



FIA 2020/22

XII CONGRESSO/CONGRESO IBEROAMERICANO DE ACÚSTICA

XXIX ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA - SOBRAC

Florianópolis, SC, Brasil

ACÚSTICA E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA: proposta de atenuação de ruído escolar por meio de barreira acústica composta por módulos fotovoltaicos

Ferreira, R. F.¹; Santos, E. S. O.²; Meller, G.³; Lourenço, W. M.⁴; Silva, L. B.⁵; Grigoletti, G. C.⁶

¹ Laboratório de conforto ambiental e eficiência energética - LABAUT, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, lucasrafael2209@usp.br

² Programa de pós-graduação em engenharia civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil, sofiaoliveirasant@gmail.com

³ Programa de pós-graduação em engenharia civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil, gabrielameller0@gmail.com

⁴ Programa de pós-graduação em engenharia civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil, creativearquiteto@gmail.com

⁵ Engenharia civil, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Santa Maria, RS, Brasil, lukabornes.26@gmail.com

⁶ Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil, ggrigoletti@gmail.com

Resumo

Este trabalho teve como proposta avaliar a eficiência de uma barreira acústica em que módulos fotovoltaicos foram utilizados como parte de sua composição, para que o ruído produzido por um ambiente escolar fosse atenuado, visto que, locais de educação e formação de crianças e jovens podem se tornar sinônimo de transtorno para a vizinhança. Além disso, a crescente necessidade por fontes cada vez mais limpas de energia, aliado ao potencial brasileiro no que diz respeito a produção de energia elétrica, demonstra uma maneira inovadora de unir estes propósitos. Assim, diferentes angulações para captação de irradiação por meio dos módulos fotovoltaicos foram estudadas considerando, conjuntamente, o seu desempenho acústico. Os resultados indicaram que a angulação de 45° se mostrou adequada a ambos os propósitos considerando a realidade apresentada pelo objeto de estudo.

Palavras-chave: ruído técnico, barreira acústica, sistema fotovoltaico.

Abstract

This paper had the proposal to evaluate the efficiency of an acoustic barrier in which photovoltaic modules were used as part of its composition, so that the noise produced by a school environment was attenuated, since places of education and training of children and young people can become synonymous of disturbance to the neighborhood. Moreover, the growing need for cleaner sources of energy, allied to the Brazilian potential regarding the production of electricity, demonstrates an innovative way to unite these purposes. Thus, different angulations for capturing irradiation through the photovoltaic modules were studied considering, jointly, their acoustic performance. The results indicated that the 45° angle was adequate for both purposes considering the reality presented by the object of study.

Keywords: school noise, sound barrier, photovoltaic system.



1. INTRODUÇÃO

Uma grande demanda de estudos, tendo à qualidade de vida do ser humano como foco, é observada atualmente. Isso pode ser atribuído ao crescimento da população mundial, o qual nas últimas décadas tem se intensificado. Tal população se encontra cada vez mais dependente de equipamentos e serviços alimentados por energia elétrica, sendo assim necessário estudos incessáveis de meios para garantir uma maior e melhor produção, visando à eficiência energética.

É possível verificar que há um maior engajamento por parte de vários países desenvolvidos e industrializados, no que diz respeito ao uso de sistemas energéticos renováveis, nos últimos anos. Contudo, ainda há a predominância do uso de fontes não-renováveis de energia e pouca ênfase em sistemas com energia limpa na matriz energética geral. É preciso que se priorize novas formas de geração de energia, como a solar, hidrelétrica e/ou eólica, em substituição às usuais, dada a redução de disponibilidade (ou até esgotamento) dos recursos utilizados, pelas fontes tradicionais, no futuro, e a constante demanda por energia [1].

Considerando o propósito que a qualidade de vida seja alcançada, além dos meios necessários para que os serviços sejam garantidos de forma eficiente, o conforto do ser humano em questão é colocado em análise, sendo o ruído um dos grandes fatores de alteração desse parâmetro. Gonçalves [2] afirma que nos grandes centros urbanos se encontram as mais elevadas taxas de geração de ruídos, em razão do rápido, desordenado e pouco ecológico crescimento urbano, e consequentemente, da poluição sonora. O mesmo autor expõe que a indústria, o transporte e o lazer são os principais meios pelos quais se desenvolvem as fontes sonoras, uma vez que a massiva demanda populacional sobrecarrega, também, as práticas nesses setores.

A produção de ruídos é um dos principais problemas enfrentados pelos grandes centros, em âmbito mundial. A poluição sonora traz malefícios à saúde humana, principalmente, em razão dos seguintes fatores: o período de exposição a determinado ruído, a intensidade do mesmo, o espaço entre a fonte e o indivíduo, a

frequência de ocorrência do ruído e até mesmo a sensibilidade auditiva do ouvinte [3]. Perda do sono, alteração da percepção e da compreensão da fala, modificação na frequência cardíaca, diminuição na capacidade de desempenho psicomotor, reações musculares, irritabilidade, ansiedade, insônia, dilatação da pupila, contração dos vasos sanguíneos, são algumas das manifestações possíveis causadas pela exposição ao ruído [4].

Nesse viés, cabe aos urbanistas e engenheiros a busca por formas alternativas, que permitam a convivência digna e voltada para o bem comum. Sendo assim, as escolas podem ser vistas como um recorte de uma sociedade que também gera problemas sociais, como a poluição sonora e o grande dispêndio de energia [5].

Logo, uma forma de atenuar os ruídos gerados por uma fonte emissora se dá por meio de barreiras acústicas, que podem ser compostas por diferentes materiais como, por exemplo, o concreto, composições metálicas com materiais isolantes no seu interior e as próprias edificações [6]. Denota-se, também, que há alguns aspectos que podem afetar o desempenho dessas barreiras, como por exemplo, as suas dimensões, o ponto de localização em relação à fonte emissora, a frequência da fonte sonora, a composição de materiais da barreira, entre outros [2]. Aliado às barreiras acústicas pode-se, conjuntamente, adicionar módulos fotovoltaicos à mesma, pois no que concerne à geração de energia limpa, esta opção, que possui um sistema de autogeração de energia, o qual possibilita a economia de energia de uma edificação e eleva a qualidade de vida dos usuários.

No cenário atual, um número cada vez maior de pessoas torna as residências seu ambiente de trabalho, o que reforça a necessidade de menores índices de ruído no horário de funcionamento previsto à escola. Assim, diante das questões apresentadas, este trabalho teve como proposta buscar melhorias em uma vizinhança afetada pelo ruído gerado em ambiente escolar, por meio da atenuação do mesmo, utilizando barreiras acústicas no entorno do objeto de estudo.

Além disso, foi analisada a eficiência do incremento em tal barreira por um sistema de placas fotovoltaicas nela apoiada, sendo buscado uma angulação ideal que atenda, tanto

aos parâmetros acústicos, quanto a inclinação necessária para que a produção energética fosse atendida. O estudo acústico e de geração de energia solar fotovoltaica combinados, não são explorados em grande escala nacional e internacionalmente, propõe-se apresentar uma solução para atenuar os ruídos ambientais e, conjuntamente, otimizar o uso deste artefato, preenchendo-se, assim, uma lacuna essencial na conjuntura atual relacionando conforto e bem-estar com vantagens econômicas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Visando-se uma melhor contextualização deste trabalho, o referencial foi apresentado demonstrando os princípios utilizados para o desenvolvimento da barreira acústico-fotovoltaica (objetivo principal da pesquisa).

2.1. Barreiras Acústicas

Considera-se como ruído ambiental todo som proveniente do entorno de uma edificação em questão, que aconteça de forma contínua ou não, trazendo perturbações para os usuários. A geração desse ruído por meio de diversos tipos de fonte, irá caracterizar a paisagem sonora de um determinado lugar.

Contudo, uma única fonte pode determinar de forma mais intensa o ruído ambiente de uma região, como é o caso de escolas, indústrias, construções, etc. De acordo com um estudo realizado [7] analisou a intensidade do ruído produzido em sala de aula e o impacto na saúde dos indivíduos expostos a ele, durante os intervalos o valor máximo de 102 dB pode ser observado, o que ultrapassa o protocolo do Ministério da Saúde determinado como 85 dB [8]. Dessa forma, a escola que deveria ser um agente transformador positivo para uma comunidade, pode vir a se tornar sinônimo de transtorno.

Barreiras acústicas comumente são utilizadas, no controle do ruído de tráfego, buscando a proteção de comunidades diante de vias muito ruidosas, como demonstra a Figura 1, entretanto outras utilizações também possibilitam o benefício, como a proposta desta pesquisa. Tais barreiras são compostas por materiais que

permitam a atenuação do som e dimensionadas seguindo uma geometria que permita modificar o caminho realizado pelos raios sonoros.



Figura 1: Ilustração do efeito causado pela inclusão da barreira acústica em uma rodovia com ruído de tráfego representado pela região em amarelo.

No momento em que uma onda plana encontra uma barreira, a porção inferior é suprimida, sendo, apenas, emitida sobre ela. As regiões de baixa e alta pressão da onda colidem com o fluido em repouso na zona de sombra e se propagam dentro dela [9]. Dessa maneira, a onda difratada é dobrada no espaço atrás da barreira (Figura 2).

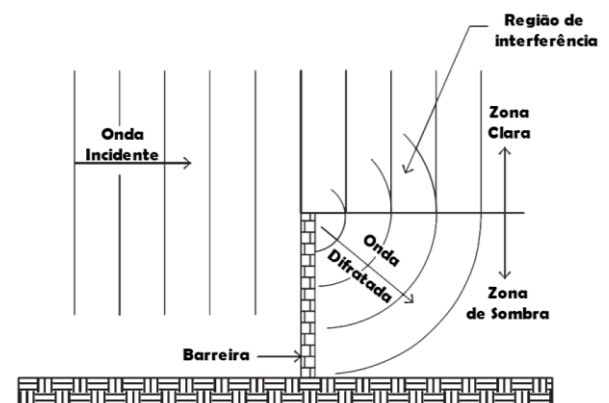


Figura 2: Esquema geométrico do comportamento de uma onda sonora sob uma barreira simples. (Adaptado de Long [9]).

2.2 Sistema fotovoltaico

Um desequilíbrio na forma como o desenvolvimento econômico tem acontecido e o uso de recursos esgotáveis, é de conhecimento geral, o que demonstra uma necessidade latente da utilização de novas tecnologias. A energia solar, que vem ganhando espaço no mercado como fonte alternativa, demonstra potencial na tentativa de minimizar tal desequilíbrio.

Segundo o Balanço Energético Nacional [10], 65,2% da matriz elétrica brasileira é proveniente da produção por hidrelétricas, mesmo possuindo grandes níveis de insolação e quartzo



de qualidade. Com um aproveitamento adequado, tal uso poderia gerar grandes avanços e competitividade no mercado.

Entende-se por energia solar fotovoltaica (ou efeito fotovoltaico) a transformação da radiação do sol em corrente elétrica e, em seguida, em energia elétrica. A absorção direta da luz solar é processada por dispositivos, os quais podem reter a energia em baterias ou contribuir diretamente em uma rede elétrica.

O seu uso vem sendo disseminado em coberturas de edificações, aliado à estética de fachadas e em possível sinergia com outros sistemas ecológicos. Esse sistema atua de modo a complementar, paralelamente ao fornecimento pela concessionária pública local, as demandas por energia elétrica [11, 12].

Vários estudos buscam avaliar o desempenho e rendimento da energia proveniente do sistema fotovoltaico, observados por Treble [13]; Parreta [14]; Seraphin [15]; Gnoatto [16] e Mirjanic [17]. A eficiência desses sistemas está relacionada à quantidade de radiação que atinge o módulo. Ou seja, as condições ambientais interferem diretamente no desempenho. Além disso, fatores como inclinação, orientação geográfica, tipo de módulo, temperatura e quantidade de sombreamento são imprescindíveis a serem considerados.

Ramos [18] afirma que o sistema de energia solar fotovoltaica é visto como uma das possibilidades no âmbito da geração de energia atual, impulsionado principalmente em razão da crise petrolífera na década de 70. O petróleo vem se sustentando como o principal combustível utilizado na produção de energias não-renováveis no Brasil, chegando a 33,1% em 2020 [10]. Todavia, trata-se de um recurso passível de esgotamento, e por isso, deve-se levar em consideração novas alternativas que venham a suprir o abastecimento da matriz energética.

Segundo o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada [19], o barateamento dos módulos, a evolução da tecnologia fotovoltaica e a conscientização da sociedade trouxeram ascensão ao mercado de energia solar. A aprovação da Resolução n.º 482 de 2012 da

ANEEL possibilitou aos sistemas fotovoltaicos a instalação direta à rede elétrica, fortalecendo a funcionalidade da tecnologia aos potenciais usuários do sistema. No Brasil, onde os recursos ambientais se mostram totalmente favoráveis, tal crescimento também é observado ano após ano.

O Brasil é amplamente favorecido à instalação da tecnologia fotovoltaica devido à linearidade e ao potencial de irradiação solar em todas as regiões geográficas do país [11]. Esses registros elevados de insolação se verificam mesmo em localidades que não apresentam valores tão expressivos de radiação, como é o caso da região Sul, mas que ainda saem na frente de outros países onde o sistema é muito utilizado. Dessa forma, espera-se um salto considerável na utilização desse sistema, que pode inclusive ultrapassar países como a Alemanha, que é o principal usuário dessa tecnologia atualmente, tornando o Brasil um dos principais produtores de energia limpa do mundo.

Dois modelos de captação de energia solar podem ser citados sobre as usinas fotovoltaicas: sistemas integrados e sistemas isolados. Para o desenvolvimento deste trabalho, o sistema integrado será apresentado como foco, sendo este conectado à rede elétrica da concessionária (sistema *On Grid*).

3. MÉTODO

Nesta sessão tratará da caracterização do objeto de estudo, dos parâmetros acústicos e dos cálculos de geração de energia

3.1 Caracterização do objeto de estudo

O objeto de estudo do presente trabalho envolve uma unidade de educação infantil, a qual possui uma latitude e longitude de 29°43'39''S e 53°48'29''W, respectivamente (Figura 3).

O CAIC “Luizinho de Grandi” – Centro de Atenção Integrada a Criança, é um complexo educacional onde faz parte deste o Núcleo de Educação Infantil (Figura 4), o qual foi criado pelo decreto executivo nº 289/95, por meio de um convênio firmado entre a Prefeitura e o Governo Federal em 12 de julho de 1995, sendo o último CAIC a ser inaugurado no Brasil. O

CAIC atua de forma integral no turno matutino e vespertino, oferece ensino do 1º ao 9º ano e ainda educação infantil, além de apresentar 13 salas de aula, 55 funcionários e atende, aproximadamente, 800 alunos.



Figura 3: Vista por satélite do objeto de estudo, com marcação em vermelho de delimitação do terreno. (Adaptado de Google (2019)).



Figura 4: Imagens do CAIC “Luizinho de Grandi”. Disponível em: < http://pibid.unifra.br/?page_id=2455 >

As escolas são locais responsáveis pela transformação da realidade de diversas crianças e jovens. Porém, quando o projeto do espaço não prevê o impacto que o ambiente escolar pode ocasionar para a vizinhança, diversas reclamações podem vir a ser feitas com base no ruído característico emitido. Além disso, para que uma escola nesse porte seja mantida, uma demanda considerável de energia elétrica é necessária.

Baseado nisso, para ser realizado um estudo adequado do espaço foram necessários os arquivos base: planta de localização, planta baixa e planta de cobertura. Para auxiliar nos estudos necessários à pesquisa a volumetria do edifício foi concebida por meio do *software*

Autodesk Revit (Figura 5). Assim, a metodologia a ser explanada a seguir visou demonstrar o processo realizado para concepção da barreira buscando atender as necessidades acústicas e energéticas do espaço em questão.

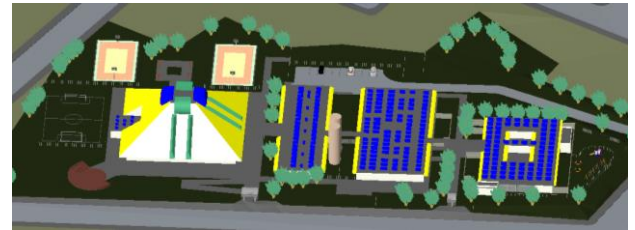


Figura 5: Volumetria desenvolvida no software Autodesk Revit.

3.2 Parâmetros acústicos

O cálculo da atenuação causada pela barreira, considerando uma fonte pontual (MAEKAEA, 1965), é dado por meio do número máximo de Fresnel (N), sendo a determinação por meio da diferença entre o menor caminho de propagação que tangencia a borda da barreira e o caminho direto através dela, conforme demonstrado na Equação 1 e na Figura 6.

$$N = \pm \frac{2}{\lambda} (A + B - r) . \quad (1)$$

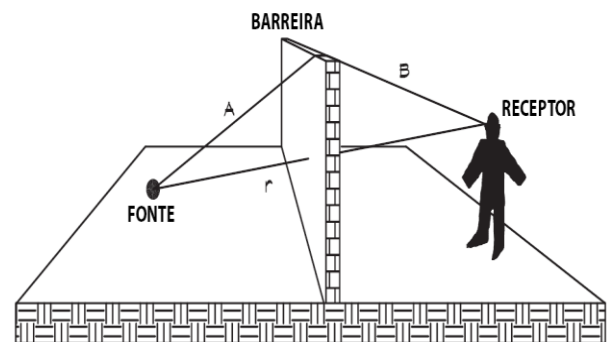


Figura 6: Esquema da lógica considerada para o cálculo de Maekawa para a atenuação de uma barreira acústica. (Adaptado de Long [9])

Assim, sabendo-se que a onda sonora propagada não é plana e sim esférica, a atenuação da barreira, para fins de cálculo considerada com altura constante e comprimento infinito, pode ser calculada com precisão significativa utilizando uma fórmula semiempírica apresentada na Equação 2 [21].

$$\Delta L = 20 \log_{10} \left[\frac{\sqrt{2\pi N}}{\tanh \sqrt{2\pi N}} \right] \text{ dB} + 5 \text{ dB} . \quad (2)$$



Destaca-se que o valor de 5 dB, ao final da Equação 2, considera a atenuação da barreira (referindo-se a uma parede de alvenaria). Logo, mesmo quando o valor de N for zero, ou seja, quando a linha de visão entre a fonte e o receptor for “apenas quebrada” pelo topo da barreira, a atenuação teórica proporcionada por uma parede de alvenaria será de 5 dB. Dessa forma, é necessário que o material a ser utilizado pela barreira garanta uma perda de transmissão sonora suficientemente maior do que a atenuação calculada pela Equação 2.

Denota-se que o isolamento acústico de um determinado material varia conforme a frequência sonora, na qual os sons de baixa frequência são mais difíceis de serem isolados devido ao comprimento de onda [22]. O comprimento de onda é proporcionalmente inverso à frequência, consequentemente as ondas sonoras correspondentes às baixas frequências tem maior possibilidade de passarem pela barreira acústica.

Para isso, pode-se adotar a Lei da Massa para que o isolamento de uma determinada estrutura seja calculado. Assim, considerando uma frequência de 500 Hz, obtém-se o isolamento sonoro por meio da Equação 3, sendo (δS) a densidade superficial de um material puro qualquer [23]. Como fator de correção para as demais frequências, os valores determinados na Tabela 1 podem ser aplicados, sendo x o valor encontrado pela Equação 3.

$$IA = 20 \times \log(\delta S) . \quad (3)$$

Tabela 1: Fator de correção para as demais frequências do valor encontrado a partir da Equação 3 considerando a Lei da Massa (retirado de Carvalho [23])

Frequência	Correção
125 Hz	($x-12$) dB
250 Hz	($x-6$) dB
500 Hz	x dB
1000 Hz	($x+6$) dB
2000 Hz	($x+12$) dB

Ressalta-se que a integração do painel fotovoltaico para o uso em barreiras acústicas não permite seu uso exclusivo devido à baixa densidade do material do módulo, não sendo

efetivo quanto a perda de transmissão sonora do ponto de vista do isolamento acústico (lei da massa). Sendo assim, o módulo fotovoltaico será considerado como incremento a barreira que será dimensionada, visando que seu uso possibilite a reflexão dos raios sonoros em uma angulação ideal, de modo que não retorne para a fonte amplificando seu efeito e, desta forma, propicie a atenuação do ruído em questão como produto do seu uso.

A partir disso, foi adotada uma parede de tijolo maciço de 15 centímetros de espessura com densidade superficial de 480 kg/m² [22]. Também, visando que não seja tomada uma grande área útil do terreno, o módulo foi considerado como apoiado na base superior da parede estudada, conforme apresentado na Figura 7.

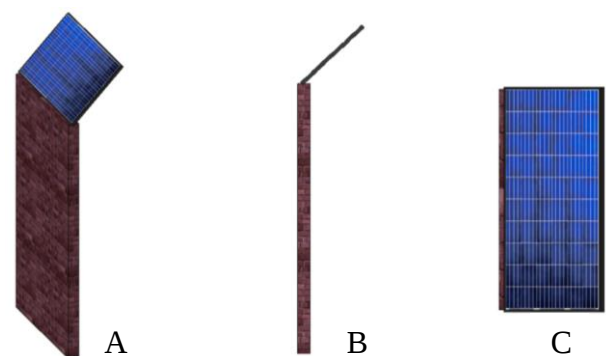


Figura 7: Modelo adotado para a constituição da barreira acústico-fotovoltaica, perspectiva (A), vista lateral (B) e vista superior (C).

O nível máximo de ruído emitido adotado foi de 102 dB com base no resultado da pesquisa realizada por Almeida [7], cujo valor considerado não foi medido in situ em virtude da pandemia de COVID-19 cometida durante a realização deste estudo. Assim, pretende-se com a inclusão da barreira atingir, ao menos, o nível máximo de 85 dB permitido pelo protocolo do Ministério da Saúde [8].

Em todo perímetro do terreno da escola, excluindo as áreas de acesso, foi avaliada a implementação da barreira. Sendo assim, toda a escola foi considerada como fonte de ruído. Contudo, para que a barreira tivesse uma única conformação, foi necessário que um parâmetro fosse adotado como base. Diante disso, foi

admitido o playground da escola como sendo o cenário mais crítico, sob o ponto de vista acústico, cujo local é justificado tanto pelo tipo de atividade ali realizada, como pela proximidade com o limite do terreno (Figura 8).



Figura 8: Demarcação da localização do playground, considerando como o pior caso do ponto de vista acústico.

Outra questão importante a ser elencada é a existência de um desnível acentuado de 2 metros em parte do terreno, principalmente, no ponto colocado como o pior caso, corroborando na necessidade de este local ser a base para o desenvolvimento dos cálculos para a barreira. Os parâmetros apresentados na Figura 9 foram levados em conta para o cálculo.

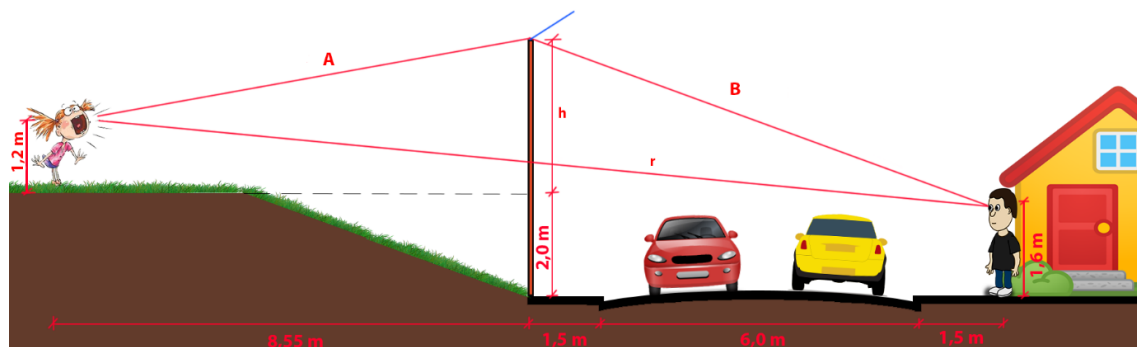


Figura 9: Esquema dos parâmetros considerados para o cálculo da altura da barreira, sendo h a altura efetiva.

Como explanado anteriormente, o módulo fotovoltaico não possui densidade suficiente para possibilitar a atenuação do som por meio da perda de transmissão sonora. Por esse motivo, a altura apresentada pela sua angulação foi desconsiderada para o cálculo, a altura da fonte cujo ponto crítico esteve localizado em um *playground*, possui 1,20 m, a qual foi estipulada como sendo a altura média de uma criança, enquanto o receptor foi fixado no ponto onde se localizava a primeira residência à uma altura de 1,60 m, sendo considerada essa média de um adulto.

Para um melhor desenvolvimento desse estudo, foi realizado um algoritmo por meio do software MATLAB, com o auxílio das Equações 1 e 2. Nele, os valores A e B, foram colocadas em função da altura da barreira (h), sendo assim calculada a atenuação estando a barreira de 1,2 a 4 metros de altura por banda de frequência (de 250 Hz a 4000 Hz).

3.3 Determinação da geração de energia

O processo de análise da geração de energia por meio das barreiras acústico-fotovoltaicas, se deu com base em dois fatores principais: determinação da inclinação ótima para a captação de energia solar para geração de energia elétrica; determinação da quantidade de placas a serem usadas nessa captação. Assim, foram analisados os resultados para cinco azimutes diferentes (-148° , -64° , 0° , 127° e 180°) e quatro inclinações (angulações de 60° , 45° , 30° e 25°) para determinar em qual das configurações há um melhor desempenho e geração de energia.

A análise da captação e geração de energia solar

se deu por meio do software Radiasol2, desenvolvido pelo Laboratório de Energia Solar – LABSOL da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, que faz operações aritméticas, cálculos trigonométricos, dando importância às características temporais e espaciais da radiação solar. O software cria rotinas considerando a inclinação e orientação da superfície da placa e a anisotropia nas suas componentes direta e difusa. A partir da obtenção dos cálculos, foi conseguida a inclinação ótima, cuja inclinação proporcionou maior captação de energia solar e,



consequentemente, maior geração de energia elétrica.

A quantidade de placas fotovoltaicas foi determinada por meio do comprimento total adotada para a barreira acústica (excluindo-se os acessos à escola) e pela dimensão lateral do módulo (Figura 10). A barreira acústica foi considerada, também, como suporte para apoio dos módulos no entorno da escola. A geração de energia foi determinada pelo número encontrado de placas, multiplicado pela

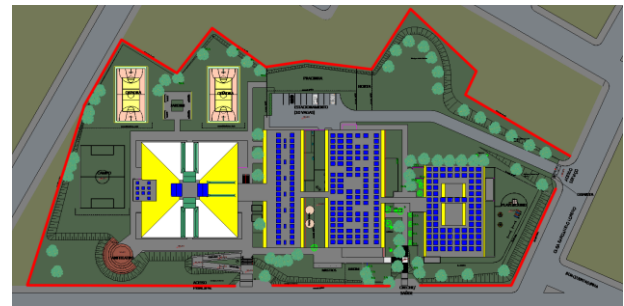


Figura 10: Marcação em vermelho do comprimento considerado como barreira acústica para o cálculo da quantidade de placas fotovoltaicas, sendo desconsiderados os acessos.

Tabela 2: Atenuação obtida por frequência, entre 1,2 m a 4 m de altura da barreira.

		Frequências (Hz)				
		250	500	1000	2000	4000
Altura da barreira (m)	1.2	6.6544	7.9448	9.873	12.3808	15.2402
	1.4	7.4061	9.0983	11.4157	14.178	17.1365
	1.6	8.2097	10.2402	12.8221	15.7141	18.7071
	1.8	9.0306	11.329	14.0805	17.0355	20.0402
	2	9.8441	12.3457	15.2022	18.187	21.1955
	2.2	10.6342	13.2855	16.2053	19.204	22.2137
	2.4	11.3911	14.1504	17.1079	20.1129	23.123
	2.6	12.1102	14.9462	17.9258	20.9337	23.9439
	2.8	12.7897	15.6795	18.6721	21.6813	24.6916
	3	13.43	16.3573	19.3574	22.3672	25.3775
	3.2	14.0326	16.9859	19.9903	23.0003	26.0106
	3.4	14.5997	17.5709	20.5778	23.588	26.5983
	3.6	15.1338	18.1173	21.1256	24.1358	27.1461
	3.8	15.6373	18.6292	21.6384	24.6487	27.659
	4	16.1128	19.1105	22.1201	25.1304	28.1407

quantidade de radiação recebida pelas mesmas, obtida por meio do software Radisol2.

O modelo de módulo fotovoltaico escolhido foi o Canadian CS6K-275, classe A, dimensão de 1638 x 982 x 40 mm, 275 Wp e possui uma eficiência de 16,8%. A quantidade necessária foi obtida por meio do cálculo da divisão da extensão das barreiras acústicas - instaladas no entorno da escola – e pelo comprimento do módulo fotovoltaico, obtendo-se, assim, um total de 381 módulos. A área total considerada de módulos solares foi de 613 m², ao realizar a multiplicação do número de módulos obtidos para cada direção, multiplicado pela área de cada módulo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Essa sessão abordará os resultados e as discussões dos valores obtidos.

4.1 Eficiência acústica

De acordo com o algoritmo programado no software MATLAB, foram encontrados os valores referentes a atenuação sonora para diferentes alturas da barreira (1,2 m a 4 m) cujos resultados estão representados a cada 0,2 m de intervalo e, também, apresentados por banda de frequência (250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz 4000 Hz). Os dados obtidos estão exibidos na Tabela 2 e na Figura 11.

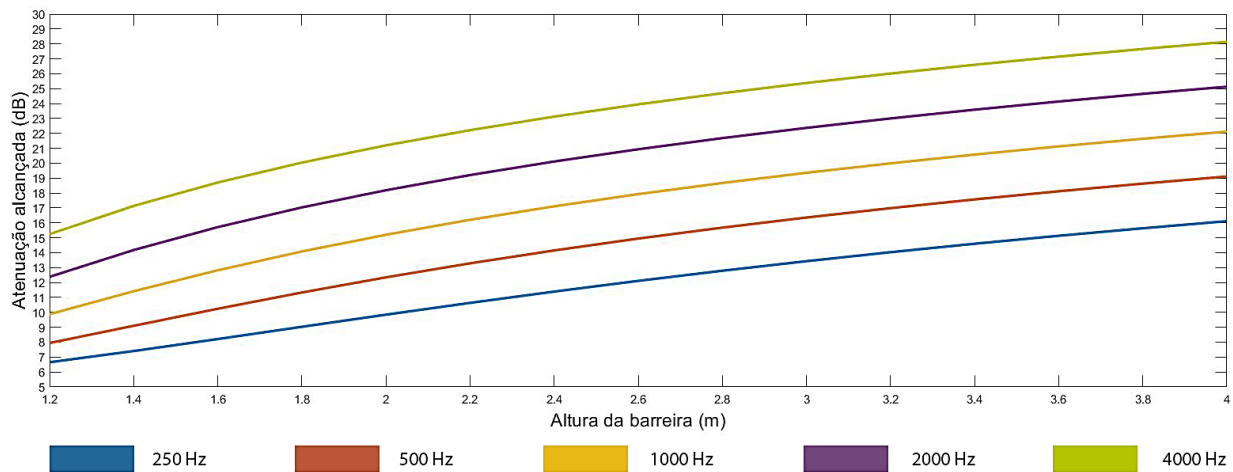


Figura 11: Gráfico dos valores encontrados por frequência variando-se a altura da barreira.

Tendo como base o valor de 85 dB estabelecido pelo Ministério da Saúde e considerando o valor máximo de 102 dB referente ao ruído emitido pela escola, seria necessário a redução de 17 dB. A atenuação alcançada por qualquer superfície possui valores diferentes por frequência, sendo as baixas frequências mais difíceis de serem controladas devido ao seu comprimento de onda. Dessa forma, considerando 17 dB como o mínimo a ser atenuado, a partir de 500 Hz (região que atende a uma média entre as baixas e altas frequências) e utilizando uma altura de 3,4 m, foi possível atingir o objetivo da barreira.

Fazendo o uso da Equação 3, encontra-se um total de 53 dB de perda de transmissão para a parede de tijolo maciço utilizada na barreira, o que se torna válido por ser esse valor maior do que o encontrado por meio do algoritmo.

Para a questão de análise considerada, o uso do módulo fotovoltaico quanto a reflexão dos raios

sonoros, busca auxiliar na atenuação promovida pela barreira, o esquema demonstrado na Figura 12 foi montado para exemplificar. A partir dos resultados obtidos neste trabalho, a fonte foi adotada como estando situada a 1,2 m do chão e distante a 8,55 m da barreira, conforme os parâmetros utilizados para o cálculo de atenuação da barreira. Já a altura ótima estabelecida foi de 3,4 m (obtido por meio do algoritmo). Para o traçado de raios, é considerado que o raio emitido sai da fonte em direção ao centro do módulo e o refletido é espelhado de acordo com a reta normal traçada perpendicularmente a superfície da placa.

Sendo assim, analisando o esquema obtido foi possível observar que a angulação de 45 graus cumpriu um melhor resultado quanto a reflexão dos raios sonoros, de modo a evitar a transmissão da energia refletida tanto para o entorno quanto para a própria escola.

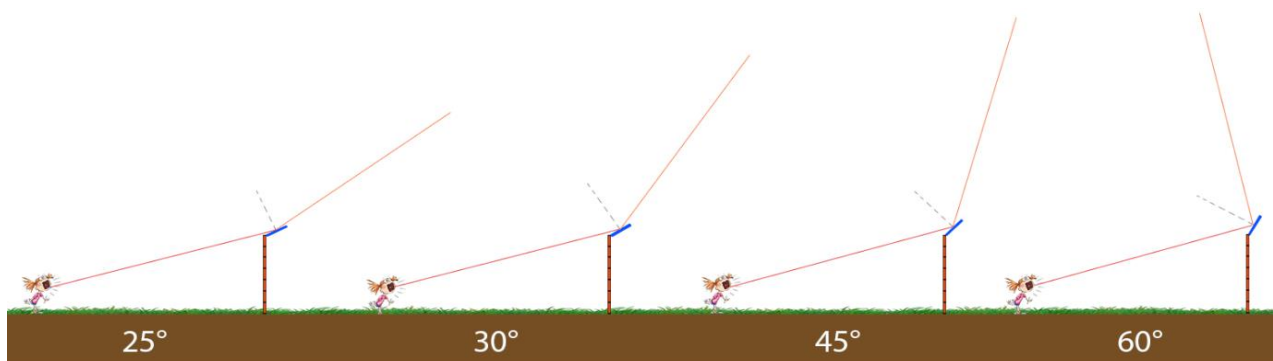


Figura 12: Estudo da reflexão dos raios sonoros para as angulações consideradas a serem calculadas para a geração de energia.



O material utilizado na composição de uma barreira acústica possui características de forma a promover a absorção sonora, evitando que os índices de ruído que se espera atenuar sejam amplificados. Para esta pesquisa, utilizando os módulos fotovoltaicos que possuem características que os tornam extremamente reflexivos, o uso de uma determinada inclinação como estratégia é válido. Com isso, conforme demonstrado pelo esquema montado na Figura 12, a inclinação considerada promoveu a reflexão das ondas sonoras emitidas pela fonte de ruído.

4.2 Geração de energia

As combinações de azimutes e inclinações geraram 20 configurações (Tabela 3). Observou-se a maior geração média mensal de energia em todas as configurações que apresentaram a menor inclinação foi a de 25°, gerando um total de 11.353,58 kWh (Tabela 4).

linha do Equador. Dessa forma, as maiores insolações foram verificadas nas inclinações de 25° e 30°, com pouca variação entre elas, porém, ligeiramente superiores aos 25° de inclinação, em razão dos fatores geográficos. Entretanto, a inclinação ótima para a reflexão sonora foi a de 45° como mostrado na Figura 12.

A decisão do ângulo que melhor atende a necessidade do contexto ambiental, considerando a atenuação do ruído no entorno, foi 45°, mesmo tendo uma geração energética inferior.

A diferença em relação à produção de energia pelo sistema fotovoltaico nas duas inclinações, é de 0,42 vezes. Enquanto em 25° de inclinação se consegue uma geração que corresponde a 3,02 vezes o uso energético necessário (Tabela 4). Já em 45°, se obtém uma geração que corresponde a 2,6 vezes em relação ao que a escola utiliza mensalmente.

Tabela 3: Relação azimuthe/inclinação e melhores configurações.

NORTE			SUDESTE			SUDOESTE		
Azimute 0°	Média (kWh)	Geração Média Mensal (kWh)	Azimute 127°	Média (kWh)	Geração Média Mensal (kWh)	Azimute -148°	Média (kWh)	Geração Média Mensal (kWh)
25°	5,017	33,11	25°	4,304	28,4	25°	4,171	27,53
30°	4,963	32,75	30°	4,142	27,34	30°	3,983	26,28
45°	4,617	30,47	45°	3,597	23,74	45°	3,366	22,22
60°	4,043	26,68	60°	3,014	19,89	60°	2,752	18,16
NOROESTE			SUL			INCLINAÇÕES EFICAZES		
Azimute -64°	Média (kWh)	Geração Média Mensal (kWh)	Azimute 180°	Média (kWh)	Geração Média Mensal (kWh)	Azimute 0°, Inclinação 25°	33,11	
25°	4,791	31,62	25°	4,085	26,96	Azimute 127°, Inclinação 25°	28,4	
30°	4,708	31,07	30°	3,876	25,58	Azimute -148°, Inclinação 25°	27,53	
45°	4,325	28,55	45°	3,219	21,25	Azimute -64°, Inclinação 25°	31,62	
60°	3,774	24,91	60°	2,598	17,14	Azimute 180°, Inclinação 25°	26,96	

A taxa de irradiação solar é máxima quando a inclinação do módulo fotovoltaico é mais próxima possível da latitude do local de instalação. O objeto de estudo está localizado em uma zona de baixa latitude, aproximadamente 29° Sul, mais próxima da

Com as configurações mais eficientes escolhidas, passou-se para o cálculo da geração média mensal total de energia, analisando os diferentes azimutes dos módulos à 45° de inclinação (Tabela 5). Assim, a geração total de energia calculada foi de 9.775,54 kWh.

Tabela 4: Geração média total mensal de energia para 25°.

COMPRIMENTOS (m)		Quantidade Módulos (Un.)	Geração Média Mensal (kWh)	Geração Média Total Mensal (kWh)
Azimuth 0°	185,84	113	33,11	3.756,5094
Azimuth -64°	61,51	38	31,62	1.187,3908
Azimuth 127°	175,9	107	28,40	3.049,7924
Azimuth -148°	153,5	94	27,53	2.579,8871
Azimuth 180°	47,39	29	26,96	779,9966
Total	624,14	381	148	11.353,58

Tabela 5: Geração média total mensal de energia para 45°.

COMPRIMENTOS (m)		Quantidade Módulos (Un.)	Geração Média Mensal (kWh)	Geração Média Total Mensal (kWh)
Azimuth 0°	185,84	113	30,47	3.456,9871
Azimuth -64°	61,51	38	28,55	1.072,1065
Azimuth 127°	175,9	107	23,74	2.549,3687
Azimuth -148°	153,5	94	22,22	2.082,2772
Azimuth 180°	47,39	29	21,25	614,7970
Total	624,14	381	126	9.775,54

Avaliando-se a tarifa branca intermediária no valor de R\$0,601/kWh, a produção energética mensal gerada pelos módulos fotovoltaicos promoveria um montante correspondente a R\$5.875,10. Logo, o gasto energético máximo diário da escola municipal, por dia, é de 156,26 kWh. Ou seja, o consumo mensal (analisando como letivos seis dias da semana) totaliza em 3.750,24 kWh, que corresponde a R\$2.253,89. Esse gasto mensal corresponde a 38,36% da energia gerada mensalmente pelos módulos fotovoltaicos, restando, ainda, um saldo mensal de 61,64% de energia gerada não consumida, que seria inserida na rede da concessionária.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse estudo propõe demonstrar a eficiência de um método para atenuar o ruído escolar e, também, utilizar módulos fotovoltaicos com o intuito de produzir energia. Aliar um caso corriqueiro de problema de ruído escolar – que pode ocorrer em diferentes zonas de uso e ocupação do solo – ao uso, simultâneo, de placas fotovoltaicas permitindo com que se solucione a atenuar o ruído e se promova, também, a eficiência energética da escola.

Destaca-se, também, que esse estudo apresentou o código do algoritmo utilizado para o cálculo das barreiras acústicas e dos painéis fotovoltaicos, permitindo com que qualquer usuário consiga replicá-lo, de forma gratuita, como uma ferramenta facilitadora. Assim, a aplicação desse estudo está direcionada às escolas que apresentam a necessidade de atenuar os ruídos ambientais provenientes, principalmente, das atividades escolares.

Portanto, se destina aos casos que não se pode interferir na fonte de ruído (veículos) e nem realizar alterações na fachada, sendo a barreira acústica um eficiente meio para atenuar esses ruídos, além do fato de que se pode aliar ao uso de módulos fotovoltaicos a fim de promover, conjuntamente, a eficiência na edificação.

O estudo desenvolvido apontou o potencial em geração de energia por meio dos módulos fotovoltaicos, considerando o perímetro em que a barreira deve ser instalada. Ressalta-se que a produção de energia calculada produziu mais que o dobro necessário para o gasto energético de uma escola municipal convencional. Mesmo não sendo utilizada a angulação de maior



captação para a aplicação do estudo, a produção gerada pelo sistema dimensionado aqui, atende a necessidade do instituto de ensino infantil, como também, fornece diretamente à rede parte da produção energética.

A angulação elegida com melhor desempenho, tem uma eficiência promissora no que diz respeito a reflexão das ondas sonoras, impedindo assim que parte dos sons e ruídos produzidos no ambiente escolar atinjam as moradias na circunvizinhança. Ademais, mostrou uma produção energética aceitável, validando a proposta da união desses dois mecanismos (barreira e placa fotovoltaica).

O estudo promovido teve êxito em sua proposta. A metodologia nessa pesquisa pode ser replicada e ajustada em outros locais que pretendem aliar uma produção energética eficaz juntamente com a atenuação sonora eficiente e, dessa forma, estará sempre visando a saúde, conforto e bem-estar das pessoas estão expostas aos efeitos nocivos do ruído.

REFERÊNCIAS

- [1] Costa, R. C.; Prates, C. P. T. O papel das fontes renováveis de energia no desenvolvimento do setor energético e barreiras à sua penetração no mercado. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 21, p. 5-30, 2005. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2436/2/BS%20201%20O%20papel%20das%20fontes%20renov%20c3%a1veis_P.pdf.
- [2] Gonçalves, R. P. R. Atenuação sonora de barreiras acústicas. Dissertação de mestrado – DEC-FCTUC – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, 2014. Disponível em: <https://estudogeral.sib.uc.pt/bitstream/10316/38605/1/Atenuacao%20sonora%20de%20barreiras%20acusticas.pdf>.
- [3] Bistafa, S. R. Acústica aplicada ao controle de ruído. 3ª edição, São Paulo, 2018.
- [4] Gerges, S. Ruído – fundamentos e controle. 2ª edição, NR Editora, 2000.
- [5] Reigota, M. O que é Educação Ambiental. 2ª edição. São Paulo, 2009.
- [6] Moraes, L. R. Estudo de barreiras acústicas no controle do ruído aeroportuário, 2008.
- [7] Almeida Filho, N.; Filletti, F.; Guillaumon, H. R.; Serafini, F. Intensity of noise in the classroom and analysis of acoustic emissions in schoolchildren, Taubaté, São Paulo, 2012.
- [8] ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE MEDICINA DO TRABALHO – ANAMT. Alerta ao ruído: ponto de atenção com a saúde do trabalhador, 2018. Disponível em: <https://www.anamt.org.br/portal/2018/10/08/alerta-ao-ruído-ponto-de-atenção-com-a-saúde-do-trabalhador/>.
- [9] Long, M. Architectural acoustics. Elsevier, 2006.
- [10] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. Balanço Energético Nacional (BEM) 2021: ano base 2020, 2021.
- [11] Villalva, M. G. Energia Solar Fotovoltaica – conceitos e aplicações – Sistemas Isolados e Conectados à Rede. 2ª edição, São Paulo, 2015.
- [12] Moren, M. S. P.; Korjenic, A. Green buffer space influences on the temperature of photovoltaic modules – Multifunctional system: building greening and photovoltaic. Energy and Buildings, 2017.
- [13] Treble, F. c. Solar cells. IEE Rev., v. 127, n. 8, 1980.
- [14] Parreta, A. et al. Effects of solar irradiation conditions on the outdoor performance of photovoltaic modules. Optics Communications, v. 153, n. 1, 1998.
- [15] Seraphin, O. J.; Siqueira, J. A. C.; Fiorentino, J. J.; Araújo, J. A. B. Eficiência energética de módulos fotovoltaicos mono e poli-cristalinos em função da radiação solar global. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA, UNICAMP, 2004.
- [16] Gnoatto, E.; Dallacort, R.; Ricieri, R. P.; Silva, S. L.; Ferruzi, Y. Determinação da curva característica de um painel fotovoltaico em condições reais de trabalho. Acta Sci. Technol., v. 27, n. 2, 2005.
- [17] Mirjanic, D.; Maksimovic, S.; Divnic, D. The study of energy efficiency of monocrystalline silicon modules. Contemporary Materials, Renewable Energy Sources, v. 4, n. 2, 2013.
- [18] Ramos, C. M. Procedimentos para caracterização e qualificação de módulos fotovoltaicos. Dissertação de mestrado – Programa Interunidades de Pós-graduação em energia, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>.
- [19] Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA. Viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos no Brasil e possíveis efeitos no setor elétrico. Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão, 2018. Disponível em: http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/8400/1/TD_2388.pdf.
- [20] Maekawa, Z. Noise reduction by screens. Applied Acoustics, England, 1968.
- [21] Kuttruff, H. Acoustics: an introduction. CRC Press, 2007.
- [22] Souza, L. C. L.; Almeida, M. G.; Bragança, L. Bê-abá da acústica arquitetônica: ouvindo a arquitetura. São Carlos, São Paulo, 2009.
- [24] Carvalho, D. C.; Passos, F. T. S.; Pereira, J. M.; Garcia, M. F. N.; Castro, M. R. R.; Storti, M. C. Escola Municipal de Ensino Fundamental – CAIC Luizinho de Grandi. Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2010. Disponível em: http://pibid.unifra.br/?page_id=2455.