeu em 100 vezes seu nível de magnitude devido a diferenças de polarização. Observa-se então que o casamento de polarizações das antenas é fundamental na transmissão de energia via microondas.

O gráfico 6.3 mostra outro interessante aspecto da transmissão quando comparado com o gráfico 6.1. Observa-se que aquele gráfico, para a distância de 2.2 metros, tem uma largura de banda na potência 0 dBm maior que a largura do gráfico 6.1. No entanto, não foram registrados picos de potência maior na medição a 2.2 metros de distância.

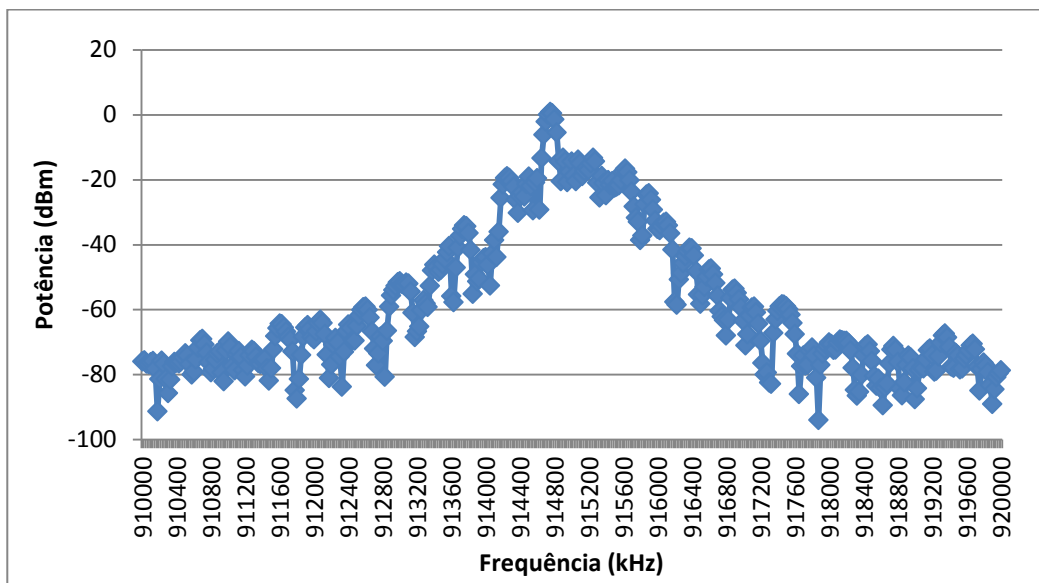


Gráfico 6.1: Medição da potência a 3 metros de distância com a antena de recepção na vertical

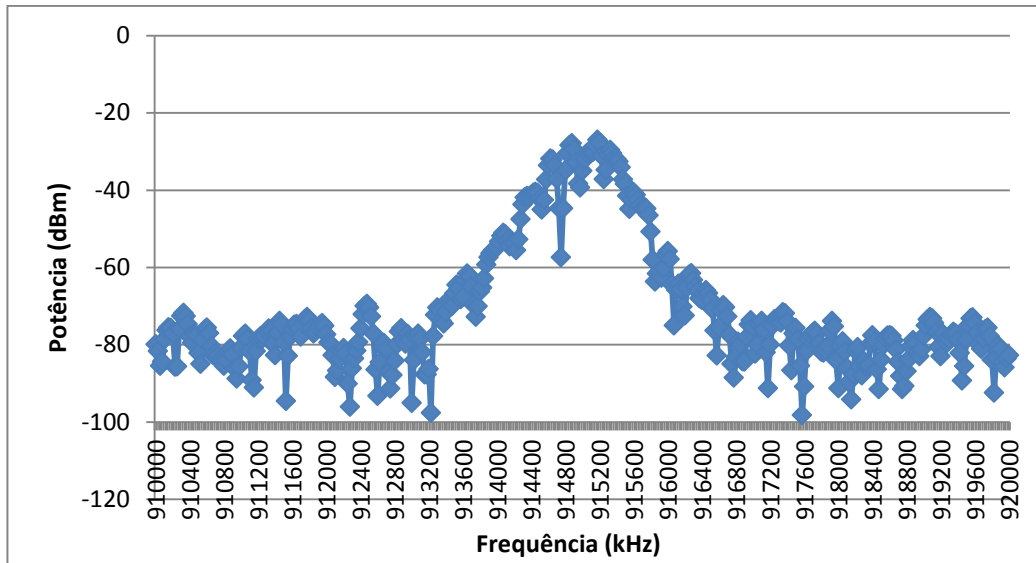


Gráfico 6.2: Medição da potência a 3 metros de distância com a antena de recepção na horizontal

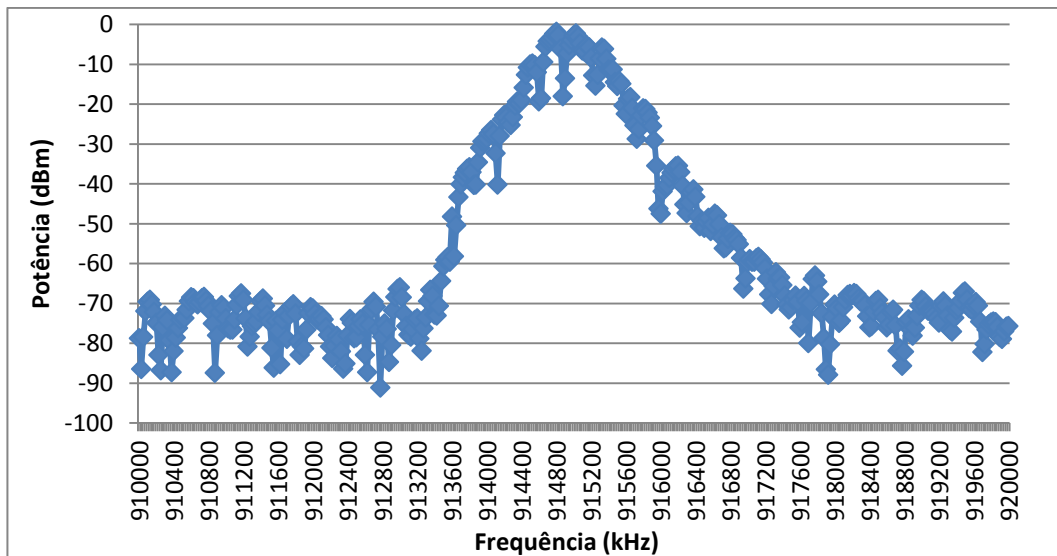


Gráfico 6.3: Medição da potência a 2.2 metros de distância com a antena de recepção na vertical

Medições para distâncias mais próximas entre as antenas não foram realizadas, pois o limite de potência do equipamento da Agilent Technologies seria ultrapassado. Inicialmente pensava-se em realizar a transmissão de energia via microondas para uma distância de, no máximo, 1 m. No entanto, estes testes iniciais mostraram que níveis de potência razoavelmente grandes eram coletados para distâncias de 2.2 e 3 m. Logo, a ideia inicial foi alterada para que se realizassem testes nessas distâncias maiores.

Outra observação importante é a comparação dos níveis de potência medidos com os que serão encontrados nos testes com o sistema completo, isto é, com o receptor e conversor RF-DC. As potências mostradas nos gráficos não serão as mesmas para os testes com o todos equipamentos. Uma vez que a antena foi produzida para o circuito conversor RF-DC, eles certamente têm as impedâncias casadas. Esta afirmação não vale para a antena e o analisador de espectro, pois para a conexão deles foi necessário um cabo de conexão que descasou esses dois equipamentos. Logo, as magnitudes de potências dos dois casos serão diferentes. No entanto, mesmo não mostrando a magnitude que realmente será oferecida para o conversor RF-DC, os gráficos gerados pelo analisador de espectro indicam a forma da onda que será encontrada e ainda foram de fundamental importância para analisar certas peculiaridades da transmissão, como, por exemplo, a necessidade de igualar as polarizações.

O próximo passo foi então realizar as medições para o sistema completo. A montagem do experimento para este teste pode ser vista na figura 6.4.

Na figura estão presentes o conversor DC-RF e transmissor energizados e o receptor e conversor RF-DC. Na parte direita do conversor RF-DC pode ser vista a luz vermelha, do led interno do conversor, indicando que há presença de energia DC. Nota-se que o conversor RF-DC encontra-se sobre uma placa metálica. Isto foi necessário, pois este circuito é muito sensível a descargas eletroestáticas e por isso uma minibancada metálica aterrada de testes foi montada para proteção do circuito. Pelo mesmo motivo manuseios no conversor só podem ser realizados com o uso de pulseiras anti cargas estáticas.

Todos os testes realizados com o sistema completo foram feitos com a antena de ganho 6.1 dBi, pois apenas com esta se obtinha potência suficiente para acender os leds mostrados na figura 6.2.

Como pode ser visto na imagem 6.4 as antenas foram colocadas com a mesma polaridade vertical. Com esta montagem foram realizados testes para distâncias de 2.2 m, 3.0 m e 4.73 m separando o transmissor do receptor. As medições para esta distância foram posteriormente realizadas, pois os resultados com as outras duas foram bastante positivos, o que nos incentivou a medir a capacidade da tecnologia. No entanto, a disposição dos equipamentos foi alterada para a distância de 4.73 metros, o que poderia gerar diferenças consideráveis nas medições. Essa diferença do local dos equipamentos pode ser percebida nas

figuras 6.3 e 6.4. Para simular uma carga, o led vermelho menor, mostrado na figura 6.2, foi utilizado. A tabela 6.1 mostra os resultados das medições.

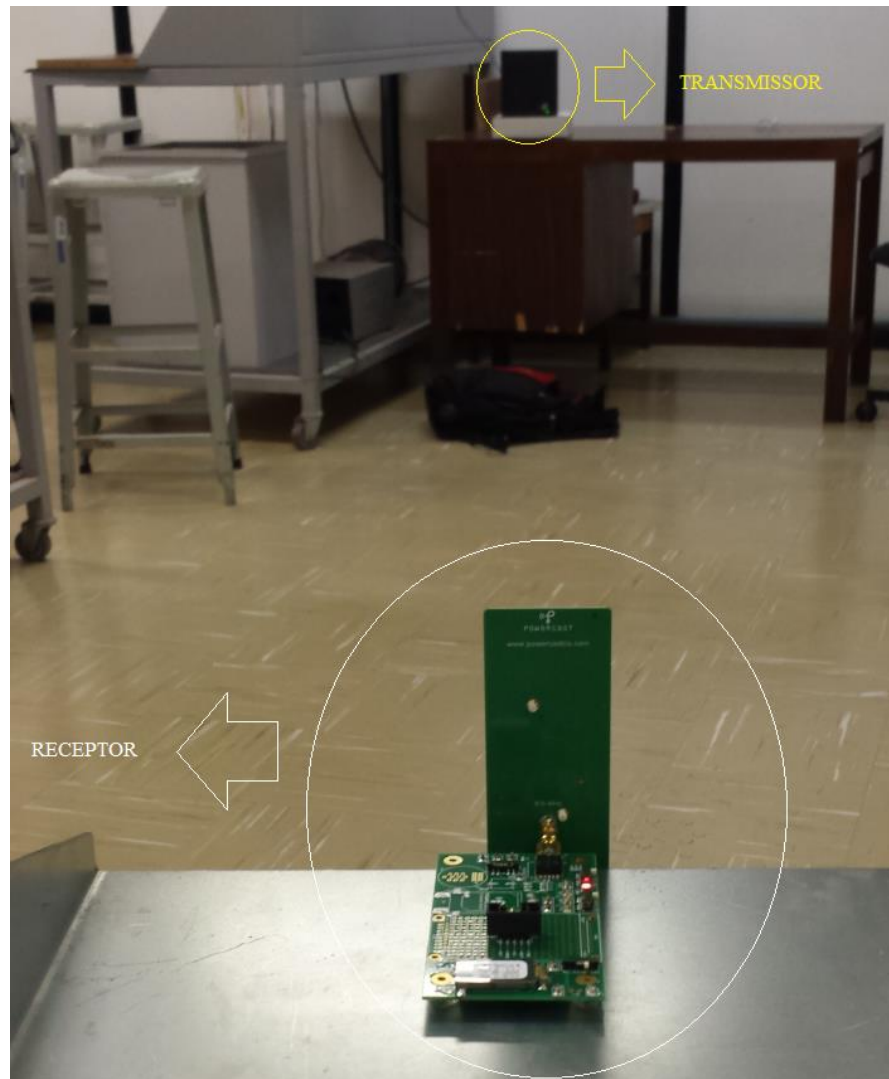


Figura 6.4: Teste para o sistema completo

Tabela 6.1: Resultados das medições para distâncias de 2.2, 3 e 4.73 metros

Distância(m)	Tensão(V)	Corrente (mA)	Potência(mW)
2.2	1.66	1.4	2.324
3.0	1.63	0.74	1.206
4.73	1.6	0.56	0.896

Algumas conclusões podem ser extraídas desses resultados. Antes, porém é importante lembrar que na medição do analisador de espectro o nível de potência máximo foi de 1 mW

para as distâncias de 2.2 e 3 metros. Na medição com o conversor RF-DC a potência medida na saída foi de 2.324 mW e 1.206 mW para as mesmas distâncias. Isto, como já dito, deve-se à diferença de casamento de impedâncias entre os equipamentos.

Considerando a entrada do sistema como 5 W, podemos analisar a eficiência total para cada caso. Para 2,2 metros tem-se $\eta_{2.2} = 0.046\%$, para 3 metros $\eta_3 = 0.024\%$ e para 4.73 metros $\eta_{2.2} = 0.018\%$.

Comparando as potências dos testes para 2.2 e 4.73 metros nota-se algo curioso. Segundo a fórmula de Friis a potência deveria cair com o quadrado do aumento da distância, no entanto, mais que dobrando a distância de 2.2 para 4.73 metros a potência caiu apenas para aproximadamente 40 % do valor inicial. Isto se deve muito provavelmente à formação de caminhos múltiplos, advindos da diferença de localização dos testes, que aumentaram a potência do sinal no receptor.

Neste ponto foi necessário que os testes fossem feitos em outro ambiente para avaliar o possível efeito dos múltiplos caminhos em outro local e comparar resultados com o primeiro experimento. Logo, exatamente o mesmo procedimento descrito anteriormente foi desenvolvido para esta segunda parte dos testes. A disposição dos equipamentos neste segundo teste é mostrada na figura 6.5. Neste experimento outras medições foram feitas além das mostradas na tabela 6.1, dentre as quais: 2.2, 3, 3.5, 4, 4.5 e 4.73 metros. Novamente o led foi usado como carga. Os resultados das medições podem ser vistos na tabela 6.2.

Tabela 6.2: Resultados das medições para distâncias de 2.2, 3,3.5,4,4.5 e 4.73 metros para outro ambiente

Distância(m)	Tensão(V)	Corrente (mA)	Potência(mW)
2.2	1.5	1.9	2.85
3	1.46	1.8	2.628
3.5	1.442	0.26	0.3749
4	1.4	0.11	0.154
4.5	1.41	0.17	0.2397
4.73	1.43	0.25	0.3575

Uma comparação entre as tabelas 6.1 e 6.2 é inevitável. Analisando as distâncias em comum, percebe-se que para a distância de 2.2 metros a variação foi pequena. No entanto, para a distância de 3 metros a potência saltou de 1.206 mW no primeiro teste para 2.268 mW

no segundo teste. Logo, a potência mais que dobrou. Para a distância de 4.73 metros a potência abaixou de 0.896 mW para 0.3575 mW. Isto evidencia claramente a influência dos múltiplos caminhos, uma vez que exatamente os mesmos equipamentos foram utilizados, porém resultados diferentes foram obtidos.

Se a análise da tabela 6.2 for feita separadamente, percebe-se que a diferença de potência da distância de 2.2 metros para 3 metros praticamente não diminui. Mais uma vez isto indica a formação, para uma das distâncias ou para as duas, de múltiplos caminhos que acabaram compensando a queda da potência que seria causada com o aumento da distância. Já a comparação das medidas de 2.2 metros e 4.73 metros é inversa da feita na tabela 6.1 para as mesmas distância, uma vez que ao dobrar a distância a potência caiu quase 8 vezes. Aqui uma formação de caminhos da onda fez com que a potência do sinal fosse diminuída. Além da geometria do ambiente, os coeficientes de reflexão dos anteparos no espaço podem ter gerado as diferenças entre os dois testes.

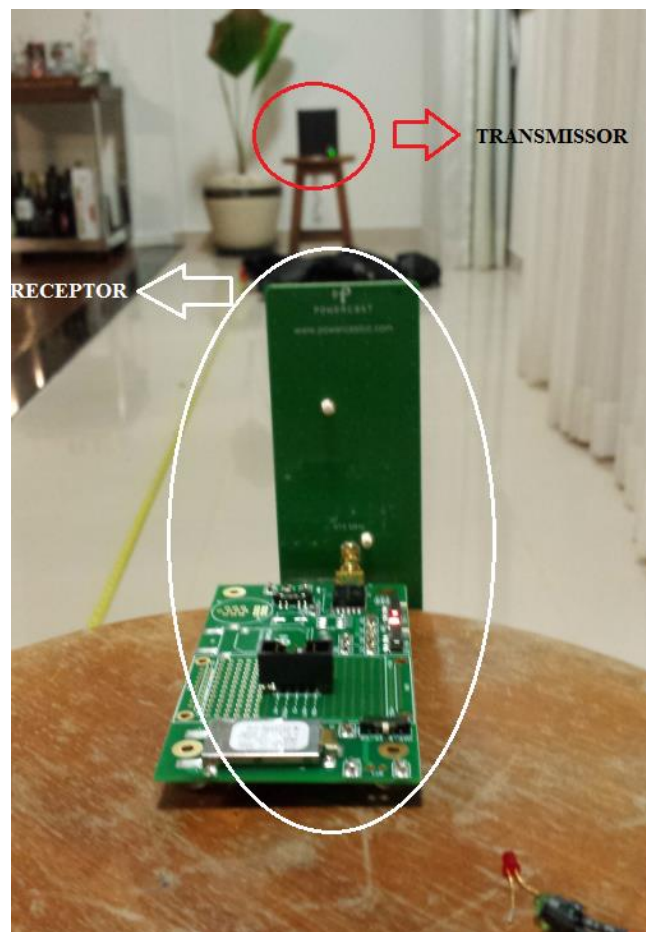


Figura 6.5: Teste com o sistema completo para outro ambiente

As potências de saída dos dois testes podem, a primeira vista, parecer muito reduzidos em relação à transmissão. No entanto, devemos lembrar que as antenas utilizadas têm ganhos pequenos. Antenas com ganhos medianos de 15 ou 20 dB fariam as potências de saída e também as eficiências aumentarem significativamente.

Para as distâncias testadas nos dois testes o nível de tensão permaneceu quase constante, o que reforça a ideia de que o circuito conversor RF-DC, além de fazer essa conversão, realiza também uma elevação e controle do nível de tensão.

Estes testes acima viabilizaram o estudo dos subsistemas do SPS, guardada as devidas proporções, em solo. Assim, além dos dados apresentados, uma ideia mais sólida do sistema foi desenvolvida através destes experimentos.

6.3 Comparação entre a simulação da fórmula e resultados do protótipo

De posse dos resultados anteriores podemos assim verificar, para o experimento do protótipo nos dois ambientes, a validade da fórmula da transferência de potência desenvolvida na seção 5.2. A fórmula foi simulada no programa MatLab®.

Lembrando mais uma vez que como essa fórmula é derivada da equação de Friis, ela somente será válida para campos distantes. Isto é, a análise com essa fórmula só poderá ser feita a partir de distâncias $D_{min} > \frac{2D^2}{\lambda}$, onde λ é o comprimento de onda e D é a maior dimensão da antena. Nos experimentos realizados a maior dimensão da antena de ganho 6.1 dBi tem 17.5 cm e o comprimento de onda do sinal de 915 MHz é de 0.328 m, então a distância mínima é de $D_{min} > 0.187$ metros. Portanto, conclui-se que a fórmula pode ser utilizada nas condições dos experimentos para qualquer distância testada.

Para simular a fórmula algumas constantes tiveram seus valores predefinidos. O valor da irradiância solar é dado como $1000 \frac{W}{m^2}$, a área do painel $0.05m^2$, eficiência do painel 10%, a eficiência de conversão DC-RF juntamente com a eficiência de transmissão da antena é de 60% como citado na seção 6.1.2 para o TX91501, comprimento de onda do sinal $\lambda = 0.328$

metros, eficiência de recepção da antena de recepção de 95% e conversão RF-DC igual a 57%. Esta última eficiência foi retirada do datasheet da POWERCAST. Além disso, as outras constantes da fórmula: $(1 - |\Gamma_t|^2)$, $(1 - |\Gamma_r|^2)$, $|\hat{\mathbf{p}}_t \cdot \hat{\mathbf{p}}_r|^2$ e α foram consideradas iguais a 1. Isso significa que assumimos que há casamento de impedâncias das antenas com as suas linhas de transmissão, que as polarizações têm ângulo de 0° entre si e que não existem múltiplos caminhos. Supor esta última condição pode ser um problema para a acurácia da fórmula já que nos testes verificamos diferenças causadas por múltiplos caminhos da onda. No entanto, a análise prévia de múltiplos caminhos é bastante complexa, sendo necessárias simulações digitais o que estava fora do escopo do trabalho.

Com as constantes da fonte fotovoltaica percebe-se que na simulação ela gera para o conversor DC-RF exatamente o que ele necessitou nos testes reais. As variáveis consideradas para a fórmula são: a distância entre as duas antenas e o ganho de recepção, representando a possibilidade de troca da antena de recepção por uma de melhor ganho.

Dadas estas considerações foi simulada a expressão 5.4. Os resultados destas simulações para as mesmas distâncias dos testes práticos são mostrados na tabela 6.3. A primeira vista os resultados experimentais e da fórmula têm poucos pontos em comum ou próximos. Porém, algumas características peculiares entre os testes e a fórmula podem ser notadas. Novamente, para a simulação da expressão foi desconsiderada a existência de múltiplos caminhos, logo aqueles pontos da expressão que são iguais aos dos testes práticos são valores os quais o efeito de múltiplos caminhos não têm grande impacto no resultado.

Já os pontos de valores desiguais são aqueles que aparentemente possuem o efeito de múltiplos caminhos.

Tabela 6.3: Simulação da transferência de potência com a fórmula 5.4

Distância(m)	Potência(mW)
2.2	0.99
3	0.53
3.5	0.39
4	0.3
4.5	0.24
4.7	0.22

No teste 1 todos os pontos divergiram dos pontos da fórmula para as mesmas distâncias. Isto é, neste caso a fórmula traria resultados errôneos caso os múltiplos caminhos fossem desconsiderados. Para o teste 2, dois pontos tiveram valores bem próximos dos valores da fórmula. Estes valores aconteceram para as distâncias de 3.5 e 4.5 metros. A diferença de valores para a primeira distância foi de 0.0173 mW ou de 4.6% do valor do teste. Para o segundo ponto a diferença foi de 0.0021 mW ou 0.88% do valor inicial.

O gráfico 6.4 mostra a variação dos valores da fórmula e do teste 2 com relação à distância. Percebe-se que a maior diferença é encontrada nas menores distâncias. Logo, para distâncias maiores que 3 metros essa fórmula sem o termo dos múltiplos caminhos pode, aparentemente ser utilizada para prever a potência de saída do equipamento, uma vez que os valores dos testes foram próxima aos da simulação.

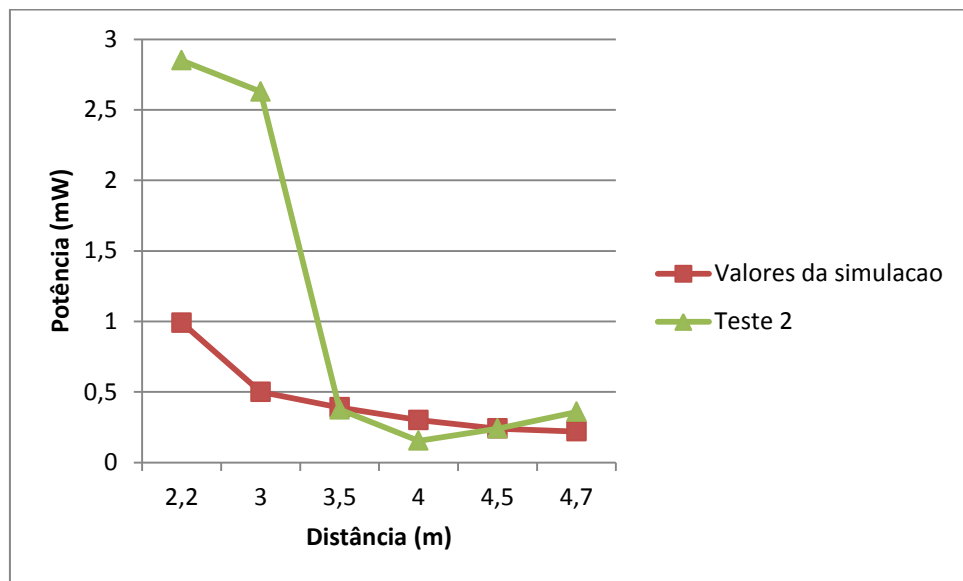


Gráfico 6.4 Comparação com os resultados da fórmula e do segundo teste

O gráfico mostrando a variação da potência em função do ganho da antena receptora e da distância é mostrado na figura 6.6. Alguns pontos que foram tema de discussão acima podem ser vistos nessa figura. Nesta figura a superfície indicada para distâncias menores do que 0.2 metros não indica o valor teórico correto da potência nas antenas, uma vez que para essa distância campos próximos têm que se considerados e a fórmula é válida apenas para campos distantes.

Concluimos assim, que para o uso desta fórmula alguns conhecimentos do ambiente, no qual a transmissão será feita, têm que ser conhecidos. Dependendo do ambiente e dos tipos de anteparos nele presentes a fórmula pode ser não eficaz. No entanto, como no caso do teste 2, ela pode ser válida para alguns pontos. As características do ambiente que determinarão se a fórmula, sem o termo de múltiplos caminhos, pode ser usada ou não é a possibilidade de existência de múltiplos caminhos causados por diversos motivos e as constantes de reflexão dos anteparos presentes no local de teste.

Foi visto que em algumas medições o valor da potência do experimento foi maior do que o calculado pela equação. Isto sugere que houve relações construtivas das ondas, aumentando assim a potência de saída. Logo, a presença de múltiplos caminhos pode ser usada como método alternativo para aumentar o valor da potência de saída do sistema.

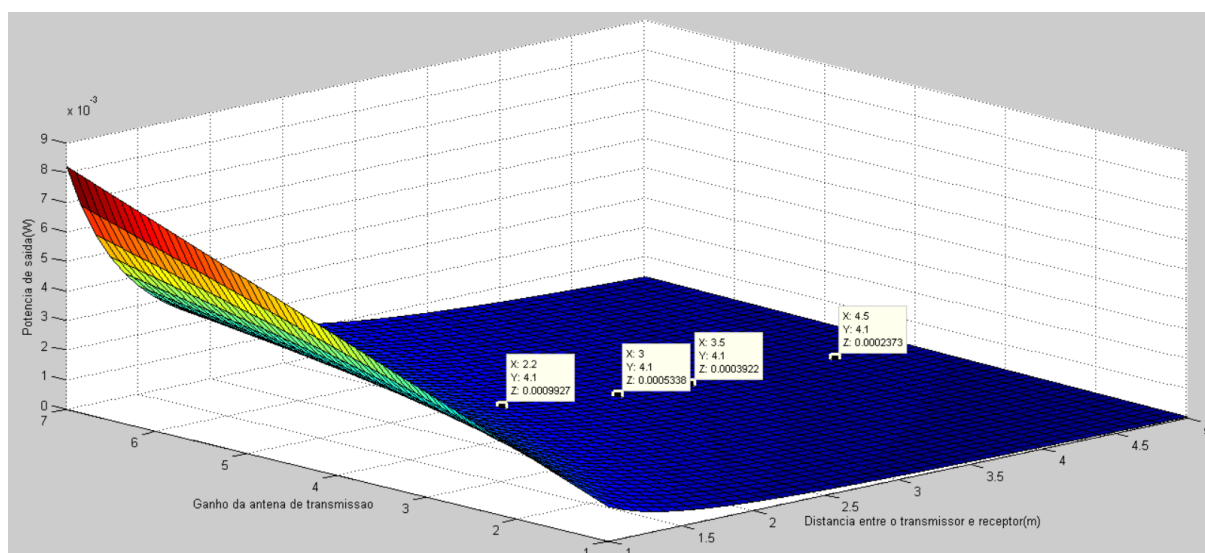


Figura 6.6: Potência em função das distâncias entre as antenas e do ganho da antena de recepção

Se possível for calcular, previamente, os múltiplos caminhos este termo poderia ser adicionado na fórmula simulada e resultados mais próximos muito provavelmente seriam obtidos. Para tal, simulações do ambiente de testes é fundamental, pois o cálculo direto do termo de múltiplos caminhos pode ser bastante complicado. Testes suplementares, aqui não feitos, serão necessários para avaliar adicionalmente a equação da potência de saída de um sistema de transmissão de energia via microondas. Experimentos com outras distâncias e até com outros equipamentos são necessários para aumentar a credibilidade da equação.

O gerador fotovoltaico não foi utilizado nos testes das seções acima, pois o uso dele demandava muito tempo e prejudicava as medições, uma vez que os valores eram

inconstantes dependendo das condições de irradiação. Após as conclusões acima mencionadas o gerador solar foi conectado ao transmissor RF. Aparentemente o gerador fotovoltaico tem potência um pouco menor do que a necessária para o transmissor, uma vez que a transmissão ficou sendo realizada em pulsos ou intermitente. No entanto, isto não desqualifica a análise feita acima. O acréscimo de uma ou duas placas no módulo solucionaria este problema e isto traria os mesmos resultados obtidos anteriormente.

7. Conclusões

7.1 Aspectos gerais

Este trabalho tem como objetivo o estudo da transmissão sem fio de energia gerada através de painéis solares como parte integrante de um “Satellite Power System”. Este é um projeto de gerador de eletricidade, o qual seria composto por duas partes. A primeira seria um satélite alocado em órbita geoestacionária, o qual seria equipado com painéis solares que gerariam energia DC. Esta energia seria convertida para energia eletromagnética na faixa de microondas e seria transmitida através de uma antena para um receptor na terra. O receptor seria uma rectena, isto é, uma antena e um circuito retificador. Depois a energia DC poderia ser utilizada.

Para o estudo da transmissão de energia via microondas do SPS, foi necessário o conhecimento de geração fotovoltaica e da teoria do eletromagnetismo. Estes temas foram revisados no trabalho.

Os principais métodos de transmissão de energia sem condutores metálicos foram estudados, sendo eles: acoplamento indutivo, transmissão magnética por ressonância de campo próximo, laser óptico e microondas. Como esta é a tecnologia usada no SPS, logo seus conceitos foram mais solidamente desenvolvidos.

Os subsistemas do SPS foram também estudados, porém especial atenção foi dada aos sistemas atrelados a transmissão de energia sem condutores metálicos. Dadas as características dos subsistemas foi desenvolvida uma fórmula para quantificar a saída de potência de um SPS para certas condições constantes. Um protótipo foi idealizado e montado a fim de analisar a expressão.

7.2 Principais conclusões e contribuições

As análises teóricas feitas de todos os subsistemas do SPS e do projeto desenvolvido pela NASA com o intuito de construir um SPS, mostram que este sistema pode fornecer energia com qualidade e segurança. Este sistema tem ainda inúmeras vantagens em relação aos geradores fotovoltaicos e de outras matrizes situados na superfície terrestre. Dentro os quais podemos citar: a possibilidade de geração 24 horas por dia e o sistema é imune a condições sazonais ou condições da natureza. Esse sistema pode ainda ser considerado uma fonte renovável uma vez que utiliza a luz do sol para geração. Com todos esses aspectos levantados tudo indicar a crer que o SPS é um sistema que deve ser mais estudado, uma vez que todos os seus subsistemas são viáveis, inclusive no quesito transmissão de energia sem condutores metálicos, como mostrado neste trabalho.

Os resultados com a equação mostram que para o melhor funcionamento dela é necessário o conhecimento de peculiaridades do ambiente a fim de conhecer a possibilidade de existência de múltiplos caminhos da onda. Simulações digitais específicas podem realizar tais cálculos, logo o termo de múltiplos caminhos poderia ser adicionado à fórmula, o que muito provavelmente aumentaria sua precisão. Este termo pode ainda ser usado como método alternativa de aumento da potência.

7.3 Sugestões para trabalhos futuros

Os estudos sobre transmissão, sem condutores, de energia proveniente de painéis fotovoltaicos e sobre o SPS foram satisfatórios, porém diversos outros aspectos devem ser futuramente contemplados. A seguir encontram-se recomendações por parte do autor para estudos futuros.

A primeira sugestão seria de investigação de todos os subsistemas do SPS para esclarecimento das peculiaridades de cada um, assim o processo completo da transmissão de energia via microondas para esse sistema seria conhecido.

A segunda recomendação seria a de estudar as eficiências de todos os subsistemas separados e juntos podendo adaptar a fórmula desenvolvida neste texto, com a finalidade de contemplar todos os subsistemas do SPS.

A terceira ideia é de estudar mais profundamente a transmissão de energia via microondas usando-se “phased arrays” com todas suas características. Com isso poderia ser desenvolvido outro protótipo similar ao feito, mas com o intuito de melhorar a eficiência do sistema e aumentar a potência de saída. O ascendimento de uma lâmpada de potência média seria um objetivo razoável neste caso.

A quarta e última sugestão é a de estudar a fórmula que foi desenvolvida neste trabalho para outros sistemas com variadas distâncias e para diversos tipos de ambientes. Juntamente com esses testes, “softwares” de simulação podem ser usados para estudar cada local de teste e calcular assim a contribuição dos múltiplos caminhos da onda para a potência recebida em uma antena. Com a integração deste termo na fórmula, ela certamente traria resultados mais compatíveis com os números dos testes reais. A utilização dessa fórmula no possível protótipo composto de um “phased array” seria uma ótima tentativa de continuar a testar esta equação.

Referências

- [1] TESLA, N. The transmission of electrical energy without wires as a means for furthering peace. *Electrical World and Engineer*, January 7, 1905, pp. 21-24.
- [2] CRISTOPHER, R. V; GREGORY, D. D. Harvesting Wireless Power *IEEE Microwave magazine*, May 7, 2014.
- [3] B.P Global. Disponível em : <<http://www.bp.com/en/global/corporate/about-bp/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/review-by-energy-type/oil.html>>. Acesso em: novembro 2015
- [4] UNEP – United Nation Enviroment Programme. Disponível em: <<http://web.unep.org/ourplanet/may-2015/unep-publications/global-trends-renewable-energy-investment-2015>>. Acesso em: novembro 2015
- [5] GLASER, P.E. Power from the Sun: Its Future, *Science*. Vol. 162, November 22, 1968, pp 857-861.
- [6] NASA - National Aeronautics and Space Administration; U.S DE - U.S. Department of Energy Satellite Power System Concept Development and Evaluation Program. February 1978.
- [7] NSS - National Space Society. Disponível em : <<http://www.nss.org/settlement/ssp/NASADVD/part03.htm>> Acesso em: outubro 2015
- [8] SEVERINO, M.M (2008). Avaliação Técnico-Econômica de um Sistema Híbrido de Geração Distribuída para Atendimento a Comunidades Isoladas da Amazônia. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE:TD – 027/08, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 335 p.
- [9] TOLMASQUIM, M. T. Geração de energia elétrica no Brasil. Rio de Janeiro. Editora Interciência Synergia 2005
- [10] FILHO, D. da S.(2003) Dimensionamento de usinas hidroelétricas através de técnicas de otimização evolutiva. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, Sp, 362 p.

- [11] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em : <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2009/035/contribuicao/contribuicao_brookfielddenergiarenovavel_proposta_ap035_2009_regras2010.pdf>. Acesso em: novembro 2015
- [12] CEPEL - Centro de Pesquisa de Energia Elétrica. Disponível em : <<http://www.cepel.br/main.jsp?lumPageId=21CF888C4A1692FF014A784FD2AE60D0&lumS=cepelinternet.produto&CodProduto=4028B88136E3DBC70136E40CF2E6203A&lumItemId=4028B88136E3DBC70136E40CF302203C>>. Acesso em: novembro 2015
- [13] DUTRA, R Energia Eólica Princípios e Tecnologia
- [14] Office of Energy and Efficiency & Renewable Energy. Disponível em : <<http://energy.gov/eere/wind/history-wind-energy>>. Acesso em: novembro 2015
- [15] EIA - U.S. Energy Information Administration. Disponível em : <<http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/iedindex3.cfm?tid=6&pid=37&aid=12&cid=regions&syid=2008&eyid=2012&unit=BKWH>>. Acesso em: novembro 2015
- [16] MESSENGER, R. A; VENTRE J. Photovoltaic Systems Engineering. Boca Raton. Editora CRC Press (2005)
- [17] SCHLABBACH, J. Netzgekoppelte Photovoltaikanlagen. Berlin. Editora VDE Verlag GMBH (2011)
- [18] REZENDE, S. M. Materiais e Dispositivos Eletrônicos. São Paulo. Editora Livraria da Física. 2ª Edição (2004)
- [19] RAMO, S; WHINNERY. J. R; DUZER VAN. T. Fields and Waves in Communications Electronics. New York. Editora John Willey & Sons, INC. 3ª Edição (1994)
- [20] PPAUL C, R. Eletromagnetismo para engenheiros. Rio de Janeiro. Editora LTC S.A. 1ª Edição (2004)
- [21] STUTZMAN, W. L; THIELE. G. A. Antenna theory and design. New York. Editora John Willey & Sons, INC. 1ª Edição (1981)
- [22] BALANIS, C. A. Antenna theory analysis and design. New York. Editora John Willey & Sons, INC 3ª Edição (2005)

- [23] AGBINYA, J.I. Wireless Power Transfer. Aalborg. Editora River Publishers (2012)
- [24] DUARTE, R. M; FELIC. G. K. Analysis of the coupling coefficient in inductive energy transfer systems. *Jornal Active and Passive Electronic Components*. Parkville, Australia. (2014)
- [25] KIANI, M; GHOVANLOO, M. The circuit theory behind coupled mode magnetic resonance based wireless power transmission. *IEEE Trans Circuits I Regul Pap*. (2012). Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3969023/>>. Acessado em: novembro 2015
- [26] W, B. M; SARPESHKAR, R Feedback analysis and design of RF power links for low-power bionic systems. *IEEE Trans Biomed Circuits Syst*. (2007 Mar); 1(1):28-38.
- [27] KURS, A, et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances. *Science Mag*. Vol317 (2007).
- [28] SUMMERE, L; PURCELL, O Concepts for wireless energy transmission via laser. Noodwijk, Holanda.
- [29] BROWN, W. C. The history of power transmission by radio waves. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. MIT-32 NO.9 (1984)
- [30] Communications and Power Industries, Beverly Microwave Division Magnetron theory of operation.
- [31] KAWASAKI, H. et al. The DC-RF conversion efficiency change of magnetron with thermal condition. (2007)
- [32] HALEY, G. M. Satellite Power Systems (SPS) concept definition study (exhibit D) Volume VII – System/Subsystems requirements databook NASA (March 1981)
- [33] NARITA, T. et al. The development of Solar Power System technologies. Mitsubishi Heavy Industries (December 2011)
- [34] CENELEC “Human exposure to electromagnetic fields, high frequency (10kHz – 300 GHz)” Experimental European Standard ENV 50166-2, European Committee for Electrotechnical Standardization, Paris

[35] Spectrum IEEE. Disponível em: <http://spectrum.ieee.org/energywise/green-tech/solar/japan-demos-wireless-power-transmission-for-spacebased-solar-farms>>. Acesso em: novembro 2015

[36] Energy Pedia. Disponível em: https://energypedia.info/wiki/Wind_Turbine_Technology>. Acesso em: novembro 2015

[37] Mitsubishi Heavy Industries: Disponível em: <https://www.mhi-global.com/news/story/1503121879.html>>. Acesso em: novembro 2015