

ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E FINANCEIRA DE RETROFIT EM SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA COM FONTE SOLAR FOTOVOLTAICA

Julio Pereira Ramos – julio.r@ufabc.edu.br
Ricardo da Silva Benedito
Universidade Federal do ABC, Campus Santo André

1.1. Recurso solar e meteorologia da radiação solar

Resumo. O uso de fontes de energias renováveis e a implementação de ações de eficiência são soluções recorrentes dentro da área de Energia para se tratar questões ambientais e de sustentabilidade. A confluência da eficiência energética por meio de retrofit de iluminação pública (IP) e da geração de energia fotovoltaica (FV) podem garantir um parque de IP mais eficiente e sustentável. Até janeiro de 2022, no Brasil, a IP com fonte solar FV era restrita a sistemas autônomos com baterias, solução pouco implementada e difundida, sendo que a partir de 2022, por meio da Lei 14.300, foi autorizada a implementação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR) com compensação de energia elétrica em clientes IP. Por se tratar de uma solução recente e pouco abordada, o presente artigo busca analisar a viabilidade técnica e financeira de um sistema de IP com SFCR tendo como base um estudo de caso de uma via pública hipotética. O retrofit do sistema de IP foi validado através do software DIALux e a alimentação elétrica do sistema de IP com o SFCR foi dimensionada analiticamente por meio da técnica da performance esperada. Os resultados apontam para uma redução de 70% na potência das luminárias com o retrofit proposto com manutenção da iluminância. Adicionalmente, o método do valor presente líquido revelou viabilidade financeira para ambas as soluções quando aplicadas individualmente ou em conjunto.

Palavras-chave: Iluminação pública, Sistemas fotovoltaicos conectados à rede, Sistema de compensação de energia.

1. INTRODUÇÃO

Ano após ano tem-se observado aumentos significativos no consumo e demanda de energia em escala mundial. A geração de energia por meio de fontes diversificadas, bem como o uso racional da energia, são temas abordados em discussões, estudos e implementações de projetos na área. A sustentabilidade, aliada a tendências de tarifas altas de energia, impulsiona o mercado de renováveis e eficiência energética e a confluência dessas duas soluções podem garantir sistemas eficientes. Nem sempre há uma preocupação de se adotar ambas as medidas em conjunto. Com isso, estudos e análises sobre os temas, além de importantes e necessários, conduzem inovações e melhorias na área.

Na eficiência energética, as ações de eficiência em sistemas de iluminação pública (IP), além de serem bem difundidas, representam um grande potencial a ser explorado. O consumo de energia referente aos sistemas de IP representa 2,3% do consumo global (Carli, Dotoli e Pellegrino, 2017). Já no Brasil esse valor é ainda maior: o parque de IP é composto por aproximadamente 18 milhões de pontos de iluminação, representando 4% do consumo de energia elétrica de todo o país (Meyer *et al.*, 2017).

Segundo o BEN 2022 - Balanço Energético Nacional 2022 (EPE, 2022), o setor de serviços (comercial e público) representou, em 2021, 23,2% do consumo elétrico do país. De acordo com o PDE 2031 - Plano Decenal de Expansão de Energia de 2031 (EPE, 2022), a previsão de crescimento na demanda energética do setor é de 4,2% a.a, entre 2021 e 2031, sendo que em 2031 a IP representará 10% do consumo de energia elétrica do setor de serviços, com 2,3% do consumo elétrico do país, se igualando ao patamar global atual. A Fig. 1 apresenta a expectativa de consumo de energia elétrica do setor de serviços para o ano de 2031.



Figura 1 – Distribuição do consumo final de energia do setor de serviços em 2031. Fonte: PDE 2031 (EPE, 2022).

Os avanços tecnológicos no desenvolvimento de equipamentos LED mais eficientes e baratos vêm crescendo ano a ano, possibilitando viabilidade de soluções e ações que até pouco tempo atrás eram ignoradas ou descartadas. A alta eficiência e grande vida útil dos equipamentos são fatores fundamentais para a viabilização de projetos envolvendo o retrofit (troca de equipamentos considerando a modernização e atualização de um sistema). A troca de luminárias com lâmpadas de descarga (vapores de sódio, metálico e mercúrio) por luminárias LED (light emissor diode) chega a proporcionar economias de energia de até 60% (Djuretic e Kostic, 2018). Além da maior eficiência energética, o retrofit com LED permite evitar grandes parcelas de emissões de CO₂. Em seu estudo, Campisi, Gitto e Morea (2018) preveem que um retrofit de 193.045 lâmpadas de vapores de descarga por LED proporciona uma redução de 44.461,1 toneladas de CO₂ por ano.

Dentro do segmento de energias renováveis, a geração solar fotovoltaica (FV) se torna cada vez mais atrativa. Com o avanço das tecnologias mais eficientes e baratas a área apresenta um horizonte promissor do ponto de vista financeiro e de sustentabilidade. O PDE 2031 (EPE, 2022) prevê, para os próximos 10 anos, um crescimento na geração FV de 400% na micro e mini geração distribuída (de 9 TWh em 2021 para 45 TWh em 2031) e de 214% nas usinas de geração FV centralizadas (de 7 TWh em 2021 para 22 TWh em 2031), sendo que juntas, ambas representarão 7% da matriz energética em 2031.

No Brasil, até janeiro de 2022, os sistemas FV presentes na IP eram restritos a sistemas fotovoltaicos isolados (SFI), sistemas esses mais caros e com diversas particularidades. Projetados com uma previsão de autonomia de 3 a 5 dias, para atender períodos de baixa ou nenhuma insolação, o sistema em muitos momentos do ano fica superdimensionado e é subutilizado (Panguloori, Mishra e Kumar, 2013). Normalmente o SFI é utilizado em local de difícil acesso ou afastado da rede de energia como alternativa de se levar iluminação à locais que não receberam ou receberão a infraestrutura de energia. Em seu estudo, Liu (2014) conclui que a solução IP + SFI custa entre 2 a 4 vezes mais que a solução IP + FV em rede dedicada ao sistema IP, rede essa que armazena energia DC em baterias ao longo do dia e a noite converte a energia em AC para alimentar as luminárias. Panguloori, Mishra e Kumar (2013) também abordam em seu estudo uma rede dedicada à IP, com armazenamento de energia DC para posteriormente ser convertida em AC. Para Duman e Güler (2019), o sistema passa ser viável se a tendência de queda nos custos FV continuar e se o preço da energia elétrica aumentar. Por se tratar de um sistema de custos elevados a análise do SFI não será objeto do presente artigo.

Com a lei 14.300, de 6 de janeiro de 2022, Art. 20º (Brasil, 2022), os clientes da tipologia IP agora podem aderir ao modelo de micro e minigeração distribuída, participando do sistema de compensação de energia (SCEE). A micro e minigeração distribuída FV, ou sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR) são sistemas compostos basicamente por módulos e inversores, sem elementos armazenadores de energia. Nesse caso, a rede da concessionária atua como uma espécie de elemento armazenador de energia, uma vez que toda a energia do SFCR trabalha em paralelo com a rede (Urbanetz, 2010). Os SFCR podem trabalhar com a geração compartilhada (autoconsumo mais injeção na rede do excedente de energia) ou ainda com o autoconsumo remoto, sendo que nessa modalidade novas oportunidades surgem nesse mercado grande e promissor (clientes IP), com sistemas mais baratos que os SFI, mais eficientes e ainda capazes de atender em até 100% dos consumos de energia das unidades consumidoras (UCs).

Como é possível observar, as duas tecnologias aqui apresentadas (FV e LED) vêm passando por melhorias e constantes evoluções, além de estarem inseridas num mercado com grandes oportunidades dentro da área de energia. Também é notório que as implementações individuais de cada tecnologia trazem resultados positivos, mas é muito importante considerar que ambas as soluções possam ser feitas de forma conjunta. É contraproducente pensar em um SFCR fornecendo energia para uma carga ineficiente, sistema esse que será maior e mais caro do que um SFCR alimentando uma carga eficiente. O mesmo se aplica aos sistemas já eficientizados, se as cargas são eficientes não há viés sustentável e ambiental ao se utilizar fontes não renováveis para fornecer energia aos sistemas tidos como mais eficientes e modernos disponibilizados no mercado.

Alguns autores até reconhecem que a solução IP + FV é recomendada, Garcia-Fernandez e Omar (2023) em seu estudo avaliaram o retrofit de lâmpadas halógenas, fluorescente e vapor metálico por LED e recomendam o uso de

sistemas FV para alimentar as mesmas, porém não avaliam a solução conjunta e o ganho combinado que ambas trazem. Panguloori, Mishra e Kumar (2013) e Liu (2014) analisam a IP + FV, porém em rede dedicada. Já Pinter *et al.* (2018), em seu estudo na Hungria, apontaram que as regulamentações locais não permitem a integração de IP e FV conectada à rede, impedindo que o país aproveite a oportunidade de implementação de ambas as soluções conjuntas. Dessa forma, este artigo vem explorar essa possibilidade recentemente permitida no Brasil, oportunidade que apresenta grande relevância para o contexto atual.

Diante desse cenário, uma análise detalhada possibilita identificar os aspectos, pontos positivos e negativos da implementação de um sistema IP com SFCR. Vale ressaltar que a lei 14.300 não impõe nenhum tipo de restrição ou particularidade para o cliente IP, devendo ele apenas seguir os requisitos regulamentares da ANEEL. Como a UC de IP apresenta uma infraestrutura diferenciada, com postes em praticamente todas as vias de um município, o estudo SFCR leva em consideração dois tipos de instalação, sistemas individualizados em poste e sistema convencional com usina no chão. Com isso, o objetivo do presente artigo é analisar a viabilidade técnica e financeira do SFCR, não permitida até 2022, ajudando a entender de fato quais são as questões mais relevantes que devem ser consideradas nas duas implementações (poste e chão), sendo ainda uma grande oportunidade de se desenvolver conteúdos técnicos e acadêmicos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para obter os resultados e respostas sobre as questões apresentadas neste trabalho, foi realizada pesquisa bibliográfica em trabalhos relacionados ao tema, tais como artigos científicos, livros e publicações em revistas voltadas ao setor fotovoltaico e de iluminação pública de forma a subsidiar, amparar e respaldar informações e questões usadas no artigo, mas que não fazem parte do cerne e foco da pesquisa.

Além das pesquisas bibliográficas, foram feitas análises de compatibilidade entre dois tipos de luminárias, vapor de sódio (V.SOD) e LED, de forma a identificar e estabelecer o retrofit ideal proposto. Os dados analisados foram obtidos por meio de simulações computacionais no DIALux, software amplamente difundido e utilizado em estudos e projetos luminotécnicos. Com o retrofit determinado foi possível calcular a energia economizada bem como estabelecer a nova carga do sistema eficiente IP, configurando assim o objeto de estudo na parte de iluminação.

Com a nova luminária LED sendo a carga do SFCR, foi possível dimensionar os sistemas SFCR. Os cálculos de projeto para determinar o tamanho mínimo de cada sistema, poste e chão, possibilitaram identificar e determinar a melhor configuração de montagem e arranjo para as duas situações. Estabelecida a melhor configuração, foram escolhidas 3 potências de capacidades instaladas, utilizadas em ambos os sistemas (poste e chão), para serem analisadas de forma a atender e alimentar um determinado conjunto de luminárias por meio do SCEE.

A partir das configurações estipuladas e delimitadas, tanto nos sistemas IP quanto nos sistemas FV, foi possível identificar as limitações técnicas, pontos positivos e negativos de cada sistema, bem como estimar os custos de implementação possibilitando a análise de viabilidade técnica e financeira do retrofit de IP com fonte de alimentação FV.

2.1 Sistema de Iluminação

A análise de compatibilidade de um retrofit pode ser feita por meio da comparação dos resultados entregues por cada luminária analisada, considerando ainda que o sistema antigo entregue minimamente os valores de referência estipulados e exigidos em norma. Os resultados mais relevantes e pertinentes em uma análise de compatibilidade são os níveis de iluminância (E) e de uniformidade (U) fornecidos por cada luminária, se os valores entregues forem semelhantes então existe uma troca compatível.

A iluminância ($E = \text{lux}$) pode ser considerada como a quantidade de iluminação fornecida por uma fonte de luz, natural ou artificial, em um metro quadrado, sendo teoricamente representada pelo lúmen (lm) por m^2 . O lúmen é a unidade de medida para mensurar o fluxo luminoso (quantidade de luz) que uma fonte pode emitir dentro do espectro de luz visível. A uniformidade (U), com unidade adimensional, é um dado que informa como está a distribuição da quantidade de iluminação ao longo do trecho analisado, ela é calculada pelo quociente entre a iluminância mínima (E_{min}) e a iluminância média (E_{med}).

O método para validar a compatibilidade do retrofit consiste em comparar os resultados de E e U obtidos por meio de simulações no software DIALux, simulações essas que rodam a partir da inserção e carregamento de dados das vias e luminárias a serem analisadas. Os principais dados das luminárias são os dados fotométricos, cada lâmpada ou luminária possui características próprias, isso porque cada fonte irradia sua luz de forma peculiar e individual, com direções e intensidades diferentes no eixo esférico, também chamado de espectro polar. Tais individualidades são denominadas características fotométricas e podem ser expressas por uma curva polar, denominada IES (Illumination Engineering Society), levantada por um equipamento específico denominado gônio-fotômetro.

A curva da luminária de V.SOD foi cedida pelo fornecedor REEME, já as curvas das diversas luminárias LED analisadas foram todas obtidas e baixadas da Tabela Luminária LED para Iluminação Pública PROCEL, (ELETROBRAS, 2023). A tabela do PROCEL conta com 35 fornecedores e 1.361 produtos, sendo assim o ponto de partida para a escolha das luminárias LED considerou as quantidades de lumens semelhantes entre V.SOD e LED. Além das quantidades de lumens semelhantes entre luminárias, o fator decisivo nas escolhas dos produtos LED foram as eficiências luminosas (lm/W), priorizando o produto com a maior eficiência luminosa.

O objeto de estudo do sistema de iluminação considerou o retrofit de lâmpada de V.SOD de 150W, atribuindo um cenário específico e hipotético de uma via da cidade de São Paulo, com premissas e configurações de montagens de uma via pública classe V3, com resultados estabelecidos pela NBR5101 – Iluminação pública - Procedimento (ABNT, 2012), conforme dados da Tab. 1.

Tabela 1 – Iluminância média mínima e uniformidade para cada classe de iluminação.

CLASSE DE ILUMINAÇÃO	ILUMINÂNCIA MÉDIA MÍNIMA $E_{med,min}$	FATOR DE UNIFORMIDADE MÍNIMO $U = E_{min}/E_{med}$
V1	30 lux	0,4
V2	20 lux	0,3
V3	15 lux	0,2
V4	10 lux	0,2
V5	5 lux	0,2

É importante salientar que todas as análises das luminárias feitas no DIALux utilizaram exatamente os mesmos dados fixos da via, fator esse fundamental para estabelecer uma comparação adequada entre os retrofits. Além dos dados fixos da via também foram utilizados alguns parâmetros variáveis. Para entender melhor as diferenças entre tais dados, eles foram divididos em dois tipos: dados fixos da via e parâmetros variáveis de montagens.

Nessa subdivisão é possível estabelecer que os dados fixos são aqueles que não podem ser alterados sem o envolvimento de obras de infraestrutura, sendo eles: Largura da via, Largura do passeio, Distância entre postes, Distância entre poste e via.

Já as características variáveis de montagens, são os parâmetros possíveis de se mudar no momento do retrofit de forma simples, sem que haja necessidade de grandes obras e altos custos, sendo: Pendor (tamanho do braço menos distância poste ao meio fio), Ângulo de inclinação da luminária, Altura do ponto de luz.

Como já dito anteriormente, os dados fixos foram estabelecidos de forma a serem exatamente os mesmos tanto na análise das luminárias de V.SOD quanto LED, garantindo assim uma possibilidade de comparação adequada, independentemente de serem dados reais, uma vez que a comparação de resultados é em mesmo cenário fixo. Já os parâmetros variáveis, podem e devem ser modificados de forma a oferecer melhores resultados. Dessa forma tais parâmetros foram estipulados com base nas análises dos melhores resultados obtidos nas diversas simulações efetuadas, com diferentes inputs de dados de pendora, inclinação da luminária e altura do ponto de luz.

Com a identificação da melhor opção para o retrofit, opção essa que proporciona o menor consumo de energia, entregando os mesmos resultados de iluminância e uniformidade, é possível determinar a energia economizada anual – EE (kWh/ano), conforme Eq. (1), onde o horário de funcionamento médio diário (horas/dia) da IP em São Paulo é 11 h e 26 m (ANEEL, 2019), todos os dias do ano (365 dias/ano) e Pot. VSOD e Pot. LED são as potências de cada luminária.

$$EE = [(Pot. VSOD - Pot. LED) \times \frac{horas}{dia} \times \frac{dia}{ano}] / 1000 \quad (1)$$

2.2 Sistema Fotovoltaico

Após validado o retrofit das luminárias, bem como o consumo de energia da nova luminária, calcula-se a potência do sistema SFCR, por meio da técnica da performance esperada, Eq. (2), onde L é igual ao consumo anual de energia da luminária LED, PR é o Performance Ratio, sendo igual a 0,8 e as horas de sol pleno (HSP) são 1506 horas/ano (Zilles *et al.*, 2012), para São Paulo e sua região metropolitana.

$$PFV = \frac{L}{PR \times HSP} \quad (2)$$

Com o cálculo da potência PFV para alimentar uma luminária é possível estabelecer o tamanho e arranjo necessário do SFCR, que pode atender diversos cenários de iluminação uma vez que seu tamanho, tanto em poste quanto no chão, pode ser aumentado ou diminuído em função das quantidades e potências das luminárias que serão atendidas.

Em ambos os casos do SFCR, poste e chão, os sistemas geram e fornecem as mesmas quantidades de energia, isso porque além de utilizarem módulos iguais, eles também são instalados em condições iguais de plano de inclinação e orientação para o norte. Dessa forma, a diferença entre um sistema e outro não está na geração de energia e sim nos custos para se instalar uma usina no chão ou se instalar diversos sistemas individuais em postes.

Para o SFCR em poste foi estabelecida uma configuração padrão com o intuito de otimizar os custos de materiais e mão de obra de instalação. O kit único foi determinado para fornecer energia para uma ou mais luminárias, a depender das potências delas. Nesse kit foram considerados todos os elementos necessários para instalação do SFCR em poste (módulo FV + micro inversor + suporte de montagem em poste + sistema de cabeamento + sistema de proteção).

Para o SFCR no chão, foram calculadas as áreas físicas ocupadas pelos módulos e consequentemente os tamanhos dos terrenos necessários para abrigar cada usina FV em função de suas potências instaladas, esse dimensionamento foi levado em consideração para calcular o custo de aquisição do mesmo, valor esse que entra na análise de viabilidade financeira. O cálculo da área do terreno, Eq. (3), leva em consideração os sombreamentos por fileiras, que garantem a não incidência de sombras nos módulos entre os horários das 09:00 às 15:00 no dia mais crítico do ano, solstício de inverno. O sombreamento é dado por d_{min} , Eq. (4), onde L é a largura do módulo, α é a altura solar, β é a latitude da instalação e ψ' é 180° menos o ângulo de azimute. Além da consideração dos sombreamentos por fileiras, o cálculo da área do terreno teve as strings do SFCR no chão limitadas a uma tensão de 1000 VDC por string.

$$A_{terreno} = \left[\left(\frac{n^{\circ} \text{módulos}}{n^{\circ} \text{strings}} \right) \times \text{Comprimentomódulos} \right] \times [d_{min} \times n^{\circ} \text{strings}] \quad (3)$$

$$d_{min} = L \left(\frac{\text{sen}\beta \text{cos}\psi'}{\text{tg}\alpha} + \text{cos}\beta \right) \quad (4)$$

Com a lei 14.300, a geração distribuída para redes não despacháveis (FV sem baterias) mudou sua capacidade instalada máxima permitida de 5 MW para 3 MW, a referida lei ainda diz que conexões com autoconsumo remoto com capacidade instalada acima de 500 kWp se enquadram na classe de tarifação GD III, não podendo usufruir da não compensação gradativa e escalonada do fio B até 2030. Diante dessas regulamentações e do pressuposto de que usinas grandes são mais viáveis, as análises e comparações das viabilidades técnicas e financeiras dos SFCR, no chão e em poste, foram feitas em 3 potências de capacidades instaladas, 500 kWp, 1.000 kWp e 3.000 kWp.

2.3 Viabilidade financeira

As análises financeiras foram feitas sob três óticas, a primeira apenas do sistema de iluminação, a segunda apenas dos sistemas FV e a terceira com os dois sistemas juntos.

O preço de instalação e material do sistema de iluminação, apresentado na Tab. 2, foi obtido da tabela de serviços, versão 191 da CDHU (São Paulo, 2023), tal base é amplamente utilizada para balizar processos de licitações em órgãos públicos no estado de São Paulo.

Tabela 2 – Custo do retrofit.

CÓDIGO CDHU	DESCRIÇÃO	PREÇO UNITÁRIO
41.11.721	Luminária LED retangular para poste potência 40W/59W	R\$ 1.171,48

Nos sistemas FV os valores da implementação das ações foram obtidos a partir de duas fontes de preços. Para o SFCR em poste os preços se basearam em pesquisa de mercado com os preços dos materiais ofertados no varejo comum, já para os preços do SFCR no chão usou-se os valores já consolidados e apresentados pela Greener em seu último estudo do 1º semestre de 2023 (Greener, 2023). A Tab. 3 apresenta o custo de apenas um kit FV instalado em poste, as Tab. 4 e 5 apresentam os preços dos sistemas FV em poste e no chão em grandes capacidades instaladas, no poste em larga escala e no chão como usina.

Tabela 3 – Custo de um SFCR em poste instalado.

DESCRIÇÃO	QUANTIDADE	TOTAL	R\$/Wp
Módulo 550W	1	R\$ 1.072,75	R\$ 1,95
Microinversor 600W	1	R\$ 1.132,87	R\$ 2,06
Estrutura p/ módulo	1	R\$ 398,18	R\$ 0,72
Cabos	1	R\$ 110,70	R\$ 0,20
String box	1	R\$ 258,91	R\$ 0,47
Subtotal kit		R\$ 2.973,41	R\$ 5,41
Mão de obra	1	R\$ 1.105,50	R\$ 2,01
Total SFCR poste		R\$ 4.078,91	R\$ 7,42

Tabela 4 – Custo SFCR poste em larga escala.

CAPACIDADE INSTALADA	QUANTIDADE DE SFCR	PREÇO KIT POSTE	CUSTO DO SISTEMA
500 kWp	910	R\$ 4.078,91	R\$ 3.711.811,13
1.000 kWp	1.819	R\$ 4.078,91	R\$ 7.419.543,35
3.000 kWp	5.455	R\$ 4.078,91	R\$ 22.250.472,23

Tabela 5 – Custo SFCR no chão

USINA	R\$/Wp	CUSTO SFCR	CUSTO TERRENO	CUSTO DO SISTEMA	R\$/kWp
500 kWp	3,60	R\$ 1.800.000,00	R\$ 351.061,35	R\$ 2.151.061,35	4,30
1.000 kWp	3,44	R\$ 3.440.000,00	R\$ 701.736,92	R\$ 4.141.736,92	4,14
3.000 kWp	3,49	R\$ 10.470.000,00	R\$ 2.104.439,20	R\$ 12.574.439,20	4,19

Os custos da TE e TUSD para a classificação B4a – Iluminação Pública, na área de concessão da ENEL SP, de acordo com a Resolução homologatória nº 3.215, de 27 de junho de 2023 (ANEEL, 2023), totalizam R\$ 0,357 por kWh consumido, sem considerar os impostos. Com a aplicação dos impostos (ICMS, PIS e COFINS) o valor da tarifa B4a vai para R\$ 0,456/kWh. Por meio da Eq. (5) é possível obter o benefício financeiro da iluminação – Ben._{ilum.} (R\$/ano) que o retrofit traz, sendo E.E a energia economizada.

$$\text{Ben.}_{ilum} = EE \times \text{tarifa B4a} \quad (5)$$

Da Resolução homologatória nº 3.215, de 27 de junho de 2023 (ANEEL, 2023), Tabela 4 – Percentuais de descontos aplicados na TUSD E TE para estabelecimento da tarifa de aplicação utilizada no faturamento da energia compensada associado ao SCEE (Enel SP), os percentuais de descontos aplicados na TUSD E TE para GD III são respectivamente 37,91% e 92,50%. Com isso, já considerando os impostos pertinentes, o valor de tarifa B4a GDIII é de R\$ 0,272 a ser compensado em cada kWh consumido no SFCR B4a. Por meio da Eq. (6) obtém-se o benefício financeiro da geração FV – Ben._{FV} (R\$/ano), sendo Egerada a energia gerada FV.

$$\text{Ben.}_{FV} = \text{Egerada} \times \text{tarifa B4a GDIII} \quad (6)$$

Vale ressaltar que ambos os benefícios apresentados são calculados ano a ano, com reajustes anuais das tarifas e com a energia gerada, no caso do sistema FV, diminuindo ano a ano por conta do fator de degradação dos módulos. A análise financeira ainda considera outros parâmetros importantes apresentados na Tab. 6, como as taxas de operação e manutenção sobre o custo total e taxa de desconto. Os cálculos de viabilidade financeira, tanto para o retrofit quanto para o SFCR, levam em consideração um ciclo de análise de 20 anos, devido a vida útil média das luminárias LED IP. Já o percentual de ajuste tarifário de 7,16% é o valor do reajuste real anual médio do custo da energia nos últimos 24 anos para a ENEL SP (ANEEL, 2023).

Tabela 6 – Parâmetros das análises financeiras.

ITEM	VALOR
Tarifa B4b	R\$ 0,457/kWh
Tarifa B4b GDIII	R\$ 0,272/kWh
Período de análise	20 anos
Fator de degradação anual dos módulos	0,50% a.a.
Taxa de operação e manutenção sobre custo	0,50% a.a.
Taxa de desconto anual	8,00% a.a.
Percentual de ajuste tarifário	7,16% a.a.

Para os cálculos de viabilidade financeira foram utilizadas as análises financeiras de valor presente líquido (VPL), taxa interna de retorno (TIR), relação custo-benefício (RCB), custo da geração e custo da energia evitada. Como o presente estudo visa identificar a análise de viabilidade financeira com foco nos pontos pertinentes de um SFCR as meras apresentações das fórmulas financeiras utilizadas seriam informações demasiadas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Iluminação

Os resultados luminotécnicos do retrofit proposto obtidos por meio das simulações no DIALux para a via classe V3 podem ser observados na Tab. 7.

Tabela 7 – Resultados retrofit proposto.

CENÁRIO	VARIÁVEIS DE MONTAGEM			LUMINÁRIA				RESULTADOS	
	ALTURA	ÂNGULO	PENDOR	TIPO	POT.	FLUXO LUM.	EFIC. LUM.	Emed	U
INICIAL	9,5 m	15°	3 m	V.SOD 150W	179,5 W	11.634 lm	64,81 lm/W	15,55 lux	0,45
	9,5 m	15°	3 m	LED 70W	76,1 W	13.281 lm	174,52 lm/W	15,02 lux	0,61
FINAL	6,5 m	0°	3 m	LED 50W	52,6 W	9.058 lm	172,20 lm/W	15,56 lux	0,43

Os dados elétricos e resultados de energia consolidados do retrofit podem ser observados na Tab. 8, com as potências de cada luminária, eficiência luminosa, seus consumos de energia, a redução de potência e economia de energia (E.E).

Tabela 8 – Resultados de energia para um retrofit.

V.SOD			LED			RESULTADOS		
POTÊNCIA	EFIC. LUM.	CONSUMO ENERGIA	POTÊNCIA	EFIC. LUM.	CONSUMO ENERGIA	REDUÇÃO DE POTÊNCIA		E.E.
179,5 W	64,81 lm/W	749,08 kWh/ano	52,6 W	172,21 lm/W	219,51 kWh/ano	126,9 W	70,7 %	529,57 kWh/ano

A economia de energia (E.E) apresentada na Tab. 8 diz respeito à economia de apenas um retrofit. Como a implementação dessa ação ocorre normalmente em vários pontos IP, a economia total de um projeto é obtida pela multiplicação da E.E pela quantidade de pontos que receberão aquele dado retrofit. Além dos resultados apresentados na Tab. 8, a Fig. 2 apresenta graficamente a representatividade dos consumos de energia de cada luminária bem como as economias de energia que as luminárias LED trazem tanto no cenário inicial, mantendo as condições do sistema antigo de V.SOD, como no cenário final com alterações nas premissas variáveis de montagens.

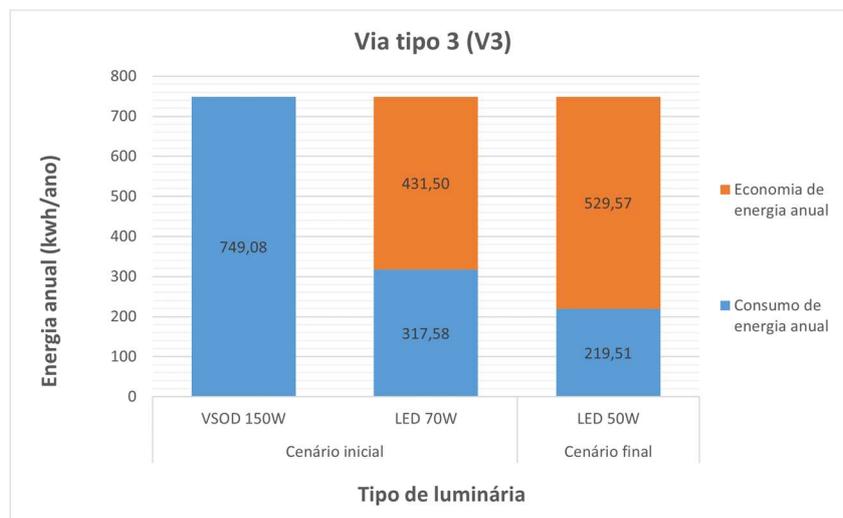


Figura 2 – Consumo e economia de energia anual cenário em via classe V3.

Em seu estudo com lâmpadas de V.SOD, Terrich e Balsky (2022) comentam sobre a importância e necessidade de projetos luminotécnicos detalhados e específicos, evitando assim o derramamento de luz indesejado, *spill light*, que aumenta o consumo de energia elétrica e reduz a eficiência energética do sistema. Os resultados do retrofit apresentados no presente artigo demonstram que as alterações dos parâmetros variáveis de montagens trazem de fato melhoras nos resultados, com destaque para alterações na altura da luminária e ângulo de inclinação da mesma. Tais alterações são possíveis pois cada tecnologia apresenta um padrão de características fotométricas, aplicar a mesma solução para produtos diferentes nem sempre trará os melhores resultados, demonstrando de fato que uma análise apurada e um projeto personalizado são necessários para se garantir a maior eficiência energética do sistema de IP proposto.

3.2 Fotovoltaico

O dimensionamento do SFCR apresentado na Tab. 9 demonstra que o sistema adotado atende 3 luminárias LED de 50W. Já os dados da Tab.10 apresentam as características e configurações dos SFCR no chão e em poste.

Tabela 9 – Dimensionamento do SFCR para luminária LED 50W.

POTÊNCIA PARA 1 LUMINÁRIA	ENERGIA GERADA	MÓDULO USADO	ENERGIA GERADA	LUMINÁRIAS ATENDIDAS
182,20 Wp	219,51 kWh/ano	550 Wp	662,64 kWh/ano	3,02

Tabela 10 – Configurações dos SFCR com IP em função das capacidades instaladas.

POSTE E CHÃO				POSTE	CHÃO
CAPACIDADE INSTALADA	NÚMERO DE MÓDULOS	ENERGIA GERADA	NÚMERO DE LED 50W ATENDIDOS	NÚMERO DE POSTES	ÁREA UTILIZADA
500 kWp	910	603,00 MWh/ano	2.747	910	3.510,6 m ²
1.000 kWp	1.819	1.205,34 MWh/ano	5.491	1.819	7.017,4 m ²
3.000 kWp	5.455	3.614,70 MWh/ano	16.467	5.455	21.044,4 m ²

A Tab.10 demonstra que a geração FV no chão necessita de áreas relativamente grandes. Muitas vezes os municípios já possuem terrenos próprios dentro de seus distritos, em áreas afastadas ou até mesmo rurais, porém em alguns casos os municípios além de não terem terrenos próprios podem também estar em áreas com alta densidade demográfica. Dessa forma a possibilidade de instalação do SFCR em poste pode ser uma alternativa interessante que viabilize a implementação de geração FV em municípios sem áreas livres ou então que não consigam fazer a aquisição delas.

Em contrapartida o SFCR em poste apresenta alguns entraves técnicos que podem dificultar a implementação do sistema, como por exemplo a apuração da energia gerada e injetada na rede. Por se tratar de um sistema com vários pontos de consumo, as UCs de IP normalmente possuem contratos por avença com suas concessionárias, contratos esses sem medição da energia consumida, baseado apenas em cálculos dos consumos de energias das luminárias do município. Outro ponto relevante diz respeito ao tamanho e área dos módulos instalados em poste, seus locais de instalação são relativamente altos, dessa forma há a necessidade de se ter uma estrutura robusta que suporte o peso do sistema e ainda resista a rajadas de vento, nesse contexto é fundamental uma análise apurada que provavelmente envolverá um projetista estrutural. Além das questões apresentadas ainda há o fato de que os SFCR em poste estejam mais sujeitos a vandalismos ou furtos, sendo que a instalação de proteção antivandalismo pode ser uma solução. Para Zajac e Przybylek (2020), tal ação possibilitou uma redução de 97% de danos comparados a sistemas sem a proteção.

3.3 Viabilidade Financeira

As Tab. 11 a 13 apresentam os resultados das análises de investimentos para os SFCR nas 3 capacidades instaladas delimitadas no estudo.

Tabela 11 – Análise de investimento 500 kWp.

INDICADOR FINANCEIRO	RETROFIT ILUMINAÇÃO	SFCR POSTE	SFCR CHÃO	RETROFIT COM SFCR POSTE	RETROFIT COM SFCR CHÃO
VPL	R\$ 8.962.902,17	-R\$ 994.667,55	R\$ 644.925,35	R\$ 7.968.234,62	R\$ 9.607.827,53
PayBack descontado	6,03 anos	Projeto inviável	16,00 anos	9,95 anos	7,83 anos
Taxa interna de retorno	18,95%	-2,88%	2,74%	9,01%	13,12%
RCB	0,45	2,12	1,23	0,78	0,61
Custo da energia evitada	R\$ 0,20	NA	NA	NA	NA
Custo da geração	NA	R\$ 0,58	R\$ 0,34	NA	NA
Custo da energia evitada + Geração	NA	NA	NA	R\$ 0,31	R\$ 0,24

Tabela 12 – Análise de investimento 1.000 kWp.

INDICADOR FINANCEIRO	RETROFIT ILUMINAÇÃO	SFCR POSTE	SFCR CHÃO	RETROFIT COM SFCR POSTE	RETROFIT COM SFCR CHÃO
VPL	R\$ 17.916.015,96	-R\$ 1.989.335,11	R\$ 1.458.739,82	R\$ 15.926.680,85	R\$ 19.374.755,78
PayBack descontado	6,03 anos	Projeto inviável	15,37 anos	9,95 anos	7,73 anos
Taxa interna de retorno	18,95%	-2,88%	3,18%	9,01%	13,38%
RCB	0,45	2,12	1,18	0,78	0,60
Custo da energia evitada	R\$ 0,20	NA	NA	NA	NA
Custo da geração	NA	R\$ 0,58	R\$ 0,33	NA	NA
Custo da energia evitada + Geração	NA	NA	NA	R\$ 0,31	R\$ 0,24

Tabela 13 – Análise de investimento 3.000 kWp.

INDICADOR FINANCEIRO	RETROFIT ILUMINAÇÃO	SFCR POSTE	SFCR CHÃO	RETROFIT COM SFCR POSTE	RETROFIT COM SFCR CHÃO
VPL	R\$ 53.728.471,10	-R\$ 5.968.005,32	R\$ 4.219.079,24	R\$ 47.760.465,78	R\$ 57.947.550,34
PayBack descontado	6,03 anos	Projeto inviável	15,56 anos	9,95 anos	7,76 anos
Taxa interna de retorno	18,95%	-2,88%	3,04%	9,00%	13,30%
RCB	0,45	2,12	1,20	0,78	0,60
Custo da energia evitada	R\$ 0,20	NA	NA	NA	NA
Custo da geração	NA	R\$ 0,58	R\$ 0,33	NA	NA
Custo da energia evitada + Geração	NA	NA	NA	R\$ 0,31	R\$ 0,24

Os indicadores financeiros demonstram poucas diferenças entre as 3 capacidades instaladas analisadas, isso porque para o SFCR em poste o preço nas 3 capacidades é o mesmo com R\$ 7,42/Wp e para o SFCR em chão as variações nos preços são muito pequenas, na ordem de 3,86%, comparando do sistema mais barato de 1.000 kWp com R\$ 4,14/Wp, para o mais caro de 500 kWp com R\$ 4,30/Wp.

É possível observar que o SFCR em poste, individualmente, não apresenta viabilidade, porém existe o fato da análise considerar os preços dos materiais de varejo, sem levar em conta questões de escalabilidade em grandes compras dos equipamentos, questão essa existente em projetos grandes.

4. CONCLUSÃO

Os resultados do retrofit de iluminação com as trocas de luminárias de V.SOD por LED possibilitam uma redução na demanda de potência na ordem de 70%. Também é observado que a simples troca de luminária, mantendo o cenário inicial, sem considerar alterações nos parâmetros variáveis já representa redução significativa na potência do ponto de luz, em torno de 57,6%, porém é notório que as alterações dos parâmetros variáveis de montagem (pendor, ângulo de inclinação e altura do ponto de luz) podem trazer resultados ainda melhores, explorando o máximo potencial da tecnologia LED. Com isso, o sistema IP fica de fato mais eficiente, otimizado e adequado para receber um sistema FV.

Em relação aos SFCR, em poste e no chão, ambos geram e fornecem a mesma quantidade de energia ao sistema IP, porém com custos diferentes e particularidades técnicas que merecem atenção, como a utilização de área pública, desapropriada ou adquirida de terceiros para a implantação dos SFCR no chão e a necessidade da implementação de sistemas de medição de energia e coleta de dados para a apuração das compensações a serem aplicadas em sistemas SFCR em poste, além das limitações dos tamanhos dos módulos instalados em altura para esse tipo de sistema.

Em termos energéticos, é possível observar que a implementação da IP + FV traz resultados expressivos. Municípios pequenos com até 910 pontos de luz podem totalizar ganhos combinados na ordem de 1,085 GWh/ano, entre geração e economia de energia, enquanto municípios maiores conseguem alcançar benefícios na ordem de 12,33 GWh/ano a cada 16.467 pontos de luz que recebam as duas soluções conjuntas.

A análise financeira da implementação das ações de eficiência energética e da geração de energia FV em conjunto apresentam resultados positivos nas 3 potências de capacidades instaladas analisadas, demonstrando que o uso combinado das duas ações é pertinente e viável. Individualmente, apenas o SFCR em poste apresenta inviabilidade, porém o retrofit de iluminação, com um ótimo resultado, consegue sustentar a inviabilidade individual do FV em poste tornando a implementação conjunta viável.

Agradecimentos

Agradeço a empresa REEME por disponibilizar as curvas ies das luminárias de vapor de sódio, dados esses de suma importância que possibilitaram a análise dos retrofits propostos.

REFERÊNCIAS

- ABNT, 2012. NBR5101 – Iluminação pública – Procedimento, Rio de Janeiro.
- ANEEL, 2019. Resolução Homologatória nº 2.590, de 13 de agosto de 2019 – Homologa os tempos a serem considerados para o consumo diário para fins de faturamento da energia elétrica destinada à iluminação pública e à iluminação de vias internas de condomínios, Brasília.
- ANEEL, 2023. Resolução Homologatória nº 3.215, de 27 de junho de 2023 – Homologa o resultado da Revisão Tarifária Periódica – RTP de 2023 da Eletropaulo Metropolitana Eletricidade de São Paulo S.A. – Enel SP, Brasília.
- ANEEL, 2023. Base de Dados das Tarifas das Distribuidoras de Energia Elétrica, Brasília.
- Disponível em: <https://portalrelatorios.aneel.gov.br/luznatarifa/basestarifas#>. Acesso em: 10/10/2023.

- Brasil, 2022. Presidência da República. Secretaria Geral, Subchefia para Assuntos Jurídicos – Lei nº 14.300, de 06 de janeiro de 2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS); altera as Leis nºs 10.848, de 15 de março de 2004, e 9.427, de 26 de dezembro de 1996 e dá outras providências, Brasília. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/L14300.htm. Acesso em: 21/11/2022.
- Campisi, D., Gitto, S., & Morea, D., 2018. Economic feasibility of energy efficiency improvements in street lighting systems in Rome, *Journal of Cleaner Production*, vol. 175, pp. 190–198.
- Carli, R. Dotoli, M., Pellegrino R., 2018. A decision-making tool for energy efficiency optimization of street lighting, *Computers Operations Research*, vol 96, pp 223-235, ISSN 0305-0548.
- Djuretic, A., Kostic, M., 2018. Actual energy savings when replacing high-pressure sodium with LED luminaires in street lighting, *Energy*, vol. 157, pp. 367-378.
- Duman, A.C., Güler, O., 2019. Techno-economic analysis of off-grid photovoltaic LED road lighting systems: A case study for northern, central and southern regions of Turkey, *Building and Environment*, vol. 156, pp. 89-98, ISSN 0360-1323.
- ELETRONBRAS, 2023. Tabela Luminária LED para Iluminação Pública PROCEL, Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/services/DocumentManagement/FileDownload.EZTSvc.asp?DocumentID={6C362041-7E2D-4219-AD60-85BBCFD5672C}&ServiceInstUID={46764F02-4164-4748-9A41-C8E7309F80E1}>. Acesso em: 30/10/2023.
- EPE, 2022. Balanço Energético Nacional 2022: Ano base 2021, Brasília.
- EPE, 2022. Plano Decenal de Expansão de Energia de 2031, Brasília.
- Garcia-Fernandez, B., & Omar, O., 2023. Integrated innovative solar lighting system for optimization of daylight utilization for public library in Alexandria, Egypt, *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 14, iss. 1, art. 101819.
- Greener, 2023. Estudo Estratégico Geração Distribuída Mercado Fotovoltaico, São Paulo. Disponível em: <https://www.greener.com.br/estudo/estudo-estrategico-geracao-distribuida-2022-mercado-fotovoltaico-2- semestre/>. Acesso em: 02/10/2023.
- Liu, G., 2014. Sustainable feasibility of solar photovoltaic powered street lighting systems, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 56, pp. 168–174.
- Meyer, M. *et al.*, 2017. Lighting brazilian cities: business models for energy eficiente public street lighting. Energy Sector Management Assistance Program, The World Bank, Washington.
- Panguloori, R. Mishra, P.R., Kumar, S., 2013. Power distribution architectures to improve system efficiency of centralized medium scale PV street lighting system, *Solar Energy*, vol. 97, pp. 405-413, ISSN 0038-092X.
- Pinter, G. *et al.*, 2018. Study of Photovoltaics and LED Energy Efficiency: Case Study in Hungary, *Energies*, vol. 11.
- Governo do Estado de São Paulo, 2023. CDHU - Boletim referencial de custos, tabela de serviços, versão 191, São Paulo.
- Terrich, T., Balsky, M., 2022. The Effect of Spill Light on Street Lighting Energy Efficiency and Light Pollution, *Sustainability*, vol. 14, iss. 9, art. 5376.
- Urbanetz, J. J., 2010. Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Redes de Distribuição Urbanas: Sua Influência na Qualidade da Energia elétrica e Análise dos Parâmetros que Possam Afetar a Conectividade, Tese de Doutorado, UFSC, Florianópolis.
- Zajac, P., Przybyłek, G., 2020. Lighting lamps in recreational areas – Damage and prevention, testing and modelling, *Engineering Failure Analysis*, vol. 115, art. 104693, ISSN 1350-6307.
- Zilles, R. *et al.*, 2012. Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, Oficina de Textos, 1ª edição, São Paulo.

TECHNICAL AND FINANCIAL FEASIBILITY ANALYSIS OF RETROFIT IN STREET LIGHTING SYSTEMS WITH SOLAR PHOTOVOLTAIC SOURCE

Abstract. *The use of renewable energy sources and the implementation of efficiency actions are recurring solutions in the Energy area to address environmental and sustainability issues. The confluence of energy efficiency through public lighting (IP) retrofits and photovoltaic (PV) power generation can ensure a more efficient and sustainable IP park. Until January 2022, in Brazil, IP with solar photovoltaic sources was restricted to autonomous systems with batteries, a solution that was little implemented and widespread, and from 2022, through Law 14,300, the implementation of photovoltaic systems connected to the grid began. (SFCR) with electrical energy compensation for IP customers. As it is a recent and little discussed solution, this paper seeks to analyze the technical and financial feasibility of an IP system with SFCR based on a case study of a hypothetical public road. The retrofit of the IP system was validated using the DIALux software and the electrical supply of the IP system with the SFCR was analytically sized using the expected performance technique. The results point to a 70% reduction in luminaire power with the proposed retrofit while maintaining illuminance. Additionally, the net present value method revealed financial viability for both solutions when applied individually or together.*

Keywords: *Public Lighting, Grid-Connected Photovoltaic System, Independent Photovoltaic System.*