

# Implantação de um Sistema Fotovoltaico Otimizado em Arquitetura de Rádio Centralizada

Paline A. Saraiva, Marcela A. de Souza, Hugo P. Kuribayashi, Adam D. F. Santos, João C. W. A. Costa e Diego L. Cardoso

**Resumo**— Entre os requisitos da próxima geração de redes móveis está a redução massiva do consumo de energia. A adoção de sistema fotovoltaico (SF) tem sido investigada na literatura, entretanto os custos de implantação ainda são desafiadores, e para uma implantação economicamente viável é necessário dimensionar o SF com custo mínimo. Assim, este trabalho propõe a utilização de um SF otimizado em uma Arquitetura de Rádio Centralizada (CRA). Com base nos resultados, observa-se que a técnica de otimização utilizada implica na redução dos custos de propriedade do SF, com uma diferença média de 0,02 milhão de reais.

**Palavras-Chave**— Sistema Fotovoltaico, ILP, CRA.

**Abstract**— Among the requirements of the next generation of mobile networks is the massive reduction in power consumption. The adoption of photovoltaic systems (SF) has been investigated in the literature, however the implementation costs are still challenging, and for an economically viable deployment it is necessary to size SF with minimum cost. Thus, this work proposes the use of an optimized SF in a Centralized Radio Architecture (CRA). Based on the results, it is observed that the optimization technique used implies the reduction of SF ownership costs, with an average difference of 0.02 million reais.

**Keywords**— Photovoltaic System, ILP, CRA.

## I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a crescente demanda por maiores taxas de dados e melhor qualidade de serviços de Internet tem resultado em diversos desafios de projeto e planejamento da próxima geração de redes móveis (5G). Uma abordagem promissora relacionada ao 5G está baseada no uso de Arquitetura de Rádio Centralizada (CRA) [1], que propõe a centralização, compartilhamento e alocação inteligente de recursos computacionais.

Com as redes 5G, espera-se testemunhar um aumento significativo no número de conexões, dispositivos, além de requisitos cada vez maiores de serviço e cobertura. Novas aplicações irão densificar a rede. Assim, torna-se ainda mais crítico incorporar tecnologias verdes e sustentáveis nos futuros sistemas de comunicação baseados em 5G, para economia de energia significativa [2]. Na literatura tem se observado diversos esforços de pesquisa no sentido de minimizar/otimizar o consumo energético, dentre eles, destaca-se áreas como uso

Paline A. Saraiva, Marcela A. de Souza, Hugo P. Kuribayashi, Adam D. F. Santos, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Fl. 17 Qd. 04 LT Especial, Marabá-PA 68505-080, e-mails: {palinealves, marcela.alves, hugo, adamdreyton}@unifesspa.edu.br;

João C. W. A. Costa, Diego L. Cardoso, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, R. Augusto Corrêa 01, Belém-PA 66075-110, e-mails: {jwyl, diego}@ufpa.br.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

de fontes de energia renovável, melhorias na eficiência espectral, aplicação de técnicas de economia de energia ou ainda maneiras de superar a limitação de bateria dos dispositivos dos usuários.

Em virtude desse cenário, duas perspectivas de redução do consumo de energia em redes móveis podem ser consideradas. A primeira refere-se a eficiência energética, ao buscar reduzidos níveis de consumo de energia [3], enquanto que a segunda busca a adoção de técnicas de coleta de energia a partir de fontes de energia renovável, tais como energia eólica, solar, entre outras, para geração e autoconsumo de energia elétrica [4].

Diante disso, muitas pesquisas têm sido realizadas evidenciando a utilização de energia renovável, mediante a aplicação de sistema fotovoltaico, para aumentar a autossuficiência e sustentabilidade ecológica da infraestrutura de *Radio Access Network* (RAN) [5], [6].

Em [5] foi proposto o uso de um sistema de energia solar fotovoltaico utilizando baterias para alimentar uma estação base *Long-Term Evolution* (LTE) em diferentes cenários com captura de energia. Para tanto foi utilizada a abordagem de Programação Inteira Mista (MIP), visando a minimização de custos ao longo do período de 10 anos.

Em [6] é utilizado o *Hybrid Optimization Model for Electric Renewables* (HOMER), como forma de buscar a sustentabilidade de um sistema de energia solar autônomo para redes heterogêneas com base nas características da exposição à radiação solar na Coreia do Sul.

O estudo de [7] realiza uma avaliação técnico-econômica para a aquisição, implantação e operação de sistema fotovoltaico no contexto de redes móveis heterogêneas, considerando conjuntamente o consumo energético das redes de rádio, *fronthaul* e *backhaul*. No entanto, não se observa a utilização de técnicas de otimização que auxiliem na minimização dos custos de implantação e manutenção, trazendo assim maior viabilidade de implantação do sistema fotovoltaico.

Apesar da abordagem de planejamento utilizada em [7], os custos de implantação de um sistema fotovoltaico (SF) representam um desafio a ser superado, e desta forma, o escopo deste trabalho contempla o estudo de caso de [8], considerando um SF, modelado como um problema de minimização do custo, formulado como um problema de Programação Linear Inteira (ILP), objetivando reduzir ainda mais os custos relacionados à CRA.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte maneira, a seção II aborda o referencial teórico, referente à CRA e ao SF. A seção III apresenta a definição do problema

e a modelagem analítica do problema de minimização de inversores. A seção IV aborda a avaliação do consumo de energia, a seção V aborda a modelagem de custo do sistema fotovoltaico, a seção VI o estudo de caso, enquanto que a seção VII apresenta os resultados obtidos e a seção VIII apresenta as conclusões obtidas e os trabalhos futuros.

## II. REFERENCIAL TEÓRICO

### A. Arquitetura de Rádio Centralizada

Uma CRA é composta de três componentes principais: (i) Antenas indoor; (ii) Unidades de rádio remoto (RRUs); (iii) Unidades de banda base (BBUs). Uma representação da arquitetura de CRA é apresentada pela Figura 1.

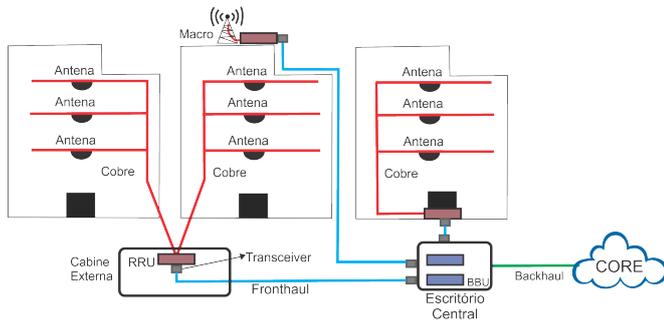


Fig. 1. Representação da CRA.

A CRA, incorpora os benefícios da banda de base centralizada graças à separação de RRUs e BBUs. Além disso, um CRA desacopla antenas de RRUs e permite a colocação de RRU em gabinetes internos ou externos, onde podem ser compartilhados por antenas colocadas em diferentes edifícios. Em uma CRA, as RRUs se comunicam com antenas por meio de sinais de frequência intermediária sobre cabos de cobre, permitindo a reutilização de cabos de cobre existentes no prédio [9].

### B. Sistema Fotovoltaico

A energia elétrica pode ser obtida a partir da conversão direta da energia solar, sendo denominada de energia solar fotovoltaica [10]. A estrutura básica de um SF contém os seguintes componentes: painel, inversor de corrente e medidor bidirecional de energia elétrica.

Os painéis fotovoltaicos, são formados por um conjunto de células solares ligadas eletricamente entre si, possuindo como principal objetivo a geração de tensão e corrente suficientes para conversão da energia solar em energia elétrica.

O inversor, atua convertendo a tensão e a corrente contínua, que recebe do módulo fotovoltaico, em corrente alternada.

Além disso conta com a tecnologia *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) que possui a finalidade de captar a máxima potência do arranjo fotovoltaico. Os painéis apresentam propriedades elétricas não lineares de tensão versus corrente, as quais variam de acordo com o nível de radiação solar e de temperatura, apresentando apenas um ponto de máxima potência. Assim, usa-se o MPPT, pois este age constantemente rastreando e levando o inversor a operar neste ponto,

garantindo que o módulo esteja sempre emitindo a sua máxima potência elétrica instantânea [11], [12], [13].

O medidor bidirecional registra a energia consumida da concessionária de energia elétrica e a excedente oriunda do SF, a qual é injetada na rede elétrica para futura compensação dos créditos gerados [14].

## III. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE MINIMIZAÇÃO DE INVERSORES

Para a implantar um SF em uma CRA, de forma econômica, é necessário dimensionar o quantitativo de inversores que atenda a demanda energética com custo mínimo. Nesta seção, descrevemos em detalhes e formulamos matematicamente o problema de minimização de inversores como um ILP.

A partir de [7], assume-se que um dos itens de maior impacto no valor do custo da infraestrutura fotovoltaica é baseado no quantitativo de inversores a serem implantados em um dado cenário, já que estes são os componentes mais caro do SF. Assim, para realizar o atendimento da CRA de modo viável financeiramente, é importante reduzir o quantitativo de inversores a serem implantados na referida arquitetura.

Portanto, o presente trabalho propõe a minimização do número de inversores até que estejam na quantidade necessária para atender as necessidades da arquitetura sem afetar seu desempenho. Para isso, realiza-se uma estimativa dos equipamentos fotovoltaicos utilizando os cálculos convencionais de dimensionamento [7] e o resultado gerado serve de entrada para o ILP que irá realizar a minimização da quantidade de inversores respeitando as restrições impostas.

### A. Definição do problema

Neste trabalho, analisa-se a implantação ideal de um SF em uma área residencial, onde assumimos um cenário CRA *greenfield* [8]. A Figura 2 apresenta uma vista do topo de cima da área que está sendo levada em consideração. Os painéis são colocados nas coberturas dos prédios de modo a haver uma melhor captura de radiação solar. Em adição, os blocos cinza representam os edifícios de uma dada área residencial, os blocos verdes trazem todas as possíveis localizações de RRU, que podem ser cabines internas ou externas ao prédio. Já os blocos vermelhos consistem nas possíveis localizações dos inversores fotovoltaicos. Os inversores são instalados dentro do edifícios em uma área específica, onde podem ser conectados aos painéis.

Neste caso, um inversor pode conectar painéis em diferentes edifícios, se este possuir potência suficiente e estiver dentro das limitações de perda de potência/distância. Assume-se que a infraestrutura fotovoltaica atende a demanda energética de todos os equipamentos que compõem o *fronthaul* da rede, tais como, antenas *indoor*, RRU, BBU, SFP+ e Macro BSs, além disso, considera-se também o consumo de refrigeração do *Central Office*.

Para calcular a taxa de perda de energia do cabo que conecta um painel a um inversor adotou-se a Eq. (1), conforme apresentado em [15]:

$$T_{loss} = \frac{2 \cdot L \cdot I}{k \cdot S \cdot U} \cdot 100, \quad (1)$$

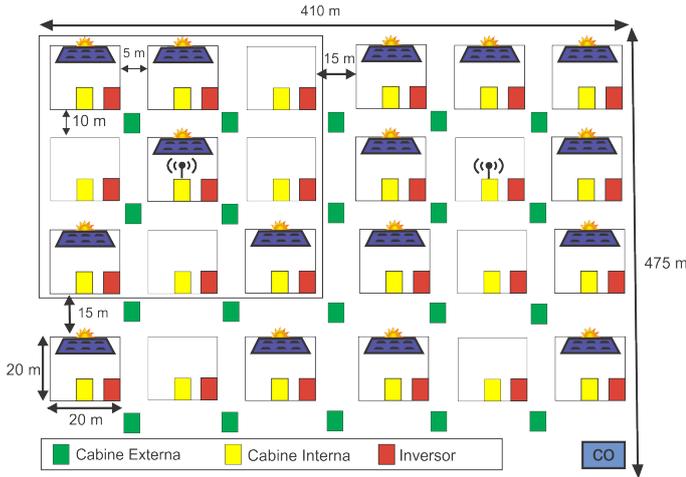


Fig. 2. Exemplo do cenário considerado no estudo.

onde  $L$  representa o comprimento do cabo de ligação entre painel e inversor, sendo calculado usando a Geometria Taxicab que considera a distância entre dois pontos como a soma das distâncias em cada uma das dimensões espaciais [8]. Em adição,  $I$ , representa a corrente contínua dos painéis conectados ao inversor (A),  $k$  representa a condutância elétrica do cobre (S.m/mm<sup>2</sup>), enquanto que  $S$  denota a seção do cabo usado (mm<sup>2</sup>) e  $U$  descreve a saída de tensão dos painéis (V).

### B. Formulação ILP do Sistema Fotovoltaico

A formulação matemática do problema de minimização do quantitativo inversores é apresentada abaixo.

Notação:

- $H$ : conjunto de possíveis localizações de inversores; Cada inversor pode conectar 01 (um) ou mais painéis;
- $P$ : conjunto de localizações de painéis;
- $v_s$ : quantidade de painéis conectados em  $s \in H$ ;

Parâmetros de entrada:

- $B[|H| \times |P|]$ : matriz de cobertura entre inversores e painéis, em que  $B_{st} = 1$  denota que um inversor  $s \in H$  pode conectar um painel  $t \in P$ , ou seja, se  $T_{loss} \leq 1\%$ , 0 caso contrário;
- $f \in \mathbb{N}$ : número máximo de painéis que podem ser conectados a um inversor.

Variáveis de decisão:

- $g_{st} \in \{0, 1\} = 1$  se um inversor colocado no local  $s \in H$  está cobrindo o painel no local  $t \in P$ ; 0 caso contrário;
- $h_s \in \{0, 1\} = 1$ , se pelo menos um painel for conectado ao inversor  $s \in H$ ; 0 caso contrário;

O problema de minimização de inversores é formulado em conjunto com a função objetivo de [8], sendo expresso pela Eq. (2):

$$\text{Minimize } \sum_{i \in R} r_i + \sum_{i \in R} z_i + \sum_{s \in H} h_s \quad (2)$$

Em [8] o objetivo é minimizar o número total de cabines ( $z_i$ ) RRU a serem ativados e o número total de RRUs ( $r_i$ ) a serem implantados nas cabines. Como complemento este

trabalho adiciona a minimização do quantitativo de inversores ( $h_s$ ) que atende a CRA. Além das restrições expressas em [8] a função objetivo ainda está sujeita as seguintes restrições:

$$\sum_{s \in H} B_{st} \cdot g_{st} = 1, \forall t \in P \quad (3)$$

$$f \cdot h_s \geq \sum_{t \in P} B_{st} \cdot g_{st}, \forall s \in H \quad (4)$$

$$h_s \geq 0, \forall s \in H \quad (5)$$

A restrição (3) garante que cada painel seja coberto por um inversor dentro do nível de perda permitido. A restrição (4) assegura que o inversor implantado em  $s$  cobre todos os painéis a ele atribuído. Finalmente, a restrição (5) garante a viabilidade da solução.

## IV. AVALIAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA

Esta subseção apresenta os modelos analíticos utilizados para avaliar o consumo de energia da CRA e a partir daí estimar a estrutura fotovoltaica. O consumo de energia da CRA ( $C_{CRA}^{total}$ ), expresso em kWh, pode ser calculado conforme a Eq. (6):

$$C_{cra}^{total} = P_{CRA}^{total} \cdot t, \quad (6)$$

onde  $P_{CRA}^{total}$  e  $t$  representam, a potência total (kW) e o período de funcionamento dos equipamentos que integram a CRA ( $h$ ), respectivamente. A potência total de uma CRA ( $P_{CRA}^{total}$ ) é obtida a partir da soma da potência de todos os equipamentos que compõe o *fronthaul*, conforme descrito pela Eq. (7):

$$P_{CRA}^{total} = P_{CO} + P_R + P_{AI} + P_M + P_T, \quad (7)$$

sendo  $P_{CO}$  a potência agregada de todos os equipamentos relacionados ao *Central Office*, o qual é composto pela potência dos BBUs e também pela potência de refrigeração do local [16], enquanto que  $P_R$  denota a potência dos equipamentos RRUs,  $P_{AI}$  representa a potência das Antenas *indoor*,  $P_M$  denota a potência das Macro BSs e  $P_T$  representa a potência dos *transceivers* ópticos.

A partir da Eq. (6) é possível dimensionar o quantitativo inicial de equipamentos fotovoltaicos necessários para suprir o consumo da CRA, considerando as relações analíticas apresentadas em [7]. Assim, é possível realizar a parametrização do modelo adotado, com a localização e quantitativo inicial de medidores, inversores e painéis fotovoltaicos que serão enviados para o processamento do ILP para assim gerar o quantitativo mínimo de inversores a serem utilizados.

## V. MODELAGEM DO CUSTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

No projeto de SF, é importante analisar sua viabilidade técnica e econômica. Diante disso, nesta seção é apresentado um modelo de *Total Cost of Ownership* (TCO) do SF, utilizado em [7] e adaptado ao contexto deste trabalho. O TCO consiste no somatório de todas as despesas relacionadas à implantação de infraestrutura, incluindo o *Capital Expenditure* (CAPEX) e

o *Operational Expenditure* (OPEX) Fotovoltaico, conforme a Eq. (8):

$$TCO = CAPEX + OPEX \quad (8)$$

O CAPEX é obtido pela soma dos custos de aquisição e instalação de equipamentos fotovoltaicos, tais como módulos, inversores e Kits de Instalação. O CAPEX é especificado pela equação abaixo:

$$CAPEX = (1 + tx_I) \cdot C_{eq}, \quad (9)$$

onde  $tx_I$  e  $C_{eq}$  representam a taxa de instalação e custo de aquisição dos equipamentos fotovoltaicos (painéis, inversores e kits de instalação), respectivamente. Como a variável  $tx_I$  representa uma taxa percentual, a mesma está expressa no intervalo  $[0, 1]$ .

O OPEX contém despesas relacionadas à operação e manutenção da estrutura fotovoltaica, sendo composto principalmente por três categorias de custo: (i) energia elétrica da concessionária, (ii) manutenção dos equipamentos fotovoltaicos; e (iii) aluguel de espaço físico para instalação das placas, conforme [7]. Assim, o OPEX é definido conforme a Eq. (10):

$$OPEX = N_m \cdot C_m + N_p \cdot A_p \cdot C_a, \quad (10)$$

onde  $N_m$ ,  $C_m$ ,  $C_a$  representam, respectivamente, o número de medidores bidirecionais, o custo de instalação de cada medidor e o custo de aluguel por  $m^2$  dos telhados dos prédios onde os painéis estão instalados, respectivamente. Em adição,  $N_p$  e  $A_p$  representam o número total de painéis fotovoltaicos utilizados na arquitetura e a área de um único painel, respectivamente. Assim como em [7], considerou-se que o número de medidores bidirecionais é igual ao número de inversores utilizados. Cabe ainda ressaltar que a categoria de custo relacionada à energia elétrica da concessionária faz referência à um eventual consumo mínimo da rede, que será cobrado do titular do medidor bidirecional, havendo consumo real ou não, a partir rede convencional de energia elétrica, de acordo com [7].

## VI. ESTUDO DE CASO

De forma semelhante ao trabalho de [8], para o estudo de caso deste trabalho foi considerado um cenário residencial com uma área de  $410 \times 475 \text{ m}^2$ , onde estão presentes 225 prédios, adotando um modelo de rua de Manhattan onde os edifícios são dispostos em blocos. O número de andares em cada edifício é uma variável aleatória obtida a partir distribuição uniforme discreta ao longo do intervalo  $[1, 12]$ . Essa área é atendida por uma CRA que conta com cabines de RRU *indoor* e *outdoor*, antenas *indoor*, duas macro BSs situadas no topo de dois prédios diferentes e um *Central Office* com BBUs.

Para atender a demanda energética da arquitetura foi utilizado um SF, onde os painéis foram instalados nas coberturas dos prédios mais altos, com o intuito de evitar perdas por eventuais sombreamentos. A cobertura de um prédio apresenta uma área de  $400 \text{ m}^2$ , porém optou-se por utilizar aproximadamente 90% dessa área, deixando um espaço significativo, entre as fileiras, de modo a facilitar as constantes manutenções

TABELA I  
PARÂMETROS DO SISTEMA FOTOVOLTAICO.

Parâmetro	Valor	Ref.
Área/Potência Painel	1,94 $\text{m}^2/320\text{W}$	[17]
Custo Inversor 20kW	R\$ 16.782,97	[11]
Custo Inversor 36kW	R\$ 17.400,13	[13]
Custo Inversor 60kW	R\$ 21.540,45	[12]
Custo Painel	R\$ 635,00	[17]
Custo Kit Instalação	R\$ 375,50	[18]
Taxa Instalação	0,2 (20%)	[7]
Seção Cabo/ $T_{loss}$	10mm <sup>2</sup> /1%	-
Aluguel do Telhado	R\$ 183,96 a.a./m <sup>2</sup>	[7]
Painel por Inversor/f	84, 216, 276	-

periódicas. Para fins de captura de energia, considerou-se utilizar a irradiação solar incidente no plano horizontal ( $0^\circ$  ao Norte).

O painel solar considerado é fabricado com silício policristalino e fornece eficiência energética de 16,46%. Além disso, suas células fotovoltaicas são protegidas por uma camada de vidro temperado e sob condições de irradiação solar ideal, produz 320W, 8,69A e 36,8V em corrente contínua [17]. Para tanto, assume-se que os painéis solares ficariam expostos ao sol por um período médio de seis horas, diariamente, assim como para uma radiação solar constante de aproximadamente  $5,0 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{dia})$ .

Diferentemente de [7], este trabalho adota três possíveis tipos de inversores a serem utilizados nos prédios, em cada simulação, de forma a analisar de maneira comparativa o potencial de redução de custos de implantação. Assim, os inversores estão localizados no interior dos prédios para serem protegidos dos intempéries do clima, apresentando potência de 20kW, 36kW e 60kW, com eficiência de 98,0%, 98,6% e 98,8%, e MPPT de 2,4 e 3, respectivamente. Além disso, as conexões entre painéis e inversores são dadas em série e paralelo respeitando as tensões e correntes máximas de cada um dos inversores usados nas simulações.

A Tabela I apresenta os parâmetros-chave utilizados na execução do ILP e também para avaliar a viabilidade técnica e econômica do SF.

## VII. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos no estudo de caso. O problema de minimização de inversores é resolvido utilizando o solver Gurobi Optimizer [19], disponível comercialmente, executado em uma estação de trabalho AMD Ryzen com processador de 2,13 GHz e 64 GB de RAM. Os resultados obtidos são comparados com a abordagem convencional de dimensionamento de sistema fotovoltaico utilizada em [7]. Além disso, é apresentado o TCO do SF voltado para o consumo energético da CRA.

A Figura 3 apresenta o quantitativo total de inversores, considerando os três tipos de inversores e suas respectivas potências necessárias para atender a CRA. A partir dos resultados, considerando as configurações de 20 kW e 36 kW, é possível observar que o número de inversores necessários é sempre menor quando comparado com a quantidade de inversores da abordagem convencional. Para a

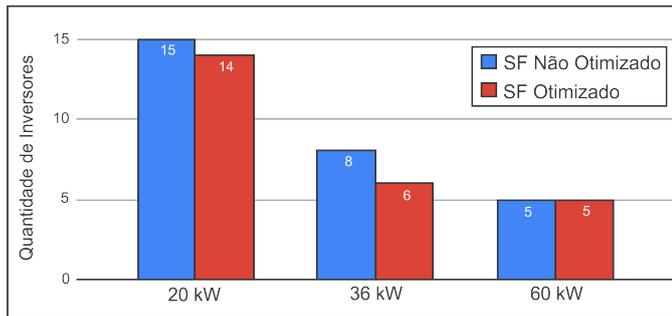


Fig. 3. Quantitativo de Inversores do Sistema Fotovoltaico.

primeira configuração (20 kW) houve uma variação quantitativa de 6,67%, enquanto que para a segunda configuração (36 kW), 25%, isso ocorre devido a possibilidade dos inversores também atenderem aos painéis de prédios vizinhos compartilhando-os, de acordo com a resolução 482 [20], aproveitando o máximo dos recursos do inversor. Entretanto, ao considerar-se a terceira configuração (60 kW), observou-se que não houve alteração no quantitativo de inversores, embora os inversores utilizados possibilitem mais conexões de painéis, é necessário respeitar as limitações estabelecidas para a técnica de otimização, ou seja, a medida que aumenta a distância entre a localização do inversor e do painel, as perdas aumentam na mesma proporção.

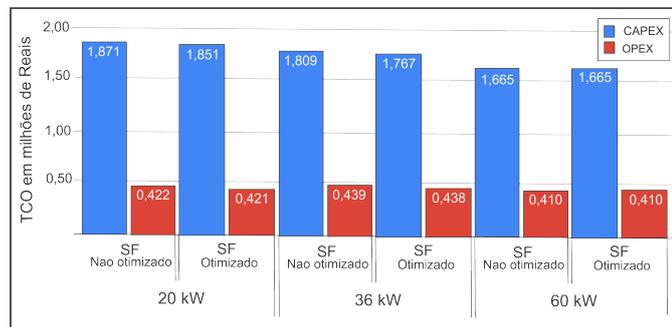


Fig. 4. TCO do Sistema Fotovoltaico.

Além do quantitativo, foi analisado também o TCO para cada uma das configurações, conforme a Figura 4. Observa-se uma variação, entre a abordagem otimizada e não otimizada, para as primeiras duas configurações (20 e 36 kW), no CAPEX de 1,08% e 2,31% e no OPEX de 0,07% e 0,14%, respectivamente. Para a terceira configuração (60 kW), como não houve variação do quantitativo de equipamentos fotovoltaicos, o TCO manteve-se o mesmo, no entanto se comparado com a configuração otimizada de 20kW e 36kW, o CAPEX apresenta uma redução de 2,76% e 6,50%, respectivamente, enquanto que o OPEX tem uma redução de 10,06% para a primeira e 5,77% para a segunda configuração. Em adição, constata-se uma diferença média de 0,02 milhão de reais para a abordagem otimizada do SF.

### VIII. CONCLUSÕES

Este trabalho buscou realizar a minimização de custos de implantação de um SF aplicado à uma CRA, por meio da

minimização do número de inversores. Os resultados mostram que para as configurações de inversores com potências menores a técnica de otimização utilizada se mostra promissora em relação aos cálculos convencionais. Pela perspectiva financeira, mostrada através do TCO, a configuração com maior potência mostrou-se mais vantajosa.

Finalmente, para trabalhos futuros, planeja-se usar uma maior variação temporal, abordando a depreciação dos equipamentos, o custo de manutenção, variar as seções do cabo, considerar inversores reservas, para que assim a viabilidade econômica mostre-se mais realista.

### REFERÊNCIAS

- [1] C. Lu *et al.*, "Connecting the dots: Small cells shape up for high-performance indoor radio," *Ericsson Review (English Edition)*, 2014.
- [2] M. Agiwal, A. Roy, and N. Saxena, "Next generation 5g wireless networks: A comprehensive survey," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 18, no. 3, pp. 1617–1655, thirdquarter 2016.
- [3] S. Fiorani, Matteo acasand Tombaz, F. S. Farias, L. Wosinska, and P. Monti, "Joint Design of Radio and Transport for Green Residential Access Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2016.
- [4] F. M. Vieira, P. S. Moura, and A. T. de Almeida, "Energy storage system for self-consumption of photovoltaic energy in residential zero energy buildings," *Renewable Energy*, 2017.
- [5] Y. Zhang, M. Meo, R. Gerboni, and M. Ajmone Marsan, "Minimum cost solar power systems for LTE macro base stations," *Computer Networks*, 2017.
- [6] M. H. Alsharif, "Optimization design and economic analysis of energy management strategy based on photovoltaic/energy storage for heterogeneous cellular networks using the HOMER model," *Solar Energy*, vol. 147, pp. 133–150, 2017.
- [7] M. A. De Souza, F. S. Farias, J. C. Costa, and D. L. Cardoso, "Technical Economic Analysis of Photovoltaic Systems in Heterogeneous Mobile Networks," in *Procedia Computer Science*, 2017.
- [8] F. Tonini *et al.*, "Minimum cost deployment of radio and transport resources in centralized radio architectures," in *2016 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, feb 2016, pp. 1–5.
- [9] —, "Radio and Transport Planning of Centralized Radio Architectures in 5G Indoor Scenarios," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017.
- [10] M. Theristis and I. A. Papazoglou, "Markovian reliability analysis of standalone photovoltaic systems incorporating repairs," *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2014.
- [11] Civic SOLAR, "Fronius Symo LITE 20.0-3 20kW 480VAC TL Inverter 4,210,054,801," 2019.
- [12] Renvu, "Canadian Solar CSI-60KTL-GS 3PH String Inverter 60KW 480V," 2019. [Online]. Available: <https://www.renvu.com/>
- [13] Civic SOLAR, "Huawei 36kW TL 1000 VDC 480 / 277 VAC Transformerless Inverter SUN2000-36KTL-US," 2019.
- [14] D. Vieira, J. S. d. A. Carneiro, and M. A. L. Castro, *Micro e Minigeração Distribuída Sistema de Compensação de Energia Elétrica*. ANATEL, 2014.
- [15] S. Ekici and A. Kopru, "Investigation of PV System Cable Losses," *INTERNATIONAL JOURNAL of RENEWABLE ENERGY RESEARCH S.Ekici and M.A.Kopru*, 2017.
- [16] R. Alhumaima, "Evaluation of power consumption and trade-offs in 5G mobile communications networks," PhD thesis, Brunel University London, 2017.
- [17] Minha Casa Solar, "Painel Solar 320W Canadian Solar - CS6U -320P," 2019. [Online]. Available: <https://www.minhacasasolar.com.br/>
- [18] NeoSolar, "Kit de montagem para laje - 6 painéis fotovoltaicos," 2019. [Online]. Available: <https://www.neosolar.com.br/>
- [19] Gurobi, "Gurobi Optimizer V8.0.0," 2018.
- [20] ANEEL, "Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012," 2012. [Online]. Available: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>