

SISTEMA AUTÔNOMO DE COMUNICAÇÃO SEM FIO EM MALHA, ENERGIZADO POR ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Rafael Herrero Alonso – rherrero@lsi.usp.br
Ciro Melo – cirom@lsi.usp.br
Marcelo Knorich Zuffo – mkzuffo@lsi.usp.br
Roseli de Deus Lopes – roseli@lsi.usp.br

Laboratório de Sistema Integráveis, Departamento de Engenharia de Sistema Eletrônicos, Escola Politécnica da USP

Resumo. Com a proliferação das redes de comunicação sem fio em malha, baseadas no padrão IEEE 802.11, está restrita as grandes capitais, que possuem energia elétrica, cabeada, bem estabelecida e facilidade para instalação de uma infra-estrutura de rede de dados, com acesso a internet. A implementação de uma infra-estrutura de energia elétrica, não cabeada, para instalação de uma rede sem fio, representa um dos maiores desafios, em relação às redes atuais, que possuem infra-estrutura de energia elétrica cabeada. A proposta deste artigo é apresentar um sistema autônomo de comunicação sem fio em malha, energizado por energia solar fotovoltaica, integrados em um protótipo compacto e autônomo, denominado Sistema Autônomo de Comunicação em Malha (SACM), de baixo custo, fácil instalação em área urbana e rural, apresentando avaliação do consumo de energia do módulo de comunicação e resultados em relação à autonomia de energia, taxas de transmissão e cobertura do sistema de comunicação.

Palavras-chave: Energia Solar, Redes sem fio em malha, autonomia de energia.

1. INTRODUÇÃO

Com a expansão da tecnologia de comunicação sem fio com base no padrão IEEE 802.11, e proliferação de pontos de acesso operando nas extensões IEEE 802.11 a/b/g, sua utilização está restrita as grandes capitais que possuem energia elétrica, cabeada, bem estabelecidas e facilidade para instalação de uma infra-estrutura de rede de dados com acesso a internet.

A implementação de uma infra-estrutura de energia elétrica, não cabeada, para instalação de uma rede sem fio, representa um dos maiores desafios, em relação às redes atuais com infra-estrutura de energia elétrica cabeada.

O grupo de trabalho em redes sem fio, elaborou o grupo de trabalho “S” para o desenvolvimento do padrão 802.11s, definido como *Extended Service Set mesh* (ESS) também conhecido como rede sem fio em malha.

A maioria dos pontos de acesso da rede sem fio, em malha, não estão conectados a infra-estrutura da rede de dados cabeada. Cada ponto de acesso da rede sem fio em malha, fornece conexão para os equipamentos que estão dentro de sua área de cobertura, possibilitando a comunicação dos usuários com a internet, a partir das rotas estabelecidas entre os referidos pontos de acesso.

Com o avanço das pesquisas e o padrão IEEE802.11s, em desenvolvimento, projetos na área acadêmica e comercial, implementaram suas próprias soluções, para comunicação em redes sem fio em malha, apresentadas pelo MIT no projeto RoofNet (Bicket, Aguayo e Biswas, 2005), na Grécia definida como VMesh (Tsarmpopoulos, Kalavros e Lalis, 2005), na Universidade da Califórnia como MeshNet (Ramachandran, Belding-Royer e Almeroth, 2007), em Dublin na Irlanda no projeto CUWin (Weber et al, 2003), na UFF o projeto ReMesh (Passos et al, 2006), na Microsoft definida como Microsoft Mesh (Draves, Padhye e Zill, 2004), na Nortel (Roch, 2004).

Nestes projetos, mesmo com a eliminação dos cabos para comunicação de dados, as redes sem fio em malha, dependem de uma fonte de energia cabeada, para alimentar os dispositivos de transmissão, que são susceptíveis a vandalismo, enchentes, roedores e interferências na construção civil.

Dentro do contexto de comunicação ubíqua, novas alternativas de energia, entre elas a energia solar fotovoltaica, que converte a energia solar em energia elétrica, foi adotada no sistema proposto, para alimentação dos módulos de comunicação, utilizados nas redes sem fio em malha.

A proposta deste artigo insere-se neste contexto de pesquisa e desenvolvimento, na área de comunicação sem fio em malha, utilizando como fonte de energia alternativa a energia solar fotovoltaica, apresentando um sistema constituído por:

- Módulo fotovoltaico;
- Módulo de armazenamento, com baterias;
- Módulo de controle de energia;
- Módulo de comunicação sem fio em malha, com antena omni;

Estes módulos estão integrados em uma plataforma compacta e autônoma, de fácil instalação em área urbana e rural. Serão apresentados os resultados em relação à autonomia de energia, taxas de transmissão, cobertura e redundância do sistema de comunicação.

2. TRABALHOS RELACIONADOS

A primeira aplicação que utilizava energia solar foi idealizada pelo matemático grego Arquimedes (Thuillier, 1994), em 212 a.C., que utilizando um conjunto de espelhos, direcionava a luz do Sol para um mesmo ponto, objetivando incendiar embarcações romanas, a fim de defender Siracusa, sua cidade natal, porém, não há comprovações históricas de que esse fato realmente ocorreu.

Na atualidade a energia solar fotovoltaica, tem sido utilizada em sistemas de irrigação, eletrificação residencial em áreas isoladas, parques ecológicos, áreas rurais desprovidas da energia elétrica e telefonia pública (Cresesb, 1999). Além destas aplicações, a energia solar fotovoltaica está sendo utilizada em telefones de emergência nas estradas e rodovias.

Os benefícios da energia solar fotovoltaica estão sendo aplicados em projetos de redes sem fio em malha, com base no padrão 802.11. Projetos como o *SolarMesh*, (Badawv, Savegh, Todd, 2008) desenvolvida pelo grupo de redes sem fio da universidade McMaster no Canadá e supervisionado pelo professor Terry Todd, apresentam uma solução para interligação dos prédios no campus da universidade, instalado no ponto mais alto dos prédios.

O Projeto *Solar Wifi Grid*, desenvolvido pela organização *Green-wifi*, é fundamentado no escopo do projeto *One Laptop per Child* (OLPC), desenvolvido pelo MIT Media Lab, como uma alternativa de baixo custo para promover a inclusão digital em países subdesenvolvidos. Nesta solução, o módulo de comunicação opera com um sistema operacional Linux e segue a proposta do protocolo de roteamento desenvolvido por alunos do MIT.

Alterações no controlador de energia do projeto do *green-wifi* foram desenvolvidas para aumentar a autonomia e controlar os períodos de liga e desliga do módulo de comunicação, porém, esta solução apresenta desvantagens, em função de ter sido projetada para instalação no solo, desprovido de segurança, sendo susceptível a vandalismo e invasão do sistema operacional e em função da antena estar próxima ao solo, a Zona de Fresnel, definida para a radiação da antena, é obstruída, causando perda de potência do sinal transmitido.

Em Junho de 2007 a empresa Meraki, pioneira em desenvolver os primeiros dispositivos comerciais para redes sem fio em malha, apresentou o projeto *Meraki Solar*. Esta solução apresenta um kit de baixo custo alimentado por energia solar e operação com base no padrão IEEE802.11, para instalação em ponto mais alto de casas e prédios.

Outros trabalhos de pesquisa dentro desta linha, ainda se encontram em desenvolvimento e correspondem a projetos de formatura, iniciações científicas e pós-graduações no Brasil e no mundo.

3. VISÃO GERAL

3.1 REDES SEM FIO EM MALHA: IEEE 802.11s

As redes sem fio em malha são arquiteturas evolutivas das redes ad-hoc. Conhecida como redes sem infraestrutura ou *Independent Basic Service Set* (IBSS), as redes ad-hoc são formadas no mínimo, por duas estações (Stations - STA), que se comunicam sem a necessidade de um ponto centralizador, dentro de uma área básica de serviço, denominada *Basic Service Area* (BSA).

As redes ad-hoc têm sido intensamente pesquisadas nos últimos anos pelos centros de pesquisa, porém, a ineficiência do protocolo de roteamento, a perda de pacotes frequentes e o compartilhamento de banda (Kravets, Carter e Magalhães, 2001), comprometeram a larga utilização desta arquitetura.

Em Julho de 2004 o grupo de trabalho do IEEE 802.11 instituiu o grupo de tarefas S, para especificar uma extensão do padrão IEEE802.11, definida como sendo o padrão IEEE802.11s e especificamente conhecido como *Extendend Service Set mesh* (ESS mesh), conforme relatado no trabalho de Faccin et al. (2006).

De acordo com o documento preliminar do padrão IEEE 802.11s, a rede sem fio de área local em malha, é baseada em um *Wireless Distribution Service* (WDS) que faz parte de um *Distribution Service* (DS) do padrão 802.11, ou seja, um conjunto de equipamentos conectados por enlaces sem fio que organizam automaticamente a topologia da rede e configuram dinamicamente os caminhos entre os dispositivos.

Recentemente Carrano, Bletsas e Magalhães (2007) propuseram que as redes sem fio em malha podem ser classificadas de forma a operar com um único canal ou múltiplos canais. Embora o espectro de frequências definido para as extensões do padrão IEEE 802.11 disponibilizar múltiplos canais, na faixa de 2.4GHz e 5GHz, a maioria das implementações de redes sem fio em malha ainda operam com um único canal de frequência. (Countinho, 2007).

Conforme definido no rascunho do padrão IEEE802.11s, apresentado na Fig. 1 uma rede sem fio em malha é formada por pontos de acesso, (*Mesh Access Point* - MAP), estações clientes (*Station* - STA) e portais (*Mesh Portal* - MP). Os MAP são responsáveis por estabelecer uma malha de comunicação sem fio, com múltiplas rotas, entre os MAP da rede e fornecer cobertura para STA no raio de alcance do sinal transmitido por cada MAP. O MP é o dispositivo conversor do sinal da rede sem fio em malha para o sistema de distribuição de dados.

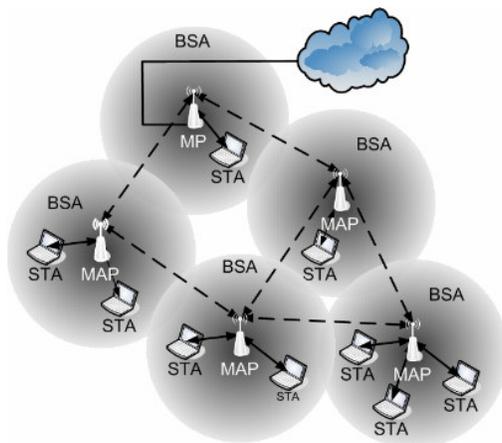


Figura 1- Componentes de uma rede sem fio em malha conforme padrão IEEE802.11s.

3.2 COMPONENTES DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO

Os módulos fotovoltaicos, também conhecidos com painéis solares, são utilizados para converter a energia solar em energia elétrica (Green, 1996).

Os módulos fotovoltaicos são compostos por um conjunto de células que, segundo Brutton (2002), podem ser fabricadas utilizando diferentes materiais como: o Silício poli cristalino, mono cristalino ou amorfo (Si), o Cobre-Índio-Gálio-Selênio (CIGS), conhecido como filme fino, o Arsênio de Gálio (GaAS) e o Telureto de Cádmio (CdTe).

Levando em consideração as vantagens e desvantagem nos matérias (Brutton, 2002), o silício cristalino tem sido considerado o material predominante na produção de células solares durante 20 anos, com tendência de crescimento voltado a fabricação células mono e poli cristalinas de alta eficiência, durabilidade e baixo custo.

A eficiência de uma célula é definida como sendo a relação entre potência produzida e a potência da radiação solar incidente na célula. Atualmente as células fabricadas em laboratório e na indústria possuem respectivamente eficiências de 24,7% e 22%, porém em linhas industriais convencionas são produzidas células com eficiência entre 14% e 15% (Zanenco e Moehlecke, 2005).

Como as células são caracterizadas por baixa tensão e corrente (Cresesb, 1999), os módulos fotovoltaicos convencionais são fabricados a partir de células agrupadas, com objetivo de alcançar maiores potências, tensões e/ou correntes (Zanenco e Moehlecke, 2005).

Na década de 70, o Brasil, como em outros países do mundo, se deparava com uma possível crise energética provinda da redução de combustíveis fósseis, de previsões do aumento da demanda e também do consumo de energia elétrica para os próximos anos, causada pelo progresso tecnológico e avanços no desenvolvimento humano. (Goldemberg e Villanueva, 2003).

Uma das possibilidades tecnológicas que poderiam suprir o fornecimento de energia neste cenário de crise é converter a energia proveniente do Sol a partir da fabricação das fotocélulas. Esta tecnologia se apresentava em um estágio avançado, resultado das implementações em programa espaciais (Cresesb, 1999).

Mesmo em estágio avançado, o custo de US\$ 600/W para produção das células solares a tornava economicamente inviável para produção em larga escala e os países iniciaram pesquisas para minimizar os custos de fabricação das células fotovoltaicas. (Cresesb, 1999).

Com o avanço da tecnologia durante os anos, novos métodos de fabricação, pesquisas e o desenvolvimento de novos materiais permitiram atingir custos de produção em larga escala de US\$ 8/W (Cresesb, 1999) e recentemente empresas estão desenvolvendo uma tecnologia revolucionária (Duren, Robinson, Leidholm, 2007), conforme apresentado na Fig. 2b, que está permitindo a comercialização de painéis solares fotovoltaicos a US\$ 1/W.

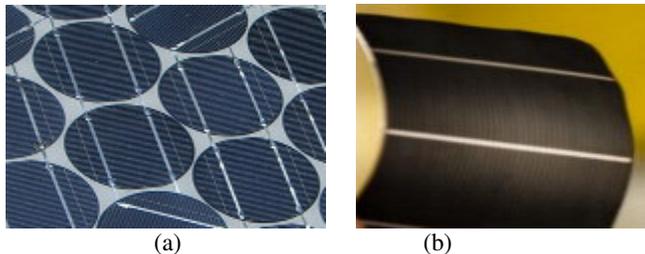


Figura 2 - (a) Painel solar fotovoltaico convencional (b) Painel solar fotovoltaico fabricado com processo de impressão de filmes finos com material CIGS pela empresa Nanosolar.

Os módulos de armazenamento utilizados em sistemas fotovoltaicos, também conhecidos banco de baterias Fig. 3, são compostos por uma ou mais baterias, tipicamente de chumbo-ácido seladas (Duryea, Islan e Lawrance, 1999) que operam como elemento armazenador de energia elétrica contínua com tensões típicas 6 V e 12 V e capacidades Ah de acordo com a autonomia projetada. Valores típicos de 12 Ah a 20 Ah para sistemas fotovoltaicos aplicados a redes sem fio.

De acordo com o Cresesb (1999), as baterias de chumbo-ácido estacionárias de ciclo profundo são recomendadas para sistemas fotovoltaicos, em função de serem projetadas para fornecer uma pequena corrente por um longo período de tempo com uma tensão estável, podendo ser descarregadas de 50 % a 60 % de sua capacidade nominal, Em comparação com os outros módulos de um sistema fotovoltaico que possuem uma vida útil de 20 a 30 anos, as baterias têm uma vida útil de 2 a 3 anos, sendo necessário à substituição das mesmas após este período.

Novas tecnologias de armazenamento de baixo custo, compactas, estão sendo desenvolvidas e nos próximos 5 anos deverão substituir as baterias convencionais.



Figura 3 – Baterias seladas de chumbo-ácido.

Os controladores de carga de baterias são dispositivos eletrônicos, discretos ou micro processados, essenciais em sistemas fotovoltaicos que empregam banco de baterias como módulo de armazenado, conforme Fig. 4.

Os controladores discretos, implementados a partir de componentes eletrônicos pré-definidos em fábrica, têm a função de gerenciar o fluxo de energia do sistema e proteger as baterias contra sobrecarga e descarga excessiva.

Os controladores micro processados, além de gerenciar a energia e proteger as baterias, executam programas armazenados em memória eletrônica, que monitoram o comportamento e efetuam ajustes automáticos no fluxo de energia, permitindo assim, aumentar a eficiência e confiabilidade durante a operação do sistema.



Figura 4 – Controladores de carga fabricados pela empresa Morningstar

4. PROTÓTIPO DO SISTEMA AUTONOMO DE COMUNICAÇÃO SEM FIO EM MALHA, ENERGIZADO POR ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (SACM)

O protótipo SACM é constituído por um conjunto de módulos, integrados em uma única plataforma compacta, autônoma e funcional, de fácil instalação em área urbana e rural.

Na Fig. 5 é apresentada a interação entre os diversos módulos, de forma a transformar a energia solar, representada por fótons, em ondas eletromagnéticas, representada por bits.

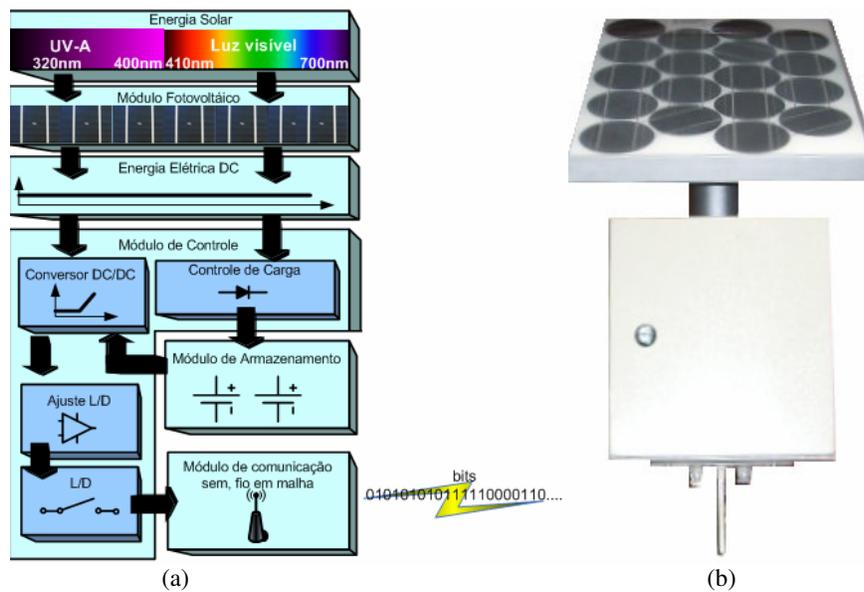


Figura 5 – (a) Diagrama de blocos SACM e (b) Protótipo SACM.

4.1 Módulo de comunicação sem fio em malha

O módulo de comunicação é um dos elementos mais importantes deste sistema, uma vez que é responsável por estabelecer uma malha de comunicação sem fio, com múltiplas rotas, entre os MAP da rede e fornecer cobertura para STA no raio de alcance do sinal transmitido por cada MAP.

Para definição do módulo utilizando no sistema, foram levadas em consideração as seguintes premissas: consumo de energia mínima, operação em diferentes tensões, dimensões físicas mínimas, possibilidade de troca de antena, operação com base nos padrões IEEE802.11b e IEEE802.11g, disponibilização de roteamento para redes sem fio em malha, existência de um sistema de segurança para a comunicação sem fio com base no padrão IEEE802.11i, também conhecido como *WiFi Protected Access* (WPA), autenticação por usuário, disponibilização de dois *Service Set Identification* (SSID) para operação como rede pública e privada, gerenciamento e monitoramento remoto, conformidade com a potência máxima de transmissão de 400 mW, definidas pela ANATEL para o território brasileiro, operação em altas e baixas temperaturas e estar fundamentado no escopo do projeto *One Laptop per Child* (OLPC), desenvolvido pelo MIT Media Lab.

A partir dos requisitos definidos para o sistema proposto neste trabalho, foi selecionado um módulo de comunicação sem fio recomendado pelo Dr. Michail Bletsas, responsável pela conectividade do projeto OLPC, para redes sem fio em malha que, conforme avaliado na seção 5, possui um consumo máximo de 3 W, opera com tensões na faixa de 4,5 V a 18 V, possui dimensões de 63 mm x 114 mm x 29 mm, disponibiliza conector para troca da antena de 2 dBi por uma de maior ganho, opera com base nos padrões IEEE802.11b/g com taxas de transmissão nominais de 1 a 54 Mbps, disponibiliza protocolo de segurança WPA e autenticação por usuário, possibilita a transmissão de SSID privado e público, disponibiliza gerenciamento e monitoramento remoto dos pontos de acesso da rede por meio de uma interface *web*, opera com potência de transmissão de 60 mW e antena de 2 dBi totalizando um potência transmitida de 100 mW, estando de acordo com as normas brasileira de telecomunicações, opera em temperaturas entre 0 °C e 40 °C, instalado internamente em uma caixa metálica a prova de intempéries com facilidade de acesso para manutenção e antena externa.

4.2 Módulo fotovoltaico

O dimensionamento do módulo fotovoltaico teve como premissas, a avaliação das características elétricas do módulo de comunicação apresentada na seção 5 e seção 6, robustez mecânica, dimensões e peso mínimos, operar em altas e baixas temperaturas ambientais, facilidade de instalação em ambiente externo sujeito a vento, chuva, granizo e prevenção contra vandalismo, possibilitando a instalação do mesmo em locais elevados, de difícil acesso.

A partir dos requisitos definidos acima e priorizando fabricação nacional, foi selecionado um painel solar com dimensões física de 547 mm x 402 mm x 45 mm, peso de 3 Kgf, 18 células solares redondas de silício monocristalino de 100 mm, potência média de 21 W, corrente de 2,46 A, tensão de 8,5 V, corrente de curto-circuito de 2,68 A e tensão de circuito-aberto de 10,5 V, valores estes definidos sob radiação solar de 1000 W/m², AM 1.5, temperatura de 25 °C, sujeita a variação de 10 %. Capacidade média de geração de 13,6 Ah/dia sob insolação média de 5.580 Wh/ m².dia, temperatura de operação entre -55 °C e +60 °C, umidade relativa de 100%, suporta altitude de 7000 m e ventos de até 200 Km/h.

4.3 Módulos de armazenamento

Para o sistema proposto neste trabalho, o módulo de armazenamento com baterias escolhido teve como premissas a avaliação das características elétricas do módulo de comunicação apresentada na seção 5 e seção 6, onde é definida uma autonomia de 36 horas, corrente média do módulo de comunicação sem fio em malha de 0,32 A, tensão de alimentação de 7,45 V, consumo de energia do módulo de comunicação de 60 W.h/dia, 4 horas/dia de insolação média anual, rendimento do módulo de controle de 90 %, descarga da bateria no máximo de 50 %, dimensões e peso mínimas, selada, livre de manutenção, resistentes a ambientes com variações de temperatura de 0 °C a 40 °C, instalada internamente em uma caixa metálica a prova de intempéries, com facilidade de acesso as baterias para manutenção.

Desta forma foi selecionado um módulo de armazenamento formado por: Duas baterias de chumbo - acido selada configuração em paralelo, tensão nos terminais 6 V, capacidade em 12 Ah cada, totalizando 24 Ah, peso 2 kg cada, carga de tensão constante: 25 °C, flutuação: 6,8 V - 6,9 V, cíclico: 7,2 V - 7,35 V, corrente inicial: 4,8 A.

4.4 Módulo de controle de energia

Para o sistema proposto neste trabalho, o desenvolvimento do módulo de controle de energia teve como premissas a avaliação das características elétricas do módulo de comunicação apresentada na seção 5 e seção 6, operar com tensões de entrada de energia na faixa de 4,5 V a 8,5 V, fornecidos pelo módulo fotovoltaico, manter a tensão de saída entre 7,1 V e 7,4 V para alimentação do módulo de comunicação, manter a carga das baterias, individualmente, em flutuação de 6,8 V a 6,9 V, limitar a descarga das baterias em 50 % para evitar diminuição da vida útil, proteger o módulo de comunicação contra eventuais sobrecargas e curto-circuito, utilizar componentes discretos de controle e potência para operação em faixas de temperatura entre -10 °C e 55 °C, dimensões mínimas para instalação interna em uma caixa metálica a prova de intempéries com facilidade de acesso para manutenção.

Desta forma foi projetado um módulo protótipo dedicado, para controle de energia este sistema que encontra em processo de patente.

5. AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO MÓDULO DE COMUNICAÇÃO SEM FIO EM MALHA

A fim de analisar o consumo do módulo de comunicação sem fio em malha, realizou-se um levantamento dos seguintes cenários de utilização do módulo:

- Cenário 1: Módulo alimentado sem transmissão de dados;
- Cenário 2: Módulo alimentado e procurando outros módulos de comunicação para estabelecimento da rede sem fio malha;
- Cenário 3: Módulo alimentado, comunicação estabelecida com outros módulos de comunicação sem fio em malha e fornecendo cobertura para dois usuários acessando páginas da internet;
- Cenário 4: Módulo alimentado, comunicação estabelecida com outros módulos de comunicação sem fio em malha e fornecendo cobertura para dois usuários acessando páginas da internet e rodando aplicações de vídeo e voz;
- Cenário 5: Módulo alimentado, comunicação estabelecida com outros módulos de comunicação sem fio em malha e fornecendo cobertura para dois usuários, acessando páginas da internet e rodando aplicações de vídeo e voz permanentemente. (consumo estimado máximo);

5.1 Ambiente para avaliação de parâmetros elétricos do módulo de comunicação

Para avaliação das características elétricas do módulo de comunicação sem fio em malha e dimensionamento dos módulo fotovoltaico, módulo de armazenamento e módulo de controle, foram levantados experimentalmente os parâmetros de tensão, corrente em um período de 2 horas sendo apresentado na análise elétrico em uma amostra de 60 s, totalizando 30 horas de avaliação.

A partir dos valores de tensão e corrente, foram calculados os parâmetros de potência, energia por hora, potência máxima instantânea no período, potência média no período e energia por dia.

A Fig. 6a apresenta o ambiente de teste utilizado, para a avaliação experimental do consumo do módulo de comunicação.

As medidas foram efetuadas utilizando um multímetro digital modelo Protek 506 true RMS com saída serial RS232 para interface com computador executando o software Protek 506 RS232C Ver.2.03 para *Windows*, fornecido com o instrumento para armazenamento e registro gráfico dos dados conforme Fig. 6b.

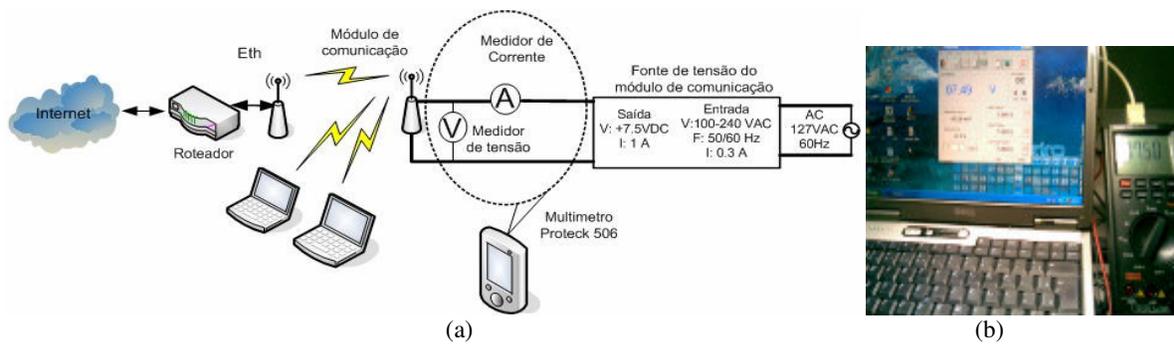


Figura 6 – (a) Ambiente de teste para avaliação das características elétricas do módulo de comunicação sem fio em malha em temperatura de 25 °C e (b) Equipamentos utilizados na avaliação.

5.2 Variação de tensão no período

Durante a avaliação da tensão do módulo de comunicação sem fio malha, foram verificadas, conforme Fig. 7, a variações da tensão, para os quatro cenários reais de teste, na faixa 7.47 V e 7.45 V em função da alteração do comportamento da corrente no circuito do módulo. A tensão especificada na fonte de alimentação do dispositivo representa a tensão do primeiro cenário.

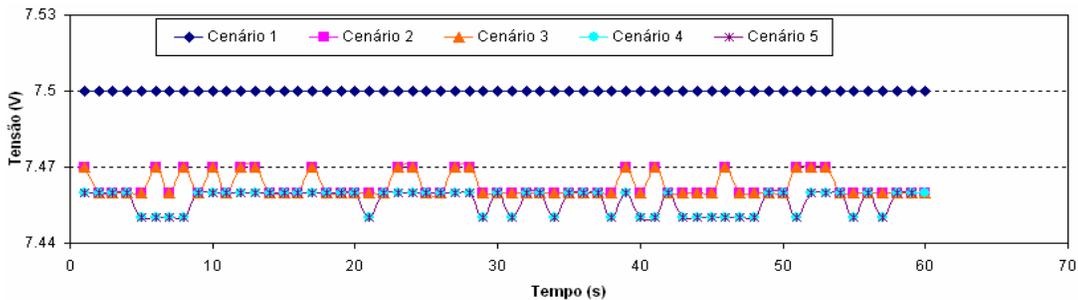


Figura 7- Característica elétrica da tensão do modulo de comunicação no período de 60 s para os cinco cenários

5.3 Variação da corrente consumida no período

A característica elétrica da corrente do módulo de comunicação apresentada na Fig. 8, demonstra a variação de consumo para os cinco cenários de utilização. Para o primeiro cenário, foi verificado que a corrente do módulo se manteve em 0,24 A com variações da corrente em função da inicialização do modulo de comunicação.

No segundo cenário podemos verificar aumentos de corrente em relação ao primeiro em função do módulo monitorado iniciar a procura do módulo com acesso a rede externa.

No terceiro cenário podemos verificar na Fig. 8, acréscimo de consumo de corrente no módulo que fornece cobertura para os computadores.

No quarto cenário foi constatado que a corrente permaneceu durante aproximadamente 12 s com um valor médio de 0,35 A em função das aplicações de vídeo e voz.

O quinto cenário representado pela corrente de 0.4 A não representa a utilização real do sistema, porém representa um valor máximo estimado.

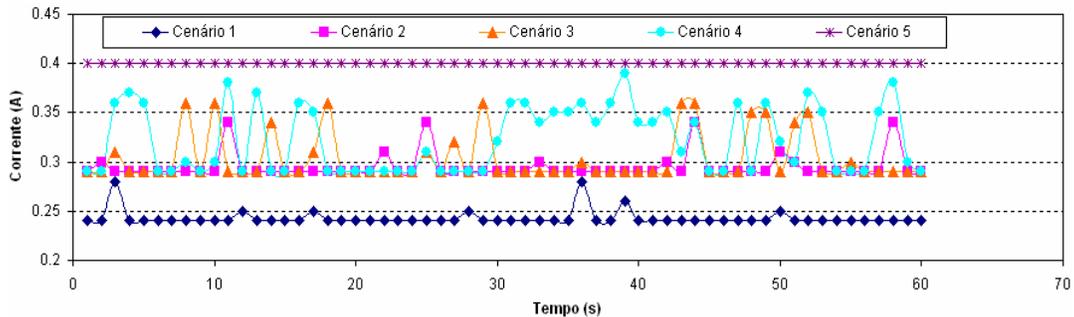


Figura. 8- Característica elétrica da corrente do modulo de comunicação no período de 60 s para os cinco cenários.

5.4 Variação da potência e energia no período

A Fig. 9 apresenta a variação de potência para os cinco cenários especificados. Podemos verificar no quarto cenário, picos de até 2,8 W, que correspondem à demanda de potência do módulo durante a transmissão de vídeo, voz e dados.

O quinto cenário representa a demanda de potência máxima do módulo que corresponde a 3 W.

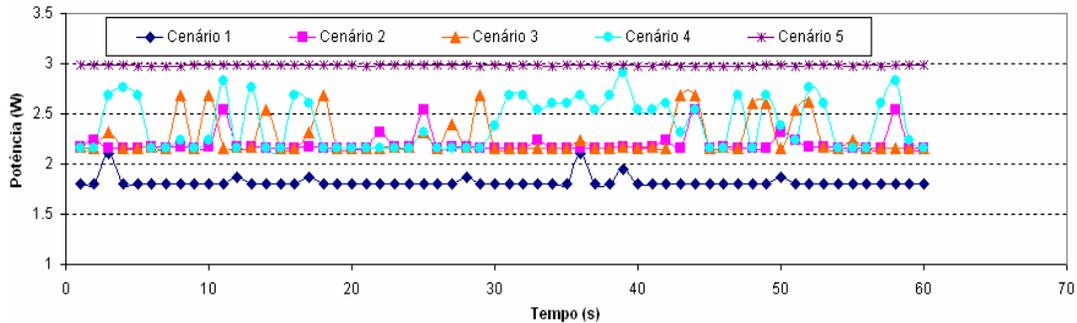


Figura 9 – Característica elétrica de potência do módulo de comunicação no período de 60 s para os cinco cenários.

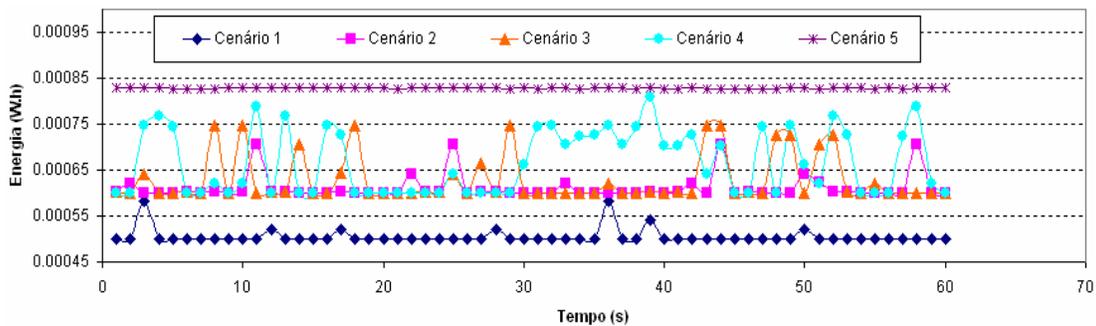


Figura 10 – Característica elétrica da energia consumida do módulo de comunicação no período de 60 s para os cinco cenários.

5.5 Resumo da avaliação das características elétricas do módulo de comunicação sem fio em malha.

A Tab. 1 apresenta um resumo das avaliações efetuadas para cinco cenários, que serão utilizados como base para o dimensionamento do módulo fotovoltaico, módulo de armazenamento e módulo de controle.

Tabela 1. Análise comparativa de potência e energia para os cinco cenários

Cenários	1	2	3	4	5
Tensão média V	7,50	7,46	7,46	7,46	7,46
Corrente média A	0,24	0,29	0,30	0,32	0,40
Potência média no período W	1,80	2,16	2,24	2,40	2,98
Potência máxima instantânea no período W	2,18	2,54	2,69	2,90	2,98
Energia por dia W.h/dia	43,20	51,48	53,76	57,60	71,52

6. DIMENSIONAMENTO DO MÓDULO DE ARMAZENAMENTO E MÓDULO FOTOVOLTAICO

Para o dimensionamento dos módulos de armazenamento e fotovoltaico foi utilizado o cenário 4 que representa a condição normal de operação do módulo de comunicação.

Embora o projeto do protótipo considere 36 horas de autonomia, com o sistema de comunicação em malha ativo, 24 horas por dia, será apresentada também projeção de autonomia, considerando sistema de comunicação ativo, 12 horas/dia e 8 horas/dia, respectivamente.

6.1 Dimensionamento do módulo de armazenamento

Conforme a Tab.2 o módulo de armazenamento será constituído por: Duas de bateria chumbo – ácido seladas configuração em paralelo, tensão nos terminais 6 V, capacidade em 12 Ah cada, totalizando 24 Ah, peso 2 kg cada, carga de tensão constante: 25 °C, flutuação: 6,8 V - 6,9 V, cíclico: 7,2 V - 7,35 V, corrente inicial: 4,8 A.

Para disponibilidade de 12 horas/dia do sistema de comunicação, a autonomia será de 75 horas.
Para disponibilidade 8 horas/dia do sistema de comunicação, a autonomia será de 112 horas.

Tabela 2. Premissas para dimensionamento do sistema de armazenamento

Autonomia desejada do sistema	36 h
Disponibilidade do sistema de comunicação h/dia	24 h/dia
Consumo do sistema 0,32 A x 24 h	7,68 Ah/dia
Consumo do sistema para autonomia desejada de 36 h	11,52 Ah
Capacidade mínima de bateria – 50 % de descarga	23,04 Ah

6.2 Dimensionamento do módulo fotovoltaico

Conforme a Tab. 1, definida na seção 5.5, para o cenário quatro o consumo de energia é de 57,60 W.h/dia. Considerando que o módulo de controle tem um rendimento de 90 % a potência total solicitada pelo sistema de comunicação, excluindo a recarga do módulo de armazenamento, será 64 W.h/dia. Desta forma, o módulo fotovoltaico com capacidade mínima para atender os 64 W.h/dia, seria de 16 W que em 4 horas de insolação diária, teria uma capacidade de 64 W.h/dia, porém, este módulo fotovoltaico não teria capacidade de recarga do módulo de armazenamento.

Em função do exposto, foi especificado um módulo fotovoltaico de 21 W que em 4 horas de insolação diária teria uma capacidade de 84 W.h/dia, possibilitando assim, a recarga do módulo de armazenamento. Na seção 4.3 são apresentadas as especificações técnicas do módulo fotovoltaico selecionado.

Na Tab. 3 é apresentada o comportamento energético do sistema de comunicação integrado, considerando módulo de armazenamento 100 % carregado e insolação de 4 horas/dia, durante um período de sete dias com ausência de insolação no terceiro dia.

Tabela 3. Balanço energético dos módulos do sistema no período de 7 dias (3° Dia sem insolação)

Status dos módulos do sistema proposto	1° Dia	2° Dia	3° Dia	4° Dia	5° Dia	6° Dia	7° Dia
Estado de carga da bateria inicial (Ah)	24	17.60	17.60	12.48	14.40	16.32	17.60
Percentual de carga da bateria inicial (%)	100	73	73	52	60	68	73
Período de insolação diária (h)	4	4	0	4 ^(c)	4	4	4
Corrente do módulo de comunicação (A)	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32
Consumo do módulo de comunicação no período de 4 horas (Ah)	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28
Corrente fornecida pelo módulo fotovoltaico (A)	0.50 ^(a)	1.92	0	2.40	2.40	2.24	1.92
Energia fornecida pelo módulo FV no período de insolação (Ah)	2.00	7.68	0	9.60	9.60	8.96	7.68
Recarga do módulo de armazenamento (Ah)	0.72	6.40	0	8.32	8.32	7.68	6.40
Estado da carga da bateria após período de 4 horas (Ah)	24	24	16.32	20.8	22.72	24	24
Percentual de carga após período de insolação (%)	100	100	68	87	95	100 ^(d)	100
Período sem insolação (h)	20	20	16	20	20	20	20
Corrente do módulo de comunicação (A)	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32
Consumo do módulo de comunicação no período sem insolação (Ah)	6.40	6.40	5.12	6.40	6.40	6.40	6.40
Estado da carga da bateria após período sem insolação (Ah)	17.60	17.6	12.48	14.4	16.32	17.60	17.60
Percentual de carga após 20 horas de insolação (%)	73	73	52 ^(b)	60	68	73	73

Notas da Tabela 3:

- (a) $0,18 A = 0,50 A - 0,32$ para recuperação da descarga interna do módulo de armazenamento
 (b) Módulo de comunicação após 36 horas sem insolação é desativado.
 (c) Módulo de comunicação é ativado no início do período de insolação.
 (d) Módulo de armazenamento atinge 100 % de carga após 3 dias de insolação de 4 horas.

7. ANÁLISE DOS RESULTADOS

7.1 Autonomia

Um dos aspectos mais relevantes do protótipo SACM é a autonomia do módulo de comunicação sem fio em malha, na ausência de luz solar.

A manutenção do módulo de comunicação ativo por um mínimo de 3 dias de operação do sistema, 24 horas por dia, sem a presença luz solar, exige que o módulo de armazenamento e o módulo fotovoltaico possuam maior capacidade e por conseqüência, maior custo, peso e dimensões físicas que dificultam a instalação.

Em países tropicais como o Brasil, a ausência da luz solar por um período de 3 dias é comum, principalmente em períodos de chuva.

A alternativa de manter o módulo de comunicação ativo 12 horas por dia ao invés de 24 horas por dia, é uma solução viável, que permite utilizar à mesma arquitetura do protótipo proposto, instalado conforme Fig. 11a e Fig. 11b, possibilitando a operação do sistema com ausência da luz solar por 3 dias consecutivos.

Uma segunda alternativa para incrementar a autonomia do sistema, com ausência da luz solar por aproximadamente 5 dias consecutivos, é limitar a comunicação para os usuários em 8 horas por dia utilizando à mesma arquitetura do protótipo proposto.

As alternativas mencionadas limitam a utilização do sistema de comunicação em tempo integral, porém, técnica e economicamente viabilizam a implementação do SACM.



Figura 11 – (a) Protótipo SACM instalado em poste de iluminação a 6 metros de altura (b) Protótipo SACM.

7.2 Cobertura para comunicação sem fio do protótipo SACM

Dois protótipos SACM estão instalados em dois postes de iluminação localizados no campus da Universidade de São Paulo (USP), dentro da Escola Politécnica.

Anteriormente a instalação mencionada, foram efetuados testes de transmissão e avaliação da cobertura utilizando computadores portáteis e instrumentação de apoio.

Um dos principais desafios na comunicação sem fio é não obstruir a Zona de Fresnel, definida para a radiação da antena, que provocaria a diminuição da potência do sinal transmitido. Desta forma, os dois protótipos foram instalados a uma altura de 6 m do solo, conforme apresentados na Fig. 12 como SACM-1 e SACM-2, permitindo a transmissão do sinal sem perdas e cobertura em um raio de 100 m.

Além dos SACMs, a rede sem fio malha implementada possui o dispositivo conectado a rede de dados cabeada conhecido como portal em malha (MP) e o ponto de acesso em malha (MAP), ambos conectado a rede elétrica cabeada.

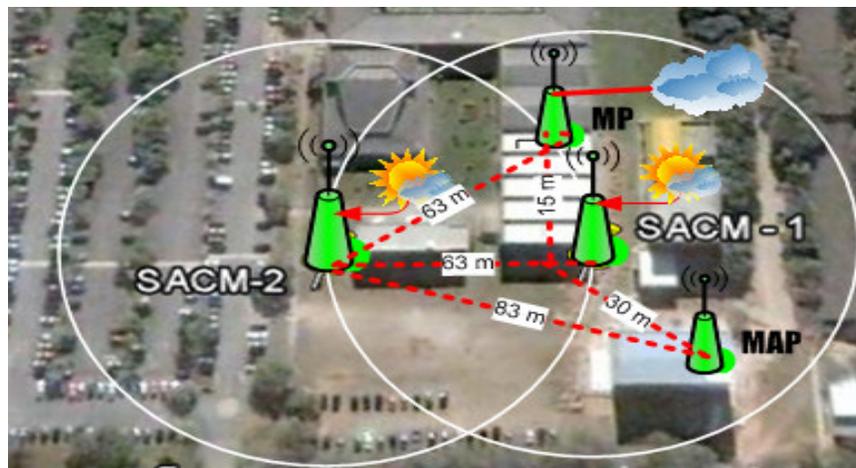


Figura 12 - Visualização da rede sem fio em malha solar localizada na Escola Politécnica da USP

7.3 Serviços disponibilizados pelos protótipos SACM -1 e SACM -2

O fabricante do módulo de comunicação sem fio em malha, integrado ao SACM, disponibiliza pela Internet, a cada 10 min, estatísticas da taxas de transmissão de dados, da taxa de perda de pacotes, além de enviar e-mail informando se o módulo está desconectado ou conectado, com o número de usuários e o volume de dados transmitidos, entre outras informações .

Na Fig. 13 podemos verificar que durante o dia 13 de Março de 2008 o volume de dados foi superior de 0,9 Mb/s e na Fig. 14 o número de usuários conectados simultaneamente no SACM – 1 foi superior a 10.

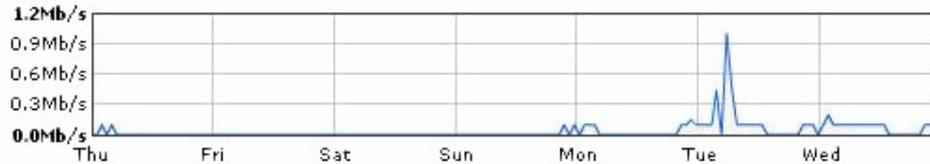


Figura 13 - Máxima utilização do sistema durante a semana do dia 13 de Março de 2008.



Figura 14 - Número máximo de usuário atingido durante a semana do dia 13 de Março de 2008

8. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou um sistema autônomo de comunicação sem fio em malha energizado por energia solar fotovoltaica. Na área de comunicação sem fio, tal sistema representa um desenvolvimento tecnológico da maior importância, já que facilita a comunicação digital sem fio em locais de difícil acesso, sem infra-estrutura de rede elétrica e de rede de dados cabeada, possibilitando a inclusão digital em comunidades isoladas através da utilização da luz solar como fonte de energia inesgotável.

A alta velocidade na implementação da rede sem fio em relação às redes cabeadas e investimentos reduzidos em infra-estrutura, está permitindo a expansão significativa deste sistema de comunicação.

O levantamento de dados apresentado neste artigo, relativo ao consumo de energia do módulo de comunicação, dimensionamento do módulo de armazenamento e do módulo fotovoltaico, nos incentiva a orientar futuras pesquisas, em módulos de comunicação, com o menor consumo de energia possível, que permitiram diminuir os módulos de armazenamento e fotovoltaicos, possibilitando maior autonomia, menor custo e como consequência, maior expansão deste sistema de comunicação.

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Michail Bletsas, responsável pela conectividade do projeto *One Laptop per Child (OLPC)*, por disponibilizar três módulos de comunicação sem fio em malha, ao Laboratório de Sistemas Integráveis (LSI), que permitiram a avaliação das características elétricas e do comportamento da rede sem fio em malha para dimensionamento do módulo de armazenamento e módulo fotovoltaico.

A empresa Heliodinâmica S.A. que disponibilizou três conjuntos de módulos de armazenamento e fotovoltaicos e estrutura para integração dos módulos do sistema, com base no dimensionamento preliminar, que permitiram a implementação do protótipo SACM-1.

Ao gerente do laboratório de TV digital e a toda equipe do LSI que deram apoio no desenvolvimento deste projeto.

Aos funcionários dos serviços gerais, da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, que sempre estiveram dispostos a colaborar no suporte para instalação do protótipo em campo.

REFERÊNCIAS

- Badawy, G. Sayegh, A. A. and Todd, T. D., 2008. Solar Powered WLAN Mesh Network Provisioning for Temporary Deployments, Accepted for publication, IEEE Wireless Communications and Networking Conference 2008 (WCNC'2008), Las Vegas, NV.
- Bicket, J. Aguayo, D. Biswas, S. 2005. Architecture and Evaluation of an Unplanned 802.11b Mesh Network, SIGMOBILE 2005, pp. 31-42.

- Bruton T.M., 2002. General trends about photovoltaics based on crystalline silicon, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 72, n. 1, pp. 3-10 Elsevier.
- Carrano, R.C. Bletsas, M. Magalhães, L.C.S., 2007. Mesh Networks for Digital Inclusion – Testing OLPC’s XO Mesh Implementantion, 8º Forum Internacional de Software Livre, 2007, Porto Alegre.
- Coutinho. A. A. C., 2006. Técnicas para aumento de banda disponível em redes em malha, Dissertação de Mestrado em Engenharia de Telecomunicações, UFF, Rio de Janeiro.
- CRESESB/CEPEL., 1999, Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Organizado pelo Grupo de Trabalho de Energia Solar.
- Draves, R. Padhye J. and Zill, B. 2004. Comparison of Routing Metrics for Static Multihop Wireless Networks, *SIGCOM 2004*, pp. 133-144.
- Duren, J.K. J.V. Robinson, M. R. Leidholm. Craig, 2007. High-throughput printing of chalcogen layer, Patent Application Publication number: US 2007/0166453 A1, Assignees: Nanosolar, Palo Alto, CA.
- Duryea, S. Islam, S. e Lawrance, W., 1999. A Battery Management System for Stand Alone Photovoltaic Energy Systems Industry Applications Conference IEEE, vol. 4, pp. 2649-2654.
- Faccin, S.M. Wijting, C. Knecht, J. e Damle, A. 2006. Mesh WLAN Networks: Concepts and System Design, *Wireless Communication IEEE*, vol. 13, pp. 10-17.
- Goldemberg, J. e Villanueva, L. D., 2003. Energia, meio ambiente e desenvolvimento, São Paulo, EDUSP.
- Green, M.A. 1996. High Efficiency Silicon Solar Cells, *Optoelectronic and Microelectronic Materials And Devices Proceedings conference*, pp. 1-7.
- IEEE 802.11 Standard., 1999. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications.
- IEEE 802.11a Standard., 1999. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: High-speed Physical Layer in the 5 GHz Band.
- IEEE 802.11b Standard., 1999. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band.
- IEEE 802.11g Standard., 2003. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications Amendment 4: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band.
- IEEE 802.11s Standard., 2004. Extended Service Set Mesh Networking working group.
- Kravets, R. Carter, C. Magalhães, L., 2001. A cooperative approach to user mobility, *ACM SIGCOM*, vol. 31, pp. 57-69.
- Meraki Solar, 2007.
<http://meraki.com/press-releases/2007/06/03/meraki-introduces-first-solar-powered-outdoor-wi-fi-access-kit/>
- Moehlecke, A. Zanesco, I., 2005. A tecnologia de silício é líder no mercado mundial, *Mercado, Física e Processamento de Células Solares, Caderno Técnico, Metalurgia & Materiais, Mercado, Física e Processamento de Células Solares* vol. 61, pp. 394 a 397.
- Passos, D. Teixeira, D. Muchaluat-Saade, D. Magalhães L.C.S. e Albuquerque, C. 2006. Mesh Network Performance Measurements, This work was supported in part by the Brazilian National Research and Education Network.
- Ramachandran, K. Belding-Royer, E.M. Almeroth, K.C. 2004. DAMON: A Distributed Architecture for Monitoring Multihop Mobile Networks, *IEEE SECON 2004*, vol.1, pp. 601-609.
- Roch, S. 2005. Nortel’s Wireless Mesh Network solution: Pushing the boundaries of traditional WLAN technology, *Nortel Technical Journal*, vol. 2, pp. 18-26.
- Solar Wi-fi Grid Project, 2006. Prototype
<http://www.green-wifi.org/projects/gw/Green-WiFi-1-Pager.pdf>
- Thuillier, P., 1994. De Arquimedes a Einstein: A face oculta da invenção científica, Jorge Zahar.
- Tsarpopoulos, N. Kalavros, I. Lalis, S. 2005. A Low-cost and Simple-to-Deploy Peer-to-Peer Wireless Network based on Open Source Linux Routers, *TRIDENTCOM 2005*, IEEE Press, pp. 92-97.
- Weber, S. Cahill, V. Clarke S. e Haahr, M. 2003. Wireless Ad Hoc Network for Dublin: A Large-Scale Ad Hoc Network Teste-Bed, *ERCIM News*, vol. 54.
- Wichert, B., 1997. PV-Diesel Hybrid Energy system for Remote Area Power Generation-A Review of Current Practice and Future Developments, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.1, n. 3, pp. 209-228.

Abstract. *The aim work is to present a wireless mesh communication autonomous system powered by photovoltaic solar energy. With the proliferation of wireless mesh network, based on the IEEE 802.11 WLAN standard, it's restrict to capital cities, where there are a continuous power sources and Ethernet infrastructure to access the internet. The design of source power infrastructure without cable to powered a wireless network represent one of the most challenge in actual wireless networks.*

In this paper we present an autonomous wireless mesh network system, powered by photovoltaic solar energy in a compact and inexpensive prototype named SACM, for rural and urban areas. Several tests were performed to evaluate the wireless mesh module power consumption to design the photovoltaic module and storage module. The paper also presents the results of field test coverage area, communication usage and autonomy system in a real installation.

Key words: *Solar energy, Wireless mesh networks, Autonomy.*