

# Technical-Economic Analysis of Photovoltaic Systems Applied to Heterogeneous Mobile Networks in Rural Areas

Marcos V. P. Oliveira, André L. P. Fernandes, Felipe V. S. dos Reis, Hugo P. Kuribayashi, Marcela A. de Souza, Leonardo N. Gonçalves, João. C. W. A. Costa, Fabricio S. Farias

**Abstract**— The use of renewable sources as an energy matrix has become crucial for the development of rural mobile networks both to meet increasing energy consumption in mobile network segments and to improve the efficiency of the grid. Thus, this work aims to analyze the economic viability of the photovoltaic system as an energy source for 5G mobile networks in rural environments by means of energy consumption models for mobile networks and cost for installation and operation of photovoltaic systems. Results indicate that although the analysis is characterized for a rural scenario with low population density, where economic viability is low due to geographic location and access difficulties, the photovoltaic system has great feasibility of implantation and operation. Thus, according to the results, the implementation of this renewable energy source is financially favorable in locations with a higher insolation rate above 4.0 kWh/m<sup>2</sup>.day. In addition, the reduction in the emission of CO<sub>2</sub> in the atmosphere from the use of the photovoltaic system demonstrated the environmental importance of this energy source.

**Index Terms** — mobile networks; 5G; photovoltaic systems; rural scenario.

## I. INTRODUÇÃO

A Internet e suas aplicações têm se mostrado fundamentais para indústria, comércio, governo, educação, saúde e outras áreas [1]. Espera-se que a crescente dependência de conectividade por parte de usuários e máquinas crie uma sociedade totalmente conectada, resultando na necessidade de maiores taxas de transmissão de dados e melhor qualidade de serviço [2]. As novas demandas de operação favorecem a implantação de redes heterogêneas (HetNets), onde os usuários móveis são atendidos por *small cells*, sobrepostas pelas tradicionais macrocélulas [3][4]. Embora ocasione maior disponibilidade aos usuários, as HetNets podem ocasionar um

aumento de consumo energético e dos custos de implantação das redes *backhaul* e *fronthaul* [5], tornando desafiador o futuro das operadoras de telecomunicações móveis, dada a crescente demanda de dados, que tende a intensificar as despesas operacionais associadas ao custeio de energia elétrica.

As redes móveis de quinta geração (5G) são apresentadas como solução para atender as crescentes demandas de uma sociedade totalmente conectada. No entanto, devido à falta de conectividade em áreas rurais e remotas, atualmente, cerca de 3,9 bilhões de pessoas não tem acesso a esta realidade [6]. Dessa forma, o 5G deve considerar o potencial de cenários rurais e remotos, que podem trazer vantagens como novo mercado para as operadoras, melhor monitoramento ambiental e aumento de produtividade em fazendas inteligentes [6]. No cenário rural a implantação de redes 5G é mais complexa, necessitando de melhor planejamento em relação ao número de usuários servidos e consequentemente do retorno econômico pós-implantação [7][8][9]. Deste modo, para cenários rurais se faz necessário uma análise técnica e econômica que leve em consideração o baixo retorno financeiro e altos custos com infraestrutura [10]. Além disso, a análise também deve abordar alternativas que possam garantir melhores resultados econômicos na operação da rede.

Uma possibilidade para reduzir o custo operacional em redes 5G é a alimentação energética via fontes de energia renováveis, as quais têm apresentado promissor potencial em redes móveis [11]–[16]. Em especial sistemas fotovoltaicos, que geram energia por meio de painéis solares a partir da irradiação solar, apresentam uma das formas de produção de energia mais promissora para o futuro pelo fato de utilizar uma fonte

M. V. P. Oliveiras, bacharel em Sistemas de Informação pela Universidade Federal do Pará. Atualmente no Instituto de Computação – Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, Brasil (e-mail: mar33vi@gmail.com).

A. L. P. Fernandes, doutorando em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará. Atualmente é membro colaborador do Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado (LEA) em Belém, Pará, Brasil (e-mail: andre.lucaspinho@gmail.com).

F. V. S. dos Reis, Graduando em Engenharia da Computação pela Universidade Federal do Pará. Atualmente é membro colaborador do Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado (LEA) em Belém, Pará, Brasil (e-mail: felipe.vitow@gmail.com).

Hugo P. Kuribayashi, possui Mestrado e doutorado em andamento em Computação Aplicada. Atualmente atua como Professor da Faculdade de Computação e Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (Unifesspa) (e-mail: hkuribayashi@gmail.com)

M. A. de Souza, doutorando em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará. Atualmente é membro colaborador do Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado (LEA) em Belém, Pará, Brasil (e-mail: marcelaalves89@gmail.com).

Leonardo N. Gonçalves, mestrando em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará. Atualmente é membro do Laboratório de Programação Extrema (LABEX) em Cametá, Pará, Brasil (e-mail: leo.widgeon16@gmail.com).

J. C. W. A. Costa, doutor em Engenharia Elétrica - Telecomunicações pela Universidade Estadual de Campinas. Atualmente professor na Universidade Federal do Pará – Campus Belém, Pará, Brasil (e-mail: jweyl@ufpa.br).

F. S. Farias, doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará. Atualmente professor na Universidade Federal do Pará – Campus Cametá, Pará, Brasil (e-mail: fabriciosf@ufpa.br).

inesgotável com baixa necessidade por manutenção nos painéis e facilidade para implantação [17].

A partir deste contexto, este artigo busca, no melhor do conhecimento dos autores, preencher uma lacuna na literatura, apresentando uma análise de viabilidade econômica da utilização de sistemas fotovoltaicos como fonte energética para redes móveis 5G em ambientes rurais. Para isso, são utilizados os modelos de custos de [11], os quais são adaptados para atendimento de cenários rurais/remotos e esparsos, assim como, é adotada a utilização dos modelos de consumo energético para redes rurais propostos em [8]. Diante deste contexto, as principais contribuições desse trabalho são:

- Adaptação e aplicação de modelos analíticos utilizados para dimensionar sistemas fotovoltaicos, visando atender arquiteturas de redes móveis heterogêneas de quinta geração em ambientes rurais.
- Avaliação da viabilidade técnica e econômica da utilização de sistemas fotovoltaicos como fonte energética de redes de telecomunicações em ambientes rurais;
- Investigação sobre diferentes arquiteturas de redes móveis e seus impactos no consumo geral de energia da rede;
- Análise de sensibilidade da influência de fatores como índice de irradiação solar e densidade de usuários nos custos e economia da implantação de uma rede 5G em ambiente rural.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma: a seção II apresenta os aspectos teóricos e as características de redes 5G e seus seguimentos, assim como, os conceitos do sistema fotovoltaico. A seção III apresenta o estudo de caso com os parâmetros e as métricas adotadas. A seção IV contém as discussões sobre os principais resultados. Por fim, a seção V apresenta as conclusões e trabalhos futuros.

## II. TRABALHOS RELACIONADOS

Em [18] discute-se sobre a crescente demanda por dados móveis e suas influências no consumo de energia elétrica das redes de acesso sem fio. Os autores buscam avaliar o impacto do *backhaul* para o consumo de energia das redes de acesso sem fio, com diferentes demandas de tráfegos de dados. Os resultados mostram que a implantação de *small cells* podem acarretar possíveis problemas ao consumo de energia no *backhaul*, onde tal consumo pode alcançar até 50% do consumo total de energia das redes de acesso sem fio. Porém, a combinação de diferentes tecnologias no *backhaul* apresenta resultados satisfatórios do ponto de vista econômico. Contudo, o trabalho não considera cenários suburbanos ou rurais, além disso, não avalia o uso de energia provida de fontes renováveis para alimentação das arquiteturas.

Já os autores em [19] apresentam um estudo sobre tecnologias para *backhaul* em HetNets, enfatizando a importância do mesmo para a qualidade de serviço na telefonia móvel. De acordo com os resultados, a fibra apresenta menor atraso e melhor qualidade de serviço para *links* de *backhaul* utilizados para cobrir grandes distâncias, por outro lado, os *links* baseados em tecnologia mmWave se destacam em aplicações de curtas distâncias, por exemplo, entre 1 e 2 quilômetros. Além

disso, o estudo destaca que xDSL e sub-6 GHz são adequados para cobertura de *links* de média distância. Embora o estudo apresente resultados satisfatórios para que se propõem, o mesmo não levou em consideração fontes de alimentação baseadas em energias renováveis ou cenários rurais.

Em [20], os autores apresentam um estudo sobre a eficiência energética de HetNets visando a implantação de redes verdes. Para isso, este estudo adota um cenário urbano composto por estações bases macro e *femto*. Além disso, são consideradas tecnologias distintas para o *backhaul*, isto é, micro-ondas, cobre, e fibra óptica. De acordo com os resultados, a melhor opção de arquitetura, depende diretamente do tráfego exigido pela área. Para o cenário composto por baixa requisição de tráfego, a implementação de estações bases macro com *backhaul* baseado em fibra apresenta melhores resultados em termos de eficiência energética, por outro lado, as arquiteturas com estações bases macro e *small cells*, instaladas em áreas com tráfego mais elevado, resultam em maior eficiência no consumo de energia. Os autores sugerem que a utilização de *small cells* sobre influência das tecnologias adotadas no *backhaul*. Embora o trabalho realize uma ampla análise sobre estratégias para redes móveis, o mesmo não considera áreas rurais, assim como, não faz análise de sensibilidade financeira ou ambiental, além de não considerar fontes de energias renováveis.

Em [21], os autores discutem a eficiência e os benefícios da associação do sistema fotovoltaico e turbinas eólicas para redes de acesso 4G interconectadas com *links* de *backhaul* sem fio. O estudo aponta que o uso do modo de suspensão de estações base em sono profundo pode resultar em redução significativa do tamanho do sistema fotovoltaico instalado. Todavia, o trabalho considera uma localidade específica para realizar o experimento, bem como desconsidera variações em fatores que implicam na produtividade energética dos sistemas de energias renováveis, além disso, o trabalho considera uma implantação homogênea, por meio de macrocélulas.

Em [22], os autores apresentam uma discussão sobre os altos consumos de energia quando há negligência no dimensionamento das HetNets, ocasionando na densificação do *backhaul* e como consequência elevando as necessidades de energia elétrica para operação do sistema. Os resultados sugerem significativa eficiência na redução da emissão de gases poluentes, em especial o CO<sub>2</sub>. Além disso, o custo de instalação (CAPEX) da infraestrutura do sistema fotovoltaico apresenta-se inferior aos valores que seriam pagos com o eventual custeio de energia a partir da concessionária durante o período de análise da tecnologia instalada. Embora o trabalho tenha grande profundidade em relação à aplicação de sistemas fotovoltaicos em HetNets e conduza uma análise de custos a partir do CAPEX e custos operacionais (OPEX), os autores não aplicam a avaliação proposta em cenários rurais.

## III. ARQUITETURAS PARA REDES MÓVEIS

Neste trabalho aborda-se a utilização de arquiteturas HetNet, abordando três alternativas tecnológicas de *backhaul*, aplicadas a cenários rurais: micro-ondas, satélite e *Long-Range Passive Optical Network* (LR-PON), conforme Fig. 1.

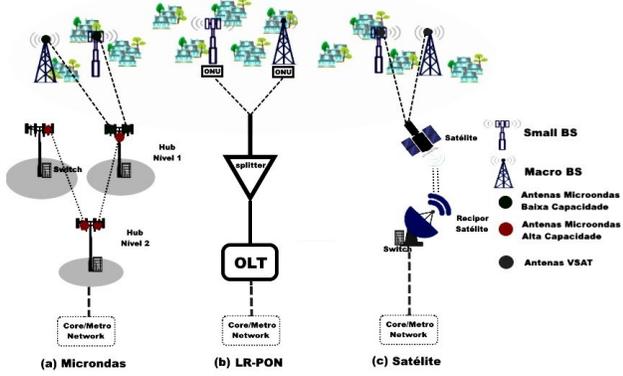


Fig. 1. Representação das arquiteturas para backhaul propostas em [8].

A arquitetura de micro-ondas, conforme Fig. 1 (a), baseia-se na utilização de enlaces sem fio ponto-a-ponto (P2P) com topologia árvore. Assim como em [8], é definido que a rede é composta por dois níveis de hubs. O hub no primeiro nível contém antenas de baixa capacidade ligadas às BSs e um switch de micro-ondas. Os níveis de hubs se conectam utilizando antenas de alta capacidade. O hub no segundo nível está diretamente ligado ao núcleo da rede, logo, estão equipados com switch de Micro-ondas e transceptores plugáveis (SFP+).

Em adição, a arquitetura LR-PON, conforme Fig. 1 (b), está baseada no uso de enlaces de fibra óptica dispostos em múltiplos níveis que usam elementos divisores de potência (splitter) não consumidores de energia elétrica, mas possuindo um alcance maior quando comparada às redes PONs tradicionais. Neste trabalho aborda-se o uso de LR-PON operando sobre com *Time Division Multiplexing* (TDM LR-PON), de forma que quatro tipos de equipamentos são utilizados. Os amplificadores ópticos (AO) para o aumento do alcance da rede e das taxas de transmissão em bits. Os *power splitters* para distribuição do sinal óptico entre os níveis da rede. As *optical line terminal* (OLTs) para conectar o núcleo da operadora que fornece sinal óptico à rede e faz o gerenciamento desta. As *optical network unit* (ONUs) para conversão óptico-elétrica nas BSs.

A arquitetura apresentada pela Fig. 1 (c), é baseada na ligação sem fio ponto a multiponto entre o núcleo da rede e as BSs usando um satélite em órbita terrestre. Assim como em [8], considera-se o conjunto de BSs compartilham uma única ligação com o satélite utilizando *Time Division Multiple Access* (TDMA), de forma que três tipos de equipamentos são utilizados. As *Very Small Aperture Terminals* (VSATs) fazem a ligação entre as BSs e os satélites. O *satellite gateway* faz a ligação entre o núcleo da rede e o satélite. O switch faz agregação do tráfego de BSs e gerenciamento da rede.

#### IV. SISTEMA FOTOVOLTAICO

Um dos principais desafios para as HetNets é o aumento do consumo energético no backhaul e fronthaul [23]. Em vista disso, planejar e dimensionar a infraestrutura utilizando tecnologias alternativas pode ser um caminho viável para economia de recursos técnicos e econômicos. A partir deste contexto, para provimento da energia elétrica utilizada pela infraestrutura de redes móveis em ambientes rurais foi proposto a adaptação do modelo de sistema fotovoltaico de [11], o qual

considera o sistema fotovoltaico em um cenário estritamente urbano.

#### A. Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico

A energia mínima ( $E_{Min}$ ), a ser produzida através dos painéis fotovoltaicos, para o funcionamento de cada arquitetura pode ser obtida por meio do resultado da diferença entre o consumo total de energia ( $Con_{Total}$ ) requerida por cada arquitetura e o consumo mínimo de energia franqueada da concessionária ( $Con_{Franq}^{Min}$ ) pode ser calculado por (1):

$$E_{Min} = Con_{Total} - Con_{Franq}^{Min}, \quad (1)$$

onde  $Con_{Franq}^{Min}$  é obtido em (2):

$$Con_{Franq}^{Min} = N_{Med} Con_{Grid}^{Min}, \quad (2)$$

onde  $N_{Med}$  e  $Con_{Grid}^{Min}$  representam o número de medidores de energia elétrica utilizados em uma determinada arquitetura e o consumo diário mínimo franqueado a partir da concessionária de energia elétrica em kWh, respectivamente. Assim como em [11], neste trabalho é considerado que o número de medidores bidirecionais é igual ao número de inversores utilizados nas arquiteturas ( $N_{Inv} = N_{Med}$ ).

Para complementar o consumo mínimo fornecido pela concessionária de energia, os painéis fotovoltaicos produzem energia elétrica ( $E_{Ger}$ ) que pode ser calculada pela equação (3):

$$E_{Ger} = N_{Inv} E_{Inv}, \quad (3)$$

onde  $N_{Inv}$  e  $E_{Inv}$  representam respectivamente, o número de inversores necessários para suprir a demanda energética de cada arquitetura e o volume total de energia gerado diariamente por um inversor em kWh. O termo  $N_{Inv}$  é definido por (4):

$$N_{Inv} = \left\lceil \frac{Con_{Total}}{E_{Inv}} \right\rceil, \quad (4)$$

enquanto que,  $E_{Inv}$  é dado pela Eq. (5):

$$E_{Inv} = n_{Inv} N_{Inv}^P E_p \quad (5)$$

onde  $n_{Inv}$ ,  $E_p$ , e  $N_{Inv}^P$  são respectivamente os parâmetros de eficiência do inversor que varia entre [0;1], a energia elétrica gerada por um painel solar, e a quantidade de painéis solares que podem ser instalados por inversor, a qual é obtida a partir de (6):

$$N_{Inv}^P = \left\lfloor \frac{P_{Inv}^{Input} t_{Solar}}{E_p} \right\rfloor \quad (6)$$

onde  $P_{Inv}^{Input}$  e  $t_{Solar}$  representam, respectivamente, a potência nominal de um inversor em kW e o tempo médio de exposição da placa ao sol por dia, expresso em horas. A energia gerada por um painel solar ( $E_p$ ) é mensurado em kW e pode ser obtida por (7):

$$E_p = A_p n_p r_s t x_{loss} \quad (7)$$

onde  $A_p$ ,  $n_p$ ,  $r_s$  representam a área de um painel solar em  $m^2$  a taxa de eficiência do painel fotovoltaico para conversão da radiação solar incidente em energia elétrica, variando entre [0;1], e a intensidade dos raios solares incidentes ao longo do dia em (kWh/ $m^2$ .dia). Além disso,  $t x_{loss}$  representa a taxa de perda de desempenho do painel solar no decorrer dos anos, a qual varia de modo decrescente nos intervalos [0,8;1] [11].

## B. Modelos de Custo

Afim de identificar a viabilidade econômica da proposta deste trabalho, é utilizado como base os modelos apresentados em [11], porém, são investigados para um cenário rural e suas respectivas arquiteturas propostas em [8]. Deste modo, é realizada uma análise do Custo Total de Propriedade do sistema fotovoltaico ( $TCO_{FV}$ ).

1) *Custo Total de Propriedade*: O  $TCO_{FV}$  é calculado a partir da soma entre o custo aquisição do sistema fotovoltaico ( $CAPEX_{FV}$ ) e o custo de operação do sistema fotovoltaico ( $OPEX_{FV}$ ), sendo dado por (8):

$$TCO_{FV} = CAPEX_{FV} + OPEX_{FV} \quad (8)$$

2) *Custo de Aquisição do sistema fotovoltaico*: O  $CAPEX_{FV}$  é obtido por meio da soma dos custos ligados à aquisição e instalação dos equipamentos, tais como módulos, inversores e kits de instalação, entre outros, sendo calculado em (9):

$$CAPEX_{FV} = (1 + tx_{Install}) C_{Equip} \quad (9)$$

onde  $tx_{Install}$  e  $C_{Equip}$  representam, respectivamente, a taxa de instalação e o custo inicial dos equipamentos fotovoltaicos (painéis, inversores e kits de instalação). Para a obtenção do termo  $C_{Equip}$ , é utilizado a equação (10):

$$C_{Equip} = \sigma [N_P (C_P^{Unit} + C_{Kit}^{Unit}) + N_{Inv} C_{Inv}^{Unit}] \quad (10)$$

onde  $N_P$  representa o número de painéis fotovoltaicos. Tal quantidade é obtida por  $N_P = N_{Inv} N_{Inv}^P$ , enquanto que,  $C_P^{Unit}$ ,  $C_{Kit}^{Unit}$  e  $C_{Inv}^{Unit}$  representam o custo unitário do painel, e os custos dos kits de instalação dos painéis e do inversor, respectivamente. O parâmetro  $\sigma$  varia no intervalo de  $[0,6;1]$  e representa uma taxa de depreciação do custo de aquisição dos equipamentos fotovoltaicos que respeita a evolução tecnológica e inserção e modernização de equipamentos disponíveis no mercado durante o período de análise do estudo.

3) *Custo de Operação do sistema fotovoltaico*: O  $OPEX_{FV}$  é obtido por meio da soma dos custos de manutenção (troca de partes defeituosas, limpeza e outros), aluguel de espaço e energia. O valor do  $OPEX_{FV}$  pode ser obtido por (11):

$$OPEX_{FV} = N_P A_P C_{m2}^{Rent} N_{Med} (C_{Med} + Con_{Grid}^{Min} C_{Purchase}^{KWh}) + C_M \quad (11)$$

onde  $C_M$ ,  $C_{Med}$ ,  $C_{Purchase}^{KWh}$  e  $C_{m2}^{Rent}$  representam o custo de manutenção da estrutura fotovoltaica, o custo de manutenção de cada medidor, o custo monetário de 1 kWh e o custo de aluguel por  $m^2$  dos áreas/locais de instalação dos painéis, respectivamente. Enquanto que  $N_{Med}$  e  $N_P$  são o número de medidores bidirecionais e o número total de painéis utilizados na arquitetura, respectivamente. Além disso,  $Con_{Grid}^{Min}$  e  $A_P$  representam o consumo mínimo de energia da rede convencional de energia elétrica por medidor bidirecional e a área de um único painel, respectivamente. Dessa forma, o custo de manutenção da estrutura fotovoltaica é dado pela equação (12):

$$C_M = tx_M [N_P (C_P^{Unit} N_{MP} + C_{Kit}^{Unit} N_{MK}) + N_{Inv} C_{Inv}^{Unit} N_{MI}], \quad (12)$$

onde  $tx_M$  representa uma taxa de manutenção sofrida pelos equipamentos, da mesma maneira que  $C_P^{Unit}$ ,  $N_{MP}$ ,  $C_{Kit}^{Unit}$  e  $N_{MK}$  representam o custo de aquisição dos painéis fotovoltaicos, o número de manutenções dos painéis, o custo de aquisição do kit

de instalação dos painéis, e o número de manutenções do *kit*, respectivamente. Enquanto que  $N_{Inv}$ ,  $C_{Inv}^{Unit}$  e  $N_{MI}$  representam o número de inversores utilizados em uma dada arquitetura, o custo de aquisição dos inversores e o número de manutenções destes inversores, respectivamente.

4) *Economia Monetária do Usuário*: A redução do consumo energético garantida pelo uso do sistema fotovoltaico implica em uma economia monetária ao usuário ( $AS_{User}$ ), a qual é relacionada a venda da energia gerada em excesso ( $E_{Extra}$ ) pelo sistema fotovoltaico à concessionária, assim como, ao fato dos equipamentos alimentados não consumirem mais sua energia a partir da rede elétrica. Por conseguinte,  $AS_{User}$  é expressado em (13):

$$AS_{User} = \frac{[E_{Extra} C_{Sale}^{KWh} + Con_{Total} C_{Purchase}^{KWh}] - TCO_{FV}}{\rho \cdot A} \quad (13)$$

onde  $C_{Sale}^{KWh}$  e  $C_{Purchase}^{KWh}$  representam os preços de venda e compra do kWh, ambos valores obtidos com base nos dados da concessionária de energia elétrica. Enquanto que  $\rho$  representa a densidade populacional de usuários (usuários/ $km^2$ ) e  $A$  representa a área residencial ( $km^2$ ). Por fim, a energia extra é dada por (14):

$$E_{Extra} = E_{Ger} - E_{Min} \quad (14)$$

## V. ESTUDO DE CASO

Para efeitos de comparação entre as três arquiteturas de transporte apresentadas na Fig. 1, adota-se um cenário de uma área remota de 30.000  $km^2$ , a qual contém 60 vilas de 50  $km^2$ , com densidade populacional igual 100 usuários por  $km^2$  quadrado. Também, foi levado em consideração que a demanda de tráfego de áreas rurais em 2030 será proporcional à demanda de tráfego esperada em áreas urbanas densas no ano de 2020. O tráfego foi previsto a partir da metodologia apresentada em [24], cujas previsões de tráfego para um período de análise de 15 anos são sintetizadas pela Tabela I.

TABELA I  
PARÂMETROS DE PREVISÃO DE TRÁFEGO

Parâmetros	Valores
Demanda Máxima de Tráfego (2016)	2.6 Mbps/ $km^2$
Demanda Máxima de Tráfego (2023)	82.8 Mbps/ $km^2$
Demanda Máxima de Tráfego (2030)	474.3 Mbps/ $km^2$

Para este estudo de caso será considerado uma cidade rural que possui um sistema de geração de energia provido pela concessionária que está conectada à rede elétrica tradicional [25].

O sistema fotovoltaico foi configurando de forma a estar conectado à rede elétrica convencional, em um perfil de geração distribuída, isto é, funcionando de forma colaborativa com a rede elétrica tradicional, agindo de duas maneiras. Na primeira, a rede convencional fornecerá a energia necessária para manter o *backhaul*, o que ocorre em dias de baixa isolação, isto é, quando o sistema fotovoltaico não conseguir produzir a energia suficiente para atender toda a demanda energética. Na segunda, o sistema fotovoltaico venderá energia para rede tradicional, o que ocorre em dias de muita insolação, isto é, quando se produz mais energia e se ultrapassa os requisitos do *backhaul*.

Por motivos de simplificação é considerado que todas as edificações são edículas. Além disso, assume-se que a área não utilizada entre as vilas é usada como local para implantação dos painéis fotovoltaicos, deste modo, visando minimizar os custos com alugueis, como ilustra a Fig. 2, e evitando os espaços rurais muito valorizados pela agricultura e consequentemente com custos elevados para aluguel [26].

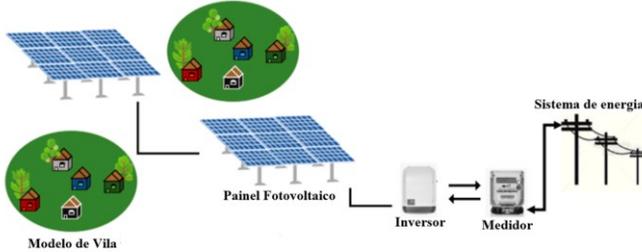


Fig. 2. Sintetização do cenário para o caso de estudo.

Adicionalmente, com base em [8] para a comunicação entre uma BS e o núcleo da rede foi considerado uma distância de 100 km. Afim de mensurar a demanda energética requerida pelos equipamentos utilizados no *backhaul* e associados a cada arquitetura, foram considerados os dados de [8], os quais são sumarizados na Tabela II. A partir dos referidos dados, projeta-se o consumo de energia para os próximos anos considerando um cenário com condições técnicas discutidas na literatura [8][11][21]. Onde as arquiteturas estudadas estão ligadas a fonte de energia em período integral.

Além disso, para o sistema fotovoltaico foi considerado a variação na irradiação solar entre 2,5 e 7,5 kWh/m<sup>2</sup> por dia com média de 4,0 kWh/m<sup>2</sup> por dia [27]. Por fim, adotou-se o posicionamento dos painéis com irradiação solar incidente no plano horizontal com ângulo igual a zero (0° N) [27]. A Tabela III apresenta os dados utilizados para o sistema fotovoltaico e obtidos a partir de [28]–[32].

TABELA II  
PARÂMETROS ENERGÉTICO DAS ARQUITETURAS

	EQUIPAMENTOS	VALORES
<b>Micro-ondas</b>	Antenas Alta/Baixa Potência ( $P_{MW}^h$ ) ( $P_{MW}^l$ )	(50,30) W
	Potência do <i>Switch</i> ( $P_{MW}^s$ )	50 W
	Capacidade do <i>Switch</i> ( $C_{MW}^s$ )	8 Gbps
	Número de <i>hub</i> no 1° Nível	16
<b>Satélite</b>	Antenas Alta/Baixa Potência ( $P_{SAT}^h$ ) ( $P_{SAT}^l$ )	(75,50) W
	Potência do <i>Switch</i> ( $P_{SAT}^s$ )	50 W
	Capacidade do <i>Switch</i> ( $C_{SAT}^s$ )	8 Gbps
	Potência da Unidade de Rede Óptica ( $P_{ONU}$ )	5 W
<b>LR-PON</b>	Potência do Amplificador Óptico ( $P_{OA}$ )	8 W
	Potência Terminal de Linha Óptica ( $P_{OLT}$ )	1197 W
	Número de Amplificadores Ópticos ( $N_{OA}$ ), <i>Local Exchange</i> ( $N_{LR}$ ) e <i>Card</i> ( $N_{card}$ )	3, 8 e 9

TABELA III  
PARÂMETROS DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Equipamentos	Valor
Área do Painel Fotovoltaico	1.940352 m <sup>2</sup>
Potência e Eficiência do Painel	330 W e 17%
Tempo de Garantia do Painel	25 Anos
Taxa de Perda de Desempenho do Painel	0,5% a.a.
Custo Unitário do Painel e Kit de Instalação	R\$: 679,00 e R\$: 199,75
Tempo de Garantia dos Kits de Instalação	12 Anos
Potência Nominal e Eficiência do Inversor	60 kW e 98%
Tempo de Garantia do Inversor	05 Anos
Custo Unitário do Inversor	R\$: 20.246,45
Custo de Instalação do Medidor Bidirecional	R\$: 300,00
Consumo Mínimo por Medidor	100 kWh
Custo de Compra e Venda do KWh	R\$: 0,671 e 0,64/kWh
Custo do Aluguel de Área/m <sup>2</sup>	R\$: 183,96 a.a./m <sup>2</sup>
Taxa de manutenção dos equipamentos	1% a.a.

## VI. ANÁLISE DE RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados obtidos a partir do estudo de caso. A Fig. 3 ilustra a projeção do consumo energético em kWh de arquiteturas de redes móveis rurais com *backhaul* baseado em Satélite, ou Micro-ondas ou LR-PON. A partir dos resultados constata-se que o crescimento do consumo energético varia com o passar dos anos, em função da previsão do aumento de requisições de tráfego de dados móveis esperado para os próximos anos (conforme Tabela I), que por consequência resulta no aumento do número de equipamentos instalados no *backhaul*.

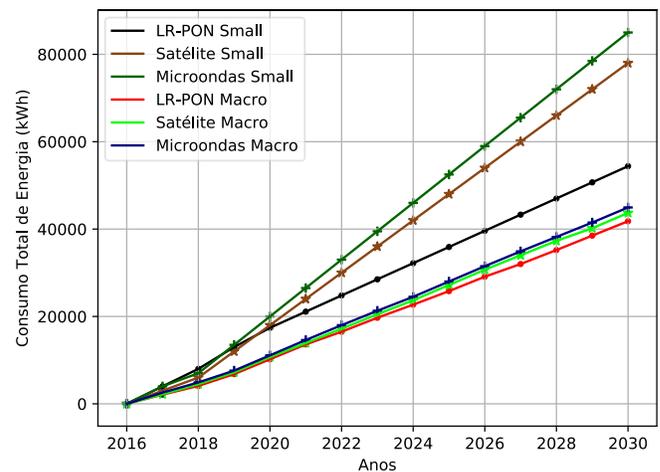


Fig. 3. Projeção do consumo total de energia para as determinadas arquiteturas.

Dentre as arquiteturas apresentadas, a LR-PON-Macro apresenta o menor consumo de energia, enquanto que a arquitetura baseada em Micro-ondas-*Small* apresenta o maior consumo energético. Esse comportamento se justifica pelo fato de PONs utilizarem equipamentos passivos, os quais reduzem consideravelmente o consumo de energia do *backhaul*. Além

disso, os equipamentos utilizados na transmissão de Microondas possuem alto consumo energético [33].

Tendo em vista o consumo das arquiteturas, a Tabela IV apresenta os valores de referência para o custo monetário do consumo de energia elétrica proveniente de determinada concessionária de energia em relação a cada arquitetura analisada. Tais valores podem ser obtidos a partir do consumo de energia total esperado anualmente por determinada arquitetura *backhaul* multiplicado pelo preço do kWh. Tal valor servirá de referência para comparação da instalação do sistema fotovoltaico como fonte de energia alternativa, isto é, quando o custo de aquisição e operação do sistema fotovoltaico é inferior ao custo de energia definido na Tabela IV, sua adoção é vantajosa.

TABELA IV  
VALORES DE REFERÊNCIA PARA O CONSUMO ENERGÉTICO DE CADA ARQUITETURA JUNTO À CONCESSIONÁRIA

Arquitetura	Milhões de Reais (R\$)
LR-PON – Macro e LR-PON – Small	93,7 e 133,1
Microondas – Macro e Microondas –Small	98,0 e 185,9
Satélite – Macro e Satélite – Small	96,7 e 170,0

A Fig. 4 ilustra os valores associados ao  $TCO_{FV}$ , em função da intensidade de radiação solar média. Com base nos valores apresentados na Tabela IV, apesar do cenário proposto considerar uma área geográfica extensa com vilas esparsas, onde a rede de telecomunicações necessita de um número elevado de equipamentos para poder disponibilizar cobertura em toda a área, o  $TCO_{FV}$  expresso em milhões de reais (R\$) é inferior ao valor estimado quando se utiliza a rede convencional de energia. Dessa forma, mesmo com tais características, observa-se vantagens econômicas quando a irradiação solar assume valores superiores a  $4,0 \text{ kWh/m}^2\text{.dia}$ . Para esta irradiação, o  $TCO_{FV}$  varia aproximadamente entre 86,4 e 170,0 milhões de Reais (R\$). Por outro lado, o valor com energia elétrica quando não se utiliza os sistemas fotovoltaicos variam de 93,7 até 185,9 milhões de Reais (R\$), conforme resumido na Tabela IV.

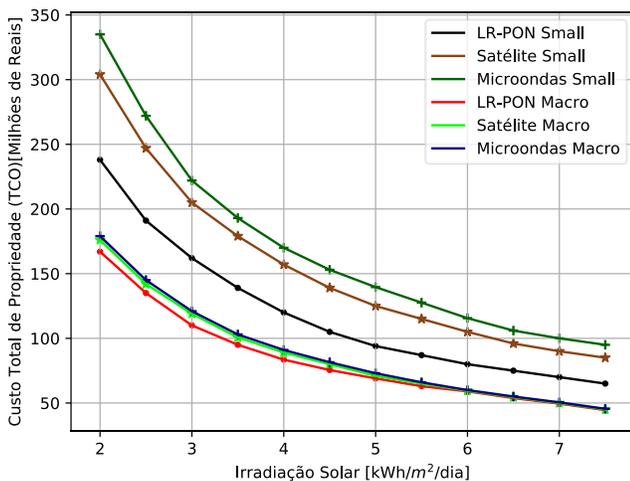


Fig. 4. Custo total de propriedade do sistema fotovoltaico em função da radiação solar.

Desta forma, aponta-se vantagem econômica na instalação de sistemas fotovoltaicos em áreas rurais localizadas em partes do

planeta como as situadas entre os trópicos de Capricórnio e Câncer (i.e., na maioria das regiões da América Latina, África e Ásia). Tais regiões apresentam irradiação solar próximas ou superiores a  $4,0 \text{ kWh/m}^2\text{.dia}$ . Além disso, a adoção de energias renováveis também causa um impacto ambiental positivo por reduzir as emissões de gases poluentes na atmosfera.

Outra análise realizada refere-se à viabilidade do sistema fotovoltaico como fonte de energia em redes móveis remotas. A Fig. 5 apresenta o custo médio anual de implantação e do sistema fotovoltaico dividido pelo número de usuários e em função da intensidade de irradiação solar da área. Os resultados demonstram que embora a densidade populacional seja reduzida em áreas rurais, o custo monetário associado à instalação do sistema fotovoltaico em arquiteturas *backhaul* pode aumentar o custo das redes entre 2 e 6 reais/usuário/ano para regiões com irradiação solar superior a  $4,0 \text{ kWh/m}^2\text{.dia}$ . Deste modo, se tornando como uma opção competitiva para ser instalada.

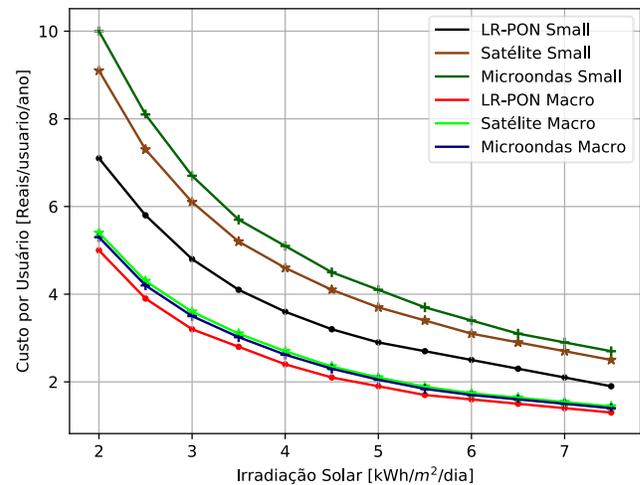


Fig. 5. Custo do Sistema fotovoltaico por usuário ao ano em função da irradiação solar.

Complementarmente, a Fig. 6 apresenta a economia que pode ser gerada por usuário em função do aumento do índice de irradiação solar.

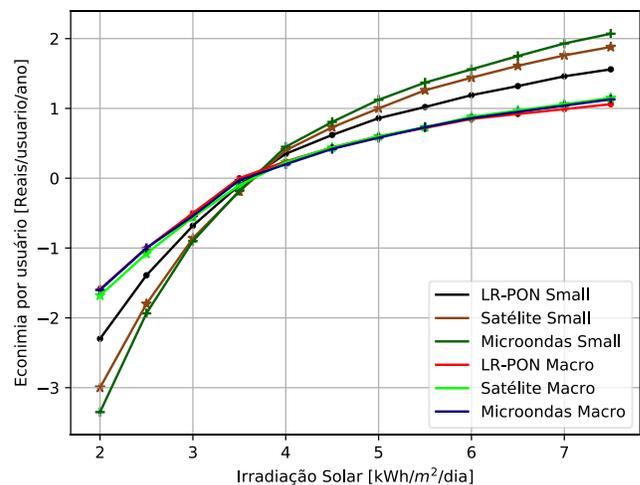


Fig. 6. Economia gerada pelo usuário em função da irradiação solar.

A partir dos dados obtidos, se percebe que quando a irradiação solar alcança  $3.5 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{dia}$  existe um ponto de convergência em que as arquiteturas *backhaul* que utilizam o sistema fotovoltaico passam a obter lucro. Deste modo, é possível observar que o correto planejamento da infraestrutura do sistema fotovoltaico, assim como, a escolha correta da arquitetura *backhaul* que serão instaladas em determinada localidade podem resultar em economia para usuários e operadoras.

É importante destacar que o aumento da densidade de usuários, implica em uma convergência do valor de custo associado aos usuários entre as arquiteturas. Neste contexto, de acordo com a Fig. 7, à medida que a densidade de usuários aumenta, a aproximação dos valores fica evidente, deixando uma diferença mínima no custo por usuário entre as arquiteturas. De fato, as altas densidades de usuários apresentam baixo impacto no custo aos usuários finais, como em cenários urbanos [11]. No entanto, de acordo com a Fig. 7 mesmo em áreas rurais onde as redes móveis têm poucos usuários por  $\text{km}^2$ , demonstrou-se que o impacto nos custos ao usuário final é mínimo.

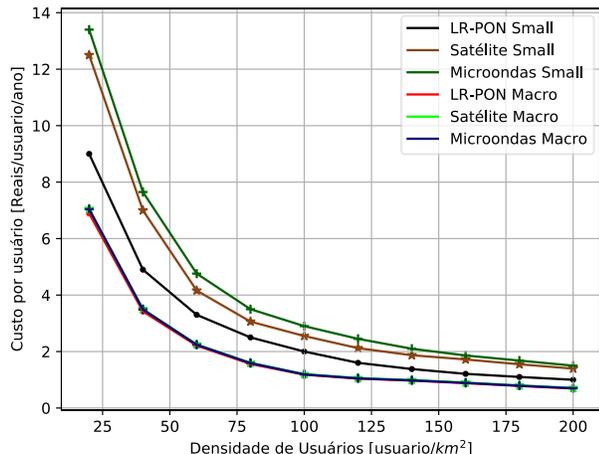


Fig. 7. Custo do Sistema fotovoltaico por usuário ao ano em função da densidade de usuários.

## VII. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

No presente trabalho foi apresentado um estudo sobre a implantação de um sistema fotovoltaico aplicado a redes móveis 5G em ambientes rurais. Para avaliar a solução, uma análise técnica e econômica foi conduzida comparando os custos do sistema fotovoltaico em comparação com a matriz energética convencional. Neste trabalho foram adotadas as tecnologias micro-ondas, satélite e LR-PON para o *backhaul*, assim como, para as redes de acesso sem fio foram adotadas as estações bases do tipo Macro e *Small*. A avaliação de variabilidade foi realizada com base em modelos de consumos energéticos das redes sem fio e do *backhaul*, bem como, em modelos de custo para aquisição do sistema fotovoltaico.

A partir dos resultados obtidos é possível concluir que o uso de energia renovável aplicada a rede móvel rural é uma alternativa viável, uma vez que, o custo total para aquisição do sistema fotovoltaico tem um valor inferior ao que se gastaria com energia consumida da rede elétrica convencional. Dessa forma, essa alternativa de matriz energética se apresenta

promissora financeiramente, pois as economias monetárias obtidas a cada ano alcançam lucratividade significativa após a quitação do sistema fotovoltaico implementado. Além disso, sugere-se que um aumento proporcional entre as condições de insolação da região resulta na viabilidade da utilização do sistema fotovoltaico no *backhaul* e que quanto maior for o índice de irradiação solar menor será o custo total para aquisição do sistema fotovoltaico, e conseqüentemente maiores, a economia financeira projetada aos usuários finais.

Contudo, apesar do cenário proposto considerar na análise uma baixa densidade de usuários por  $\text{m}^2$ , os resultados indicam que mesmo com essas condições a implantação do sistema fotovoltaico é economicamente viável para implantação no *backhaul*. Como trabalhos futuros planeja-se desenvolver novas arquiteturas de rede móveis utilizando outras tecnologias para os diversos seguimentos com seus respectivos outros modelos de consumo. Bem como, desenvolver novas pesquisas sobre outras fontes de energias renováveis e considerando a utilização de sistemas fotovoltaicos *off-grid*, isto é, utilizando baterias para armazenamento de carga, afim de diversificar a matriz energética para efeitos de comparações, assim como, para avaliar o potencial de implantação e financeira das mesmas. Por fim, planeja-se reproduzir este experimento considerando cenários rurais e esparsos realísticos para implantação dos serviços em cidades da Amazônia ou do deserto da África.

## VIII. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Pró-Reitoria de Extensão (PROEX) e Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação (PROPESP) da Universidade Federal do Pará (UFPA).

## REFERÊNCIAS

- [1] ITU. "Setting the Scene for 5G: Opportunities & Challenges". International Telecommunication Union (ITU). Disponível em: <<https://www.itu.int/en/Pages/default.aspx>>. Acesso em: 02 de jun de 2019.
- [2] Q. Wu, G. Li, W. Chen, D. Ng e R. Schober, "An overview of sustainable green 5G networks", IEEE Wireless Commun., vol. 24, no. 4, pp. 72-80, Aug. 2017.
- [3] M. Seruffo, W. V. Araujo, D. da S. Souza, C. A. de M. Teixeira, D. L. Cardoso, "Análise de Heurísticas de Implementação de Small-Cells em Arquitetura Centralizadas: Análise Baseada em Custo e Capacidade". XXXV Simpósio Brasileiro De Telecomunicações E Processamento De Sinais – SBrT. São Pedro-SP. pp.3-6 de setemb. De 2017.
- [4] Q. Ye, B. Rong, Y. Chen, Al-Shalash, M., Caramanis, C. e Andrews, J. G. "User association for load balancing in heterogeneous cellular networks," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 12, no. 6, pp. 2706–2716, Jun. 2013.
- [5] D. Breuer, E. Weis, S. Krauß, J. Belschner, F. Geilhardt, "Assessment of future backhaul and fronthaul networks for HetNet architectures", Proc. Int. Conf. Transparent Opt. Netw., pp. 1-2, Jul. 2015.
- [6] Imme Philbeck, CONNECTING THE UNCONNECTED Working together to achieve Connect 2020 Agenda Targets, ITU White Paper, 2017.
- [7] L. Chiaraviglio, N. Blefari-Melazzi, W. Liu, J. A. Gutierrez, J. Vanc De Beek, R. Birke, L. Chen, F. Idzikowski, D. Kilper, P. Monti, A. Bagula, J. Wu, "Bringing 5G into Rural and Low-Income Areas: Is it Feasible?", IEEE Communications Standards Magazine, 2017.

- [8] M. Fiorani, S. Tombaz, P. Monti, M. Casoni, L. Wosinska, "Green backhauling for rural areas", *Optical Network Design and Modeling 2014 International Conference*, pp. 114-119, 2014.
- [9] A. Bisu, A. Gallant, H. Sun, K. Brigham, A. Purvis, "Telemedicine via Satellite: Improving Access to Healthcare for Remote Rural Communities in Africa". *IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10-HTC)*, pp. 1-6, 2018.
- [10] J. Ellershaw, J. Riding, A. Tran, L. Guan, e T. Smith, "Economic analysis of broadband access for australian rural and remote areas," in *Telecommunication Networks and Applications Conference, 2008. ATNAC 2008. Australasian*, pp. 1-4, dec. 2008.
- [11] M. A. Souza, F. Farias, H. P. Kuribayashi, C. R. L. Frances, J. C. W. A. Costa, D. L. Cardoso, "A Photovoltaic System for Heterogeneous Networks: a Technical, Economic and Environmental Analysis", *Journal of Communication and Information Systems*, vol. 35, no. 1, pp. 90-102, 2020.
- [12] D. Renga, M. Meo, "Dimensioning renewable energy systems to power mobile networks", *IEEE Trans. Green Commun. Netw.*, vol. 3, no. 2, pp. 366-380, Jan. 2019.
- [13] G. Piro, M. Miozzo, G. Forte, N. Baldo, L. Grieco, G. Boggia e P. Dini, "HetNets powered by renewable energy sources", *IEEE Internet Comput.*, vol. 17, no. 1, pp. 32-39, Jan. 2013.
- [14] M. A. Marsan, G. Bucalo, A. Di Caro, M. Meo e Y. Zhang, "Towards zero grid electricity networking: Powering BSs with renewable energy sources", *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. Workshops (ICC)*, pp. 596-601, Jun. 2013.
- [15] M. Colin, B. R. Malcolm, D. Faisal, W. Stephan e S. W. Robert, "WindFi" - A renewable powered base station for rural broadband", *19ª Conferência Internacional sobre Sistemas, Sinais e Processamento de Imagens (IWSSIP)*, pp. 265 - 268, Abr. de 2012.
- [16] Z. Wang, D. Luo, R. Li, L. Zhang, C. Liu, X. Tian, Y. Li, Y. Su e J. He, "Research on the active power coordination control system for wind/photovoltaic/energy storage", *2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, pp. 1-5, 2017.
- [17] F. Shabnam, "Analysis of Energy Harvesting Techniques for Mobile Networks," *2019 IEEE Region 10 Symposium (TENSYP)*, Kolkata, India, 2019, pp. 784-788.
- [18] S. Tombaz, P. Monti, F. Farias, M. Fiorani, L. Wosinska e J. Zander, "Is backhaul becoming a bottleneck for green wireless access networks?", *IEEE Int. Conf. Commun. (ICC)*, pp. 4029-4035, Jun. 2014.
- [19] G. Zhang, T. Quek, M. Kountouris, A. Huang, e H. Shan, "Analysis and Optimization for Heterogeneous Backhaul Technologies", *Wiley Telecom*, pp. 232, Out. 2016.
- [20] M. Fiorani, S. Tombaz, F. Farias, L. Wosinska e P. Monti, "Joint design of radio and transport for green residential access networks", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 34, no. 4, pp. 812-822, Abr. 2016.
- [21] A. Marsan, G. Bucalo, A. Caro, M. Meo e Y. Zhang, "Towards zero grid electricity networking: Powering BSs with renewable energy sources", *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. Workshops (ICC)*, pp. 596-601, Jun. 2013.
- [22] M. A. Souza, F. Farias, J. C. W. A. Costa, D. L. Cardoso, *Technical Economic Analysis of Photovoltaic Systems in Heterogeneous Mobile Networks*. *Procedia Computer Science*, v. 109, pp. 825-832, 2017.
- [23] C. Li, A. Yongacoglu e C. D'Amours, "Heterogeneous cellular network user distribution model", *Communications (LATINCOM) 2016 8th IEEE Latin-American Conference on IEEE*, pp. 1-6, 2016.
- [24] G. Auer, O. Blume, *Earth Project D2.3 - Energy efficiency analysis of the reference systems, areas of improvements and target breakdown*. *Energy Aware Radio and Network Technologies (EARTH)*, INFOS-ICT-247733, ver. 2.0. [Online]. Disponível em: <http://www.ictearth.eu/>. Acesso em: 14 de maio 2019.
- [25] R. Zilles, W. Macêdo, M. Galhardo e S. Oliveira, "Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica". São Paulo: Oficina de Textos, 2012.
- [26] T. Menezes, C. Azzoni e G. Moreira, *Diferenças Em Gastos Com Aluguel Entre Estados, Tipos De Área E Níveis De Renda Familiar No Brasil*. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br>. Acesso em 4 nov. 2018.
- [27] E. B. Pereira, et al. *Atlas Brasileiro de Energia Solar*, São José dos Campos: 2ª edição. INPE, 2017.
- [28] Neosolar Energia. *Kit de Montagem Fotovoltaico Thesan para telhado*. Disponível em: <http://www.neosolar.com.br/>. Acesso em: 16 nov. 2018.
- [29] Inverter Go. 60KW Grid Tie Inverter three phase Data Sheet. Disponível em: <http://www.invertergo.com/>. Acesso em: 17 nov. 2018.
- [30] R. Nakabayashi, *Microgeração Fotovoltaica No Brasil: Condições Atuais e Perspectivas Futuras*. Disponível em: [http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/106/106131/tde26012015141237/publico/Dissertacao\\_Renny\\_vfinal.pdf](http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/106/106131/tde26012015141237/publico/Dissertacao_Renny_vfinal.pdf): Universidade de São Paulo, jan. 2014.
- [31] Agência Nacional de Energia Elétrica. *Regulamenta Medidores Eletrônicos*. Disponível em: [http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output\\_Noticias.cfm?Identidade=5903&id\\_area=90](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=5903&id_area=90). Acesso em: 17 nov. 2018.
- [32] F. Farias, P. Monti, A. Vastberg, M. Nilson, J. Costa, L. Wosinska, "Green backhauling for heterogeneous mobile access networks: What are the challenges?", *Information Communications and Signal Processing (ICICS) 2013 9th International Conference on IEEE*, pp. 1-5, 2013.
- [33] Y. Niu, "Energy-efficient scheduling for mmWave backhauling of small cells in heterogeneous cellular networks", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 66, no. 3, pp. 2674-2687, Mar. 2017.



**Marcos Vinicius dos Passos Oliveira** Bacharel em Sistemas de Informação pela Universidade Federal do Pará - UFPA. Estudante de mestrado em Computação na Universidade Federal Fluminense. Membro colaborador para o Laboratório de Programação Extrema (LABEX) desde 2016.



**André Lucas Pinho Fernandes** possui Mestrado e doutorado em andamento com ênfase em Telecomunicações, pela Universidade Federal do Pará – UFPA. Membro colaborador do Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado (LEA).



**Felipe Vitor Souza Dos Reis** graduando em Engenharia da computação, pela Universidade Federal do Pará – UFPA, Membro colaborador do Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado (LEA) e do Laboratório de Programação Extrema (LABEX).



**Hugo Pereira Kuribayashi** possui Mestrado e doutorado em andamento em Computação Aplicada, pela UFPA. Atualmente atua como Professor da Faculdade de Computação e Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (Unifesspa), desde 2017.



**Marcela Alves De Souza** possui Mestrado e doutorado em andamento em Computação Aplicada, pela UFPA. Atualmente atua como Técnica em Tecnologia da Informação pela Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (Unifesspa). Membro colaboradora do Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado (LEA).



**Leonardo Nunes Gonçalves** Bacharel em Engenharia de Computação pela Universidade Federal do Pará (UFPA). Atualmente é aluno de mestrado no programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica – UFPA. Membro colaborador do Laboratório de Programação Extrema (LABEX) desde 2017.



**Joao Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa** possui mestrado em Engenharia Elétrica, pela PUC do Rio de Janeiro (1989) e doutorado em Engenharia Elétrica, pela UNICAMP (1994). Professor da UFPA e Coordenador do Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado (LEA).



**Fabricio de Souza Farias** possui Mestrado e Doutorado em Engenharia Elétrica, pela UFPA, respectivamente (2012) e (2016). Graduação em Engenharia da Computação pela UFPA (2011). Professor da UFPA - CUNTINS desde 2014. Coordenador do Laboratório de Programação Extrema (LABEX) desde 2014.