

DESIGN OF AN EFFICIENT WIRELESS COMMUNICATION INFRASTRUCTURE TO ASSIST RURAL DISTRIBUTION NETWORKS

F. M. PORTELINHA JÚNIOR,* D. Q. OLIVEIRA,† B. DE N. NASCIMENTO,* DIOGO MARUJO,§ A. C. ZAMBRONI DE SOUZA,* P. F. RIBEIRO*

*Av. João de Camargo 510
Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL)
Santa Rita do Sapucaí, Minas Gerais, Brasil

†Av. dos Portugueses 1966
Universidade Federal do Maranhão (UFMA)
São Luís, Maranhão, Brazil

‡Av. Brasil, 4232
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) - Campus Medianeira
Medianeira - Paraná, Brasil,

§Av.BPS, 1903
Universidade Federal de Itajuba (UNIFEI)
Itajubá, Minas Gerais, Brasil

Emails: portelinha@gmail.com, dq.oliveira@ufma.br, bruno.nascimento@utfpr.edu.br, diogomarujo@utfpr.edu.br, zambroni@unifei.edu.br, pfribeiro@unifei.edu.br

Abstract— The outage in the supply of electricity in rural areas is a huge concern. The delay, which is often significant in solving the unknown problem, results in losses for both the power utility and the final consumer. Generally, rural power feeders have limited intelligence, and small availability of communication connectivity, due to their long geographical extension and the high implementation cost. As a result, the distribution electrical power system offers low reliability, quality, and safety. Such difficulties establish a barrier between connectivity and the reliable supply of energy. Wireless communication systems are considered suitable for use in remote locations. However, its operational costs are high, while the energy consumed by the customers is low, turning the system unprofitable. In this paper, the concept of autonomous base stations will be evaluated, aiming to demonstrate that the benefits go far beyond financial advantages. The deployment of autonomous base stations show benefits regarding monitoring and control of rural distribution lines, ensuring reliability and quality in the electricity supply in remote areas. In addition to the scope of this paper, the design of an autonomous base station will be presented in a technical project, as well a case of study for a small countryside village in Brazil.

Keywords— Renewable generation, photo voltaic cells, communication networks, power consumption, wireless

Resumo— Os artigos a serem submetidos deverão ser redigidos em língua portuguesa, espanhola ou inglesa, com número máximo de 6 (seis) páginas, tamanho A4, coluna dupla, em formato PDF.

Palavras-chave— Lista de palavras-chave, separadas por vírgulas. Máximo de quatro palavras-chave, sendo que pelo menos uma delas deve corresponder a um dos tópicos de interesse dos eventos.

1 Introdução

Inúmeros desafios se encontram no caminho de países em desenvolvimento para atingir metas de crescimento com o objetivo de melhorar os índices de desenvolvimento humano (Semeraro et al., 2014). Neste contexto, a produção de energia é um dos fatores mais importantes para o país, sendo a base para vários setores da economia, principalmente o industrial. Neste aspecto, o consumo de energia em países desenvolvidos cresce aproximadamente 1% ao ano, enquanto em países em desenvolvimento atingem taxas de 5% ao ano (of Electricity Delivery and Reliability, n.d.).

Para acompanhar este crescimento, além da grande necessidade de prover uma infraestrutura de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica suficiente (Moslehi and Kumar, 2010), existe o desafio de que a energia elétrica chegue a 100% da população. Um grande número de pessoas que vive em países em desenvolvimento ainda não possui acesso à energia

elétrica, variando de 40 % a 98% da população em países da América Latina (Palma-Behnke et al., 2012).

Esta falta de acesso à energia nestas áreas causa um desequilíbrio muito grande no crescimento dessas regiões. No Brasil, segundo dados oficiais, 1,27% dos domicílios não têm acesso à eletricidade e 3,67% não possuem conexão formal, ou seja, não possuem medidor de energia (IBGE, 2011). A energia é proveniente de geradores a diesel nas áreas remotas ou a partir de ligações clandestinas nas grandes cidades (de Geografia e Estatística, n.d.).

No caso específico do Brasil, o programa *Luz para Todos* conseguiu atingir a meta de 98% dos brasileiros com acesso à energia elétrica (de Minas e Energia, 2011). Apesar desse avanço indiscutível, os altos preços da energia elétrica aliados a outros aspectos socioculturais mantêm a agricultura nessas regiões cara e ainda pouco rentável (Saint, 2009). Pesquisas recentes mostram que o uso de energias renováveis é uma ótima opção para se produzir energia em

áreas rurais de forma mais barata e maior eficiência (Farhangi, 2010).

A integração do sistema com novas tecnologias é um ponto chave nessa modernização da rede e terá um impacto muito grande na sociedade (Hassan et al., 2015). Um importante foco desses investimentos será no desenvolvimento das chamadas Redes Elétricas Inteligentes, *Smart Grids* (Ipakchi and Al-buyeh, 2009). Porém, a maioria de suas soluções são focadas principalmente para grandes centros urbanos. Assim, abre-se uma janela de oportunidade para se pesquisar e desenvolver tal tecnologia em áreas rurais (Brown, 2008).

Um ponto de dificuldade em áreas rurais é a pouca ou não existência de redes de comunicação, devido a sua longa extensão geográfica, perdas, baixa densidade populacional e o alto custo de implementação (Ubilla et al., 2014). Sistemas de comunicações sem fio são considerados propícios para a utilização em áreas rurais (Aravinthan et al., 2011), devido a escalabilidade e flexibilidade dos mesmos. Porém, seus custos operacionais OPEX (*Operational Expenditure*) são altos, principalmente o custo de energia consumida pelo mesmo, o que inviabiliza a implantação de redes de acesso sem fio em áreas rurais (Alsharif, 2017).

Devido a estas características, estudos com Estações Rádio Base (ERBs) devidamente energizadas com energia renováveis (Marsan et al., 2013), principalmente de fontes solares e eólicas têm sido motivo de grande atração e um tópico de estudo pela comunidade acadêmica devido ao apelo em regiões que ainda estão em desenvolvimento e os seus benefícios oferecidos (Chamola and Sikdar, 2016).

O apelo para aplicações em regiões que ainda estão em desenvolvimento e os benefícios assegurados pela implementação de uma ERB totalmente independente da rede de energia motivam cada vez mais a sua utilização (Kwon et al., 2015), a qual tem a função de produzir e fornecer energia, independente do sistema conectado, ser suporte durante horários de picos e autônoma a falhas e cortes evitando assim significantes perdas no sistema (Aris and Shabani, 2015).

Atualmente, em áreas isoladas a maioria das estações são energizadas por geradores a diesel (Peterson and Winstead, 2013), que possui um alto custo operacional e uma alta emissão de (CO_2) na atmosfera (Liu et al., 2013). Devido ao seu alto consumo energético, as comunicações sem fio serão responsáveis pela emissão de aproximadamente 179.000 toneladas de CO_2 em 2020 (Suarez et al., 2012). Esta previsão é devida ao aumento constante do número de ERBs que são dimensionados para atender as novas necessidades de conexão tanto em áreas urbanas como em áreas rurais.

As estações rádio base são responsáveis por aproximadamente 60% a 80% do consumo energético de redes de acesso de comunicação celular (Koutitas and Demestichas, 2010). Devido a necessidade da redução de emissão de CO_2 o dimensionamento de sistemas mais eficientes se faz necessário com o intuito

de otimizar o desempenho de redes de comunicação (Portelinha Júnior et al., 2017).

Neste artigo, o conceito ERBs autônomas será avaliado. Busca-se demonstrar que os benefícios vão muito além de vantagens financeiras, mas sim, por apresentarem vantagens técnicas e sociais. Além disso é escopo deste artigo o projeto de pontos relacionados ao dimensionamento e análise de uma estação autônoma de comunicação para áreas rurais.

O artigo está estruturado da seguinte maneira: na seção II é apresentada uma introdução sobre a necessidade da aplicação de redes elétricas inteligentes em áreas rurais. Na Seção III discute-se o papel das redes de telecomunicações verdes. Na seção IV apresenta-se a análise e o estudo de caso da metodologia aplicada de redes de comunicação verdes. Finalmente, na seção V, apresentam-se as devidas conclusões da metodologia.

2 Impacto de Redes Inteligentes em Áreas Rurais

A interrupção no fornecimento de energia elétrica em áreas rurais causa prejuízos elevados para os produtores, já que toda a produção pode ser perdida (Jha et al., 2016). A demora significativa para a resolução do problema acarreta em prejuízos tanto para a concessionária de energia elétrica, como para o consumidor final. Além disso, a infraestrutura de comunicação em áreas rurais isoladas é bastante precária (Brew et al., 2011).

O restrito desenvolvimento das redes elétricas inteligentes em áreas rurais e a baixa disponibilidade e/ou não existência de redes de comunicação, devido a sua longa extensão geográfica e o alto custo de implementação, são a consequência direta da falta de investimentos. Nestes cenários o sistema elétrico apresenta baixa confiabilidade, qualidade e segurança nos sistemas de distribuição. Entre as principais características dessas áreas, pode-se citar: altas perdas e o alto custo operativo (Collier, 2009). Tais dificuldades estabelecem uma barreira entre a conectividade e o consequente fornecimento seguro de energia para estas áreas.

Uma rede elétrica inteligente aplicada ao ambiente rural, portanto pode ser entendida mais como um conceito do que uma tecnologia (Lamin and de Toledo Camargo, 2013). É capaz de controlar desde a produção de micro energia, até as preferências individuais de cada consumidor, com a utilização intensiva de tecnologias de automação, computação e comunicações. Sendo um sistema que aperfeiçoa o suprimento de energia, minimizando perdas de várias naturezas e auto recuperável.

Desta maneira, o conceito de *smart grid* rural tende a gerar diversas oportunidades para tais áreas que tradicionalmente são deixadas em segundo plano. Potencialmente este novo conceito para áreas rurais devem estimular o desenvolvimento do uso de energias renováveis tais como biomassa, solar e eólica. Isso tende a criar novas oportunidades de ganho em

eficiência para estas regiões, diminuindo a dependência das distribuidoras de energia elétrica (Jha et al., 2016). No entanto, o potencial esperado da implementação das redes elétricas inteligentes em áreas rurais é enorme, não incluindo somente aspectos técnicos, mas complementando o contexto social e econômico.

A implantação de sistemas de comunicação em zonas rurais e remotas possui alguns desafios que devem ser superados. Algumas características predominantes na região agravam o desenvolvimento de tecnologia de informação nessas áreas como, por exemplo, a questão do custo, a baixa renda per capita característica dessa região e a baixa quantidade de potenciais utilizados. As longas distâncias de usuários remotos é um fator agravante, pois é caracterizada por um alto custo de instalação. A Figura 1, ilustra um cenário hipotético de comunicação para atender áreas rurais (Kuzlu et al., 2014).

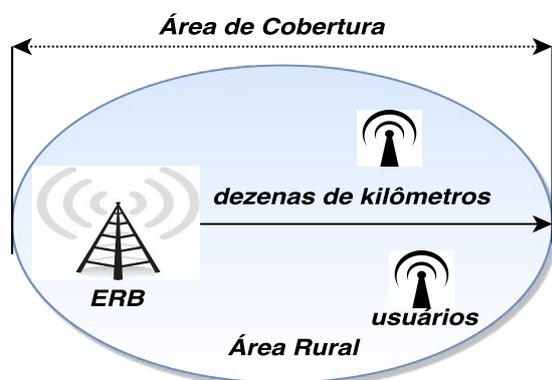


Figura 1: Implementação de sistemas de comunicação em áreas rurais.

A implementação energeticamente eficiente de sistemas de comunicação em áreas isoladas, além de promover mudanças ambientais, promovem mudanças técnicas e econômicas (Hassan et al., 2013). Com o monitoramento em tempo real, o diagnóstico de falhas se tornará remoto, não havendo necessidade de envio de equipes de campo, além de se aumentar a confiabilidade e robustez do sistema elétrico. No lado econômico, pequenos produtores rurais, poderão vender a energia que foi produzida em excesso para a própria concessionária ou seus vizinhos, aumentando a sua renda.

3 Redes de Comunicação Verdes

Atualmente, a conexão com a rede principal de energia é considerada como a fonte primária de energia para o sistema de comunicação. Sistemas híbridos (Alsharif and Kim, 2017), com a aproveitamento de fontes solares e eólicas e com geradores de *backup* a diesel têm sido propostos como solução para minimizar a dependência elétrica e consumo de energia destas redes.

As redes de comunicação celular podem ser vistas como diversas cargas distribuídas na rede (Portelinha

et al., 2016). Para uma análise mais apurada devemos entender o funcionamento de uma rede de comunicação para o projeto de sistemas autônomos. O sistema de comunicação é dividido em diversos setores (Correia et al., 2010): o setor principal responsável pela comunicação entre os servidores de acesso a internet e a rede de comunicação, a rede de acesso responsável pela conexão entre o usuário (cliente final) e a rede de comunicação. Nesta configuração, a rede de acesso, é a maior consumidora de energia, sendo seu maior consumidor a estação rádio base, responsável pela conectividade entre todos os elementos da rede de comunicação.

As ERBs podem ser divididas em vários setores e cada setor agrupado com um grupo de antenas (Rappaport, 2001). As células de conexão variam de tamanho de acordo com o raio de cobertura e a área de cobertura desejada. Estações de grande porte provêm cobertura em uma vasta região geográfica, porém apresentam um maior consumo de energia. Uma ERB possui vários dispositivos que podem ser divididos de acordo com a dependência na variação de tráfego de clientes e com o seu consumo de potência. Técnicas de economia de energia em redes de acesso de comunicação são principalmente aplicadas nas ERBs (Domenico et al., 2014).

Na Figura 2, é apresentado um sistema autônomo de comunicação alimentado por painéis solares e conectados a baterias (Aris and Shabani, 2015).

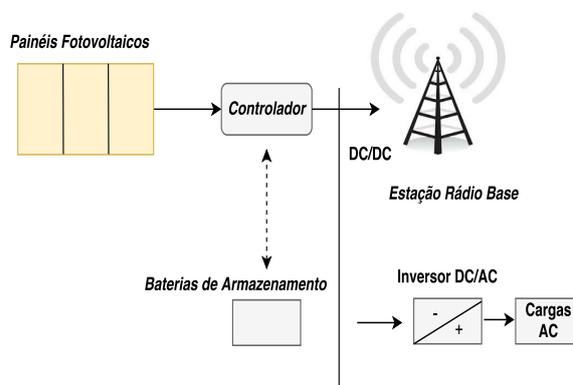


Figura 2: Configuração típica de uma Estação Rádio Base alimentada por painéis fotovoltaicos.

Na Figura 2, podemos identificar os diversos dispositivos responsáveis para uma comunicação autônoma. Os painéis solares, responsáveis por absorver a energia e converter em eletricidade, e o banco de baterias, que apesar de ser um dos itens de maior custo é essencial para a autonomia dos sistema sendo responsável pelo armazenamento da energia produzida em excesso. Esta energia será utilizada durante períodos de intermitência da fonte de energia e principalmente durante a noite. Junto a bateria é anexado um controlador responsável em limitar a taxa de armazenamento e retirada de carga e um conversor DC/AC para alimentar os dispositivos alimentados em corrente alternada na estação de rádio.

Para atingir a maior eficiência no projeto da rede autônoma deve-se projetar cada item corretamente. Para isto, deve-se levantar corretamente a demanda do sistema que deseja-se abastecer e após esta etapa descrever o projeto de cada elemento do sistema autônomo, como será descrito nas próximas subsecções.

3.1 Cálculo do Consumo de Energia de uma RERB

O consumo de potência de uma estação rádio base pode ser modelado em duas partes distintas (Deruyck et al., 2014). A primeira descreve a parte estática do consumo de potência, ou seja, o consumo que irá existir mesmo que não tivermos nenhuma usuário utilizando a rede de comunicação, e seus componentes dinâmicos que variam de acordo com a utilização da rede. Os itens com maior impacto no consumo de potência de uma estação rádio base são: o amplificador de potência e o sistema de refrigeração.

A potência consumida por uma estação rádio base em seu modelo completo é descrito pela influência da largura de banda do sistema de comunicações, do modelo de propagação e do tipo de tecnologia adotada. Sistemas atuais utilizam da quarta geração da tecnologia celular - o LTE (Long Term Evolution)(Universal and Radio, 2010). Com isto, podemos descrever o consumo de energia de uma estação LTE como (Auer et al., 2011),

$$P_{RBS} = N_{setor} \frac{\frac{P_{max}}{\eta(1-\sigma_{ali})} + P_{rf} + P_{dsp}}{(1-\sigma_{dc})(1-\sigma_{ms})(1-\sigma_{air})} + P_{en} + P_{luz} \quad (1)$$

onde em (1), N_{setor} é o número de setores da estação, P_{max} é a máxima potência de transmissão, η é o fator de eficiência do amplificador de potência, σ_{ali} , σ_{dc} , σ_{ms} , σ_{air} são respectivamente as perdas devido aos alimentadores, conversão dc/dc, cabos e o ar condicionado. P_{rf} , P_{dsp} , P_{enlace} , P_{luz} são as potências devidos a parte de rádio frequência do sinal, do processamento de dados, do enlace de microondas e das lâmpadas do gabinete da unidade rádio.

Como o objetivo do artigo é analisar o consumo em uma área rural, a sua máxima potência de transmissão será influenciada como descrito em (Alsharif and Kim, 2017),

$$P_{max} = P_{tx} \frac{A^\alpha}{d} \quad (2)$$

onde em (2), P_{tx} é a potência de transmissão da antena, A a área de cobertura aonde se deseja prover conectividade, d a máxima distância de cobertura de uma estação rádio base e α é o fator de perda por percurso.

3.2 Cálculo da Energia Produzida pelo Sistema Renovável

No dimensionamento de sistemas autônomos é muito importante determinar a máxima energia produzida de um conjunto de células fotovoltaicas, levando em conta seu modo de operação, a máxima irradiação

diária λ , a área da superfície do módulo A_M e sua eficiência ϵ_{pv} . Desta maneira, pode-se descrever a máxima energia produzida por um arranjo fotovoltaico pela seguinte fórmula (Villalva, 2015),

$$E_{max} = \lambda A_M \epsilon_{pv} \quad (3)$$

É importante ressaltar que este método é conhecido com o método da insolação, onde conhecemos o valor da irradiação diária em (Wh/m.²/dia), sendo válido quando utilizado controladores de carga para a máxima produção de energia. Um outro método é utilizado quando não é utilizado o recurso de rastreamento do ponto de máxima potência, denominado o método da corrente máxima do módulo, onde são considerados o número de horas diárias de insolação I_d e a máxima potência produzida por um módulo, desta maneira podemos escrever a potência de cada arranjo fotovoltaico, de acordo com (Villalva, 2015),

$$P_m = I_{sc} V_{bat} \quad (4)$$

onde em (4), I_{sc} é a corrente de curto circuito do módulo em (A) e V_{bat} é a tensão da bateria em (V). É a energia produzida pelo método da corrente máxima, é descrita como em (Villalva, 2015),

$$E_{max} = P_m I_d \quad (5)$$

Os sistemas autônomos ou *off-grid* tem como característica principal, além de serem auto suficientes, de estarem conectados a um banco de baterias. Estas irão armazenar a energia durante o período de excesso de produção e o descarregamento nos períodos intermitentes de energia e durante os períodos noturnos. O nível de descarga da bateria (Υ_{bat}) é um importante fator, que descreve o nível de descarregamento da bateria através de seu estado mínimo, e pode ser descrito pela seguinte fórmula (Alsharif, 2017),

$$\Upsilon_{bat} = 1 - \frac{\Upsilon_{minbat}}{100} \quad (6)$$

A escolha de uma bateria é um fator importante para o dimensionamento de um sistema autônomo. Informações como o estado de carga mínimo e o máximo, o número de dias, capacidade nominal e o perfil da carga que pretende-se suprir são levados em consideração para se determinar a autonomia e o tempo de vida do banco de baterias (Alsharif, 2017). A autonomia de uma bateria, em número de dias, pode ser determinada, de acordo com (Lambert, n.d.),

$$N_{dias} = \frac{N_{bat} V_{nom} C_{nom} \Upsilon_{bat}}{Carga_{con}} \quad (7)$$

onde em (7), N_{bat} é o número de baterias, V_{nom} é a tensão nominal de uma única bateria em (V), C_{nom} é a capacidade nominal de uma única bateria em [Ah] e $Carga_{con}$ representa o consumo diário da carga a qual se deseja autonomia. Um outro fator de extrema importância para cálculo é o tempo de vida de uma bateria. O mesmo é determinado de acordo com suas condições de operação, carga e descarga. De acordo

com (Lambert, n.d.) o tempo de útil de vida de uma bateria é descrito como,

$$V_{bat} = \min\left(\frac{N_{bat} V_{util}}{V_{anual}}, V_{bat,f}\right) \quad (8)$$

onde em (8), V_{util} é a capacidade total de armazenamento e descarga de uma única bateria em (kWh), V_{anual} é a capacidade total anual de armazenamento e descarga de uma única bateria em (kWh/ano) $V_{bat,f}$ é tempo total de vida da bateria.

No dimensionamento do banco de baterias é necessário tensão nominal desejada no projeto (baterias ligadas em série) e a capacidade de demanda do banco (baterias ligadas em paralelo). O número de baterias em série é determinado como descrito em (Villalva, 2015),

$$N_s = \frac{V_b}{V_{bat}} \quad (9)$$

onde em (9), V_b e V_{bat} denominam tensões do banco de bateria e a tensão da bateria utilizada em [V]. Desta maneira o próximo passo é calcular o número de baterias em paralelo como descrito em (Villalva, 2015),

$$N_{bp} = \frac{C_B}{C_{bat}} \quad (10)$$

onde em (10), C_B e C_{bat} representam a capacidade de carga do banco de bateria e a capacidade de carga bateria utilizada em [Ah].

Existem vários tipos de baterias no mercado, porém no trabalho realizado em (Alsharif et al., 2017) é apresentado o perfil de vários modelos de baterias focadas no projeto de redes celulares. Na Tabela 1 é apresentado os principais tipos de baterias para esta aplicação e suas características principais.

Tabela 1: Principais características de modelos de bateria aplicados a redes móveis.

Tipo da Bateria	Eficiência (%)	DOD (%)
Chumbo ácido (Convencional)	75-85	70
Chumbo ácido (SLA-VRLA)	80-90	80
Níquel cádmio	70-80	10
Hidreto metálico de níquel	65-75	100
polímero de lítio	95-100	80
Íon de lítio	95-100	80

Com o intuito de se dimensionar corretamente o sistema serão considerados os equipamentos que devem ser alimentados por fontes alternadas de tensão (AC). As estações rádio base para longa distâncias são dotadas de sistemas de refrigeração, portanto o cálculo de um inversor de tensão deverá ser levado em consideração. Desta maneira, a capacidade do inversor é dada por (Lambert, n.d.),

$$\eta_{inv} = \frac{C_{AC}}{\epsilon_{inv}} \sigma_{seg} \quad (11)$$

onde em (11), C_{AC} é a máxima carga de corrente alternada, ϵ_{inv} é a eficiência do inversor e σ_{seg} é o fator de segurança.

4 Simulação e Resultados

O estudo de caso será realizado com os dados da cidade de Santa Rita do Sapucaí, no interior de Minas Gerais (de Geografia e Estatística, 2017). A cidade apresenta características relevantes para o estudo de caso, pois o seu município apresenta vasta extensão geográfica e grande população vivendo fora dos centros urbanos. Devido a isto, a conectividade ainda não chegou a áreas mais remotas, sendo de extrema importância a análise de implantação de uma infraestrutura de telecomunicações para o aumento da eficiência no campo e melhoria de vida. Primeiramente foi levantado o perfil de irradiação solar diário por mês em Santa Rita, como ilustrado na Figura 3.

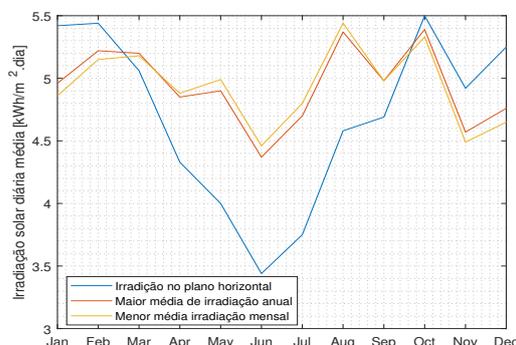


Figura 3: Perfil de irradiação diária média na cidade de Santa Rita do Sapucaí - MG.

De acordo com (de Abreu e Ricardo Rüter, 2006), a média anual de irradiação global brasileira apresenta uma boa uniformidade, com médias anuais relativamente altas em todo o país. O valor de máximo de irradiação global – 6,5 kWh/m² que ocorre no norte do estado da Bahia. A menor irradiação solar ocorre no litoral de Santa Catarina – 4,25 kWh/m². Santa Rita do Sapucaí está na média de irradiação brasileira com um consumo médio de 5,3 kWh/m². Para o projeto de uma estação rádio base autônoma, tomemos a média de irradiação solar de 5,3 kWh/m² como referência e demonstrado na Figura 3.

O próximo passo é determinar o valor de energia consumida diariamente por esta estação. Com a ajuda da Tabela 2 e as Eq. (1) e Eq.(2), é possível levantar o consumo da ERB diariamente, que chega a valores de consumo diário de 42,96 [kWh/dia]. É importante ressaltar que não estamos considerando as variações de tráfego na rede, e sim a média diária consumida.

Um outro fator muito importante é análise da influência do tipo de ambiente no consumo de potência. Áreas urbanas apresentam uma menor influência de componentes de propagação do que em áreas rurais, o que leva à uma valor maior no consumo de po-

Tabela 2: Consumo de uma estação rádio base

P_{tx}	46 (dBm)
P_{bbl}	29.4 (W)
P_{rfl}	12.9 (W)
N_{sec}	3
$e_{alimentador}$	0.5
e_{dc}	0.075
e_{ms}	0.09
e_{ar}	0.1
$P_{palimite}$	80 (W)
n_{pamax}	0.36

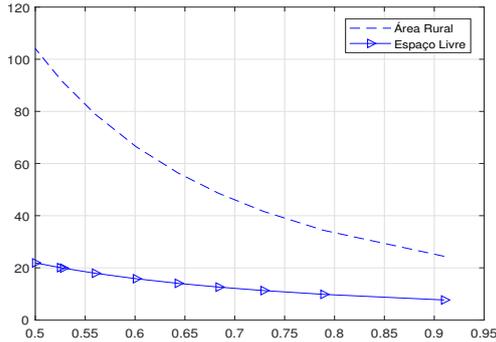


Figura 4: Influência do ambiente no consumo de potência de uma ERB.

tência. Na Figura 4 é ilustrada a influência do fator de perda por percurso no cálculo do consumo total de uma estação rádio base. Comparando as duas curvas, podemos observar que quando considerado o cenário de espaço livre, ou seja, um ambiente com nenhuma influência dos componentes de propagação, resultando em um consumo menor de potência. Já em áreas rurais, onde os componentes de propagação apresentam valores elevados, ou seja, haverá perdas de transmissão de sinais por diversos fatores, como em áreas mais isoladas, o consumo de potência é consideravelmente maior.

É importante ressaltar que este projeto será baseado no método da insolação, pois o valor da irradiação é conhecido e assume-se que o projetista irá fazer o uso do rastreador do ponto máximo de potência do módulo. Portanto, para o cálculo da energia do módulo devemos ressaltar algumas informações importantes devem ser considerados para o dimensionamento do sistema autônomo, como ilustrado na Tabela 3.

Com os dados fornecidos pela Tabela 3 e conjuntamente com a Eq. (3), é possível determinar a potência produzida por um módulo. Porém, primeiramente devemos determinar o valor da eficiência do módulo (ϵ_{pv}) através de sua potência máxima, onde temos, $\epsilon_{pv} = P_{max}/((A_M * 1000)) = 17\%$. Desta maneira e de acordo com a Eq. (3) a energia máxima produzida por módulo é 1,747 kWh.

Consequentemente é determinado o número de

Tabela 3: Parâmetros para o dimensionamento da energia produzida por um módulo

Parâmetros	Valores
Tensão alimentação [V]	48
Irradiação Solar [kWh/m ²]	5,3
Modelo módulo	Canadian Solar325P-FG
Área do Painei [m ²]	1,91232
Potência máxima [W]	325

módulos necessários para alimentar todo sistema de acordo com a energia diária consumida e a energia diária produzida. Portanto, 25 módulos serão necessários para alimentar o sistema, que serão distribuídos em dois conjuntos de painéis em paralelo. Portanto a potência máxima produzida pelo arranjo de painéis fotovoltaicos será, $P_{maxp} = 8,125kW p$.

O próximo passo é o dimensionamento do banco de baterias, a bateria escolhida para este projeto é a Trojan L16P. De acordo com as especificações do fabricante e com Eq. (10) e Eq. (9) serão conectadas 8 baterias em série e 24 baterias em paralelo para atingirmos os requisitos mínimos de autonomia.

Assumindo que o consumo diário de uma estação rádio base é de 42,56 kWh/dia e desejamos projetar um sistema com autonomia, portanto de acordo com 6, para obtermos uma autonomia de 24 horas serão necessárias um banco de 32 baterias, que apresentam autonomia de aproximadamente 26,93 horas, com tempo médio de vida de acordo com (8) de 8 anos.

Por último devemos dimensionar o controlador de carga e o inversor necessário para o suprimento das cargas AC da estação rádio base. O inversor é dimensionado de acordo com a Eq.(11) e o controlador é comumente dimensionado levando em consideração um valor de 30 % acima da máxima corrente do projeto, que é a corrente de curto circuito, que é de acordo com o fabricante é de 9,34 [A]. Deste modo, o controlador deve suportar a tensão máxima de 24 [A], devido a ligação de dois strings fotovoltaicos em paralelo. E o inversor deve suportar a potência dos equipamentos AC, que é aproximadamente 0,25KW.

5 Conclusões

A interrupção de energia elétrica em áreas rurais causa prejuízos bastante elevados para os produtores rurais, já que toda a produção pode se perder em função de interrupção de fornecimento de energia.

A infraestrutura de uma rede de comunicação em áreas remotas é bastante dificultada, e quase inexistente em quase todas as áreas rurais principalmente em países de terceiros mundo, o que estabelece mais uma barreira no estabelecimento de um sistema inteligente rural. Neste trabalho foi apresentado o projeto e dimensionamento de estação rádio base autônoma, totalmente baseada em produção de energia solar.

A integração de energias renováveis com um sistema de comunicação robusta se faz necessário para o aumento da confiabilidade sistemas elétricos de distribuição. Estes sistemas tem a função de fornecer energia durante horários de picos e autonomia durante falhas, é essencial para a segurança e confiabilidade do sistema de distribuição. Propiciando assim energia e conectividade para os mais necessitados e aumentando a lucratividade da produção rural com o início da integração das redes inteligentes dentro da matriz energética brasileira.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES, INERGE, FAPESP, FAPEMIG e FAPEMA pelo apoio financeiro no trabalho.

Referências

- Alsharif, M. H. (2017). Techno-economic evaluation of a stand-alone power system based on solar power/batteries for global system for mobile communications base stations, *Energies* **10**(3).
- Alsharif, M. H. and Kim, J. (2017). Hybrid off-grid spv/wtg power system for remote cellular base stations towards green and sustainable cellular networks in south korea, *Energies* **10**(1).
- Alsharif, M. H., Kim, J. and Kim, J. H. (2017). Green and sustainable cellular base stations: An overview and future research directions, *Energies* **10**(5).
- Aravinthan, V., Karimi, B., Namboodiri, V. and Jewell, W. (2011). Wireless communication for smart grid applications at distribution level; feasibility and requirements, *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1–8.
- Aris, A. M. and Shabani, B. (2015). Sustainable power supply solutions for off-grid base stations, *Energies* **8**(10): 10904–10941.
URL: <http://www.mdpi.com/1996-1073/8/10/10904>
- Auer, G., Giannini, V., Desset, C., Godor, I., Skillermark, P., Olsson, M., Imran, M. A., Sabella, D., Gonzalez, M. J., Blume, O. and Fehske, A. (2011). How much energy is needed to run a wireless network?, *IEEE Wireless Communications* **18**(5): 40–49.
- Brew, M., Darbari, F., Crockett, L. H., Waddell, M. B., Fitch, M., Weiss, S. and Stewart, R. W. (2011). Uhf white space network for rural smart grid communications, *2011 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (Smart-GridComm)*, pp. 138–142.
- Brown, R. E. (2008). Impact of smart grid on distribution system design, *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, pp. 1–4.
- Chamola, V. and Sikdar, B. (2016). Solar powered cellular base stations: current scenario, issues and proposed solutions, *IEEE Communications Magazine* **54**(5): 108–114.
- Collier, S. E. (2009). Ten steps to a smarter grid, *2009 IEEE Rural Electric Power Conference*, pp. B2–B2–7.
- Correia, L. M., Zeller, D., Blume, O., Ferling, D., Jading, Y., Gódor, I., Auer, G. and Perre, L. V. D. (2010). Challenges and enabling technologies for energy aware mobile radio networks, *IEEE Communications Magazine* **48**(11): 66–72.
- de Abreu e Ricardo Rütther, E. B. P. F. R. M. S. L. (2006). *Atlas brasileiro de energia solar*, 1nd edn, São José dos Campos : INPE, Brasil.
- de Geografia e Estatística, I. B. (2017). Ibge | cidades.
URL: <https://cidades.ibge.gov.br/painel>
- de Geografia e Estatística, I. B. (n.d.). Características da população e dos domicílios: Resultados do universo.
URL: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2017>
- de Minas e Energia, M. (2011). Programa de eletrificação rural.
URL: <http://luzparatodos.mme.gov.br/>
- Deruyck, M., Joseph, W. and Martens, L. (2014). Power consumption model for macrocell and microcell base stations, *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies* **25**(3): 320–333.
- Domenico, A. D., Strinati, E. C. and Capone, A. (2014). Enabling green cellular networks: A survey and outlook, *Computer Communications* **37**: 5 – 24.
- Farhangi, H. (2010). The path of the smart grid, *IEEE Power and Energy Magazine* **8**(1): 18–28.
- Hassan, H. A. H., Nuaymi, L. and Pelov, A. (2013). Renewable energy in cellular networks: A survey, *2013 IEEE Online Conference on Green Communications (OnlineGreenComm)*, pp. 1–7.
- Hassan, H. A. H., Pelov, A. and Nuaymi, L. (2015). Integrating cellular networks, smart grid, and renewable energy: Analysis, architecture, and challenges, *IEEE Access* **3**: 2755–2770.
- IBGE (2011). Indicadores sociais municipais: uma análise dos resultados do universo do censo demográfico 2010. rio de janeiro:.
- Ipakchi, A. and Albuyeh, F. (2009). Grid of the future, *IEEE Power and Energy Magazine* **7**(2): 52–62.

- Jha, S. K., Stoa, P. and Uhlen, K. (2016). Socio-economic impact of a rural microgrid, *2016 4th International Conference on the Development in the in Renewable Energy Technology (ICDRET)*, pp. 1–4.
- Koutitas, G. and Demestichas, P. (2010). A review of energy efficiency in telecommunication networks, *Telfor journal* **2**(1): 2–7.
- Kuzlu, M., Pipattanasomporn, M. and Rahman, S. (2014). Communication network requirements for major smart grid applications in han, {NAN} and {WAN}, *Computer Networks* **67**: 74 – 88.
- Kwon, Y., Kwasinski, A. and Kwasinski, A. (2015). Microgrids for base stations: Renewable energy prediction and battery bank management for effective state of charge control, *2015 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, pp. 1–6.
- Lambert, T.; Gilman, P. L. (n.d.). Lilienthal, p. micro-power system modeling with homer.
- Lamin, H. and de Toledo Camargo, I. M. (2013). Smart grids deployment in brazil: A study from the perspective of a regulatory impact analysis, *2013 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Latin America)*, pp. 1–8.
- Liu, M., Liu, L., Wu, X., Teng, L., Cao, J. and Qin, S. (2013). A research on the telecommunication base station power consumption investment analysis and optimized configuration method for hybrid energy power, *Intelec 2013; 35th International Telecommunications Energy Conference, SMART POWER AND EFFICIENCY*, pp. 1–6.
- Marsan, M. A., Bucalo, G., Caro, A. D., Meo, M. and Zhang, Y. (2013). Towards zero grid electricity networking: Powering bss with renewable energy sources, *2013 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)*, pp. 596–601.
- Moslehi, K. and Kumar, R. (2010). A reliability perspective of the smart grid, *IEEE Transactions on Smart Grid* **1**(1): 57–64.
- of Electricity Delivery, O. and Reliability, E. (n.d.). The smart grid: An introduction.
URL: <http://www.oe.energy.gov/1165.htm>
- Palma-Behnke, R., Reyes, L. and Jiménez-Estévez, G. (2012). Smart grid solutions for rural areas, *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1–6.
- Peterson, M. and Winstead, R. (2013). Evaluating the efficiency of hybrid power systems at telecom cell sites: Using system-level metrics for accurately determining tower energy efficiency, *Intelec 2013; 35th International Telecommunications Energy Conference, SMART POWER AND EFFICIENCY*, pp. 1–6.
- Portelinha, F., Oliveira, D. Q., de Souza, A. C. Z., Ribeiro, P. F., de Nadai, B. and Marujo, D. (2016). The impact of electric energy consumption from telecommunications systems on isolated microgrids, *5th IET International Conference on Renewable Power Generation (RPG) 2016*, pp. 1–6.
- Portelinha Júnior, F. M., Carlos Zambroni de Souza, A., Castilla, M., Queiroz Oliveira, D. and Ribeiro, P. F. (2017). Control strategies for improving energy efficiency and reliability in autonomous microgrids with communication constraints, *Energies* **10**(9).
- Rappaport, T. (2001). *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd edn, Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, USA.
- Saint, B. (2009). Rural distribution system planning using smart grid technologies, *2009 IEEE Rural Electric Power Conference*, pp. B3–B3–8.
- Semeraro, B. D., Sisneros, R., Fullop, J. and Bauer, G. H. (2014). It takes a village: Monitoring the blue waters supercomputer, *2014 IEEE International Conference on Cluster Computing (CLUSTER)*, pp. 392–399.
- Suarez, L., Nuaymi, L. and Bonnin, J.-M. (2012). An overview and classification of research approaches in green wireless networks, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* **2012**(1): 142.
- Ubilla, K., Jiménez-Estévez, G. A., Hernández, R., Reyes-Chamorro, L., Irigoyen, C. H., Severino, B. and Palma-Behnke, R. (2014). Smart microgrids as a solution for rural electrification: Ensuring long-term sustainability through cadastre and business models, *IEEE Transactions on Sustainable Energy* **5**(4): 1310–1318.
- Universal, E. and Radio, T. (2010). Ts 136 401 - v9.2.0 - lte; evolved universal terrestrial radio access network (e-utran); architecture description (3gpp ts 36.401 version 9.2.0 release 9), **0**: 21.
- Villalva, M. G. (2015). *Energia Solar Fotovoltaica - Conceitos e Aplicações*.