

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM PROJETO E PROCESSOS DE  
FABRICAÇÃO

Área de concentração: Projeto e Processos de Fabricação

Dissertação de Mestrado

SIMULAÇÃO ACÚSTICA DE ESPECTROS SONOROS E  
BARREIRAS EM SUBESTAÇÃO DE ENERGIA

Mateus Da Silva

Passo Fundo

2022



CIP – Catalogação na Publicação

---

S586s Silva, Mateus da  
Simulação acústica de espectros sonoros e barreiras  
em subestação de energia [recurso eletrônico] / Mateus  
da Silva. – 2022.  
14 MB ; PDF.

Orientador: Prof. Dr. Charles Leonardo Israel.  
Dissertação (Mestrado em Projeto e Processos de  
Fabricação) – Universidade de Passo Fundo, 2022.

1. Processos de fabricação. 2. Subestações elétricas.  
3. Ruído industrial. 4. Acústica - Simulação. 5. Poluição  
sonora. I. Israel, Charles Leonardo, orientador.  
II. Título.

CDU: 621

**Mateus Da Silva**

**SIMULAÇÃO ACÚSTICA DE ESPECTROS SONOROS E BARREIRAS  
EM SUBESTAÇÃO DE ENERGIA**

Orientador: Prof. Dr. Charles Leonardo Israel

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Passo Fundo  
2022

Mateus Da Silva

**SIMULAÇÃO ACÚSTICA DE ESPECTROS SONOROS E BARREIRAS  
EM SUBESTAÇÃO DE ENERGIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Os componentes da Banca examinadora abaixo aprovaram a Dissertação:

Professor Doutor Charles Leonardo Israel  
Orientador

Professor Doutor Agenor Dias de Meira Junior  
UPF - PPGPPF

Professor Doutor Leandro Dóro Tagliari  
UPF – PPGPPF

Professor Doutor Juan Pablo Raggio Quintas  
UFRGS

## RESUMO

Subestações de energia elétrica estão cada vez mais inseridas em ambientes urbanos, tornando o ruído gerado pelos transformadores de potência um desconforto recorrente para a população. Com o intuito de melhorar o bem estar social, foram realizados dois estudos por meio de simulações acústicas, sendo o primeiro a avaliação das ferramentas do programa de simulação e de outros tipos de espectros de ruído gerados por transformadores, buscando assim formas de avaliar o ruído antes da instalação dos equipamentos em uma subestação a ser construída e também a possibilidade de simular uma subestação sem a necessidade de medições “*in-loco*”. A segunda etapa do estudo buscou por meio de simulações acústicas verificar a eficácia de diferentes geometrias de barreiras acústicas na mitigação do nível de pressão sonora nas residências próximas de uma subestação. Para garantir uma correta simulação foram coletados dados referentes ao ruído gerado pelos transformadores em uma subestação real, tanto para fins de caracterização do ruído, como para dados referentes ao nível de pressão sonora na região da subestação. Com isso comparou-se os valores reais com os valores simulados, e posteriormente simulou-se a capacidade de mitigação do som com a inserção de barreiras acústicas. Tais barreiras puderam influenciar na forma de dispersão do ruído dependendo de sua proximidade da fonte, de sua geometria e altura. Dentre as 4 formas de barreiras simuladas foram encontrados valores de 3 a 17 dB(A) de perda por inserção das barreiras. Durante a avaliação dos espectros, que foram obtidos por meio do *software* de simulação e da literatura, foi possível verificar que o espectro gerado pelo *software* apresentou valores demasiadamente elevados e com isso não confiável. O espectro encontrado na literatura apresentou valores plausíveis, entretanto seu uso é restrito, pois as variações apresentadas entre ele e o espectro real tiveram valores de até 8,6% de diferença.

Palavras-chave: Subestação; Mitigação de ruído; Análise Sonora; Mapa acústico; Barreiras acústicas.

## ABSTRACT

Electric power substations are increasingly inserted in urban environments, making the noise generated by power transformers a recurring discomfort for the population. In order to improve social welfare, two studies were carried out through acoustic simulations, the first being the evaluation of the simulation program tools and other types of noise spectra generated by transformers, thus seeking ways to evaluate the noise before installing the equipment in a substation to be built and also the possibility of simulating a substation without the need for on-site measurements. The second stage of the study sought, through acoustic simulations, to verify the effectiveness of different geometries of acoustic barriers in mitigating the sound pressure level in homes close to a substation. In order to guarantee a correct simulation, data referring to the noise generated by the transformers in a real substation were collected, both for the purposes of noise characterization and for data referring to the sound pressure level in the substation region. With this, the real values were compared with the simulated values, and later the sound mitigation capacity was simulated with the insertion of acoustic barriers. Such barriers could influence the form of noise dispersion depending on its proximity to the source, its geometry and height. Among the 4 forms of simulated barriers, values from 3 to 17 dB(A) of loss by insertion of barriers were found. During the evaluation of the spectra, which were obtained through the simulation software and the literature, it was possible to verify that the spectrum generated by the software presented values that were too high and therefore unreliable. The spectrum found in the literature presented plausible values, however its use is restricted, since the variations presented between it and the real spectrum had values of up to 8.6% of difference.

Keywords: Substation; Noise mitigation; Sound Analysis; Acoustic map; Acoustic barriers.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Faixa de espectro sonoro audível, infrassons e ultrassons variando conforme frequência	14
Figura 2 – Linhas isofônicas referentes à audição humana	15
Figura 3 – Variação da absorção sonora referente à umidade relativa para temperaturas de 0°C e 25°C.	16
Figura 4 – Atenuação do solo relativa à frequência e tipo de solo	17
Figura 5 – Curvaturas geradas pela ação do vento na transmissão do som no ar	18
Figura 6 – Propagação de onda sonora por obstáculo apresentando difração, transmissão e reflexão	19
Figura 7 – Configurações de topo de barreira acústica e seu respectivo IL para diversos casos	21
Figura 8 – Espectro sonoro puro típico de um transformador de energia elétrica	22
Figura 9 – Apresentação dos raios sonoros entre fontes e receptores	24
Figura 10 – Variações dos raios sonoros referentes ao número de reflexões	25
Figura 11 – Fluxograma das etapas iniciais do estudo	28
Figura 12 – Posição das medições <i>in loco</i> e pontos medidos na simulação com sua respectiva numeração	29
Figura 13 – Exemplos de espectros sonoro coletados nas medições “in-loco”	33
Figura 14 – Vistas, superior e 3D, da simulação da subestação indicando transformadores e barreiras	35
Figura 15 – Posição das barreiras simuladas em cada configuração	36
Figura 16 – Valores medidos em cada um dos pontos durante ensaio “in-loco” na subestação em dB	37
Figura 17 – Valores simulados com espectro obtido por medições “in-loco” e acréscimo referente a som tonal em dB	38
Figura 18 – Valores simulados com espectro sonoro da literatura em cada ponto de medição, valores em dB	40
Figura 19 - Valores simulados com espectro sonoro obtido através do software CadnaA, valores em dB	41
Figura 20 – Mapa de distribuição do ruído na subestação para a configuração C1A, apresentando valores incidentes nas residências em dB	44
Figura 21 – Mapa de distribuição do ruído na subestação para a configuração C2, apresentando valores incidentes nas residências em dB	45
Figura 22 – Mapa de distribuição do ruído na subestação para a configuração C3, apresentando valores incidentes nas residências em dB	46
Figura 23 – Mapa de distribuição do ruído na subestação para a configuração C4, apresentando valores incidentes nas residências em dB	47
Figura 24 – Mapa de distribuição do ruído na subestação para a configuração C5, apresentando valores incidentes nas residências em dB	48
Figura 25 – Vista 3D da configuração do C5 apresentando mapa da distribuição de ruído	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variação de nível de pressão sonora em relação ao valor medido	39
Tabela 2 – Diferença dos valores simulados com diferentes espectros em relação ao espectro real	42
Tabela 3 – Visão geral dos resultados para diferentes configurações	53



**LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Caracterização do som tonal	31
Quadro 2 – Resumo das estratégias definidas e simuladas	34
Quadro 3 – Mapas de distribuição do ruído verticalmente nos transformadores centrais da subestação, valores em dB	50
Quadro 4 – Mapas de distribuição do ruído verticalmente cruzando a subestação na direção leste-oeste, valores em dB	52

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CEEE-GT	Companhia Estadual de Geração e Transmissão de Energia Elétrica
CRAEB	Critério Mais Relevante para Aumentar a Eficiência da Barreira
GPS	<i>Global Position System</i>
IL	<i>Insertion Loss</i> (Perda por inserção)
NBR	Norma Brasileira
NPS	Nível de Pressão Sonora
OMS	Organização Mundial da Saúde
LAFmax	Nível máximo de pressão sonora ponderado em A e em F
LAeq	Nível de Pressão Sonora Equivalente e Contínua
UTM	<i>Universal Transversa de Mercator</i>

**LISTA DE SÍMBOLOS**

$p$	Pressão Medida, Pa
$p_0$	Pressão de Referência, Pa
$Q$	Fonte Emissora de Som
$IP$	Receptor Acústico
$B$	Barreira
$C$	Configuração de Barreiras Simuladas
$Tr$	Transformadores
$LTR$	Largura do Transformador
$CTR$	Comprimento do Transformador
$P$	Ponto de Medição Acústica

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
1.1	OBJETIVO GERAL	12
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>13</b>
2.1	O SOM	13
2.2	PERCEPÇÃO SONORA	13
2.3	PROPAGAÇÃO DO SOM AO AR LIVRE	15
2.3.1	<i>Absorção Atmosférica e Umidade</i>	16
2.3.2	<i>Absorção do Solo</i>	16
2.3.3	<i>Vento e Temperatura</i>	17
2.4	ABSORÇÃO SONORA POR OBSTÁCULOS E BARREIRAS	18
2.5	DESEMPENHO DE UMA BARREIRA ACÚSTICA E FATORES DE INFLUÊNCIA	20
2.5.1	<i>Geometria da Barreira e de Topo</i>	20
2.6	FONTES SONORAS EM SUBESTAÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA	21
2.7	CARACTERIZAÇÃO DE SOM TONAL E SOM IMPULSIVO	23
2.8	<i>SOFTWARE CADNAA</i>	23
2.9	PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO	25
2.10	CONSIDERAÇÕES FINAIS	26
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>27</b>
3.1	PONTOS DE MEDIÇÃO	28
3.2	CARACTERIZAÇÃO DO RUÍDO DE TRANSFORMADORES E DA SUBESTAÇÃO	29
3.2.1	<i>Medições In Loco</i>	30
3.3	DEFINIÇÃO DO NÍVEL DE PRESSÃO SONORA ATRAVÉS DO <i>SOFTWARE</i>	31
3.4	FONTES SONORAS NO CADNAA	32
3.5	SIMULAÇÃO DE BARREIRAS ACÚSTICAS	33
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>37</b>
4.1	VALIDAÇÃO DA SIMULAÇÃO ACÚSTICA	37
4.1.1	<i>Valores Simulados Utilizando Espectro Sonoro Real</i>	38
4.2	SIMULAÇÃO ACÚSTICA COM DIFERENTES TIPOS DE ESPECTROS SONOROS	40
4.3	SIMULAÇÃO DE BARREIRAS ACÚSTICAS	43
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>54</b>
	<b>APÊNDICE A</b>	<b>60</b>
	<b>APÊNDICE B</b>	<b>126</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A Organização Mundial da Saúde (OMS), em 2011, classificou a poluição sonora como a segunda maior fonte de poluição, atrás apenas da poluição do ar. Devido à sua gravidade, não só a perda auditiva é levada em consideração, mas também fatores como irritabilidade, dificuldades de concentração, aumento da pressão arterial, pulso acelerado, efeitos psicológicos, alterações comportamentais e do sono (WHO, 2011).

Em um estudo de, de Castro et al. (2019), em duas escolas diferentes, quanto ao impacto da poluição sonora em relação aos níveis de aprendizagem e concentração, foi possível observar que o ruído afetou negativamente o desempenho dos alunos, tendo sido agravado no caso de salas com maior nível de ruído, o que indica a necessidade de reduzi-lo. Em outro estudo de Assunção et al. (2019), em relação ao desempenho cognitivo, indicou problemas relacionados à memória e ao ciclo do sono de pessoas expostas a ruído intenso.

Para reduzir o ruído e mitigar os problemas mencionados, ações podem ser realizadas em um ou mais dos seguintes pontos: na fonte emissora, meio de propagação ou no receptor (BIES & HANSEN, 2003).

As subestações de energia elétrica são fundamentais em todos os níveis de sua cadeia de operação, atuando principalmente na elevação e rebaixamento de nível de tensão na rede, assim como na distribuição de energia à população.

Tais subestações são, em sua maioria, construídas distantes da área residencial, mas com o crescimento populacional a região antes desabitada acaba por receber novas moradias. Dessa forma a população residente próximo a uma subestação acaba acometida pela poluição sonora gerada por ela.

Os transformadores de potência são os equipamentos responsáveis pela alteração de nível de tensão, e no decorrer do processo acabam gerando ruído, tanto pela vibração gerada pela magnetostrição do núcleo, como pela ventilação forçada utilizada no resfriamento dos mesmos.

Como intervenções junto aos transformadores poderiam gerar falhas, além de reduzir a segurança do equipamento, soluções aplicáveis na fonte do ruído foram descartadas. O mesmo ocorreu em relação aos receptores, no caso, a população. Portanto, este estudo busca encontrar, através de simulação acústica, soluções para redução do ruído gerado pelas subestações no seu meio de propagação do som, nesse caso, o ar, por meio de barreiras acústicas.

Para isso foram realizados ensaio em campo, junto a uma subestação e nos seu entorno, de modo a adquirir o espectro sonoro real dos transformadores presentes nesta, assim como aquisição de dados para posterior validação da simulação. Buscou-se então, através da literatura e do *software* CadnaA, espectros sonoros padrões, para com estes verificar a possibilidade de utilizar a simulação acústica em subestações antes de sua construção, possibilitando dessa forma avaliar o possível impacto que a subestação trará à região.

## 1.1 Objetivo Geral

Avaliar diferentes espectros de nível de pressão sonora a serem inseridos na simulação de subestações de energia elétrica, além de possíveis configurações de barreira para mitigação do ruído.

## 1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste estudo são:

*Avaliar espectros sonoros referente a subestação de estudo;*

*Mapear acusticamente a região da subestação através de medições acústicas;*

*Avaliar diferentes possibilidades de inserção de espectros sonoros junto ao software de simulação;*

*Comparar resultados gerados pela simulação com valores obtidos através de medições em campo e com valores de diferentes espectros sonoros simulados;*

*Simular diferentes características de barreiras acústicas para mitigação de ruído.*

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Apresenta-se a seguir uma revisão de literatura relacionada aos principais pontos abordados no decorrer do presente estudo, sendo estes, o som, percepção sonora, propagação do som, absorção atmosférica, por umidade, pelo solo, pelo vento e temperatura, absorção sonora por obstáculos e barreiras, desempenho e fatores de influência de uma barreira acústica, fontes sonoras de subestações, caracterização do som e referente ao *software* utilizado para as simulações.

### 2.1 O Som

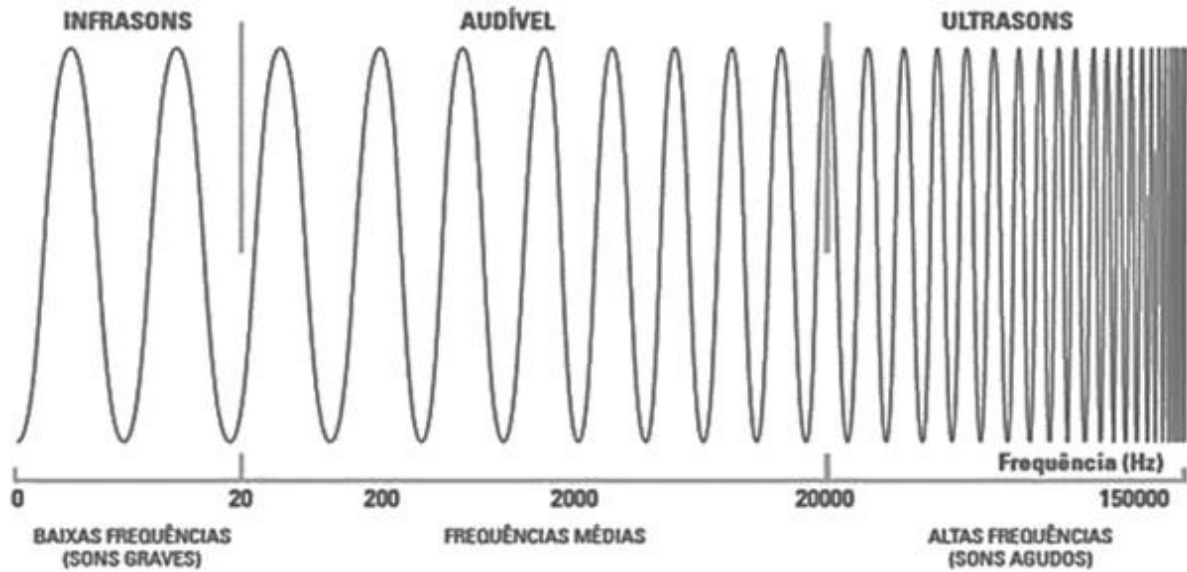
Ondas sonoras são ondas mecânicas, pois estas se propagam apenas onde existe um meio, seja ele, sólido, líquido ou gasoso. A velocidade da onda é afetada pela temperatura do meio, a intensidade do som é afetada pela amplitude da onda, sendo essa amplitude ocasionada pela diferença de pressão e, por fim, a frequência que é medida em Hertz (Hz) é relacionada a rapidez que ocorrem as variações de pressão em um período de tempo (SANCHO & SENCHERMES, 1982).

Para possibilitar análises do som, instrumentos de medição possuem filtros que analisam o espectro sonoro de acordo com faixas de frequência, as quais chamam-se de bandas de frequência. As bandas comumente utilizadas são bandas largas de 1/1 oitava e 1/3 de oitava (BISTAFA, 2011)(GERGES, 1992).

### 2.2 Percepção Sonora

O som pode ser caracterizado como a variação da pressão causada pela vibração de um material, e promove um aumento na agitação das moléculas, dessa forma chegando até o ouvido. O ouvido humano é capaz de distinguir sons presentes em apenas uma faixa de frequências, a qual inicia em 20 Hz, representando os sons mais graves, e finalizando em 20000 Hz, caracterizando sons agudos.

Figura 1 - Faixa de espectro sonoro audível, infrassons e ultrassons variando conforme frequência.



Fonte: Bies & Hansen, (2003).

As frequências abaixo de 20 Hz são chamadas de infrassons e aquelas acima de 20000 Hz de ultrassons, como pode ser visto na Figura 1 (BIES & HANSEN, 2003).

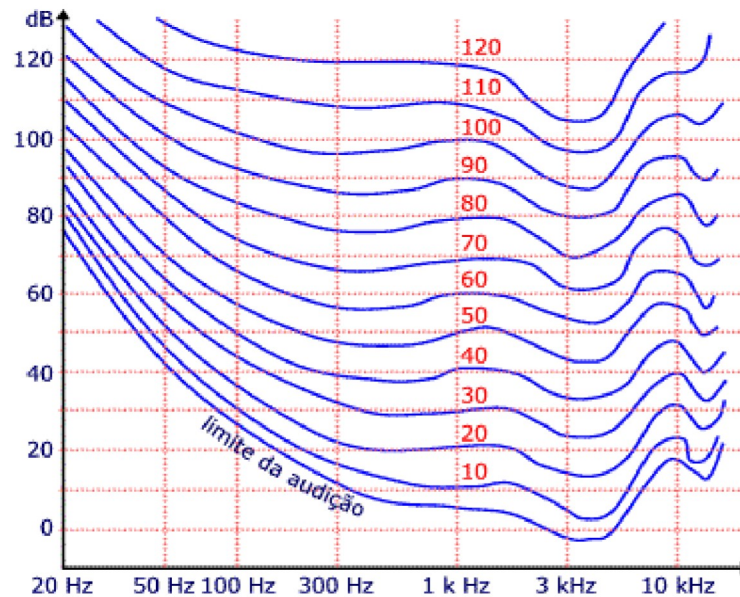
O nível sonoro é definido por meio de uma relação logarítmica entre a pressão sonora do meio em que se encontra, medida em Pascals (Pa), e uma pressão de referência que corresponde ao valor mínimo perceptível ao ser humano, sendo medida em decibels (dB), como mostra a Equação 1, sendo o nível de pressão sonora,  $L_p$  é a pressão medida e  $p_0$  é a pressão de referência (APA, 2004).

$$L_p = 20 \log_{10} \frac{p}{p_0} \quad (1)$$

Quando o som que se ouve é desagradável, incômodo e/ou puder gerar danos à saúde humana é classificado como ruído (ABNT NBR 10151, 2020). Além de não ouvir todas as frequências sonoras o ouvido humano tem percepções diferentes para cada variação de frequência, gerando assim diferentes linhas isofônicas, as quais estão representadas na Figura 2. As linhas isofônicas traduzem-se em iguais sensibilidades para diferentes pontos da mesma curva (BIES & HANSEN, 2003).



Figura 2 - Linhas isofônicas referentes à audição humana.



Fonte: MSPC (2018).

Como pode ser visto na Figura 2, o ouvido humano tem maior capacidade de percepção para sons mais agudos. Em baixas frequências o nível de pressão sonora precisa ser maior para tornar-se perceptível (GONÇALVES, 2014).

Sistemas de medição, como os sonômetros, podem captar o som sem descaracterizá-lo como nas linhas isofônicas, desse modo são úteis em medições de impacto ambiental, por exemplo. Sonômetros também contam com filtros, os quais podem ser utilizados para aproximar a leitura do equipamento da percepção humana, contribuindo assim para determinar se o som é prejudicial à saúde ou não. Dessa forma o pode-se padronizar as medições acústicas para diferentes ponderações, nesse caso é possível utilizar a ponderação “A”, a qual corrige o espectro de som real para se aproximar da percepção humana (GONÇALVES, 2014).

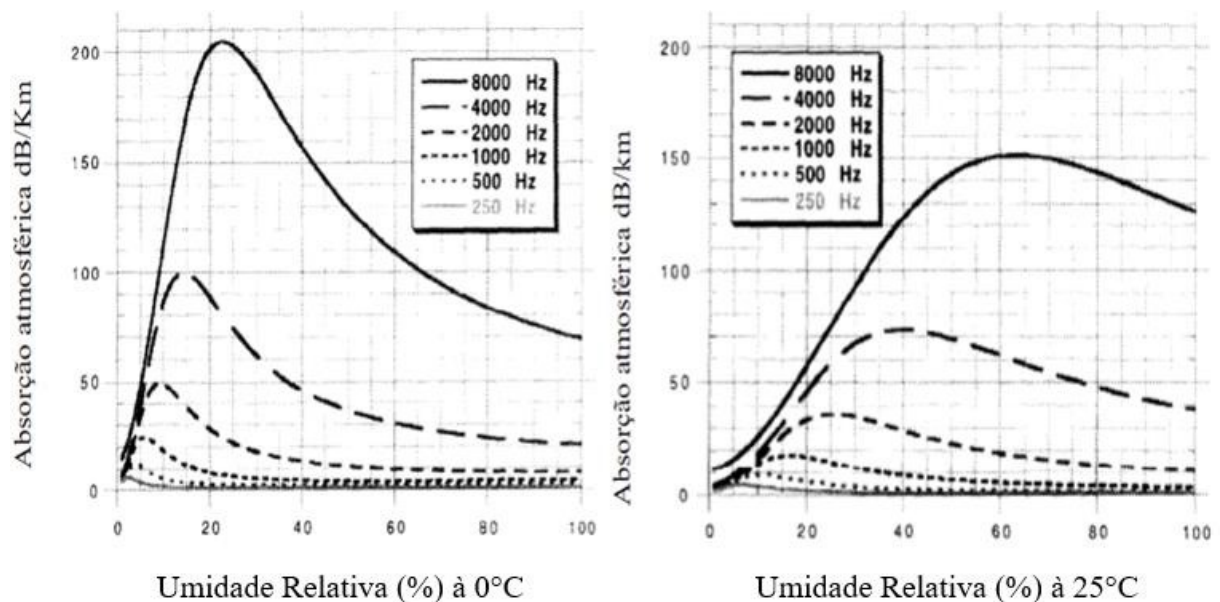
### 2.3 Propagação do Som ao Ar Livre

A forma de propagação do som ao ar livre é diretamente influenciada pelas condições meteorológicas, ou seja, umidade do ar, vento, temperatura, coeficiente de absorção sonora do solo e vegetação. Cada condição influencia de uma forma no modo como o som se comporta e com isso altera a maneira como o mesmo transporta-se (WAKEFIELD, 2012).

### 2.3.1 Absorção Atmosférica e Umidade

A absorção sonora gerada pela atmosfera e umidade varia de acordo com a frequência do som, sendo maior para frequências mais altas. Isso ocorre devido ao menor comprimento de onda, o qual se perde mais facilmente durante a transferência por indução entre moléculas (Larsson, 1997). A seguir, na Figura 3, está representada a interação da umidade relativa e da temperatura, variando a temperatura de 0°C à esquerda e 25°C à direita, tal variação é gerada pelas alterações relacionadas com a indução entre as moléculas nas diferentes temperaturas.

Figura 3 – Variação da absorção sonora referente à umidade relativa para temperaturas de 0°C e 25°C.



Fonte: Larsson, (1997).

Outro ponto a ser observado é a menor absorção em temperatura mais baixa, possivelmente causada pela menor agitação das moléculas (GONÇALVES, 2014).

A absorção atmosférica pode ser considerada desprezível em grandes cidades, devido à pequena distância entre fonte e receptor, principalmente em temperaturas normais e frequências mais baixas (WAKEFIELD, 2012).

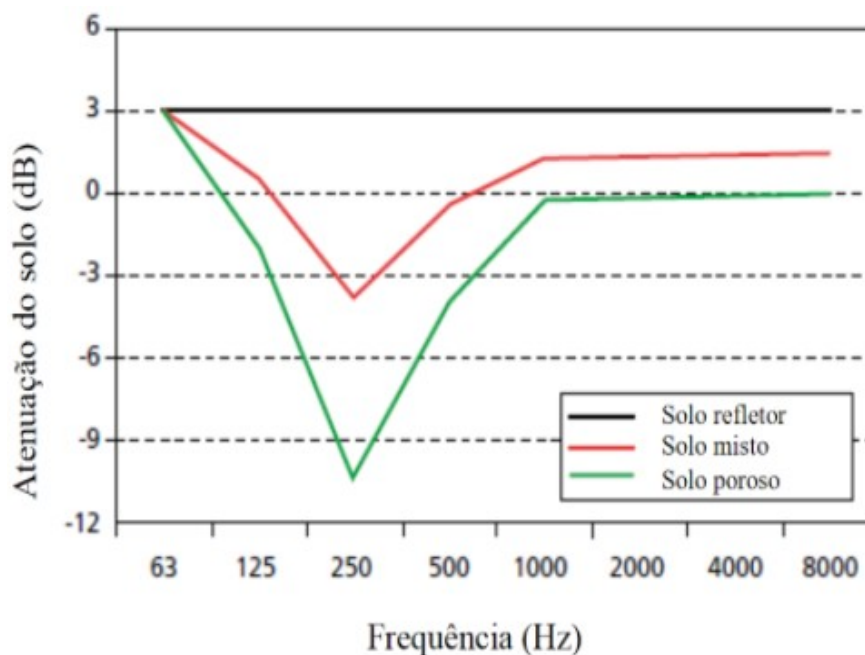
### 2.3.2 Absorção do Solo

Quando a fonte sonora ou o receptor estiverem próximos ao solo a onda sonora pode sofrer influências do mesmo, pois, parte dela será afetada por reflexões e poderá causar

interferências na onda direta, com isso gera-se o chamado *ground effect*, que é a combinação de ambas as ondas, a direta e a refletida (LEISSING, 2007).

Outras características que podem influenciar a onda são a frequência e a rigidez do solo. Caso a superfície seja porosa, a mesma terá características absorventes, reduzindo assim a potência sonora, ocorrendo o contrário se o solo for reflexivo. As frequências que mais sofrem influência do solo estão entre a faixa que varia de 200 a 600 Hz como mostra a Figura 4 (ATTENBOROUGH, 2002).

Figura 4 - Atenuação do solo relativa à frequência e tipo de solo.



Fonte: Bruel & Kjær, (2001).

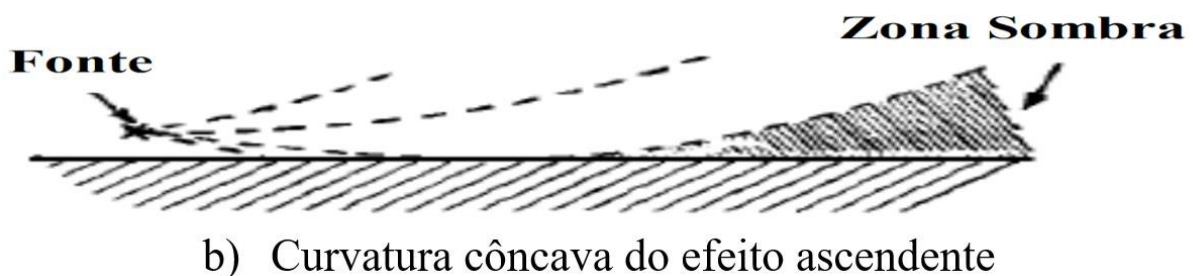
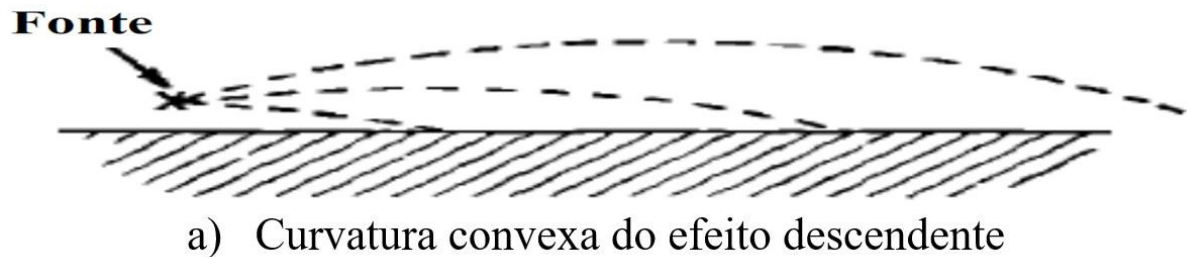
Solos porosos tem a característica de gerar um grande número de reflexões da onda sonora, e com isso “aprisionam” a onda, fazendo dessa forma com que ela acabe perdendo energia e por fim atenuando-a, por esse motivo a expressiva redução apresentada pela linha verde na Figura 4, o contrário ocorre para casos onde a superfície é lisa e uniforme, podendo, nesse caso aumentar o nível de pressão sonora pela incidência da onda refletida.

### 2.3.3 Vento e Temperatura

Vento e temperatura geram efeitos ascendentes e descendentes, devido à refração (António, 2012). Quando o vento se desloca na mesma direção da onda sonora gera o efeito

descendente, empurrando o som para o solo, esse efeito pode inclusive potencializar o *ground effect*, citado anteriormente, produzindo uma curva convexa. Para casos onde o vento viaja em direção oposta à onda sonora, cria-se o efeito ascendente, podendo inclusive gerar uma zona de sombra em determinadas distâncias, como mostra a Figura 5 (LEISSING, 2007).

Figura 5 – Curvaturas geradas pela ação do vento na transmissão do som no ar.



Fonte: Leissing, (2007).

Tais efeitos também podem ser causados pela diferença de temperatura entre superfícies e vento, ou seja, onde a temperatura da superfície for maior que a do vento. Geralmente ocorre durante o período diurno, gerando o efeito ascendente. No período noturno, com as superfícies mais frias que o vento, gera-se o efeito descendente, por isso à percepção de maior potência sonora à noite (WAKEFIELD, 2012).

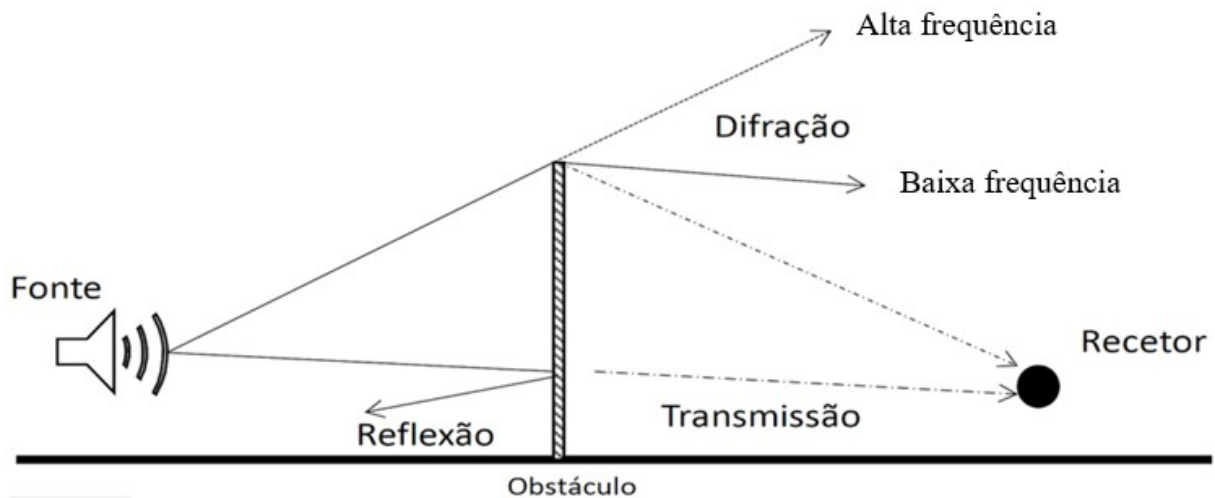
O efeito do vento não gera uma variação significativa no nível sonoro até uma distância de aproximadamente 50 metros da fonte sonora, impactando apenas em distâncias superiores a esta (BRUEL & KJÆR, 2001).

## 2.4 Absorção Sonora por Obstáculos e Barreiras

A onda sonora, ao ser interceptada por algum tipo de obstáculo, modifica uma série de fatores diferentes, como reflexão, absorção, difração e transmissão. Alguns deles podem ser

eliminados ou atenuados, dependendo do tipo de material e características que venham a descrever o obstáculo, como por exemplo, um material reflexivo influenciará na transmissão e reflexão, assim como um material absorvente mudará a absorção e transmissão da onda. Durante as simulações não são inseridos os materiais junto ao *software* utilizado, apenas os valores relacionados à absorção e reflexão. Exemplos de como acontecem tais fatores podem ser vistos na Figura 6 (DAIGLE, 1999).

Figura 6 - Propagação de onda sonora por obstáculo apresentando difração, transmissão e reflexão.



Fonte: FHWA, (2014).

A onda que incide sobre o topo da barreira sofre difração, variando conforme o ângulo de incidência e a forma dessa extremidade, assim como o comprimento de onda (FHWA, 2014). O receptor é afetado apenas pelas ondas transmitidas e difratadas já que as refletidas voltam em direção à fonte e as absorvidas são dissipadas na forma de calor pelo material da barreira (FREITAS & TRABULO, 2007).

Ondas sonoras de alta frequência dificilmente são difratadas, pois possuem um comprimento de onda pequeno, ao contrário das de baixa frequência, as quais são difratadas com um ângulo maior em direção ao receptor devido ao seu grande comprimento de onda, fazendo com que as barreiras sejam menos eficientes para baixas frequências (FHWA, 2014)(HENDRIKS et al., 2013).

O melhor indicador que pode ser usado para verificar a influência ou a eficácia de uma barreira é chamado de IL (Insertion Loss), ou perda por inserção, que é a diferença entre o valor em decibéis medido antes e após a inserção da barreira. Em síntese o IL representa quanto o

nível sonoro foi afetado antes e depois da inserção da barreira, indicando se a barreira é capaz de atenuar o som (Daigle, 1999). Os fatores que mais influenciam no IL são a altura da barreira, distância entre fonte/receptor, frequência do som, comprimento de onda e coeficiente de absorção da barreira (DAIGLE 2012).

## **2.5 Desempenho de uma Barreira Acústica e Fatores de Influência**

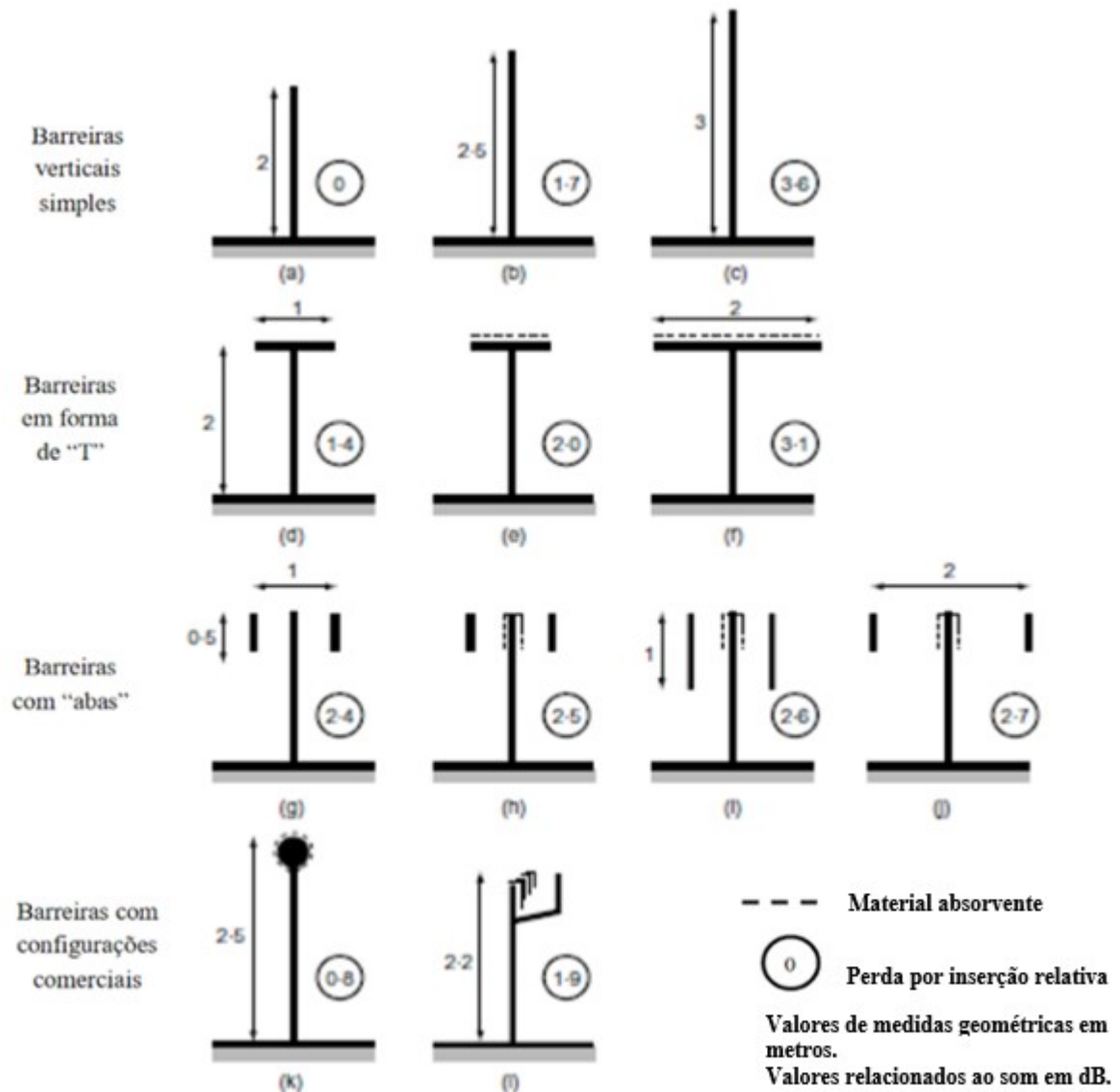
O desempenho de uma barreira está, em parte, ligado a fatores relacionados com a sua construção, desde geometria, tipo de topo, comprimento, material, frequência do som incidente e distância da barreira em relação à fonte ou o receptor. Nesta seção serão abordados dois desses fatores, os quais foram considerados mais importantes para o presente trabalho (FREITAS & TRABULO, 2007).

### *2.5.1 Geometria da Barreira e de Topo*

A geometria da barreira interfere na forma como o som é refletido por ela, porém, isso depende também do ângulo em que a onda incide na mesma. Uma barreira longitudinalmente curvada gera uma pequena atenuação, entretanto a altura da mesma influencia de forma muito mais significativa na perda por inserção, isso devido à difração sofrida pela onda sonora, que dificulta a chegada da mesma ao receptor, aumentando a sua distância percorrida e mitigando assim o ruído (TADEU et al., 2012).

Outro fator geométrico que influencia no IL (perda por inserção) é a geometria de topo, a qual visa alterar o ângulo de difração e diminuir o nível sonoro, aumentando consideravelmente a perda por inserção (Daigle, 1999). Durante um estudo foi comparada a variação do IL, tendo como referência uma barreira de 2 metros de altura, mostrando a influência de uma geometria de topo em formato de “T” com abas laterais, assim como mostra a Figura 7 (WATTS, 2002). Os valores presentes dentro dos círculos são as variações quando comparadas à barreira “a” que possui 2 metros de altura. Os tracejados são referentes à combinação da barreira revestida com material absorvente, o qual pode alterar as características da barreira como mencionado na Seção 2.5.

Figura 7 – Configurações de topo de barreira acústica e seu respectivo IL para diversos casos.



Fonte: Watts, (2002).

A perda por inserção varia também de acordo com a distância entre barreira e fonte sonora, ou barreira/receptor, de modo que, quanto mais próximo da fonte ou receptor a mesma estiver, maior será o IL, sendo o ponto de menor atenuação a distância média entre os dois (HENDRIKS et al., 2013).

## 2.6 Fontes Sonoras em Subestações de Energia Elétrica

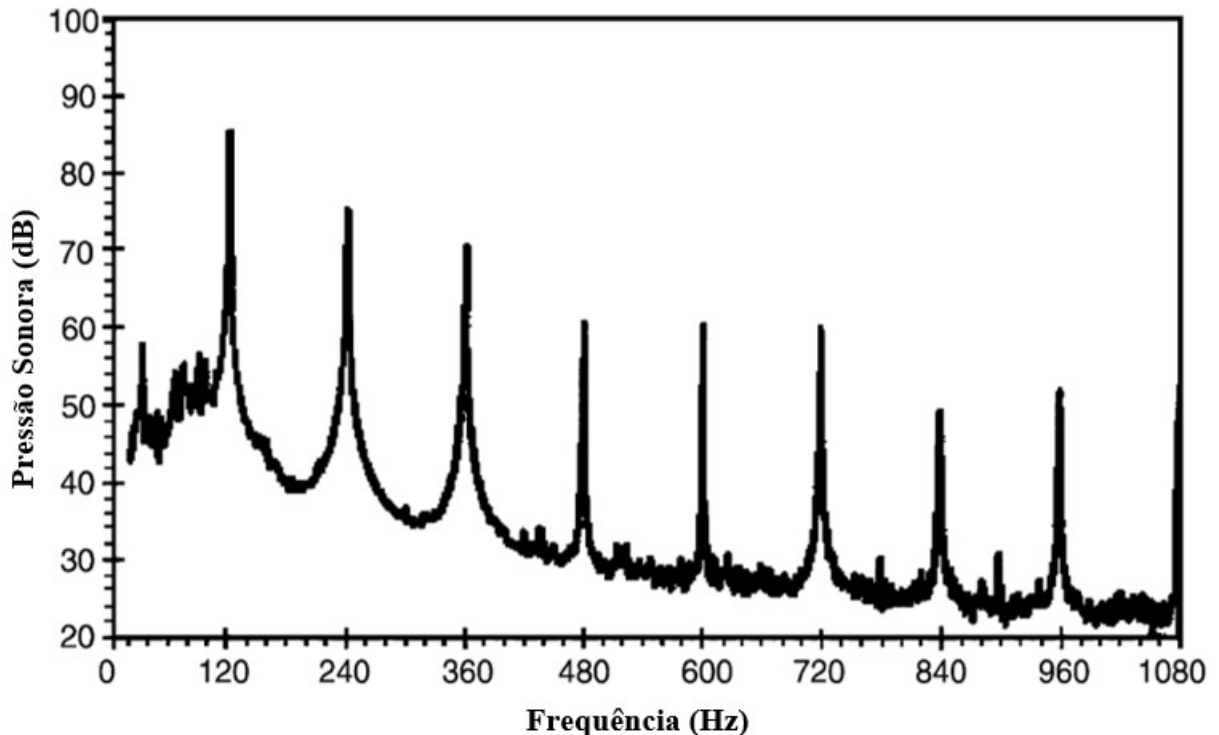
O ruído gerado pelas subestações provém de diversos equipamentos e efeitos causados pela grande quantidade de energia existente, porém o maior causador de ruído em uma

subestação é o transformador de potência. Por esse motivo, apenas estes são considerados como geradores de ruído nos estudos feitos na área (ROSA et al., 2006).

A pressão sonora audível, gerada pelos transformadores é causada por um fenômeno chamado magnetostricção do núcleo magnético do transformador. Efeito esse que é gerado durante o processo de elevação ou rebaixamento do nível de tensão da rede elétrica. As vibrações presentes no núcleo do transformador são predominantemente de 120 Hz, geradas pela inversão senoidal da corrente elétrica, a qual é de 60 Hz. Além da frequência de 120 Hz o transformador é acometido pelas frequências harmônicas presentes, de 240, 360, 480 Hz e assim por diante (GUARALDO et al., 1997).

Durante a realização de um estudo referente ao ruído emitido por transformadores de potência, pode-se obter valores referentes ao espectro sonoro destes. O resultado da análise do espectro sonoro de um transformador de alta potência, localizado em uma subestação da cidade de Belo Horizonte, está ilustrado na Figura 8 (DINIZ & ZANNIN, 2004)(RODRIGUES, 1998).

Figura 8 - Espectro sonoro puro típico de um transformador de energia elétrica



Fonte: Rodrigues, (1998).



Para o caso apresentado na Figura 8 ressalta-se que o transformador estava em operação, no entanto com a ventilação forçada desativada, apresentado assim apenas o espectro sonoro puro gerado pelo transformador.

## 2.7 Caracterização de Som Tonal e Som Impulsivo

A caracterização de som tonal se dá quando o nível de pressão sonora contínuo equivalente na banda de  $\frac{1}{3}$  de oitava de interesse exceder os níveis de pressão sonora contínuo equivalentes em ambas as bandas de  $\frac{1}{3}$  de oitava adjacentes (ABNT NBR 10151, 2020).

A caracterização de som impulsivo, decorrente da fonte sonora objeto de medição, se dá quando o resultado da subtração aritmética entre  $LAF_{max}$  e o  $LA_{eq,T}$ , medido durante a ocorrência do som impulsivo, for igual ou superior a 6 dB. Onde  $LAF_{max}$  é o nível de pressão sonora ponderada em A de medição rápida máximo encontrado e  $LA_{eq,T}$  é o nível de pressão sonora ponderada em A equivalente durante o tempo de medição. (ABNT NBR 10151, 2020).

## 2.8 Software CadnaA

Sendo um dos mais completos *softwares* de simulação e avaliação de ruído, o CadnaA foi desenvolvido pela empresa DataKustik GMBH. Este pode ser utilizado para cálculos de ruído ambiental gerados pelas mais diferentes fontes, como comércio, indústria, tráfego, além de ferrovias, aeroportos entre outros. Podendo ser utilizado desde estudos locais como cenários de grandes metrópoles (METZEN, 2009).

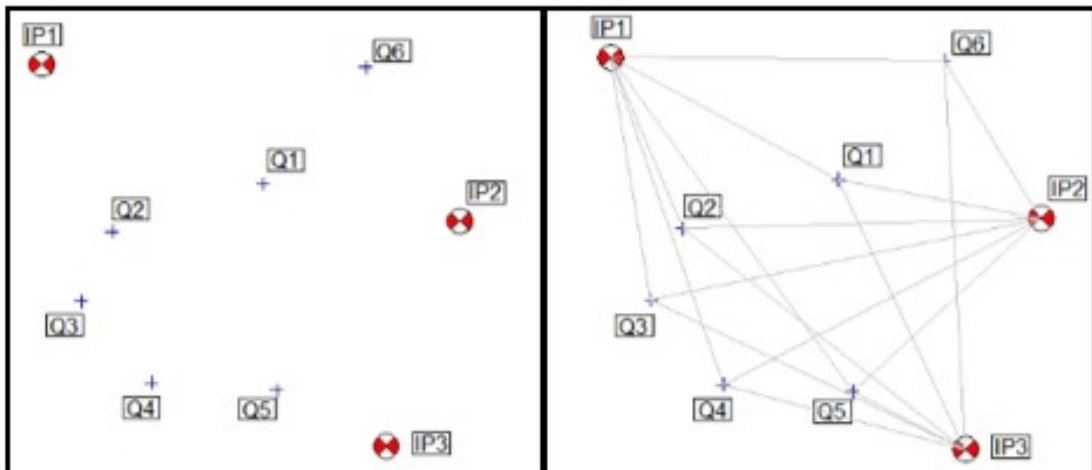
Ainda como forma de apresentar a distribuição da pressão sonora o CadnaA dispõe de diferentes formas de inserção e direcionamento do som, bem como formas de fonte móvel. O *software* permite ainda alterar valores de absorção e reflexão de obstáculos, barreiras e solo, além de opções de variação de meteorologia. O som pode ser apresentado em forma de mapas de cores e valores numéricos, com vistas superiores, laterais e em 3D (DATAKUSTIK, 2012).

A forma de cálculo pelo CadnaA leva em consideração a distância entre a fonte sonora, o receptor e o nível de potência sonora da fonte, o nível de pressão sonora no receptor será então calculado baseando-se em fórmulas analíticas derivadas de modelos físicos.

Se houver múltiplas fontes, também haverá múltiplos raios sonoros que serão considerados no cálculo. Para todos os receptores que são afetados pelas ondas sonoras, a

proporção de influência é calculada baseada no nível de pressão e distância entre as fontes e o respectivo receptor como pode ser visto na Figura 9, onde as fontes sonoras são indicadas pela letra Q, seguida da numeração da fonte, os receptores são indicados por IP seguido da numeração e por fim as linhas são referentes à incidência do som gerado pelas fontes em cada um dos receptores.

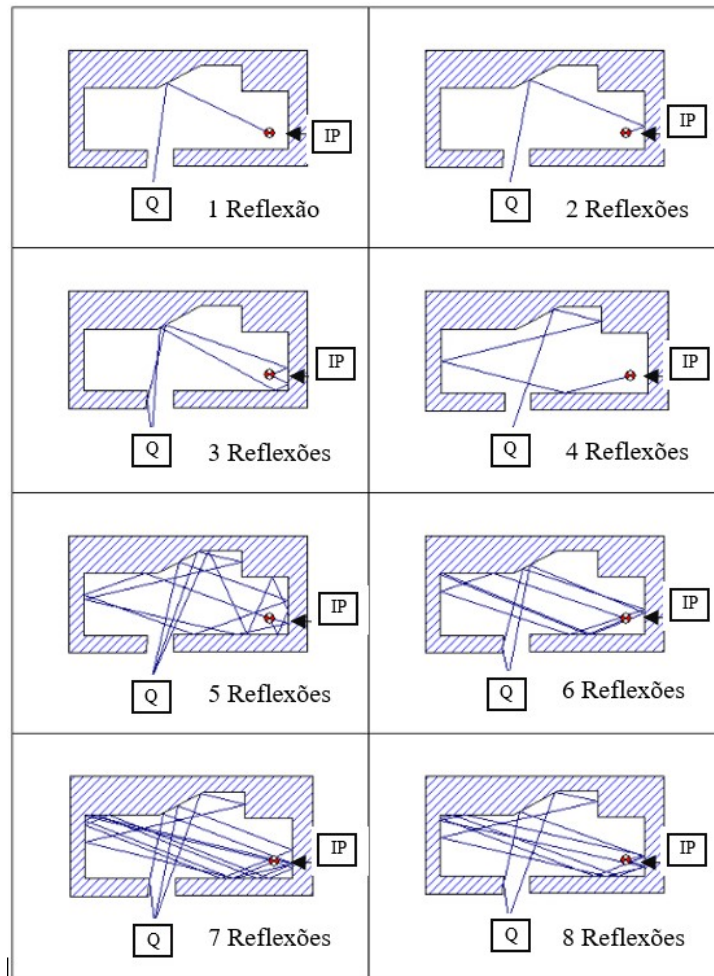
Figura 9 - Apresentação dos raios sonoros entre fontes e receptores.



Fonte: DataKustik, (2012).

Outro ponto durante o uso do *software* é relacionado ao número de reflexões, o qual pode ser determinado pelo usuário, de modo a acelerar o desempenho de cálculo ou sua precisão. Com mais níveis de reflexão os cálculos ficam cada vez mais massivos, necessitando assim um maior processamento, e também mais próximos da realidade. Com menores níveis de reflexão o cálculo se torna mais rápido, entretanto podendo mascarar resultados devido às variações de reflexão, como pode ser visto na Figura 10, da mesma forma que na figura anterior, a fonte é indicada pela letra Q, o receptor por IP e as linhas internas a geometria representam as reflexões sofridas pela onda sonora até sua incidência no receptor.

Figura 10 - Variações dos raios sonoros referentes ao número de reflexões.



Fonte: DataKustik, (2012).

## 2.9 Procedimento de Medição

De acordo com a norma ABNT NBR 10.151:2020 uma medição acústica deve obedecer a alguns parâmetros para ser validada. Entre tais parâmetros estão o equipamento de medição, calibrador acústico, calibrações destes instrumentos, posicionamento dos equipamentos durante a medição e o tempo desta.

Em relação aos equipamentos a norma indica que o medidor do nível de pressão sonora deve atender especificação de classe tipo 0, tipo 1 ou tipo 2. Já o calibrador acústico deve ser de tipo 2 ou melhor. Referente ao procedimento de medição no exterior de edificações o sonômetro deve ser posicionado a 1,2 metros do solo e a pelo menos 2 metros das demais superfícies refletoras. O tempo de medição deve ser escolhido de forma a permitir a caracterização do ruído (ABNT NBR 10.151:2020).

## 2.10 Considerações Finais

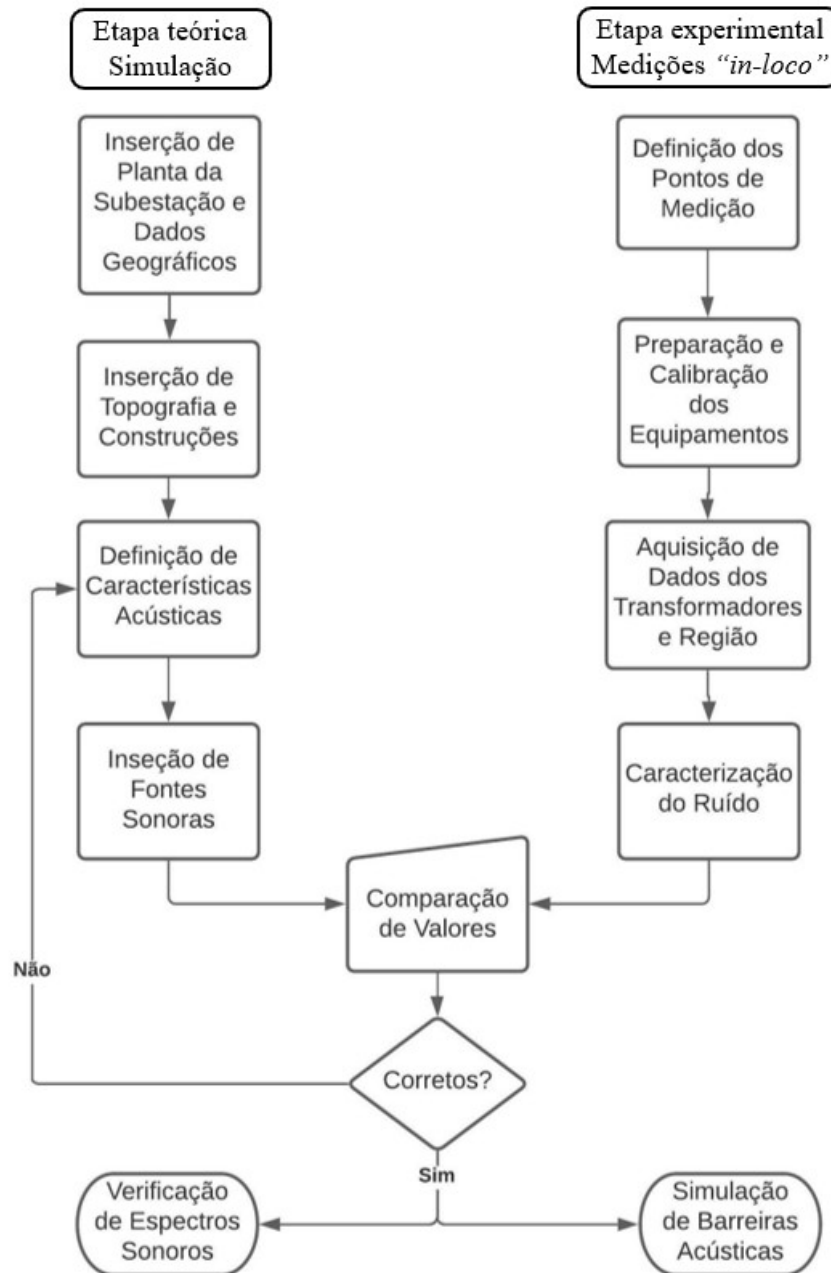
Durante presente capítulo foram apresentados dados, estudos e referencias bibliográficas que serviram como base para o estudo realizado a cerca das simulações apresentadas a seguir. O som e a percepção sonora foram apresentados de forma a apresentar sua influência nas pessoas. Propagação do som ao ar livre mostrou fatores que foram considerados durante as simulações de forma a aproxima-las da realidade, bem como características relacionadas a barreiras acústicas. Além de itens referentes às fontes de emissão de ruído de subestações, o *software* utilizado para as simulações e a norma seguida para realização dos ensaios.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item será abordada a metodologia de simulação acústica, aquisição e tratamento de dados relacionados ao ruído presente em subestações de energia elétrica. Com isso buscou-se realizar os objetivos do trabalho.

Para isso partiu-se da elaboração básica da simulação da subestação e seu entorno no *software* CadnaA, seguindo a apostila elaborada pelo autor deste estudo, apresentada no Apêndice A. Paralelo à simulação, foram feitos ensaios de medição acústica seguindo a norma ABNT NBR 10151 para aquisição dos espectros sonoros dos transformadores, em cada uma de suas faces, e do ruído na área da subestação. Com isso podendo utilizar os espectros sonoros junto à simulação, como dado de entrada, na parte de fontes sonoras e utilizando os valores medidos na região para validação do modelo. A Figura 11 apresenta um fluxograma dos passos realizados na etapa inicial, partindo de uma etapa teórica, a simulação, e outra experimental, os ensaios na subestação. Tal fluxograma tem saída para duas direções de estudo, uma delas verificando qual espectro sonoro mais se assemelha ao medido, se o do estudo de Diniz & Zannin, (2004), ou o gerado pelo próprio *software* CadnaA. A outra direção de estudo está relacionada à simulação de barreiras de diferentes geometrias e configurações para a atenuação do ruído na região da subestação de energia elétrica.

Figura 11 – Fluxograma das etapas iniciais do estudo.



Fonte: O Autor (2022).

### 3.1 Pontos de Medição

Os pontos onde foram feitas as medições “*in-loco*” foram georreferenciados a partir de um GPS acoplado ao sonômetro utilizado para tais medições. O software CadnaA possui referenciamento via coordenadas UTM obtidas a partir da importação de mapas, possibilitando inserção de receptores no mesmo local das medições “*in-loco*” com grande precisão, a fim de

garantir uma correta comparação. Os pontos onde foram feitas medições e respectiva numeração podem ser visualizados na Figura 12, retirada da simulação. Nestes pontos estão inseridos os receptores do *software*, os quais indicam numericamente o nível de pressão sonora no ponto, de forma a possibilitar a comparação direta com o nível de pressão sonora medida. Tais pontos foram definidos com base em regiões internas à subestação que sofrem menor influência de construções e equipamentos e também do ambiente externo a simulação. As demais áreas onde foram avaliados os níveis de pressão sonora foram feitas através de um mapa de cores com legenda, gerado pelo próprio software, que será apresentado na etapa de simulação de barreiras acústicas.

Figura 12 - Posição das medições *in loco* e pontos medidos na simulação com sua respectiva numeração.



Fonte: O Autor (2022).

### 3.2 Caracterização do Ruído de Transformadores e da Subestação

Para que seja possível replicar o espectro sonoro dos transformadores de energia elétrica no *software CadnaA*, será utilizado um sonômetro em conjunto com a norma ABNT NBR 10151, sendo realizadas medições em todas as faces dos transformadores a fim de que sejam obtidos os espectros referentes a cada uma das faces. O mesmo ocorre nos pontos de medição

da região da subestação, nesse caso para aquisição do nível de pressão sonora para futura comparação com os valores simulados.

### 3.2.1 *Medições In Loco*

Realizaram-se medições através de um sonômetro Dec-7000 da marca Instrutherm. Esse possui filtro de banda de  $\frac{1}{3}$  de oitava, classe 1. O sonômetro foi posicionado a 1,5m do solo com a utilização de um tripé, como indica a norma ABNT NBR 10151 e foi utilizado a uma distância mínima de 2 metros de qualquer parede, sendo essa a distância para o transformador, ou para outros obstáculos, além do uso de protetor de vento no microfone. Foi utilizado um tempo de medição de 02 minutos para cada uma das medições que coletaram o espectro sonoro dos transformadores e realizadas duas medições, de forma que o espectro foi gerado pela média de tais medições.

Para as medições referentes aos valores na região da subestação foi realizada uma coleta de dados para cada um dos nove pontos indicados na Figura 12, tendo essa sido realizada da mesma forma que a coleta referente ao espectro, com a variação apenas do tempo de coleta, que nesse caso foi de 05 minutos.

Para calibrar o sonômetro, foi utilizado um calibrador acústico CAL-5000 também da marca Instrutherm. O mesmo é utilizado para garantir a precisão das medições que são feitas através do sonômetro. Tanto o sonômetro quanto o calibrador acústico CAL-5000 possuem certificado de calibração como exigido pela norma.

Inicialmente foram feitas medidas de LAFmax (Nível de pressão sonora máxima em ponderação A e integração rápida) e LAeq (Nível de pressão sonora contínua equivalente na ponderação A), próximas aos transformadores para saber se estes apresentavam som impulsivo. Após isto, foi feita a medição de espectro sonoro com o filtro de  $\frac{1}{3}$  de banda de oitava para analisar se os transformadores apresentavam ruído tonal.

A norma ABNT NBR 10151 indica que adaptações devem ser feitas caso o som produzido pela fonte sonora tenha um comportamento impulsivo ou tonal, sendo que, para ser impulsivo, a subtração de LAeq,T de LAFmax deve ser maior ou igual a 6 dB, e para som tonal se dá quando o nível de pressão sonora contínuo equivalente na banda de  $\frac{1}{3}$  de oitava de interesse exceder os níveis de pressão sonora contínuo equivalente nas bandas de  $\frac{1}{3}$  de oitava adjacentes, sendo que, de 25 Hz a 125 Hz, a diferença deve ser maior ou igual a 15 dB, de 160



Hz a 400 Hz, a diferença deve ser maior ou igual a 8 dB, e, por fim, de 500Hz a 10000 Hz, a diferença for maior ou igual a 5 dB, conforme o Quadro 1.

Quadro 1 – Caracterização do som tonal

Banda de 1/3 de oitava de interesse	Diferença aritmética entre o $L_{Z_{eq,T,fHz(1/3)}}$ da banda de interesse e o $L_{Z_{eq,T,fHz(1/3)}}$ de cada banda adjacente
25 Hz a 125 Hz	$\geq 15$ dB
160 Hz a 400 Hz	$\geq 8$ dB
500 Hz a 10 000 Hz	$\geq 5$ dB

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 10151, (2019).

Após as medições, foi visto que os transformadores não apresentaram som impulsivo, porém foi visto que 4 dos 6 transformadores apresentaram som tonal. Por este motivo, foram adicionados 5 dB ao nível de pressão sonora medidos na região da subestação, conforme a norma indica.

### 3.3 Definição do Nível de Pressão Sonora Através do *Software*

Para possibilitar uma simulação correta e fiel à realidade, as configurações de terreno e posição geográfica utilizadas para criação do modelo foram referenciadas a partir da importação de mapas via GoogleMaps, OpenStreetMap e arquivo topográfico cedido pela CEEE-GT (Companhia Estadual de Geração e Transmissão de Energia Elétrica). Também foi inserida a planta da subestação para um posicionamento correto dos transformadores e das edificações presentes ao redor da mesma.

Com auxílio dos desenhos técnicos dos transformadores foi possível obter suas dimensões e características estruturais. A partir disso foram criadas as fontes sonoras padrão, nas quais serão inseridos os espectros sonoros, tanto para validação da simulação como para a parte de estudo do espectro apresentado na Figura 8 como o gerado pelo CadnaA a partir dos dados de potência e características do transformador.

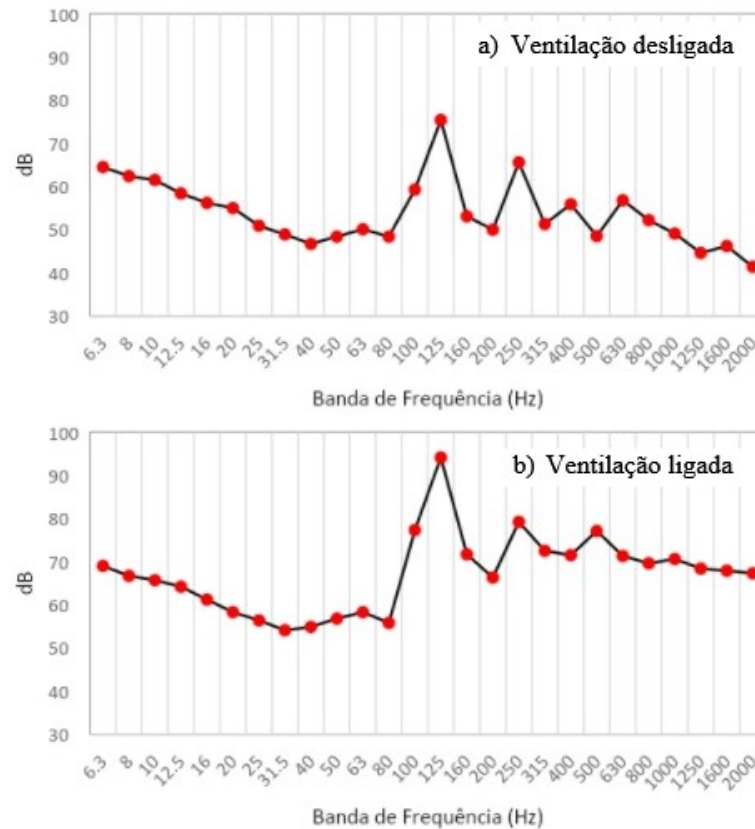
### 3.4 Fontes Sonoras no CadnaA

As fontes sonoras inseridas na simulação são correspondentes aos seis transformadores presentes na subestação. Esses têm capacidade nominal variando entre 12,5 MVA e 83 MVA, sendo que eles apresentam níveis de tensão compreendidos entre 13,8 kV e 230 kV.

Relativo à simulação, cada transformador é representado por cinco áreas emissoras de ruído, sendo quatro destas verticais, representando suas laterais e uma delas referente a área superior de cada um.

A forma de obtenção dos espectros sonoros inseridos a estas áreas para a validação da simulação, quando comparada aos valores de nível de pressão sonora medidos na subestação, foram indicados na Seção 3.2.1, para esse caso, cada área de emissão de ruído tem um espectro diferente, já que cada uma das 4 áreas verticais apresentam pequenas variações do espectro sonoro entre si, já a área superior dos transformadores, por ser de difícil acesso, teve o espectro inserido como a média das 4 áreas verticais. Durante as medições acústicas foi realizada a medição das condições meteorológicas por meio de uma estação meteorológica, dessa forma possibilitando a inserção de tais dados junto a simulação. A Figura 13 apresenta dois exemplos de espectro sonoros medidos conforme a Seção 3.2.1, sendo um deles de um transformador com ventilação desligada e outro com ventilação ligada, sendo possível observar essa variação pelo aumento do nível de pressão sonora nas frequências acima de 300 Hz.

Figura 13 – Exemplos de espectros sonoro coletados nas medições “*in-loco*”



Fonte: O Autor (2019).

Para a opção que utiliza o gráfico apresentado na Figura 8, todas as áreas de emissão de som apresentam o mesmo espectro, utilizando os valores presentes no gráfico citado para cada uma das frequências de  $\frac{1}{3}$  de banda. Para o caso onde utiliza-se o próprio espectro gerado pelo *software*, cada transformador terá valores de nível sonoro diferentes, variando conforme sua capacidade nominal. Dessa forma, obtém-se uma simulação onde cada uma das áreas de emissão possui um espectro próprio, uma com todos os espectros iguais, e por fim uma com um tipo de espectro para cada transformador.

### 3.5 Simulação de Barreiras Acústicas

Para vislumbrar a possível redução do ruído foram simuladas 4 configurações diferentes, cada qual contendo suas respectivas barreiras acústicas, comparando-as com a situação atual presente na subestação, a qual possui apenas as três barreiras apresentadas na Figura 12, tendo a barreira indicada por B3, 3,8 metros e as barreiras B1 e B2 8,2 metros de altura. Tais barreiras

foram mantidas durante todas as simulações. A síntese de todas as configurações criadas, C2, C3, C4 e C5, mais a situação atual, C1A, é apresentada no Quadro 2. A Figura 15 apresentada a seguir apresenta graficamente as barreiras simuladas e seus posicionamentos.

A primeira configuração definida, C2, possui 2 metros de comprimento a mais do que a lateral do transformador, ou seja, em uma lateral de 6 metros de comprimento a barreira terá 8 metros, 1 metro a mais para cada lado e altura de 6 metros. Na segunda, C3, optou-se por enclausurar totalmente as laterais dos transformadores, definindo a altura como sendo também de 6 metros. Ainda, cabe salientar, que tais barreiras foram posicionadas a uma distância de 3 m de cada lateral dos transformadores, buscando assim, evitar possíveis aquecimentos quando estes encontram-se em operação.

Para a terceira configuração testada, C4, definiu-se barreiras com uma altura superior às anteriores, de 9 metros, as quais foram posicionadas no local onde estão os muros da subestação, ou seja, em seu perímetro. Por último testou-se uma configuração utilizando barreiras no perímetro conjuntamente com outras próximas aos transformadores, C5, conforme Quadro 2.

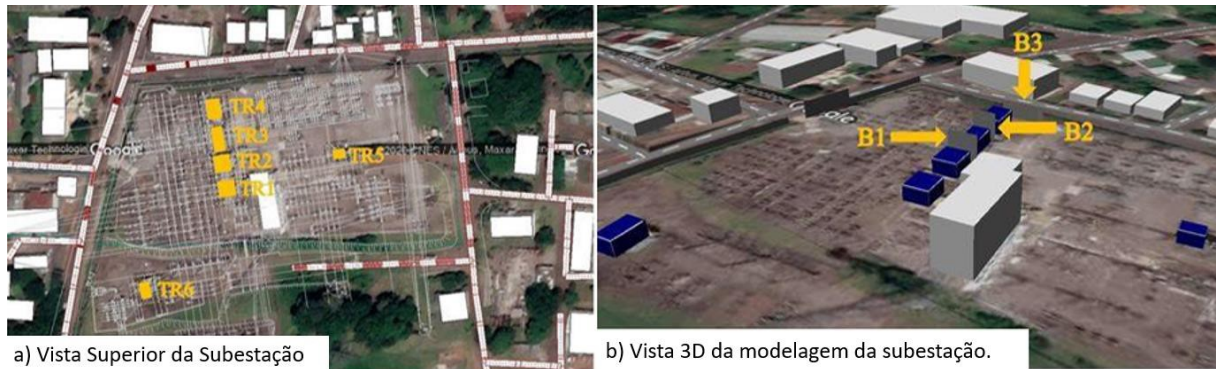
Quadro 2 - Resumo das estratégias definidas e simuladas

Configuração	Geometria de topo	Enclausura os TRs		Posicionamento	Dimensões	
		sim	Não		Altura	Comprimento
C1A			X	B1 - entre TR2 e TR3 B2 - entre TR3 e TR4 B3 - entre TR4 e Perímetro (Figuras 14 e 20)	B1 - 8,2 m B2 - 8,2 m B3 - 4 m	B1 - 7,5 m B2 - 7,5 m B3 - 18 m
C2	X		X	Junto aos TRs (Figuras 15 e 21)	6 m	CTR + 2 m LTR + 2 m
C3	X	X		Junto aos TRs (Figuras 15 e 22)	6 m	-
C4	X		X	Perímetro da Subestação (Figuras 15 e 23)	9 m	310 m
C5	X	X		Junto aos TRs (Figuras 15 e 24) Perímetro da Subestação (Figuras 15 e 24)	6 m  9 m	-  310 m

Fonte: O Autor (2022).

Testou-se todas as configurações criadas adicionando geometrias de topo junto às barreiras no formato de “T”. Definiu-se o comprimento das abas como sendo 1,5 metros. Áreas de cálculo vertical foram criadas para possibilitar a visualização das variações geradas por cada um dos diferentes arranjos. No Quadro 2, o indicativo TR refere-se a transformadores, LTR refere-se à largura do transformador, CTR refere-se ao comprimento do transformador.

Figura 14 – Vistas, superior e 3D, da simulação da subestação indicando transformadores e barreiras.

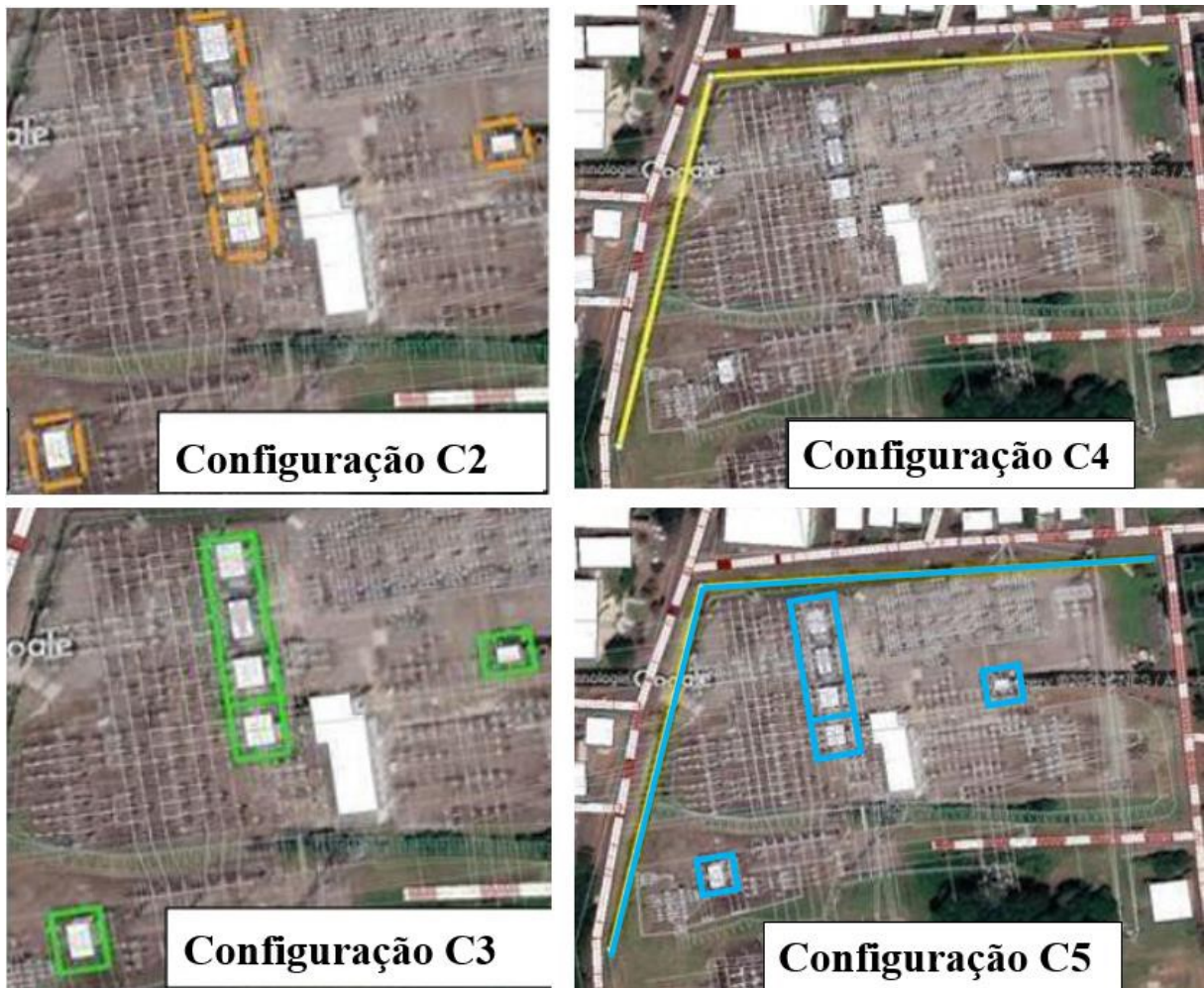


Fonte: O Autor (2022).

A Figura 14 (a) apresenta a vista superior da subestação, modelada no Software CadnaA, além dos transformadores, indicados por TR1 a TR6. Na figura 14 (b) apresenta-se uma imagem 3D da área modelada, bem como as barreiras já presentes (B1, B2 e B3) para redução do nível de pressão sonora. Pode-se observar os mapas e a planta da subestação, juntamente com as construções existentes na região adjacente. As construções presentes são representadas em branco, as ruas são apresentadas em branco com traços vermelhos na Figura 14 (a) e em cinza com tracejado branco na Figura 14 (b).

Na Figura 15 estão indicados os posicionamentos das barreiras, em laranja as barreiras laterais, para a configuração C2, em verde as utilizadas para enclausurar os transformadores, conforme definido para C3, em amarelo, o posicionamento da barreira no perímetro da subestação, configuração C4, e por fim, em azul o posicionamento das barreiras para configuração C5, enclausurando os transformadores e também no perímetro da subestação, conforme apresentado no Quadro 2.

Figura 15 - Posição das barreiras simuladas em cada configuração.



Fonte: O Autor (2022).

Entre os transformadores TR2, TR3 e TR4, posicionados mais próximos das bordas superiores das imagens, nenhuma nova barreira foi inserida, pois a subestação já contempla 2 barreiras de 8,20 metros de altura entre elas.

Por fim foi gerado um total de onze simulações distintas, sendo elas: 01 referente a situação atual da subestação, 02 referentes aos espectros inseridos no *software*, um por ferramenta do próprio CadnaA e outro da literatura apresentado na Seção 2.6, 04 simulações das configurações de barreiras, de C2 a C5, sem geometria de topo e 04 simulações das configurações de barreiras, de C2 a C5, com geometria de topo.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Essa seção foi desenvolvida em três partes, inicialmente apresenta-se a etapa de validação da simulação acústica, na qual serão indicados os valores encontrados nas medições “*in-loco*” e os valores adquiridos através da simulação, de modo a demonstrar a validação da simulação para então utiliza-la como base para os estudos indicados durante a pesquisa. Com a etapa de validação concluída, foi apresentado o estudo referente aos diferentes espectros sonoros e suas possíveis utilizações em diferentes cenários. Por fim foi desenvolvido o estudo referente às barreiras para mitigação do ruído emitido pela subestação e suas respectivas faixas de redução e possibilidades de uso.

### 4.1 Validação da Simulação Acústica

A partir das medições realizadas como indicado na Seção 3.2.1. foram obtidos os valores de LAeq apresentados na Figura 16. É possível observar que o maior valor medido se encontra no ponto 2, indicando 75,9 dB e o menor valor de 56,4 dB no ponto 9. Os pontos de medição estão indicados por P1 à P9.

Figura 16 - Valores medidos em cada um dos pontos durante ensaio “*in-loco*” na subestação em dB.



Fonte: O Autor (2022).

Os valores apresentados na Figura 16 já são acrescidos de 5 dB, como indicado anteriormente devido à presença de som tonal em 4 dos 6 transformadores. Tais valores servirão como base para verificação da simulação do cenário atual.

#### 4.1.1 Valores Simulados Utilizando Espectro Sonoro Real

Após a realização da simulação no CadnaA utilizando como dados os espectros que foram medidos junto a cada uma das faces dos transformadores, obteve-se os valores apresentados na Figura 17. Pode-se observar ainda que assim como apresentado na Figura 16, os pontos de maior e menor valor foram os mesmos, pontos 2 e 9, sendo 73,6 dB e 57,4 dB respectivamente. Assim como nas medições “*in-loco*” foram acrescidos 5 dB referentes à presença de som tonal e os valores apresentados foram calculados utilizando filtro de banda A, assim como a medição.

Figura 17 - Valores simulados com espectro obtido por medições “*in-loco*” e acréscimo referente a som tonal em dB.



Fonte: O Autor (2022).



A Tabela 1 apresenta as variações de nível de pressão sonora tendo como base os valores obtidos nas medições “*in-loco*”, com isso possibilitando verificar o quão próximos são os valores obtidos pela simulação.

Tabela 1 - Variação de nível de pressão sonora em relação ao valor medido.

Ponto de Medição	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Medições “ <i>in-loco</i> ” (dBA)	66,7	75,9	57,2	65,8	62,7	60	57,1	58,7	56,4
Simulação Espectro Real (dBA)	67	73,6	61,2	67,4	64,2	57,8	59,3	60,6	57,4
Variação Espectro Real (dBA)	+0,30	-2,30	+4,00	+1,60	+1,50	-2,20	+2,20	+1,90	+1,00
Variação em Porcentagem (%)	0,4	3,1	6,5	2,4	2,3	3,8	3,7	3,1	1,7

Fonte: O Autor (2022).

Ao analisar-se os valores simulados com espectro real, após terem sido realizadas os ajustes de parâmetros apresentados durante toda a Seção 2.3, como reflexões do solo e construções, dados meteorológicos como, vento, umidade relativa, temperatura e realizados ajustes de cálculos do *software*, pertinentes à reflexão das barreiras existentes na subestação, observa-se pequenas variações comparadas às medições, variando na faixa de 0,4% à 6,5% como apresentado na Tabela 1. Portanto a verificação e validação da simulação estão nos limites de +/- 4 dB(A), estando tais valores de acordo com o estudo de Giunta (2013), o qual buscou verificar a aplicabilidade do modelo francês NMPB Routes-2008 para uma cidade brasileira e utilizou a faixa de valores de +/- 4 dB(A) para o estudo, seguindo indicadores da Agencia Portuguesa do Ambiente e da *European Burden of Disease Network*.

Isso significa que a simulação acústica da subestação está correta e coerente, portanto, pode ser utilizada como meio de estudo para diferentes modos de inserção de sinal, além da simulação de mitigação do nível de pressão sonora pela inserção de barreiras acústicas. Tal simulação é de grande importância para a realização deste estudo, devido ao fato da mesma ser a base para todas as simulações que foram realizadas, garantindo assim valores coerentes com a realidade.

## 4.2 Simulação Acústica com Diferentes Tipos de Espectros Sonoros

Nesta subseção foram apresentados os dados do estudo da simulação utilizando dois diferentes espectros sonoros, sendo o primeiro retirado do gráfico da Figura 8, e o segundo foi adquirido a partir da programação do próprio *software* CadnaA, onde indica-se que a fonte emissora de ruído é um transformador, indicando também sua potência aparente, dessa forma o *software* cria automaticamente um espectro sonoro.

O intuito dessa etapa é verificar se é possível utilizar algum destes espectros para uma simulação sem que seja necessária a execução de medições na subestação, ou ainda, verificar a influência destes em uma região antes mesmo da construção da subestação de energia, dessa forma sendo possível modificar o projeto para que a inserção da subestação em tal área não gere problemas relacionados ao tema.

Durante a simulação realizada com valores de espectro sonoro obtidos a partir do gráfico apresentado na Figura 8 para todos os transformadores, foram obtidos os valores de LAeq presentes na Figura 18. Assim como em ambas as situações anteriormente apresentadas os valores de máximo e mínimo valor sonoro foram encontrados nos pontos 2 e 9, sendo 67,9 dB para máximo e 58,1 dB para o mínimo.

Figura 18 - Valores simulados com espectro sonoro da literatura em cada ponto de medição, valores em dB.



Fonte: O Autor (2022).

No *software* CadnaA, é possível adicionar dados de potência nos transformadores (MVA) e através disso o software calcula aproximadamente o nível de pressão sonora gerado por cada transformador. Esta ferramenta possibilita criar um espectro sonoro sem a necessidade de medição prévia e ainda possibilita obtenção de diferentes níveis de ruído conforme a potência dos transformadores varia. A Figura 19 apresenta os valores de nível de pressão sonora obtidos dessa forma.

Figura 19 - Valores simulados com espectro sonoro obtido através do *software* CadnaA, valores em dB.



Fonte: O Autor (2022).

Para facilitar a comparação entre os valores de ambas as situações simuladas e ainda compará-las com a simulação base que utiliza valores de espectro reais, foi elaborada a Tabela 2, na qual é possível verificar a alteração no nível de pressão sonora que cada um dos dois diferentes espectros analisados causaram, dessa forma facilitando a avaliação de uso de cada um destes.

Tabela 2 – Diferença dos valores simulados com diferentes espectros em relação ao espectro real.

<b>Ponto de Medição</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Simulação Espectro Real (dBA)</b>	67	73,6	61,2	67,4	64,2	57,8	59,3	60,6	57,4
<b>Simulação Espectro da Literatura (dBA)</b>	61,4	67,9	60,6	61,6	65,2	58,5	61	58,4	58,1
<b>Variação Espectro da Literatura (dBA)</b>	-5,6	-5,7	-0,6	-5,8	1	0,7	1,7	-2,2	0,7
<b>Variação em Porcentagem (%)</b>	8,4	7,7	1,0	8,6	1,6	1,2	2,9	3,6	1,2
<b>Simulação Ferramenta do Software (dBA)</b>	74,7	82,1	68,5	74,6	73,1	66,3	68,3	69,3	65,7
<b>Variação Ferramenta do Software (dBA)</b>	7,7	8,5	7,3	7,2	8,9	8,5	9	8,7	8,3
<b>Variação em Porcentagem (%)</b>	10,3	10,4	10,7	9,7	12,2	12,8	13,2	12,6	12,6

Fonte: O Autor (2022).

A simulação utilizando o espectro gerado pelo estudo apresentado na Seção 2.6, sobre transformadores de potência, obteve valores próximos aos reais, tendo esta, gerado valores inferiores a - 4 dB(A), valor esse que foi utilizado como limite de validação das simulações, em 3 pontos, sendo em P1 -5,6, P2 -5,7 e P4 -5,8 dB(A) abaixo do real. Tendo variações na faixa de 1% à 8,6%, possivelmente geradas pela proximidade dos pontos de medição aos transformadores e variações em relação à ventilação forçada destes, a qual não pôde ser desligada durante as medições “*in-loco*” afim de evitar impactos aos transformadores, configurando dessa forma frequências maiores, algo que não foi contabilizado no estudo do espectro apresentado na Figura 8. Como frequências mais altas têm uma propagação menor, as regiões próximas aos transformadores têm uma maior interferência destas, diferente de pontos de medição mais afastados e por isso esse espectro apresentou valores menores do que os simulados com espectro real em pontos próximos aos transformadores.

Essa configuração de espectro é uma possibilidade para simulação de futuras subestações ainda antes da definição dos transformadores que serão utilizados, durante a fase de projeto, já que dessa forma o espectro será aproximado da realidade. Com isso é possível avaliar as regiões que serão mais afetadas acusticamente pela subestação.

Porém não é aconselhado seu uso como valor de referência real, já que a diferença apresentada para o espectro real é considerável e pode gerar uma avaliação errônea e distante da realidade.

Por fim, a simulação realizada utilizando a ferramenta do *software*, a qual gera um espectro ao ser inserido o objeto emissor e suas características, nesse caso, transformador de potência e seu respectivo MVA, gerou valores muito superiores aos simulados com espectro real. Com variações de +7,20 até +9,00 dB(A) acima dos valores da simulação base, esta configuração apresentou uma média de aproximadamente 8 dB(A) acima dos valores simulados com o espectro real em uma faixa variando de 9,7% à 13,2%.

Tal descaracterização dos valores faz com que a simulação com o espectro do CadnaA possua valores pouco confiáveis, já que esta pode fazer com que o executor de um futuro estudo encontre valores irrealistas. Dessa forma não é aconselhado seu uso sem que seja feita uma verificação a cerca da forma como o *software* gera o espectro.

### 4.3 Simulação de Barreiras Acústicas

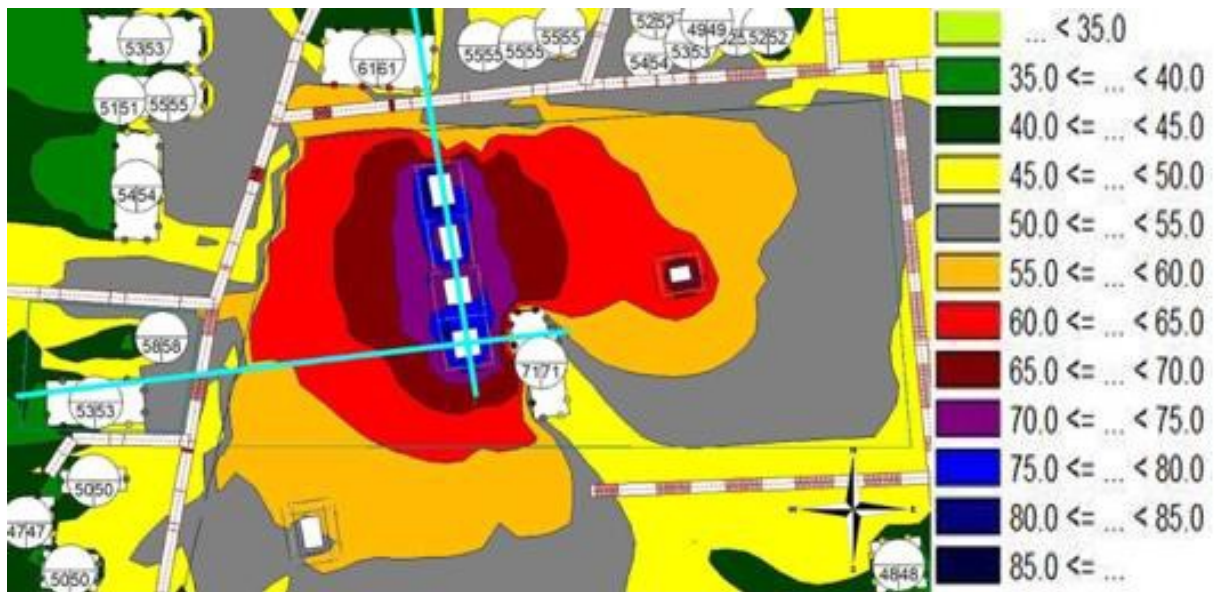
Nesta seção foram desenvolvidos dados referentes ao estudo da simulação de barreiras acústicas, os quais se tornaram um artigo publicado na revista *RESEARCH, SOCIETY AND DEVELOPMENT*, intitulado, “Comparative evaluation of different barrier configurations for electricity substation noise reduction by acoustic simulation” o qual está apresentado na íntegra no Apêndice B (SILVA et al, 2021).

Como demonstrado na seção de materiais e métodos, foram criadas nomenclaturas de modo a representar cada uma das variantes de barreiras simuladas assim como a variante da situação atual, mesma apresentada na seção 4.1.1. A partir dessa simulação e com base em comparações diretas e numéricas, pretende-se verificar a eficiência das configurações criadas, analisando possíveis variações nos mapas de ruído. Isso permitirá concluir sobre os benefícios obtidos com o uso de barreiras, bem como a influência de suas geometrias de topo e outros critérios já definidos.

A distribuição do nível de pressão sonora atual em toda a área da subestação, bem como o nível de som nas casas próximas, é indicada na Figura 20 como mapa de cores. Tal mapa de cores mostra níveis sonoros variando de 35 dB, em regiões mais distantes da subestação, a mais de 85 dB, próximo aos transformadores TR4 e TR1.

Ao examinar os níveis máximos de ruído, definidos pela Lei Municipal onde se encontra a subestação, pode-se observar que alguns locais adjacentes à subestação são impactados com uma incidência de pressão sonora acima do permitido, sendo o limite estabelecido por lei de 55 dB(A). Assim, espera-se que com as configurações propostas, que são apresentadas em sequência, seja possível definir uma alternativa viável para mitigar o ruído em níveis aceitos, que atendam à regulamentação em vigor.

Figura 20 – Mapa de distribuição do ruído na subestação para a configuração C1A, apresentando valores incidentes nas residências em dB.



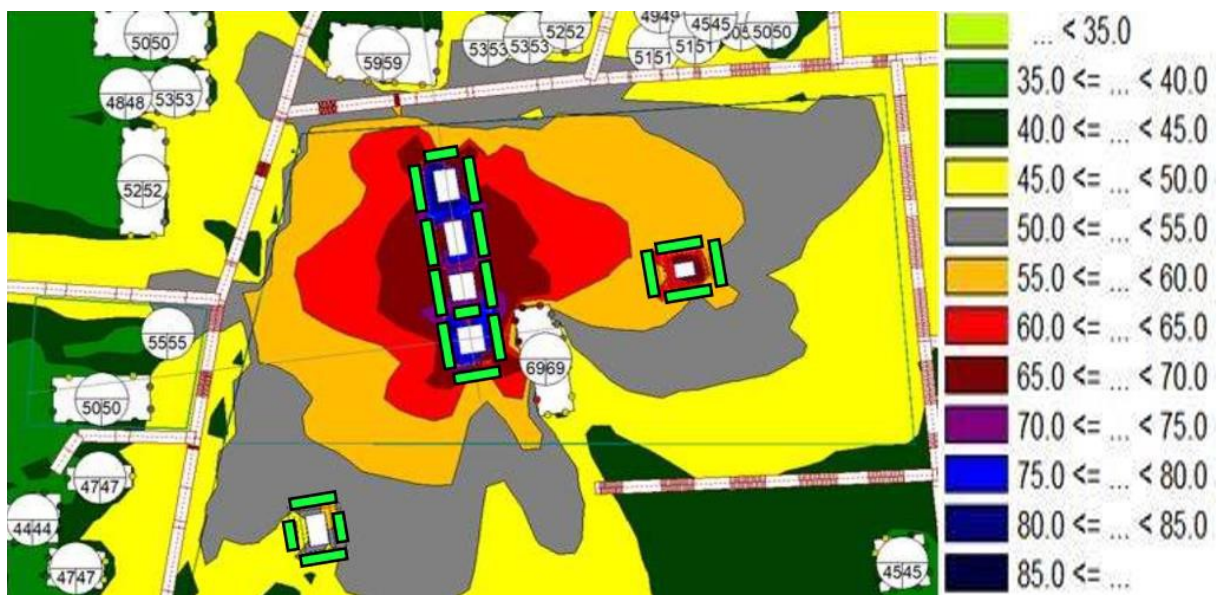
Fonte: O Autor (2022).

A Figura 20 mostra duas linhas azuis cruzando os transformadores e o prédio de controle, localizado no centro da subestação, que indicam a posição das áreas verticais de cálculo, que serão apresentadas posteriormente. Ainda na Figura 20 é possível verificar que as ondas sonoras se dispersam de forma radial, sendo levemente contidas pelas barreiras e paredes existentes que circundam a subestação. Os valores de pressão sonora incidentes nas residências próximas podem ser visualizados pela numeração indicada dentro dos círculos brancos que são posicionados sobre o local onde situam-se as residências vizinhas a subestação.

A seguir estão as variações causadas pelas barreiras dispostas nos quatro lados dos transformadores, configuração chamada de C2. Essas barreiras são 2 metros maiores do que as dimensões dos lados do transformador, reduzindo assim a difração do som. A vista superior da simulação é mostrada a seguir na Figura 21, indicando o nível de pressão sonora nas residências após a inserção das barreiras. Ao comparar os resultados obtidos com as configurações C2 e C1A, nota-se uma redução de aproximadamente 3% na simulação com C2.

Na Figura 21 é visível a influência das barreiras na forma de dispersão do som, causando uma grande redução nas regiões após as barreiras, que correspondem às cores vermelha e laranja. Nas regiões onde não houve interferência o som dispersou-se de forma muito semelhante à dispersão ocorrida na configuração C1A, gerando um baixo nível de atenuação de ruído. Ainda na Figura 21 é possível verificar o posicionamento das barreiras pelas linhas na cor verde.

Figura 21 - Mapa de distribuição do ruído na subestação para a configuração C2, apresentando valores incidentes nas residências em dB.



Fonte: O Autor (2022).

A configuração C3, apresentada a seguir, contempla barreiras que envolvem as laterais do transformador, tendo 6 metros de altura e sendo posicionadas a 3 metros delas, da mesma forma que em C2. O mapa de ruído horizontal gerado pela configuração C3 é mostrado na Figura 22, juntamente com o nível de ruído nas residências próximas à subestação e a posição das barreiras em verde. Quando os valores de C1A e C3 são comparados, verifica-se uma

redução de cerca de 13% no nível de pressão sonora. Devido à característica de enclausuramento da configuração adotada, a onda sonora é dispersa com níveis mais baixos do que as demais configurações, dessa forma se propaga com menos energia, dentro e ao redor da subestação.

Figura 22 - Mapa de distribuição do ruído na subestação para a configuração C3, apresentando valores incidentes nas residências em dB.



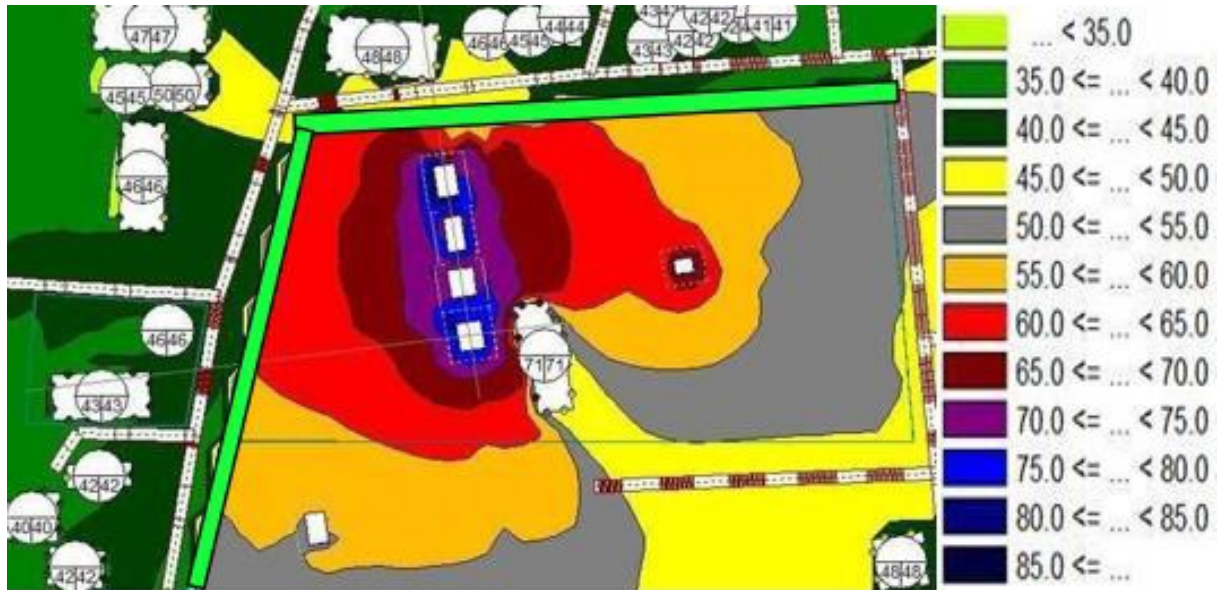
Fonte: O Autor (2022).

A seguir está a simulação com barreiras no perímetro da subestação, configuração denominada C4, com 9 metros de altura. A vista superior da subestação com o nível de som das residências próximas e a posição das barreiras em verde é mostrada na Figura 23. Esta forma de barreira tem uma construção mais cara devido ao tamanho e posição das barreiras, mas tem a vantagem da distância dos transformadores, não prejudicando o resfriamento e os cuidados com sua fiação. Esse formato de barreira pode ter a desvantagem de regulamentos municipais relacionados ao meio ambiente e questões urbanas.

Os valores do nível de ruído incidente nas moradias, a partir da simulação da configuração C4, são até 21% inferiores aos apresentados para C1A, sendo esta redução gerada em parte pela zona de sombra das barreiras, que se estende sobre as habitações adjacentes à subestação, permitindo assim a atenuação do ruído, essa zona de sombra pode ser melhor vista nas tabelas a seguir, as quais apresentam os mapas de cores verticais.



Figura 23 - Mapa de distribuição do ruído na subestação para a configuração C4, apresentando valores incidentes nas residências em dB.



Fonte: O Autor (2022).

Por fim, foi realizada uma simulação combinando as variantes denominadas C3 e C4, esta configuração apresenta barreiras que envolvem os lados do transformador, bem como barreiras no perímetro da subestação, as barreiras estão destacadas na cor verde. Tal configuração é indicada como C5.

A Figura 24 mostra a vista superior da subestação, indicando no esquema de cores a distribuição e intensidade do nível de pressão sonora, bem como o nível de incidência nas residências vizinhas. Comparando com a simulação da situação atual da subestação, C1A, verifica-se uma redução de ruído de até 29%. Em comparação com as configurações C3 e C4, que dão origem a C5, nota-se uma redução de 4 a 6 dB.

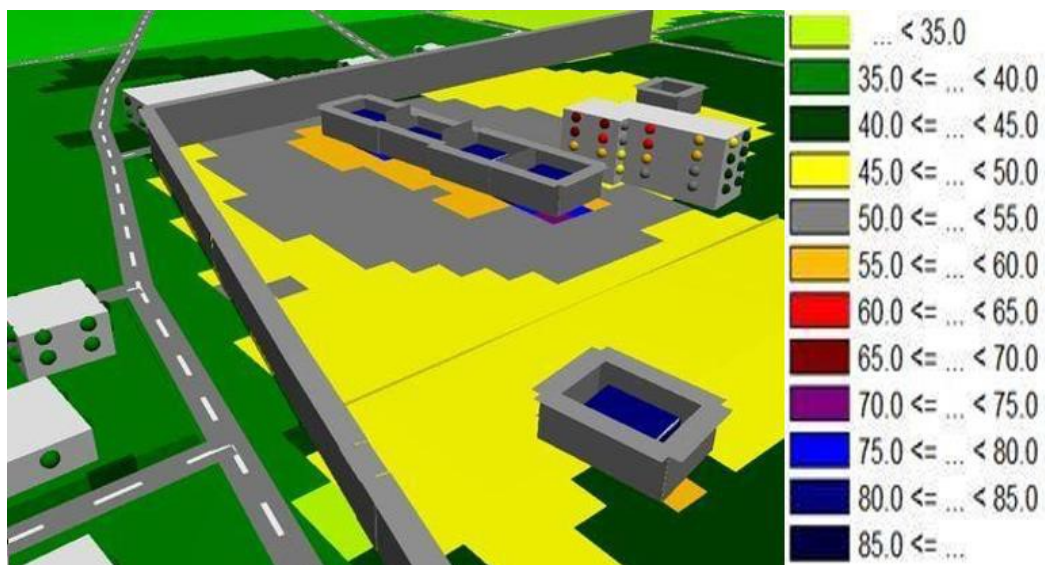
Figura 24 - Mapa de distribuição do ruído na subestação para a configuração C5, apresentando valores incidentes nas residências em dB.



Fonte: O Autor (2022).

A fim de melhorar a compreensão da configuração do C5, uma vista 3D da mesma é mostrada na Figura 25. As superfícies cinzas próximas aos transformadores e também próximas às ruas são as barreiras vistas em 3 dimensões, as quais reduzem o ruído já próximo aos transformadores reduzindo para aproximadamente 55 dB logo após as barreiras, como pode ser observado pelas cores.

Figura 25 - Vista 3D da configuração do C5 apresentando mapa da distribuição de ruído.



Fonte: O Autor (2022).

A seguir é apresentado o Quadro 3, que ilustra mapas de cores representando o nível de pressão sonora variando em relação a altitude, gerados a partir de simulação numérica. As imagens foram obtidas aplicando-se um corte em relação a uma seção dos transformadores, indicada por uma linha azul ao lado da Figura 20. Os transformadores estão instalados próximos ao prédio de comando da subestação. As seções verticais foram definidas para facilitar a análise, com altura padrão de 20 metros.

Esse quadro foi montado para garantir a possibilidade de analisar visualmente as variações dos níveis de pressão sonora de forma direta, já detalhadas no Quadro 2. Além dessas, foram simuladas as configurações C2, C3 e C4, sem o uso de geometrias de topo.

A área de cálculo utilizada para gerar os resultados do Quadro 3 foi posicionada nos transformadores centrais, TR1 a TR4, estendendo-se para uma das residências vizinhas à subestação, ilustrada à esquerda da figura (bloco branco, canto esquerdo inferior). Para facilitar a compreensão do corte vertical, o observador deve orientar-se pela rosa dos ventos presente no canto inferior direito da figura, posicionando-se à esquerda e visualizando a subestação no sentido leste, conforme Figura 20. Esta seção de corte aplica-se a todas as configurações, de forma a garantir um padrão para a área estudada. Analisando a dispersão dos mapas sonoros verticais, pode-se perceber que a propagação se dá de forma radial.

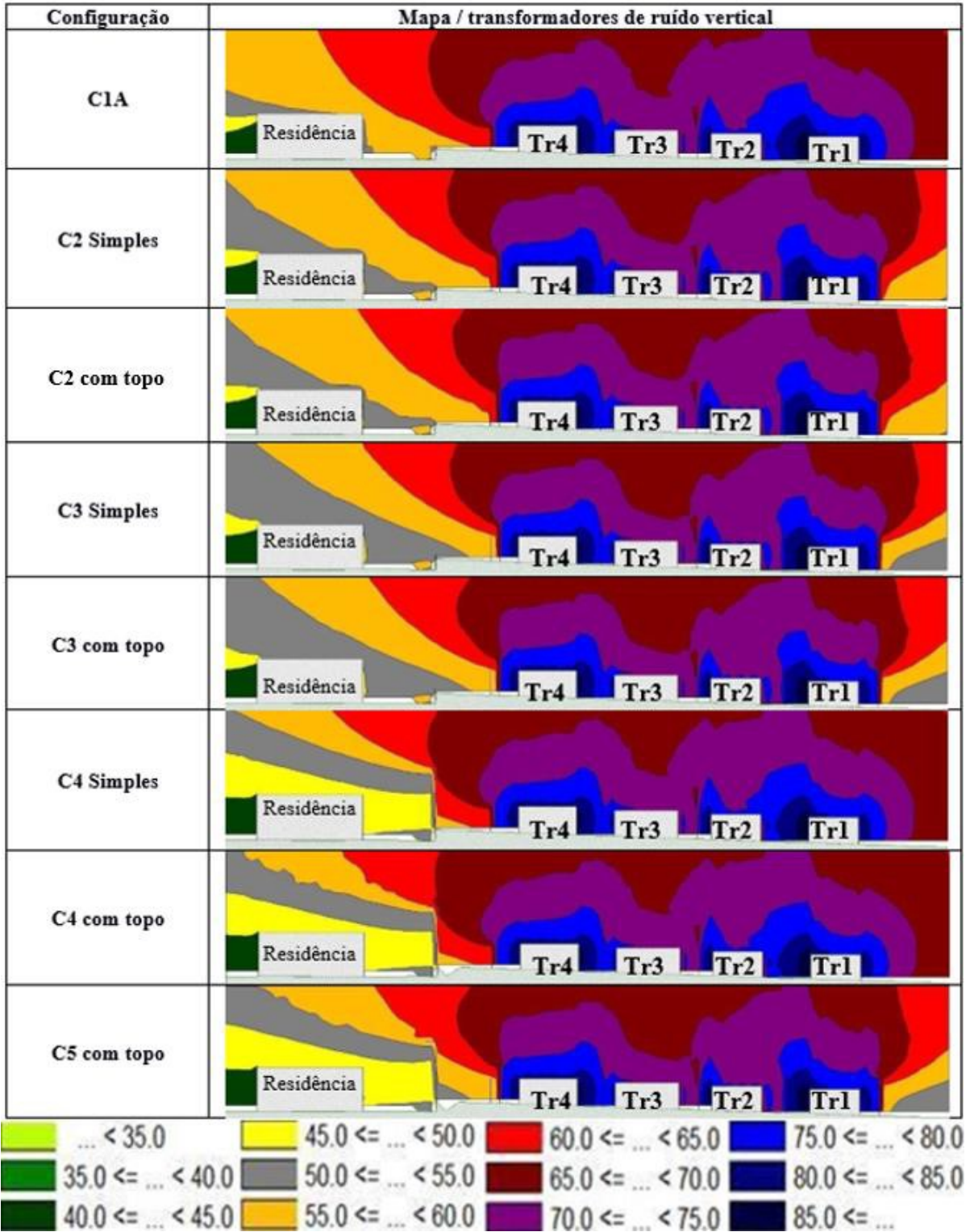
As configurações descritas como C2, C3, C4 e C5 trazem consigo, na simulação numérica, uma variante denominada topo, na qual uma aba em forma de T é adicionada ao topo da barreira. Para as variantes C2, C3 e C4, mais uma possibilidade é incorporada à análise, não inserindo as abas no topo da barreira. Ao comparar as configurações criadas com o modelo padrão (C1A), a atenuação de ruído é perceptível nas bordas esquerda e direita de todas as imagens contidas no Quadro 3. Em alguns casos, há alternância entre as áreas marrons e cinzas, que possuem faixas de som de 65 a 70 dB e 50 a 55 dB respectivamente.

Outra característica importante encontrada está ligada às geometrias de topo, que tendem a reduzir o raio da onda sonora na direção horizontal de propagação e aumentar o nível de pressão sonora na direção vertical. Essa característica torna-se importante em regiões onde existem edifícios adjacentes ao local analisado.

As configurações C4 e C5 apresentaram os melhores resultados na simulação, como pode ser verificado através de suas respectivas imagens. Observa-se que a inclusão de barreiras, envolvendo os transformadores e contornando boa parte do perímetro da subestação, proporciona uma atenuação que garante níveis sonoros próximos à residência que variam de 35

a 55 dB(A), alternando entre as áreas verde, amarela e cinza, de acordo com os dados da legenda de cores.

Quadro 3 - Mapas de distribuição do ruído verticalmente nos transformadores centrais da subestação, valores em dB.



Fonte: Autor (2022).

O Quadro 4 resume os resultados das áreas de cálculo vertical que cruzam o transformador TR1 e o edifício de comando, indicado por E.D. (mais à direita), conforme indicado por uma das linhas azuis na Figura 20, mais à esquerda, de todas as imagens vinculadas ao quadro, uma das residências próximas à subestação pode ser visualizada. Para facilitar a compreensão deste corte, o observador deve ser guiado pelo transformador TR6, que está localizado mais ao sul da subestação, visualizando-o no sentido norte, conforme mostrado na Figura 20.

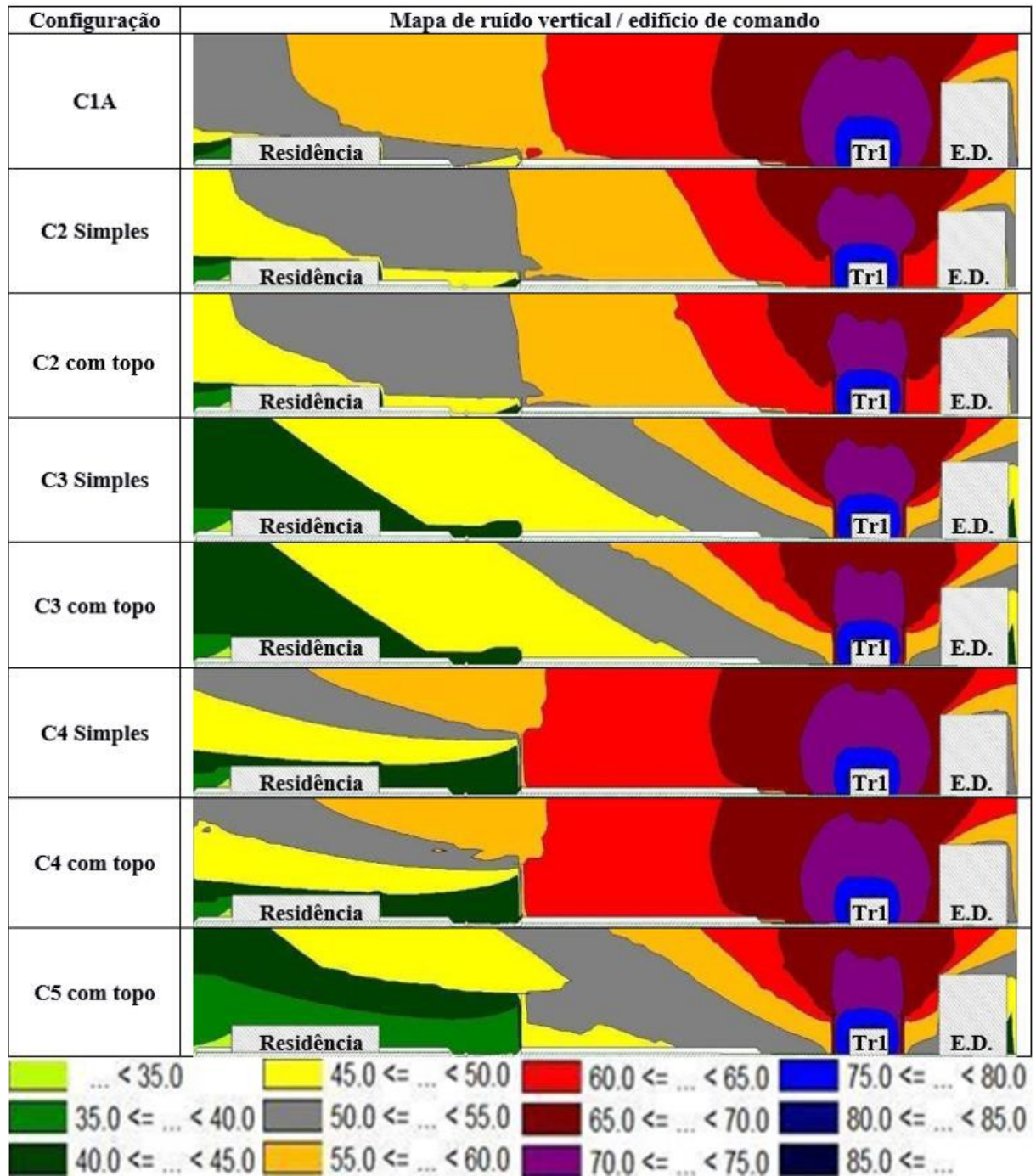
Todas as configurações indicadas no Quadro 2 foram simuladas, adicionando-se a elas as configurações C2, C3 e C4, sem a utilização da geometria de topo. Visualmente, através dos mapas de cores, percebe-se, devido à dispersão radial das áreas coloridas, que os níveis de ruído são menores para todas as variações, quando comparados à configuração atual, C1A.

Ao analisar as configurações de C2 e C3, com topo e simples, nota-se uma alteração muito pequena em seus respectivos mapas de cores. A pouca influência das geometrias de topo, nesses casos, se deve às baixas frequências emitidas pelos transformadores, que facilita a difração da onda sonora, dificultando a mitigação do ruído. Além disso, pode-se observar que os menores níveis de ruído observados nas configurações C3, se comparados aos vinculados a C2, são decorrentes do enclausuramento dos transformadores.

As configurações C4 e C5 apresentam menores níveis de pressão sonora, próximo à residência, se comparadas às demais variações, C2 e C3. Isso se deve à maior altura da barreira posicionada no perímetro da subestação, corroborando o que foi indicado na Seção 2.5.1. Esta situação ocorre porque a difração, devido à barreira ser mais elevada, dificulta a chegada da onda sonora ao receptor (residência).

Utilizando o indicador 'Perda de Inserção', apresentado na seção 2.4, que descreve se o nível de som foi afetado pela inserção das barreiras, também é possível avaliar os mapas de ruído verticais indicados no Quadro 4. Assim, assume-se que os resultados mais significativos estão ligados às configurações C4 e C5, mesclando o enclausuramento dos transformadores e a barreira instalada no perímetro da subestação com altura de 9 m, mesmo sem observar mudanças significativas devido ao uso de geometrias de topo.

Quadro 4 - Mapas de distribuição do ruído verticalmente cruzando a subestação na direção leste-oeste, valores em dB



Na Tabela 3 os principais resultados obtidos nas simulações estão resumidos e vinculados às suas respectivas configurações. Critérios de maior relevância (CRAEB), relacionados a cada variação, também são destacados. Além disso, o nível máximo de pressão sonora fora do perímetro da subestação, encontrado em cada uma das simulações, e os valores da maior perda de inserção (IL), gerados por cada configuração, quando comparados aos

resultados relativos à situação atual, C1A, são apresentados. Deve-se notar que os pontos onde ocorrem as maiores reduções de ruído não são coincidentes para todas as variações.

As alternativas C3 e C4 apresentaram reduções de ruído semelhantes, porém, por motivos diferentes. Na variante C3, o enclausuramento dos transformadores mostrou-se mais eficaz para redução de ruído, pois evita a difração pelas laterais das barreiras, enquanto que para C4, a zona de sombra, gerada por uma barreira de maior altura, possibilitou tal redução.

Além disso, pode-se identificar que para as configurações C4 e C5, são obtidas as maiores diferenças entre os níveis de pressão sonora, quando comparados com a configuração atual, C1A.

Tabela 3 - Visão geral dos resultados para diferentes configurações

<b>Resumo dos resultados - Mapas horizontais</b>			
<b>Configuração</b>	<b>Nível máximo de pressão sonora (dB)</b>	<b>Maior perda de inserção (dB)</b>	<b>CRAEB *</b>
C1A	61	-	-
C2	59	4	Barreiras instaladas ao lado dos transformadores
C3	53	12	Enclausuramento total de transformadores
C4	50	13	Maior altura da barreira
C5	48	17	Envolvimento total dos transformadores aliado à maior altura da barreira

\* CRAEB - critério mais relevante para aumentar a eficiência da barreira.

Fonte: Autor (2022).

## 5 CONCLUSÃO

Com a realização do presente estudo buscou-se de duas formas melhorar o conforto acústico no entorno de subestações de energia elétrica. A primeira forma, simulação com espectro padrão encontrado na literatura, pode ser utilizada em um momento de projeto e pré-construção da subestação, de modo a evitar que a instalação dessa gere ruído acima do permitido, além de possibilitar a verificação de quais alterações do projeto podem evitar maiores impactos a região de forma rápida e sem custo. Com isso tanto a empresa responsável pela subestação como a população são beneficiadas, a empresa evitando problemas com legislação e custos para adequação a esta e a população mantendo sua qualidade de vida mesmo após o início da operação da subestação.

A segunda forma é melhor aplicada como correção, onde uma subestação já existente deve ser adequada a legislação, dessa forma simulou-se barreiras de diferentes formas e geometrias para que se verificasse sua influência e mitigação do ruído na região.

Utilizando-se da metodologia de medição de pressão sonora apresentada na ABNT NBR 10151 - Acústica - Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade (2019), foi possível obter o espectro sonoro dos transformadores de potência além de possibilitar o mapeamento de ruído da subestação, o qual foi utilizado para verificar e validar a simulação realizada.

Foram avaliadas algumas formas de inserção de espectros sonoros de diferentes configurações junto a subestação. Por fim, foram definidos dois espectros obtidos de forma simples e prática, diferentes do espectro medido.

Tendo a base das simulações concluída e validada, foram então alterados os espectros dos transformadores, sendo o primeiro o espectro apresentado na Seção 2.6, Figura 8, o qual apresentou valores em parte inferiores aos da simulação base, tendo chegado à até -5,8 dB, entretanto a média ficou aproximadamente 2 dB abaixo. Dentre os fatores que podem ter contribuído para tal variação estão as diferenciações dos transformadores, como marca, modelo, tempo de uso e sua potência aparente entre os transformadores presentes na subestação simulada e os utilizados para elaboração do espectro, além da utilização da ventilação forçada para resfriamento dos mesmos, a qual não foi contabilizada no espectro apresentado da Figura 8, isso devido ao fato desta não ser uma constante.



Desse modo indica-se utilizar tal configuração apenas durante a etapa de projeto de uma subestação, tendo em vista que os valores simulados no espectro da literatura, por mais que apresentem valores próximos aos reais, possuem uma variação significativa, não podendo serem utilizados como verdadeiros para casos onde a simulação deve ser precisa. Dessa forma ainda que não se tenha certeza de que equipamentos estarão presentes na futura subestação pode-se simular de forma a ter uma perspectiva próxima da real.

Para a simulação utilizando o *software* como fornecedor do espectro, foram inseridas as características dos transformadores um a um, de modo que cada um deles possui um espectro referente à sua potência aparente. Para esse caso os valores simulados ficaram consideravelmente acima da simulação com espectro real, isso pode ser ocasionado pela diferença na base de dados que foram inseridas na programação do *software*. Existindo ainda a possibilidade da opção utilizada junto ao CadnaA, estar baseada em transformadores de outras características de operação, como transformadores utilizados na geração ou distribuição, o que não é o caso dos transformadores estudados para a presente simulação, fazendo com que o espectro ficasse “distorcido”. As variações ficaram em uma faixa de 7,2 a 9,0 dB(A) acima dos simulados inicialmente, tendo uma média de +8 dB(A). A grande diferença de valores encontrados impossibilita o uso dessa ferramenta, portanto não é aconselhado seu uso para o proposto objetivo.

A partir de simulações, detalhadas ao longo do estudo, conclui-se que existe a possibilidade de obter ganhos reais de eficiência, atenuando o ruído hoje existente, quando diferentes tipos de barreiras são instalados em pontos estratégicos da subestação.

Foram destacadas configurações onde as barreiras foram posicionadas no perímetro da subestação, com uma altura maior que as demais testadas, além daquelas que utilizam a ideia de enclausuramento total dos transformadores.

A utilização, em algumas variantes, de geometrias de topo não gerou os resultados anteriormente vislumbrados, devido às características do ruído emitido pelas fontes sonoras presentes na subestação. Outra conclusão a respeito de tais geometrias está associada às suas dimensões, que geram um aumento na eficiência à medida que a largura do topo se aproxima da altura da barreira, como fica evidenciado pela perda por inserção apresentada na Figura 7, onde a variação entre as opções “e” e “f” foi superior a 50% quando a largura do topo tem a mesma dimensão da altura da barreira. Nesta pesquisa, tal possibilidade seria inviabilizada devido à interferência entre o topo da barreira e a fiação do transformador.

Nos casos em que são necessárias menos reduções de ruído, é aconselhável utilizar as quatro barreiras laterais dos transformadores, vinculadas à configuração C2. Isso porque, além da menor quantidade de material a ser utilizado em sua construção, haverá menor influência nas trocas de calor, evitando o aquecimento do transformador.

Na situação em que os transformadores estão enclausurados, C3, a redução foi mais acentuada, mitigando em média 9 dB, podendo chegar a 12 dB em algumas residências próximas à subestação. Tal configuração pode ser utilizada em situações em que seja necessária uma grande redução do ruído, porém em alguns casos será necessário repensar a forma de resfriamento dos transformadores, tendo em vista a perda de eficiência devido ao aquecimento.

Procurando uma solução que corrija todos os inconvenientes destacados acima, é indicada a configuração com barreiras mais altas, C4, posicionadas no perímetro da subestação, reduzindo assim o nível de ruído nas residências próximas sem afetar as trocas térmicas dos transformadores. Essa configuração gerou resultados semelhantes aos associados ao enclausuramento dos transformadores, com redução média de 9 dB, podendo chegar a 13 dB em alguns pontos. Nesse caso, o obstáculo seria a grande quantidade de material necessário para construir a barreira, o que também poderia infringir algumas regulamentações municipais.

A última configuração simulada combinou o enclausuramento dos transformadores e barreiras instaladas no perímetro da subestação, gerando uma grande redução do nível de ruído, em torno de 14 dB com valores chegando a 17 dB em algumas residências.

Por fim, observa-se que o uso de barreiras acústicas pode ser uma solução viável para diversas situações, sejam ocasionais ou não. No entanto, é necessária uma análise prévia, não só no que se refere à questão da redução do ruído, mas também nos custos, cumprimento das normas em vigor, segurança operacional, entre outros.

Ainda é indicado para estudos futuros avaliar o caso com maior especificidade, para a implantação de barreiras com o melhor custo benefício, verificando também a possibilidade de utilização de barreiras de diferentes materiais e propriedades acústicas.

## REFERÊNCIAS

ABNT NBR 10151, de 31 de março de 2020. Acústica - Medição e avaliação de níveis de pressão sonora em áreas habitadas – Aplicação de uso geral. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Antônio, J. (2012). “Acústica Ambiental”, apontamentos teóricos da disciplina de Acústica Ambiental do Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, Departamento de engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Associação Portuguesa do Ambiente (APA), (2004), “Ruído e a cidade”, Instituto do Ambiente.

Assunção, A. A., & Abreu, M. N. S., & Souza, P. S. N. (2019). Prevalência de exposição a ruído ocupacional em trabalhadores brasileiros: resultados da Pesquisa Nacional de Saúde. *Cad. Saúde Pública*, 35(10).

Attenborough, K. (2002) “Sound Propagations close to the ground”, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol.34, pages 51-82.

Bies, D. A., & Hansen, C. H. (2003), *Engineering Noise Control: Theory and Practice*. London, England: Spon Press.

BISTAFA, S. R. Acústica aplicada ao controle de ruído. Blucher, 2a ed. São Paulo, 2011.

Bruel & Kjaer, Vibration Measurement A/S, Ruído Ambiental, 2001.

Daigle, G. (1999) “Technical assessment of the effectiveness of noise walls –Final Report”. *Noise/News International*, I-INCE Publication 99-1, pages 137-161.

Daigle, G. (2010), “Effectiveness of noise barriers”. *Internoise 2010, noise and sustainability*, 13 –16 June, Lisbon.

DATAKUSTIK. Disponível em: <<http://www.datakustik.com/en/applications/>>. Acesso em: jul. 2021.

de Castro, A. C. L., & Fontes, K. D. de S. A., & Ferreira, T. E. D., & Gontijo, H. M. (2019). Addressing the impact of environmental noise in public schools in the city of Minas Gerais. *Research, Society and Development*, 8(3), e1683716. doi: 10.33448/rsd-v8i3.716

Diniz, F.B., Zannin P.H.T. “Noise impact caused by electrical energy substations in the city of Curitiba, Brazil”. *Science of the Total Environment* 328, 2004, pages 23–31.

FHWA (2014): <https://www.fhwa.dot.gov/environment/noise/U.S.> Department of Transportation, Federal Highway Administration (página internet oficial), Washington, DC.

Freitas, E., Trabulo, L. (2007) “Desempenho de Barreiras Acústicas –dois métodos de avaliação”. Revista Engenharia Civil. No 29, pages 15-26. Parceria Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho e AENOR, autoestradas do Norte, S.A.

GERGES, S. N. Y. Ruído: fundamentos e controle. 1a. ed. Florianópolis, 1992.

Gonçalves, R. P. R. (2014), “Atenuação Sonora de Barreiras Acústicas”, Departamento do Engenharia Civil, Universidade de Coimbra.

GUARALDO, Newton J., MONTEIRO, Carlos L., GRIMONI, José A. B., KIATAKE, Luís G. G., SAIDEL, Marco A. e BISTAFA, Sylvio R., 1997. Avaliação do Ruído de Transformadores no Entorno de SE's – Aplicativo e Simulação. Publicação científica, XIV SNPTEE – XIV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Belém, Brasil, 7 p.

GIUNTA, M. B., ANÁLISE DE MODELAGEM DE PREVISÃO ACÚSTICA E MAPEAMENTO SONORO PARA A CIDADE DE SÃO CARLOS - SP. Dissertação de mestrado UFSCar, São Carlos, 2013.

Hendriks R., Rymer B., Buehler D., Andrews J. (2013), “Technical Noise Supplement to the Caltrans Traffic Noise Analysis Protocol-A Guide for the Measuring, Modeling, and Abating Highway Operation and Construction Noise Impacts “. Departamento de transportes de California.

Larsson, C. (1997), “Atmospheric absorption conditions for horizontal sound propagation”, Applied Acoustics, Vol. 50, No 3, pages 231-245.

Lei Nº 4763, de 18 de janeiro de 2011. Critérios sobre os valores máximos de ruído e outras providências. Recuperado de: <https://leismunicipais.com.br/a/rs/p/ passo-fundo/lei-ordinaria/2011/476/4763/lei-ordinaria-n-4763-2011-modifica-a-redacao-da-lei- n-2427-de-27-de-abril-de-1988-e-da-outras-providencias>

Leissing, T. (2007). “Nonlinear outdoor sound propagation”. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiente da Universidade tecnológica de Chalmers, Goteborg, Suécia.

METZEN, H. A. Introduction to CadnaA. DataKustik. Greifenberg, Alemanha, 2009.

MSPC (2018). Curvas audibilidade Disponível em <<https://www.mspc.eng.br/dir70/somdb3.php>> Acesso em 01/abr/2020.

Resolução Nº. 02/2015. Regulamenta o volume e a frequência dos sons procuram por fontes fixas e dá outras providências. Recuperado de: <http://www.pmpf.rs.gov.br/servicos/geral/multimedia/propostaDeResolucaoCMMA.pdf>

Rodrigues, V. F., “Mapeamento de Emissão Acústica em Subestações Elétricas”. Belo Horizonte, 1998. Dissertação, Universidade Federal de Minas Gerais.

Rosa, E. S., Mamede, G. L., Pelogi, H. R. T., Teodoro, J. F. (2006) “Estudo do Ruído Gerado por Transformadores em Subestações”. Revista Ciências do Ambiente On-Line Fevereiro, 2006 Volume 2, páginas 31 – 37.

SANCHO, V. M; SENCHERMES, A. G., Curso de Acústica em Arquitetura. Colégio Oficial de Arquitetos de Madrid, Madrid, 1982.

SILVA, M. da .; SETTI, A.; LANGARO, D. D. .; ISRAEL, C. L.; ZANELLA, G. C. .; LIMA, D. W. de C.; TARRAGO, R. A.; PALUDO, L. H. Comparative evaluation of different barrier configurations for electricity substation noise reduction by acoustic simulation. Research, Society and Development, [S. l.], v. 10, n. 6, p. e8710615339, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i6.15339. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/15339>. Acesso em: 28 jun. 2021.

Tadeu A., António, J., Castro, I. (2012) “Sound pressure attenuation provided by a 3D rigid acoustic barrier on a building façade: the influence of its longitudinal shape”. Boundary Elements and Other Mesh Reduction Methods XXXIV, 25-27, Split, Croatia.

Wakefield Acoustics Ltd., (2012),” City of Vancouver Noise Control Manual”, Vancouver.

Watts, G. (2002), “Barriers designed to reduce road traffic noise”, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Transport 153, Paper 12680, Issue 2, pages 79-86.

WHO - World Health Organization. (2011). Burden disease from environmental noise qualification of healthy life years lost in Europe. *Quantifying environmental health impacts*. Retrieved from

[https://www.who.int/quantifying\\_ehimpacts/publications/e94888/en/#:~:text=Environmental%20burden%20of%20disease%20from%20noise%20in%20Europe%20%2D%20WHO%20EURO&text=The%20health%20impacts%20of%20environmental,the%20western%20part%20of%20Europe](https://www.who.int/quantifying_ehimpacts/publications/e94888/en/#:~:text=Environmental%20burden%20of%20disease%20from%20noise%20in%20Europe%20%2D%20WHO%20EURO&text=The%20health%20impacts%20of%20environmental,the%20western%20part%20of%20Europe)

**APÊNDICE A**

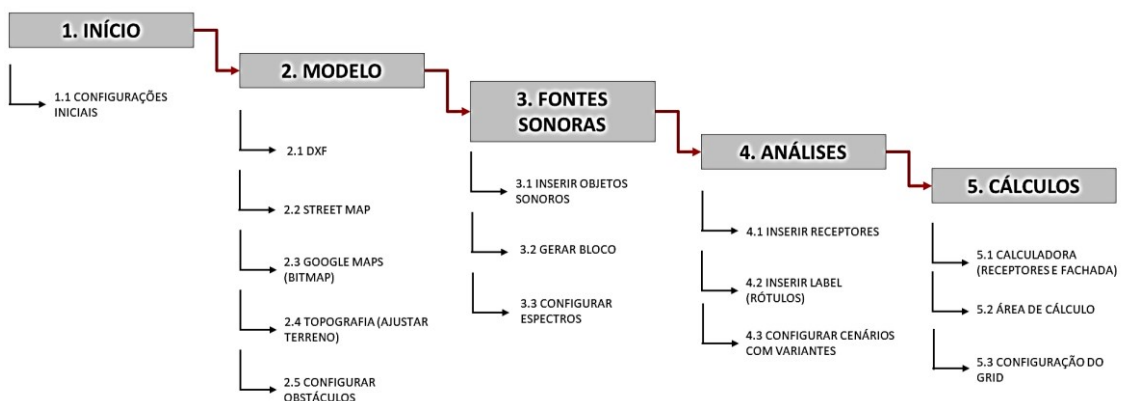
Apostila Orientativa para Utilização do *Software* CadnaA



# APOSTILA ORIENTATIVA PARA UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE CadnaA

O material a seguir busca auxiliar na manipulação do software CadnaA, o qual pode ser utilizado para caracterizar a pressão sonora oriunda de uma subestação de energia elétrica, e a partir disso facilitar a busca por possíveis soluções para mitigação de ruído, além de tornar mais assertivas possíveis tomadas de decisão associadas ao tema.

O fluxograma apresentado abaixo demonstra a sequência básica a ser seguida para realização de uma análise utilizando o software. Os passos devem ser realizados de forma cronológica, evitando que informações sejam negligenciadas ao longo da criação do modelo virtual, e garantindo assim que os resultados se aproximem ao máximo do cenário real a ser replicado.



## 1. DICAS E INFORMAÇÕES PRELIMINARES

Em boa parte dos casos onde são feitas importações e variações de configuração, o atalho CTRL+Z não funciona corretamente, sendo assim, recomenda-se fortemente salvar a cada passo todo arquivo que esteja sendo criado, para que, caso ocorra qualquer erro, seja possível reabri-lo, conservando o trabalho já realizado.

Há possibilidade de existirem diferenças entre licenças do programa, sendo assim, algumas opções podem ou não estar disponíveis para a versão utilizada. A grande maioria das opções que se alternam entre as licenças não influenciam na simulação de uma subestação. Os valores utilizados seguem normas, e em alguns casos a experiência e visão do profissional que criou a simulação.

Antes de executar qualquer ação que segue, leia todo o parágrafo relacionado a mesma, e visualize as imagens. Desse modo evita-se qualquer avanço precipitado ou perda de informação devido a omissão de algum dos passos indicados no fluxograma

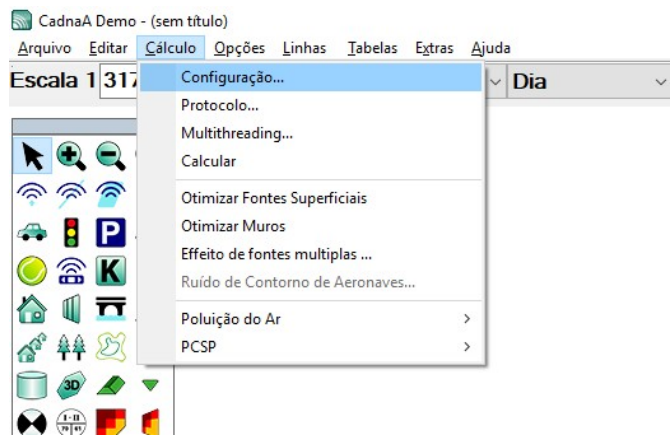


acima. As imagens possuem marcações em vermelho e/ou sombreados na cor azul, apontando com isso, o local onde deve-se clicar para acionar alguma ferramenta ou configuração.

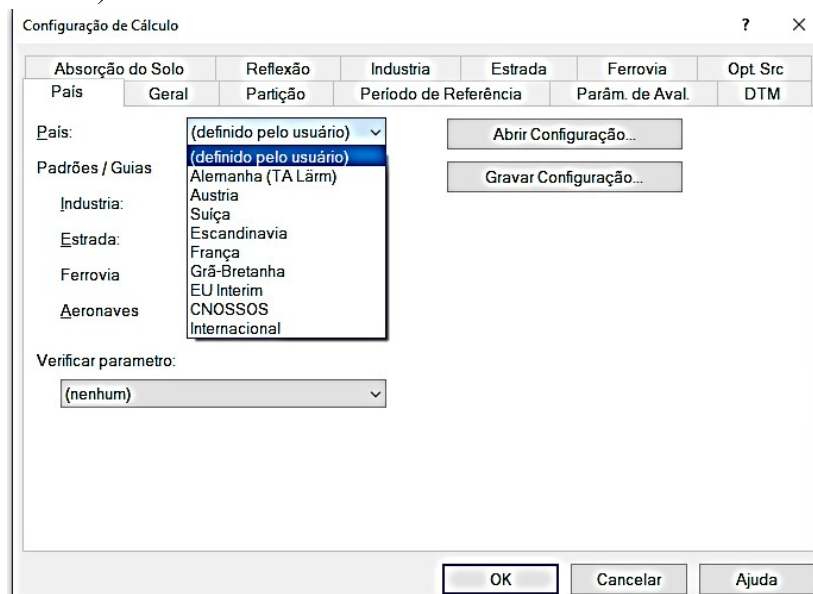
## 2. INÍCIO

Antes da abertura do programa inserir a chave de registro em uma porta USB do computador. Com o programa aberto inicia-se à configuração das normas e padrões de medição.

No 'Menu', clicar na aba 'Cálculo' e posteriormente na ferramenta 'Configuração'.



Com a janela 'Configuração de Cálculo' aberta, clicar na opção País e selecionar '(definido pelo usuário)'.



Em 'Padrões / Guias' definir as normas que atendem à legislação brasileira, como indicado na imagem a seguir.





#### Configuração de Cálculo

Absorção do Solo		Reflexão		Indu
Pais	Geral	Partição	Perio	
Pais:	(definido pelo usuário) v			
Padrões / Guias				
Industria:	ISO 9613 v			
Estrada:	RLS-90 v			
Ferrovia	SRM II v			
Aeronaves	ICAN v			
Verificar parametro:				
(nenhum) v				

Na mesma janela, na opção ‘Período de Referência’ deve-se alterar a duração dos períodos Diurno e Noturno, sendo o primeiro sinalizado pela letra “D” e compreendendo o intervalo de horários entre 7 e 22 horas, salvo situações onde legislações estadual ou municipal indiquem a existência de algum período Vespertino, o qual seria configurado a partir da letra “E” (*Evening*). O período Noturno deve ser informado pela letra “N”, como mostrado na imagem abaixo. As penalidades podem ser definidas como zero.

Absorção do Solo		Reflexão		Industria	Estrada	Ferrovia	Opt Src																
Pais	Geral	Partição	Período de Referência	Parâm. de Aval.	DTM																		
Repartição das Horas - Períodos Dia, Início de Noite, Noite:																							
00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
N	N	N	N	N	N	N	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	N	N
Penalidade Diurna (dB)		0.0		<input type="checkbox"/> Penalidade de Per. Recreacional apen:																			
Penalidade de Início de Noite (dB):		0								(ohne Nutzung) KU Kurbgebiet WR reines Wohngebiet WA alle Wohngebiet MI Mischgebiet GE Gewerbegebiet													
Penalidade Noturna (dB):		0																					
OK		Cancelar		Ajuda																			

Após tal ajuste, verificar na opção ‘Parâmetro de Avaliação’ se estão presentes apenas as variáveis que representam os períodos definidos em ‘Período de Referência’. Os descritores Ld e Ln fazem referência aos níveis de pressão sonora para os períodos diurno e noturno, respectivamente, e não tem relação com descritores presentes nas normas ABNT NBR 10151 e 10152.



Tipo	Nome	Unidade	Fórmula
1: Ld	<input checked="" type="checkbox"/> Dia	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>
2: Ln	<input checked="" type="checkbox"/> Noite	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>
3: -	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>
4: -	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>

Sem utilização de período Vespertino

Com utilização do período Vespertino

Em ‘Absorção do Solo’ é possível alterar o valor padrão de absorção, variando-o de 0 a 1, sendo 0 completamente reflexivo e 1 completamente absortivo. Esse valor depende da região em que cada subestação está instalada, ou seja, se a mesma estiver envolta por áreas pavimentadas, o valor tenderá à zero, caso contrário, existindo considerável vegetação, se aproximará de 1. O parâmetro deve ser definido empiricamente pelo calculista.

Absorção Padrão do Solo G:

Utilizar mapa de absorção do solo:

Resolução (m):

Estradas/Estacionamentos são refletoras (G==0)

Edificações são refletoras (G==0)

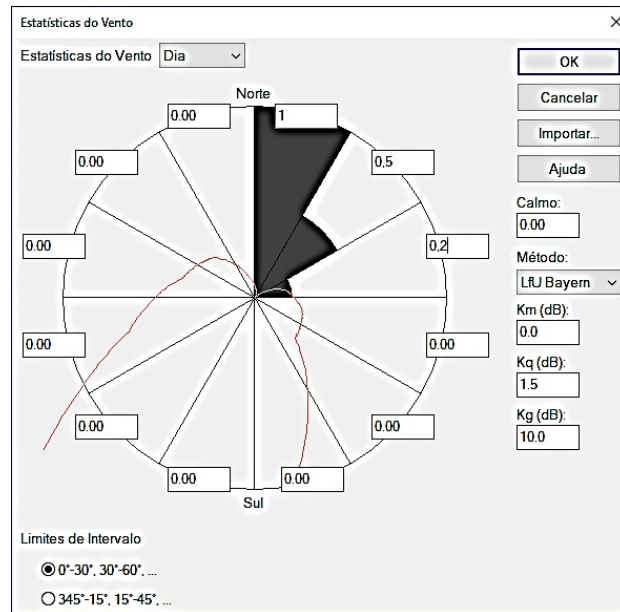
Estradas de Ferro são absorventes (G==1)

Ajusta-se a partir da opção ‘Reflexão’ a quantidade de reflexões aceitas no momento do cálculo realizado pelo software, sendo que, quanto mais reflexões, maior será o tempo de processamento. Para o caso de subestações pode-se definir o valor como 1, pois, normalmente não existem edificações próximas. Caso seja verificada a existência de edificações no entorno do local avaliado, pode-se aumentar o valor. Em linha gerais, tal informação indica quantas reflexões o receptor irá absorver, ou seja, quando o som se desloca a partir da fonte sonora, uma parte irá diretamente ao receptor e outra parte será refletido algumas vezes antes de chegar ao mesmo. Para casos onde existem poucas barreiras e construções, o som refletido não gera grandes variações no resultado, permitindo a utilização de valores de reflexão pequenos.

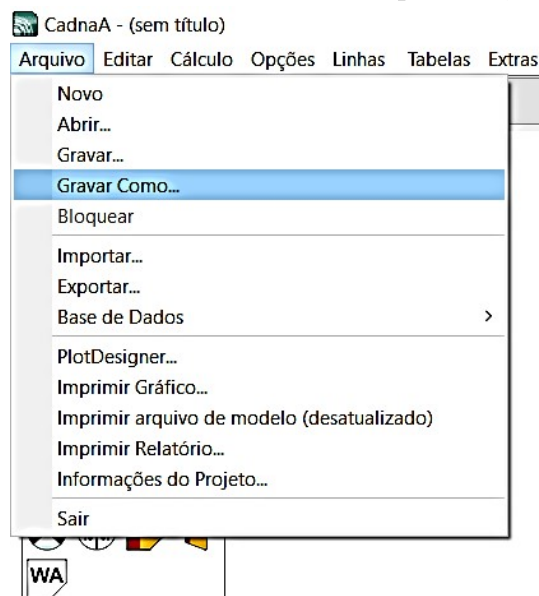


Ainda na janela ‘Configuração de Cálculo’, opção ‘Industria’, estão presentes os valores associados à condição meteorológica encontrada na região da subestação, onde é possível alterar temperatura, umidade e velocidade do vento. Para alteração da velocidade do vento basta selecionar a terceira opção mostrada na imagem abaixo e clicar no botão ‘Estatísticas do Vento’.

Ao clicar no botão ‘Estatísticas do Vento’ abre-se uma janela, na qual é possível inserir a velocidade do vento de forma vetorial, como apresentado pelas caixas de texto e desenho da rosa dos ventos. Feito isso clica-se duas vezes em ‘OK’, finalizando a etapa de configuração do modelo.



A partir desse momento inicia-se a modelagem da subestação propriamente dita. Portanto, deve-se salvar o arquivo (.cna), nomeando o Modelo Padrão da maneira que achar conveniente. Dessa forma, sempre que se iniciar um novo projeto, será possível utilizar a configuração já definida, restando somente salvar o novo arquivo com um outro nome desejado. Assim, clicar em ‘Arquivo’, na barra superior, e em ‘Gravar Como’, selecionando a pasta desejada e salvando o Modelo na sequência (‘Salvar’).



### 3. MODELO

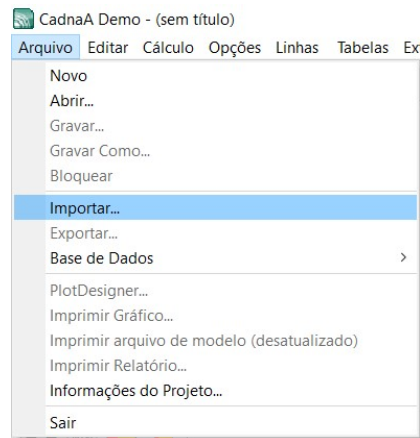
Durante o trabalho de modelagem são introduzidos no CadnaA arquivos oriundos de outras fontes, como OpenStreetMap, Google Maps, planta baixa da subestação e mapa de relevo do local.



### 3.1. DXF

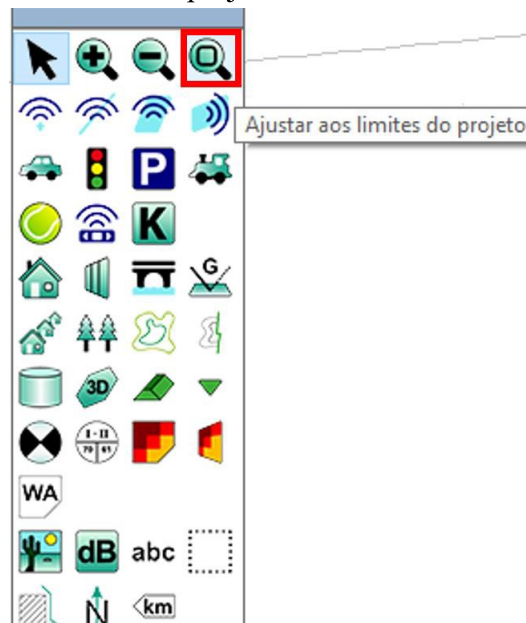
Nessa etapa configura-se o arquivo DXF, ou seja, a planta da subestação, para após introduzi-la no CadnaA. Caso você possua a planta em outro formato de arquivo, abra a mesma e salve-a como DXF ou utilize conversores para este formato. O arquivo DXF tem melhor compatibilidade como o software evitando problemas que surgiriam com outros tipos de extensão.

Abre-se um novo arquivo em branco no CadnaA e a partir da barra de ‘Menu’, clica-se em ‘Arquivo’. A partir disso, e utilizando a ferramenta ‘Importar’, localiza-se o arquivo contendo a planta da subestação.



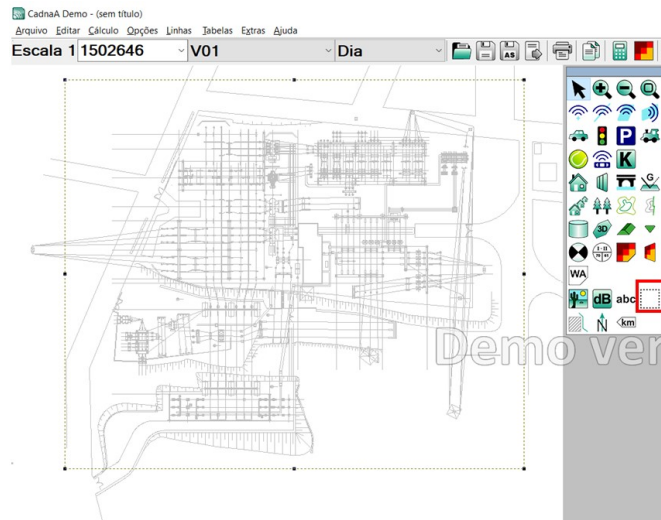
Na janela ‘Importar Arquivos’ deve-se procurar a pasta onde encontra-se salvo o DXF requerido, mudando, para isso, na parte inferior da mesma janela, a informação relacionada ao ‘Tipo’ para ‘AutoCAD DXF (\*.dxf)’, selecionando na sequência o arquivo desejado e abrindo-o.

Ao abrir o arquivo o zoom pode comprometer a visualização do mesmo, então clica-se na opção ‘Ajustar aos limites do projeto’.

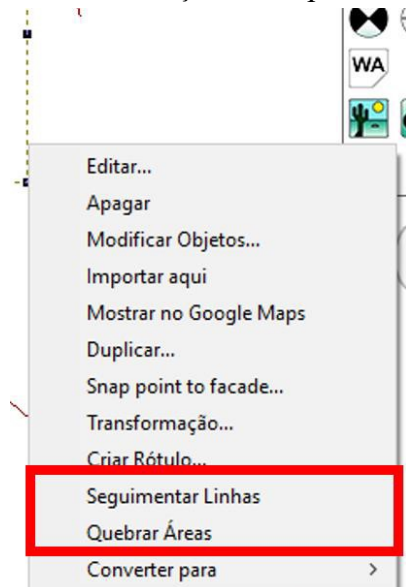




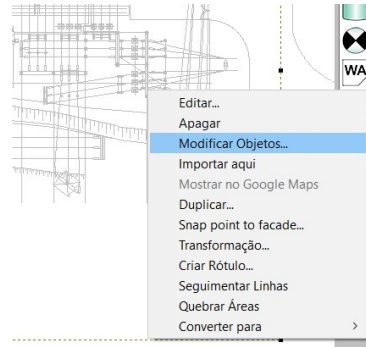
Com a planta da subestação aberta e ajustada à tela do *software*, iniciam-se às modificações para introduzi-la corretamente junto aos mapas, os quais devem ser importados posteriormente. Na primeira etapa, seleciona-se uma região da imagem (linha tracejada), enquadrando a parte de interesse da planta, como mostra a figura abaixo. Opta-se por manter algumas ruas, a fim de facilitar ajustes futuros no modelo. Para realizar o especificado, clicar na ferramenta ‘Seção’, presente na barra de ferramentas do *software*, e então desenhar a região de interesse.



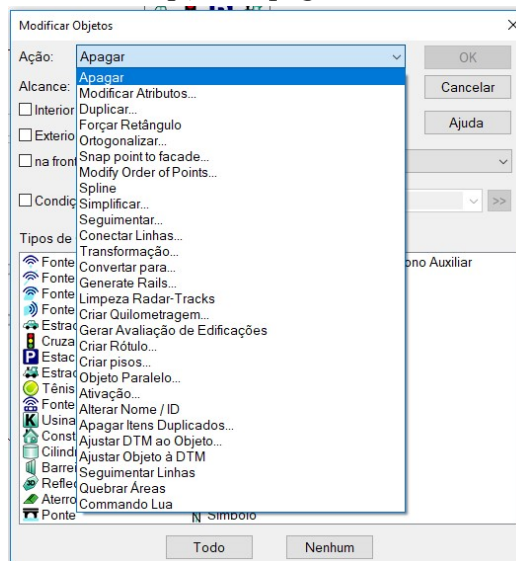
Após a seleção solicitada, ativa-se na biblioteca de opções a ferramenta ‘Editar Modo’ (seta), clicando então na borda da área predefinida. Após o clique, utilizando o botão direito do mouse, abre-se a janela de opções, na qual, deve-se escolher a função ‘Quebrar Áreas’. Repete-se os passos, utilizando a ferramenta ‘Seguimentar Linhas’, assim os objetos dentro e fora da área de seleção são separados.



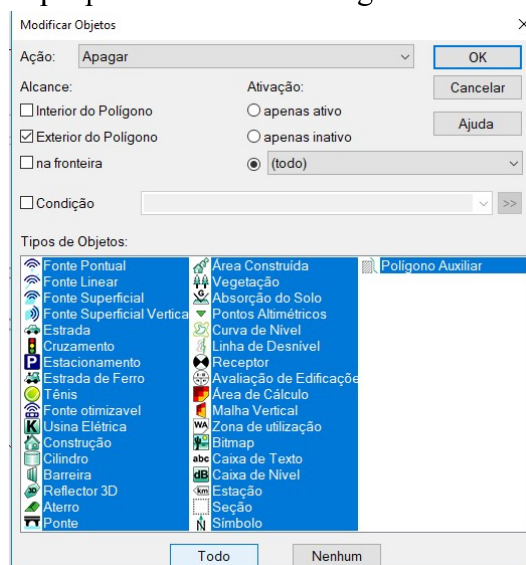
Com as linhas e áreas já separadas, selecionar novamente a seção com um clique, e após, com o botão direito do mouse, optar pela função ‘Modificar Objetos’.



Ao ativar a função ‘Modificar Objetos’, abre-se a janela apresentada na figura abaixo. No item ‘Ação’ seleciona-se a opção ‘Apagar’.

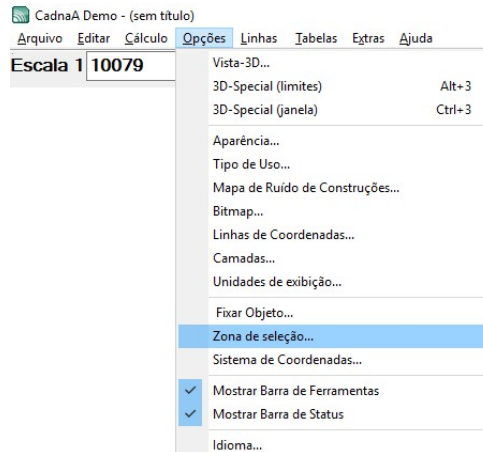


Dando sequência, ainda na mesma janela, ativa-se a caixa nomeada como ‘Exterior do Polígono’, indicando ao *software* para excluir somente os objetos fora da seção predeterminada. Prossegue-se clicando na opção ‘Todo’, presente na parte inferior, a qual permitirá selecionar todos os ‘Tipos de Objetos’ existentes. Para finalizar clica-se em ‘OK’, eliminando tudo o que pode haver fora da região de interesse.

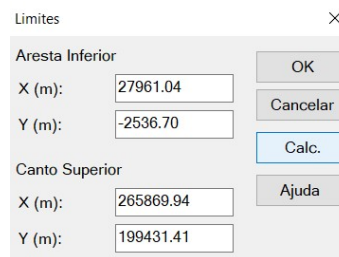




Para ajustar a imagem na tela e retirar a parte branca, então eliminada, utiliza-se a aba ‘Opções’ do menu, selecionando posteriormente a ferramenta ‘Zona de Seleção’.

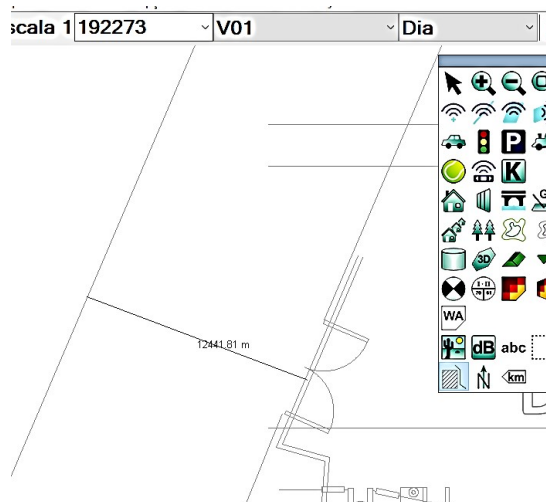


Ao abrir a janela ‘Limites’, clica-se na opção ‘Calc.’ e após em ‘OK’. Com isso aparecerá na área de trabalho do CadnaA apenas a seção desenhada anteriormente, melhorando a visualização.



Após configurar a área de trabalho do CadnaA é possível apagar o limite pontilhado que define a seção selecionada, para isso clica-se na mesma e conclui-se a operação acionando a tecla ‘Del’.

Em certas ocasiões o arquivo DXF importado acaba ficando com a escala errada, neste caso, uma forma fácil de verificar o possível erro é através da ferramenta ‘Polígono Auxiliar’, desenhando-se uma linha e comparando sua medida com a medida real. Para cancelar a ativação do ‘Polígono Auxiliar’ basta clicar em ‘Editar Modo’ presente na barra de tarefas do CadnaA.



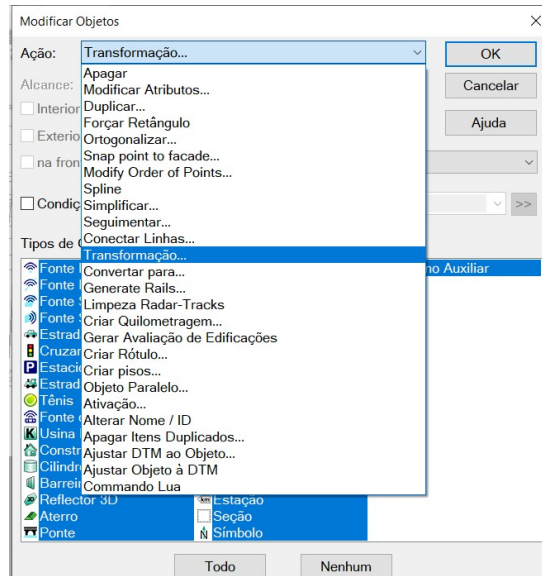




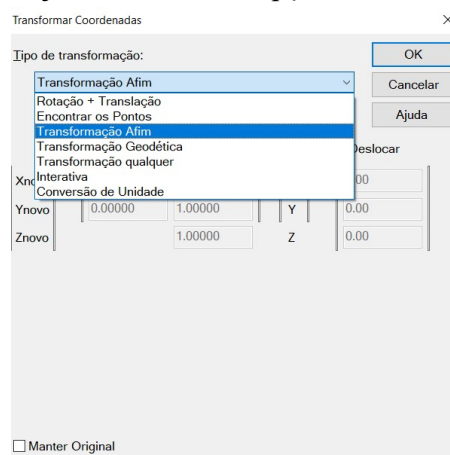
Na imagem acima é possível ver a medida gerada pelo ‘Polígono Auxiliar’, mostrando o valor de 12441m para a largura da rua, indicando que a escala está 1000 vezes maior que a real. Os próximos passos exemplificam como realizar o ajuste.

Após selecionar ‘Editar Modo’ na barra de ferramentas, clicar com o botão direito em algum espaço em branco da área de trabalho do CadnaA, e em seguida em ‘Modificar Objetos’.

Na janela ‘Modificar Objetos’ selecionar todos os ‘Tipos de Objetos’ e no item ‘Ação’ selecionar ‘Transformação...’. Para finalizar, clica-se em ‘OK’.



Ao clicar em ‘OK’, a janela ‘Transformar Coordenadas’ será aberta, para que, no item ‘Tipo de Transformação’ seja selecionada a opção ‘Transformação Afim’.



Marcar a caixa ‘Rotação/Ajuste de Escala’ e alterar os valores definidos como 1.00000 para 0.001 nas opções X e Y, gerando assim, uma redução de 1000 vezes no resultado final das dimensões. Finaliza-se a etapa clicando-se em ‘OK’.



Transformar Coordenadas

Tipo de transformação: Transformação Afim

Rotação/Ajuste de Escala  Deslocar

$$\begin{pmatrix} X_{novo} \\ Y_{novo} \\ Z_{novo} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.00000 & 0.00000 \\ 0.00000 & 1.00000 \\ 0.00000 & 0.00000 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0.00 \\ 0.00 \\ 0.00 \end{pmatrix}$$

Antes da Alteração

Transformar Coordenadas

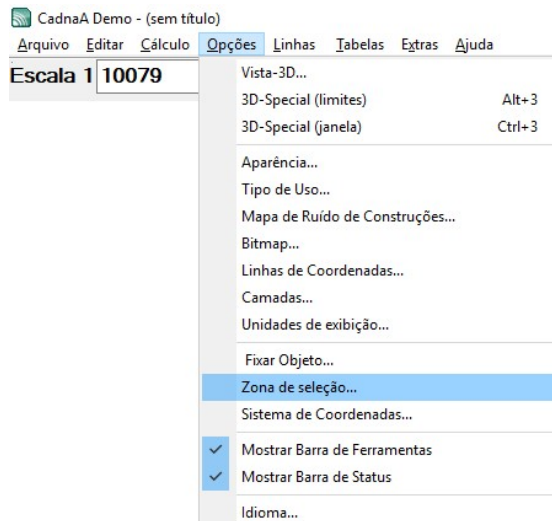
Tipo de transformação: Transformação Afim

Rotação/Ajuste de Escala  Deslocar

$$\begin{pmatrix} X_{novo} \\ Y_{novo} \\ Z_{novo} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.001 & 0.00000 \\ 0.00000 & 0.001 \\ 0.00000 & 0.00000 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0.00 \\ 0.00 \\ 0.00 \end{pmatrix}$$

Depois da Alteração

Na janela ‘Alterar Objetos’, aberta automaticamente na sequência, clicar em ‘Todo’, fazendo com que o arquivo seja atualizado em relação aos tamanhos. Para ajustar os limites da área de trabalho do CadnaA, utilizar a aba ‘Opções’, do menu, clicando em ‘Zona de Seleção’.



Já na janela ‘Limites’, clica-se primeiramente em ‘Calc.’ e após em ‘OK’. Dessa forma, a área de trabalho do CadnaA será ajustada ao novo tamanho do arquivo DXF.

Limites

Aresta Inferior

X (m): 27961.04

Y (m): -2536.70

Canto Superior

X (m): 265869.94

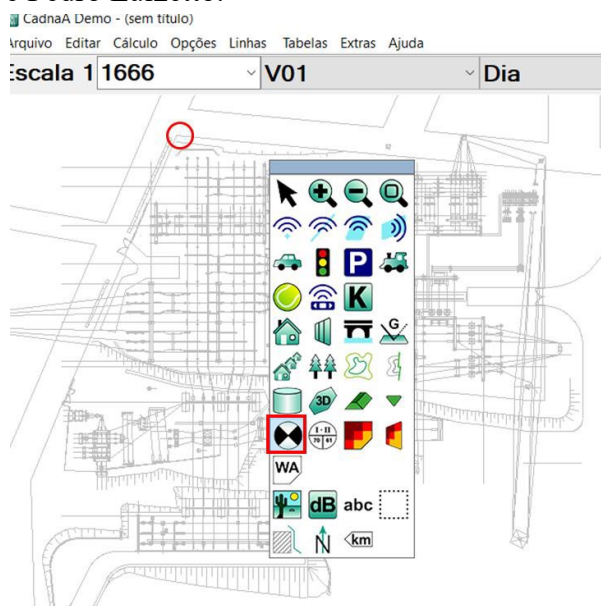
Y (m): 199431.41

Para melhorar a visualização utilizar a opção ‘Ajustar aos limites do projeto’, presente na biblioteca de ferramentas do *software*.

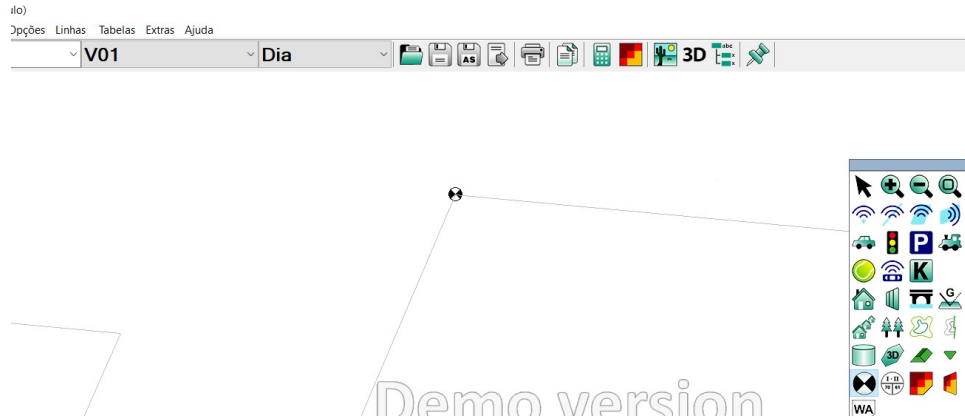


Após a realização das etapas até aqui descritas, deve-se, dando segmento a criação do modelo, introduzir um objeto que servirá de ponto de referência para futuramente realizar a junção do arquivo DXF com os mapas a serem importados do OpenStreetMap e Google Maps.

Utiliza-se para tal um ‘Receptor’, presente na biblioteca de ferramentas do CadnaA, posicionando-o no canto superior esquerdo do terreno da subestação (círculo vermelho). O local é ilustrado na figura abaixo, e na prática fica na esquina entre as Avenidas João Catapan e Pedro Luizetto.



Para realizar o passo exposto acima, seleciona-se o ‘Receptor’ na barra de ferramentas e aproxima-se o ponto de inserção utilizando o zoom, através do ‘*Scroll* do mouse’, melhorando a precisão na colocação do objeto. Para finalizar clica-se no ponto a inserir o ‘Receptor’.



Como há necessidade de salvar as coordenadas do ponto em que o ‘Receptor’ foi inserido, utiliza-se a aba ‘Tabelas’ do menu, selecionando na mesma a opção ‘Receptor’. Ao clicar em tal opção a ‘janela Receptor’ é automaticamente aberta, conforme a figura abaixo. As coordenadas devem ser salvas clicando em uma das cédulas e utilizando os comandos CTRL + C e CTRL + V, importando na sequência todos os dados para um arquivo de Excel e salvando-os em local pertinente.

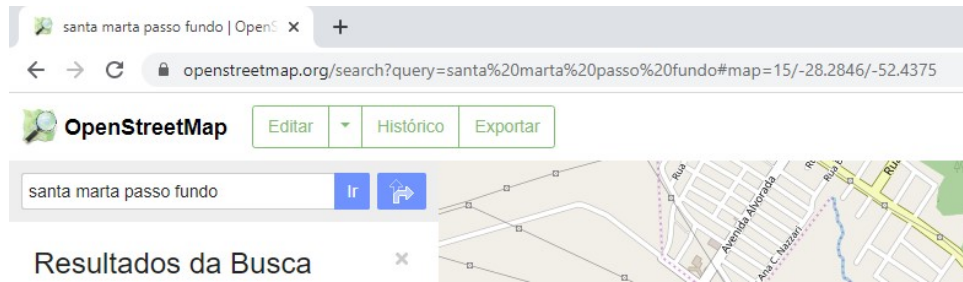
(sem título)													
álculo Opções Linhas Tabelas Extras Ajuda													
Receptor													
Fechar		Editar...		Sincr. Gráfico		Copiar...		Imprimir...		Fonte...		Ajuda	
Nome	M	ID	Nível Lr		Valor Limite		Tipo de Uso		Altura		Coordenadas		
			Dia	Noite	Dia	Noite	Tipo	Auto	Tipo de Ruído	(m)	X	Y	Z
			(dBA)	(dBA)	(dBA)	(dBA)				(m)	(m)	(m)	(m)
			0.0	0.0	50.0	40.0		x	Total	4.00	97.03	183.31	0.00

Para finalizar, fechar a janela ‘Receptor’ e salvar o arquivo .cna, clicando na aba ‘Arquivo’ e após na opção ‘Guardar Como’. É fundamental nomear o arquivo com outro nome, não aquele utilizado até então (Exemplo: Planta Subestação).

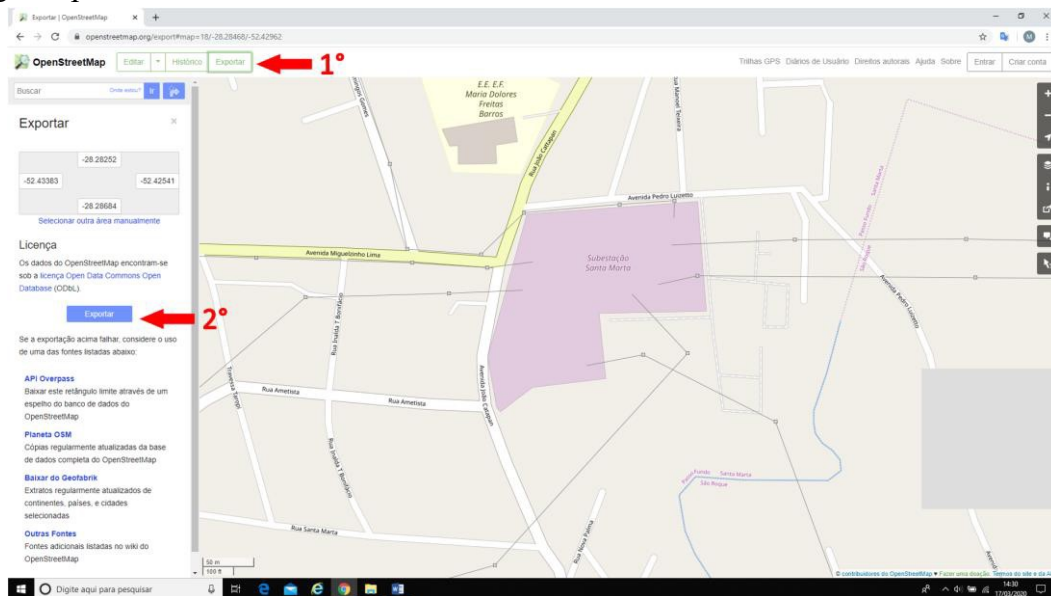
### 3.2. OpenStreetMap

O arquivo a ser gerado junto ao OpenStreetMap permite importar para o CadnaA as ruas, cruzamentos e edificações da região onde a subestação se encontra, garantindo a base geográfica para o prosseguimento da criação do modelo, possibilitando a futura incorporação com a planta da subestação. Em certos casos este arquivo pode conter a altura das casas e edifícios, facilitando a modelagem, porém, é mais comum que o mesmo não apresente nada referente as construções, sendo assim, haverá a necessidade de criar manualmente as mesmas. Para o exemplo apresentado nesse documento será simulada a subestação Santa Marta, localizada em Passo Fundo/RS.

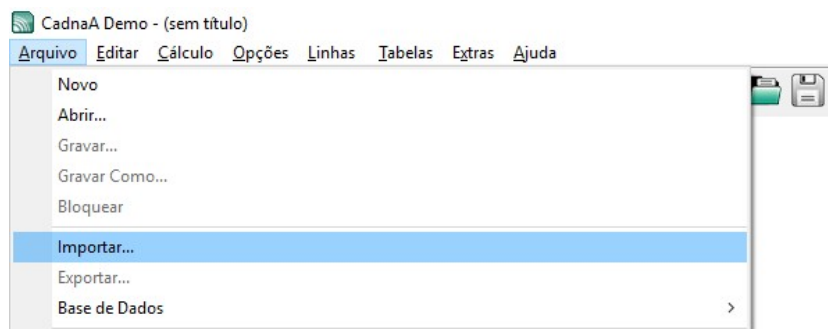
Inicialmente, utilizando algum navegador de internet, abre-se o site <https://www.openstreetmap.org/>, e em seguida realiza-se uma pesquisa relativa ao local de interesse, através do campo ‘Buscar’.



Seguindo, centraliza-se na tela a região de interesse e clica-se no botão ‘Exportar’, presente no cabeçalho do site (1°). Após a realização deste passo, utiliza-se o botão ‘Exportar’, presente na lateral esquerda da página (2°), salvando o arquivo (.osm) em alguma pasta de interesse.



O arquivo baixado do OpenStreetMap (.osm) deve ser importado para o CadnaA, junto ao arquivo .cna salvo inicialmente, contendo a configuração básica do modelo. Para tal, utiliza-se a barra superior do menu no software acústico, selecionando a aba ‘Arquivo’ e a opção ‘Importar’.

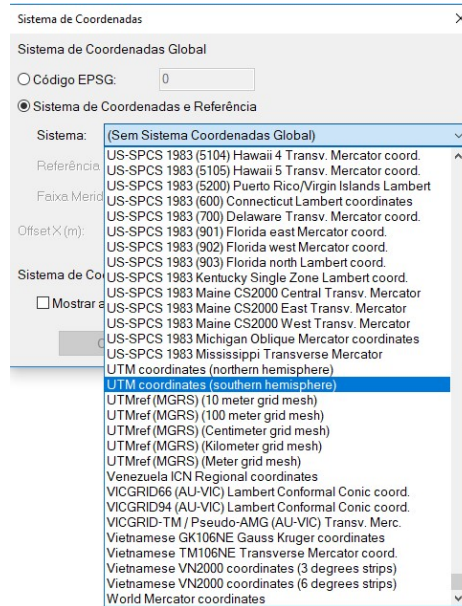


Após a abertura da janela ‘Importar arquivos’ encontra-se a pasta onde o arquivo do OpenStreetMap foi salvo, alterando em seguida a extensão do mesmo, em ‘Tipo’ de arquivo, para ‘OpenStreetMap XML (\*.osm)’. Dando sequência seleciona-se o arquivo



de interesse e clica-se em ‘Abrir’. Não há necessidade de mudar coordenadas, pois, o mapa importado do OpenStreetMap já às possui.

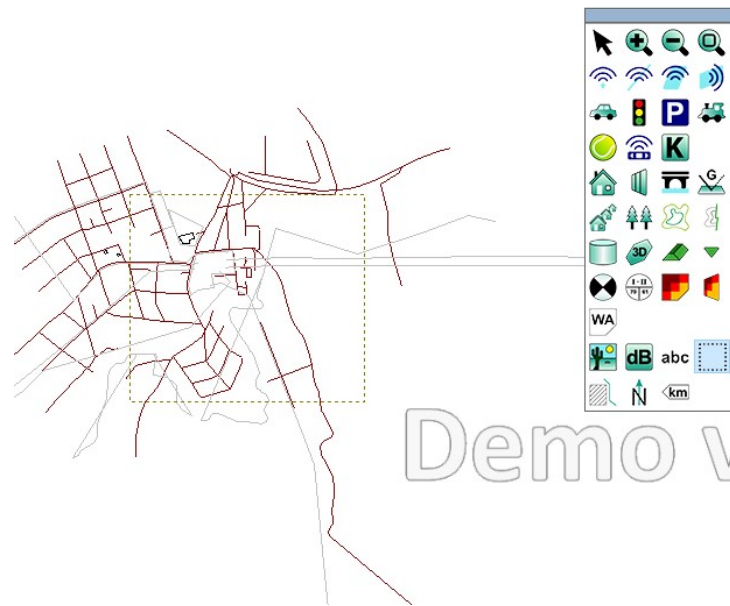
Ao clicar em ‘Abrir’ há necessidade de definir o ‘Sistema de Coordenadas e Referência’, para tal, utiliza-se o campo ‘Sistema’, selecionando ‘UTM coordinates (Southern hemisphere)’, ou seja, UTM para Hemisfério Sul. Finaliza-se a etapa dando um ‘OK’.



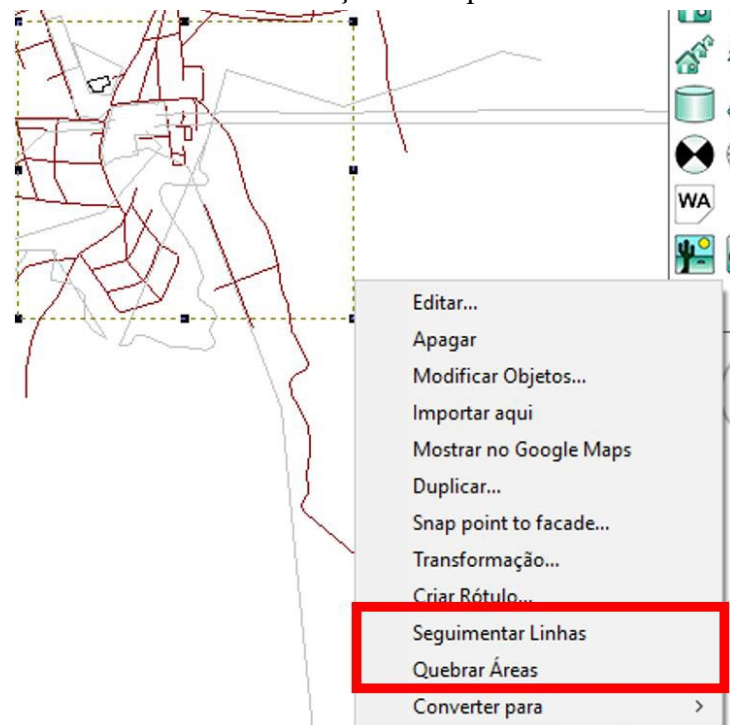
Neste momento o mapa já se encontra importado no CadnaA, mas caso não apareça de imediato no modelo, utiliza-se o botão de zoom ‘Ajustar aos limites do projeto’ para isso.



Em situações em que o mapa se apresenta maior do que o desejado é possível readequar as áreas, para tal seleciona-se a ferramenta ‘Seção’, ilustrada na imagem abaixo, e desenha-se um retângulo do tamanho da área de interesse. A área restante, a qual estiver fora da seleção, é apagada.

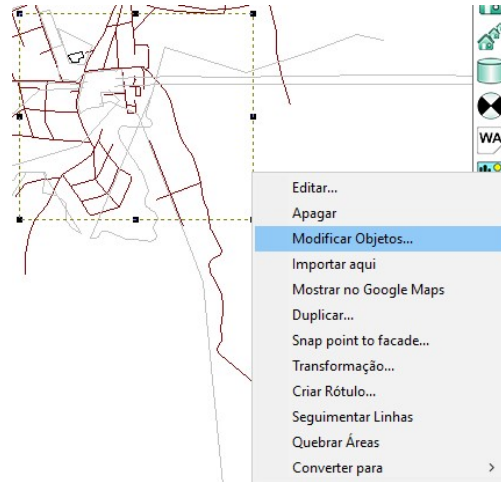


Todos os comandos do CadnaA devem retornar para a seta do mouse, possibilitando a execução de outras funções, portanto, após desenhar a área clica-se na seta do mouse, em 'Editar modo', presente na biblioteca de ferramentas e na sequência na borda da área desenhada. Para finalizar a utilização do recurso deve-se clicar com o botão direito do mouse sobre a área desenhada, e ao abrir a janela de opções selecionar a função 'Quebrar Áreas'. Repete-se o passo, clicando dessa vez em 'Seguimentar Linhas', assim os objetos dentro e fora da área de seleção são separados.

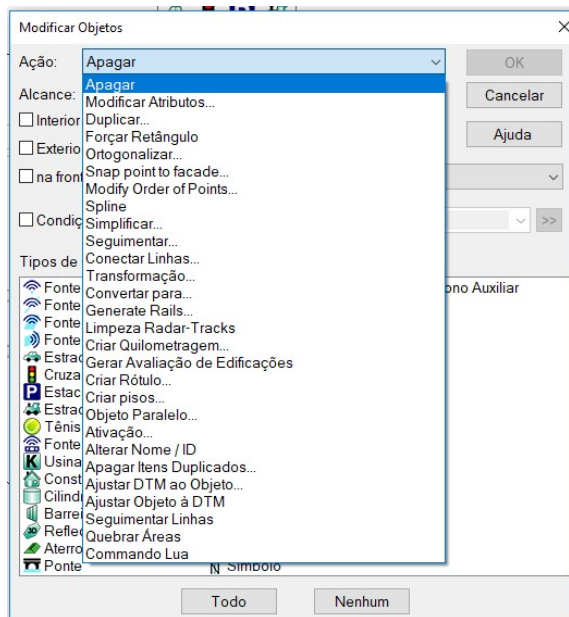




Após a quebra de áreas e linhas, realizada no passo anterior, clica-se com o botão direito do mouse na borda da seção desenhada e após seleciona-se ‘Modificar Objetos’, como indicado na figura abaixo.

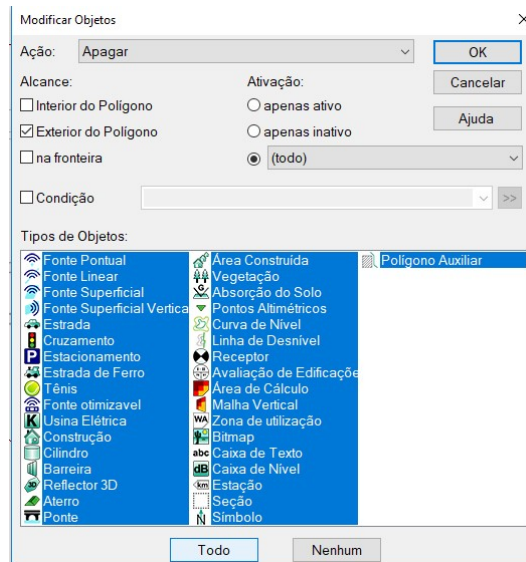


Com a janela ‘Modificar Objetos’ aberta, no item ‘Ação’, seleciona-se a opção ‘Apagar’.

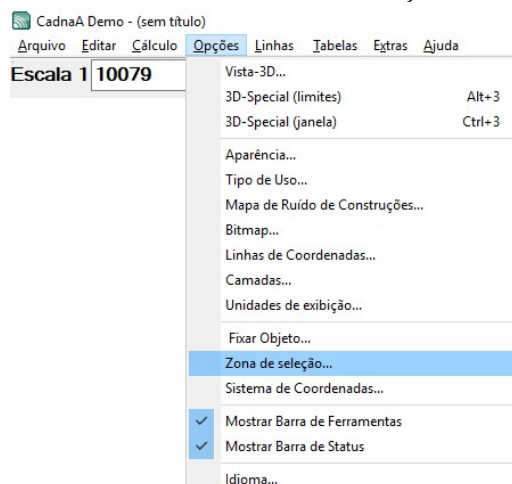


Dando continuidade, na mesma janela, deve-se selecionar a opção ‘Exterior do Polígono’, indicando ao software o interesse em apagar apenas os objetos fora da seção pré-selecionada. Ainda, clica-se em ‘Todo’, na parte inferior da janela, para apagar todos os tipos de objetos no momento que aciona-se ‘OK’ (canto superior direito).

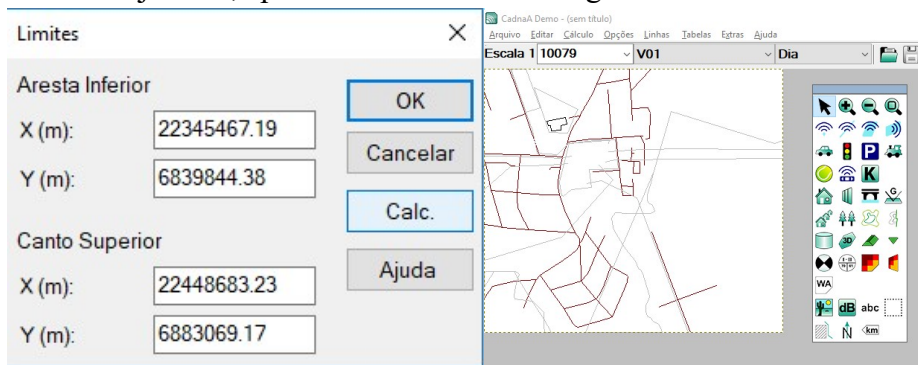




Na janela ‘Alterar Objetos’, que surge após clicar em ‘OK’, deve-se ativar a opção ‘Todo’, assim restará no ambiente de desenvolvimento do modelo, apenas os objetos dentro da área de seleção. Para eliminar a parte branca da tela, basta selecionar a aba ‘Opções’, do menu, e posteriormente o item ‘Zona de Seleção’.



Na janela ‘Limites’, clicar em ‘Calc.’ e após em ‘OK’. Com isso, a área de trabalho do CadnaA será ajustada, apresentando somente a região selecionada anteriormente.



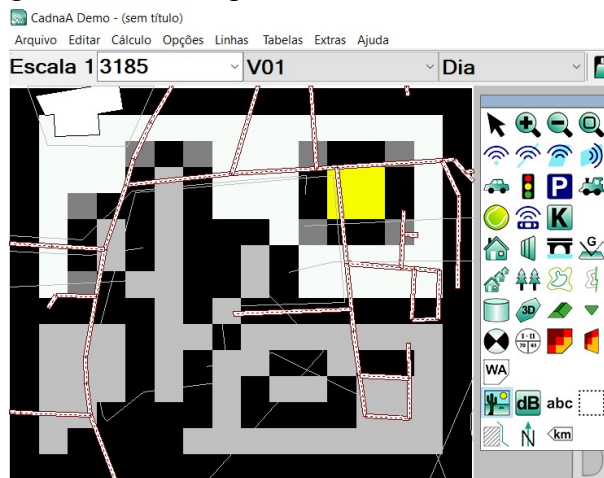


O novo arquivo (.cna) criado, deve ser nomeado e salvo em alguma pasta de interesse. Para salvá-lo deve-se clicar na aba ‘Arquivo’, do menu, e depois na opção ‘Gravar Como’, selecionando na sequência a pasta desejada.

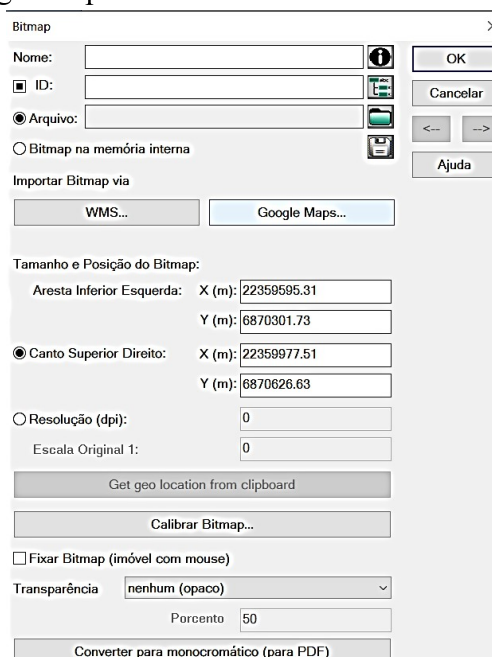
### 3.3. Google Maps (Bitmap)

O objetivo desta etapa é viabilizar a importação de um arquivo Bitmap (.bmp) referente a um mapa que contenha a subestação analisada, o qual mostrará a visão de satélite da região estudada. Essa imagem auxilia na construção e entendimento do modelo acústico.

Utilizando o mesmo arquivo onde foi importado o mapa oriundo do OpenStreetMap, clica-se no botão ‘Bitmap’, presente na biblioteca de ferramentas do software, e cobre-se a região de interesse presente na área de trabalho do CadnaA.

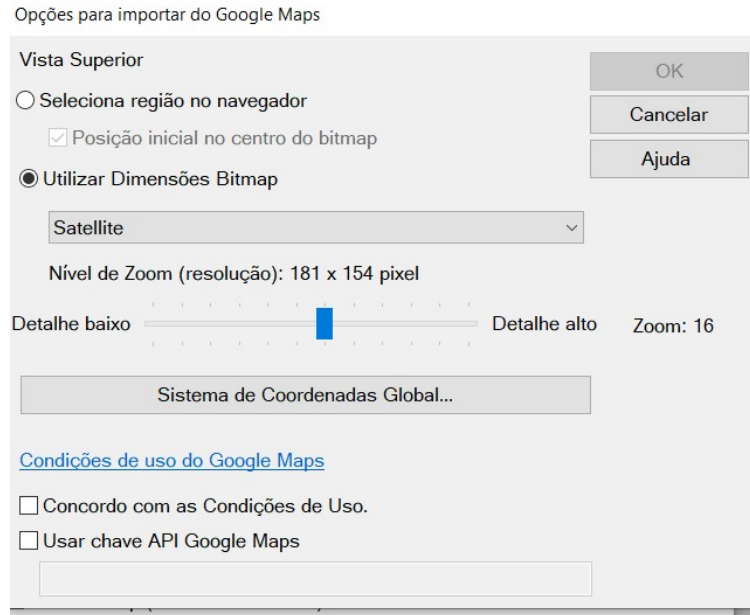


Na sequência, deve-se selecionar a opção ‘Editar modo’, também presente na biblioteca de ferramentas, e clicar 2 vezes na borda do bitmap para editá-lo. Na janela ‘Bitmap’ seleciona-se ‘Google Maps...’.

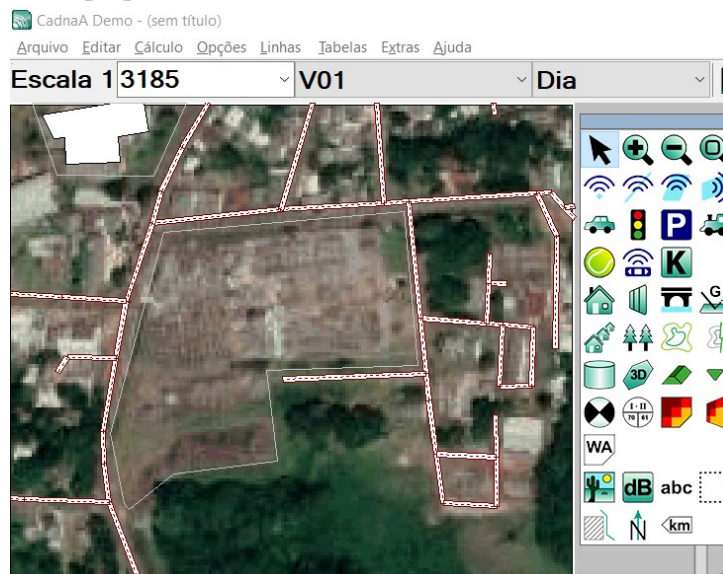




Após clicar em ‘Google Maps...’ a janela ‘Opções para importar do Google Maps’ é aberta. Nesta janela é possível escolher a resolução da imagem que será impostada, alterando o nível de detalhamento da mesma. Optou-se por posicionar a barra de ‘Zoom’ no valor 16, porém, posteriormente há possibilidade, seguindo os mesmos passos, de melhorar a qualidade da imagem.



Após ajustar o Zoom conforme indicado acima seleciona-se a opção ‘Concordo com as Condições de Uso’ e clica-se em ‘OK’, sendo aberta com isso uma janela para salvar o arquivo Bitmap. A partir disso, escolhe-se a pasta desejada para direcioná-lo, nomeia-se e salva-se o mesmo. Novamente na janela ‘Bitmap’ do CadnaA, clica-se em ‘OK’, e com isso o Bitmap aparecerá na área de trabalho do software.



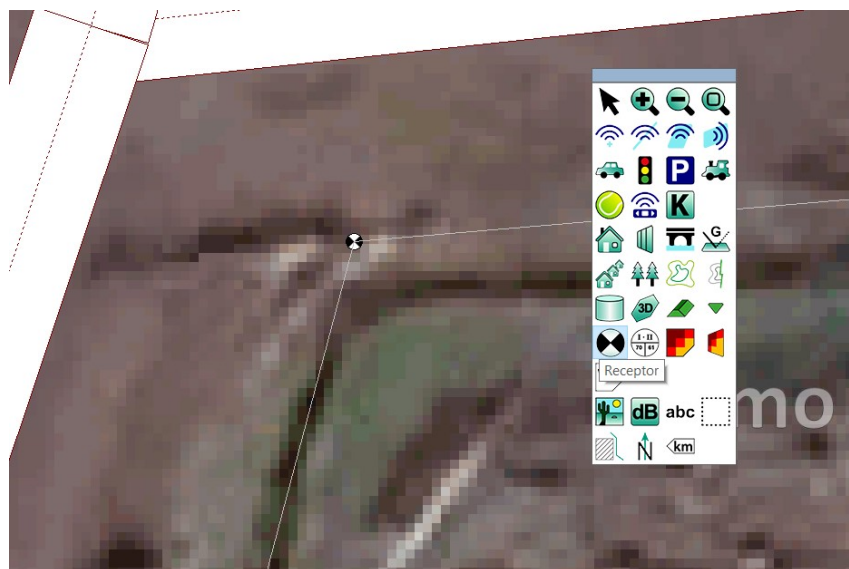
Caso a qualidade da imagem esteja ruim, impossibilitando a identificação de casas e construções presentes na região, pode-se melhora-la, clicando 2 vezes na borda da imagem Bitmap, e a partir da janela ‘Bitmap’ deve-se refazer os passos indicados



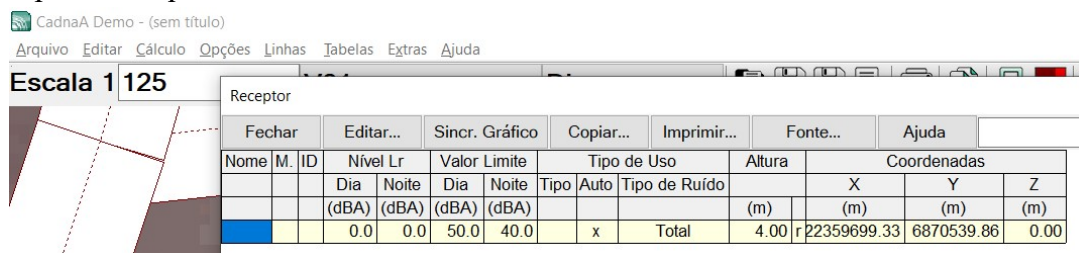
anteriormente, aumentando o valor do 'Zoom'. Se o programa não suportar a imagem, devido a mesma necessitar de uma resolução muito aprimorada, quadros cinzas irão surgir em partes do ambiente de desenvolvimento (ocorrendo isso, deve-se diminuir o valor do 'Zoom' para a configuração anterior).

Após o ajuste da imagem, o próximo passo trata do posicionamento de um receptor, próximo ao cruzamento das avenidas João Catapan e Pedro Luizetto, como havia sido realizado para o arquivo DXF da seção 2.1. O objetivo dessa etapa visa obter as coordenadas do receptor a ser inserido, de modo a facilitar o posicionamento do DXF sobre o presente mapa.

Na tela de desenvolvimento do programa aplica-se um Zoom, utilizando o Scroll do mouse, de modo a aproximar o ponto em que o receptor será inserido (canto do terreno da subestação, indicado pela linha cinza). A partir de então adiciona-se o 'Receptor', selecionando-o na biblioteca de ferramenta do software.



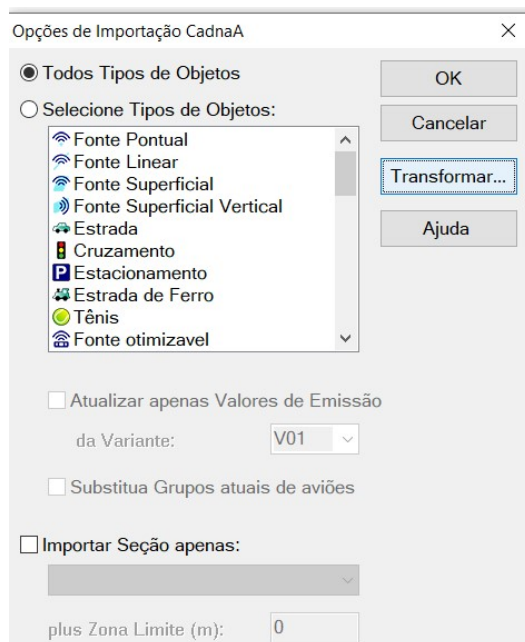
Necessita-se então salvar as coordenadas desse ponto, para tal, clica-se na aba 'Tabelas' do menu e após em 'Receptor'. Neste momento a janela 'Receptor' é aberta, contendo a tabela com as coordenadas do mesmo. Para finalizar a etapa, clica-se em uma cédula da tabela e utilizando os comandos CTRL + C e CTRL + V, copia-se a mesma para um arquivo de Excel. Para facilitar, orienta-se salvá-la no mesmo arquivo .xlsx criado no decorrer da seção 2.1, o qual contém as informações das coordenadas do receptor do arquivo DXF.



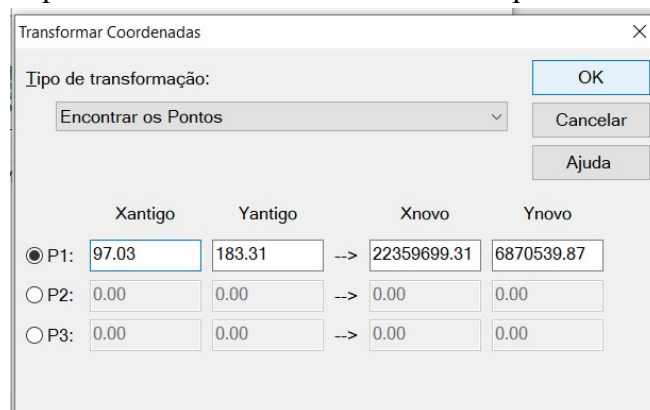
O próximo passo para criação do modelo requer a junção dos arquivos desenvolvidos até então, ou seja, da planta da subestação e dos mapas. Para isso, com o



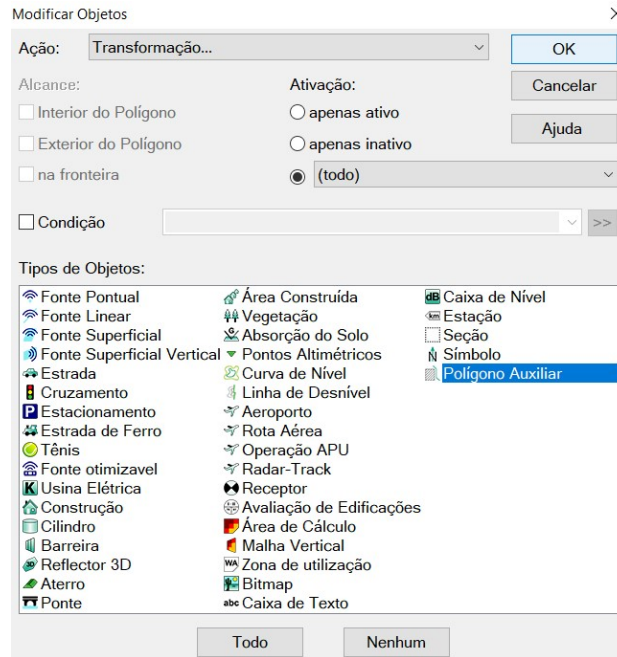
arquivo 'MAPAS' aberto, clica-se na aba 'Arquivo' do menu, e após em 'Importar', selecionando na sequência o nomeado como Planta Subestação. Na janela 'Importar arquivos', ir em 'Opções', e na janela 'Opções de Importação CadnaA' selecionar o item 'Transformar'.



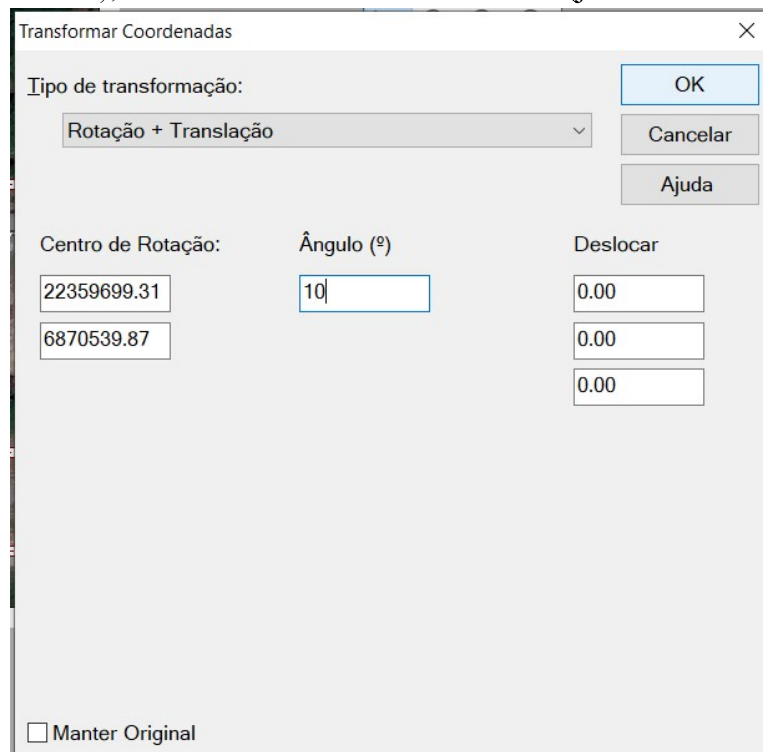
Na janela 'Transformar Coordenadas', seleciona-se 'Encontrar os Pontos' a partir da opção 'Tipo de transformação'. Utilizando os dados salvos no arquivo Excel, as coordenadas dos receptores devem ser informadas como apresentado na figura abaixo.



Feito isso, clicar em 'OK', 'OK' e após em Abrir. Com os pontos posicionados, ajusta-se o ângulo da planta. Neste caso, clica-se com o botão direito do mouse na área de trabalho e seleciona-se 'Modificar Objetos'. Na janela 'Modificar Objetos', opção 'Ação', ativa-se a função 'Transformação...', e em seguida, em 'Tipos de Objetos' o item 'Polígono Auxiliar', dando 'OK' na sequência.



Na janela ‘Transformar Coordenadas’ deve-se selecionar ‘Rotação + Translação’, presente no campo ‘Tipo de transformação’. Feito isso, em ‘Centro de Rotação’ indica-se as coordenadas do receptor adicionado no arquivo Bitmap e altera-se o ângulo para a Planta da Subestação (opção utilizada para melhorar o ajuste, mas cuidado, pois os valores informados nas caixas ‘Ângulo’ e ‘Deslocar’ são crescentes ou decrescentes a partir da posição de referência), clicando enfim em ‘OK’ e ‘Todo’ (janela ‘Alterar Objetos’).



Verificar como ficou o resultado da importação e observar se algum polígono ficou fora do lugar. Como todos eles foram rotacionados, aqueles que estavam no local

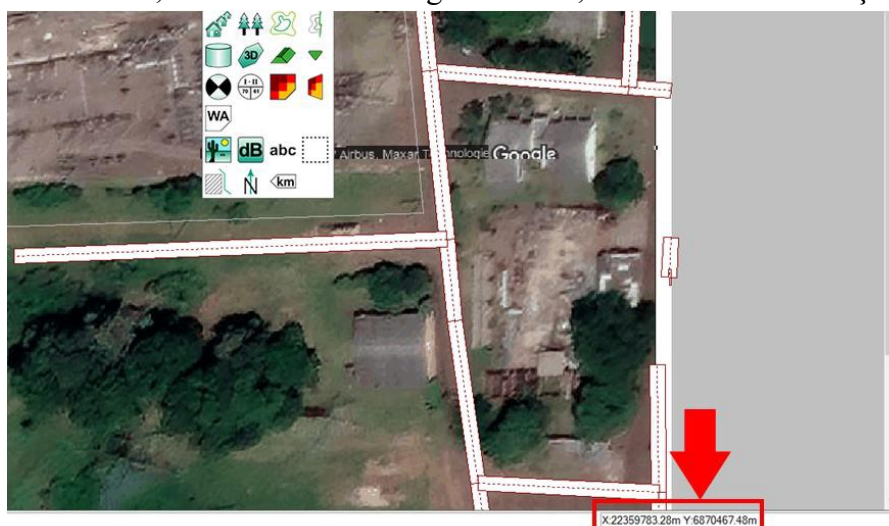


correto foram alterados, com isso encontre-os e os exclua para reduzir o excesso de linhas. Para isso clicar na linha e pressionar o botão delete, salvando o arquivo em seguida. Cabe ressaltar que a necessidade deste passo é subjetiva, podendo ou não ser realizada.

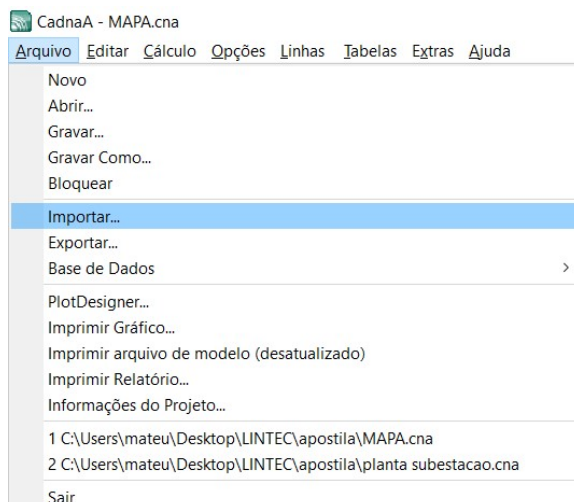
### 3.4. TOPOGRAFIA (AJUSTE DO TERRENO)

Nesta etapa importa-se ao CadnaA o arquivo referente a topografia do local onde se encontra a subestação, sendo assim, mostrar-se-á também como fazer um ajuste do terreno. O arquivo a ser importado tem o formato .xyz e pode ser obtido a partir de outros programas ou sites.

Inicialmente verifica-se as coordenadas do mapa no CadnaA. Como o software segue coordenadas UTM, nenhum dos cantos poderá ser indicado como o ponto zero. Utilizando o cursor do mouse sobre a área de trabalho é possível ver as coordenadas no canto inferior direito, como indicado na figura abaixo, e confirmar a afirmação anterior.



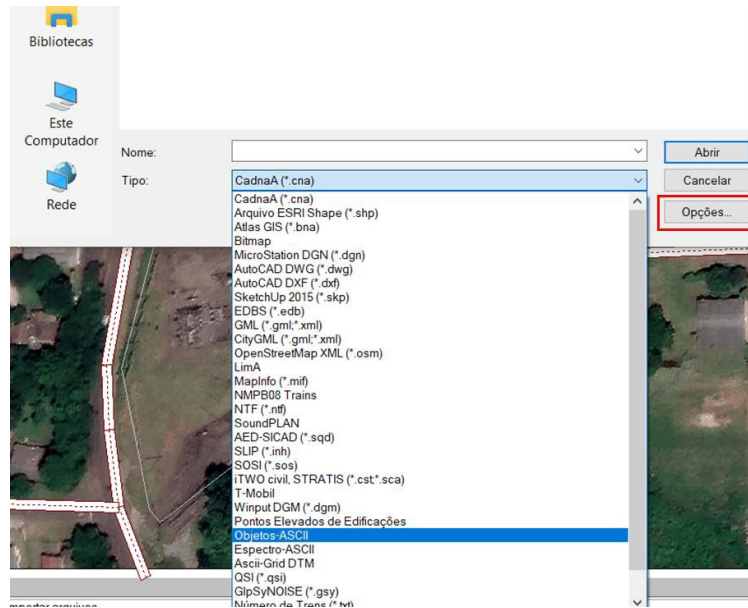
Essas coordenadas são necessárias para o ajuste do arquivo de topografia a ser importado. Iniciando a etapa em questão, clica-se na aba ‘Arquivo’ do menu e seleciona-se a opção ‘Importar’.



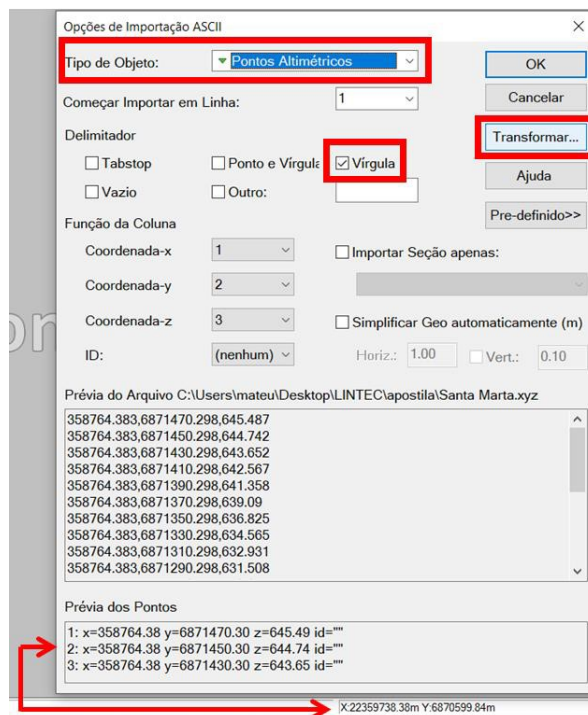
O primeiro passo é encontrar a pasta onde está salvo o arquivo da topografia e na sequência selecionar na função ‘Tipo’ a opção ‘Objetos-ASCII’. Ao surgir o arquivo



buscado deve-se, selecioná-lo, e antes de importá-lo, clicar em ‘Opções’, ainda na janela ‘Importar arquivos’.



Ao abrir a janela ‘Opções de Importação ASCII’ selecionar qual ‘Tipo de Objeto’ será importado e identificar qual ‘Delimitador’ deve ser utilizado. Para o modelo em questão escolher ‘Vírgula’ como ‘Delimitador’ e ‘Pontos Altimétricos’ como ‘Tipo de Objeto’, possibilitando com isso, identificar a diferença entre as coordenadas do projeto e dos pontos altimétricos que serão importados. Após, configura-se as coordenadas da topografia a serem importadas, a partir da opção ‘Transformar...’. Ao comparar os valores de coordenadas do projeto e os vistos na janela de opções, observados na figura abaixo, nota-se que a diferença está vinculada ao eixo X, onde a topografia possui coordenadas com um valor 22 milhões menor.







Para ajustar corretamente as coordenadas clica-se em ‘Transformar...’, conforme figura acima, e na janela ‘Transformar Coordenadas’ seleciona-se no ‘Tipo de transformação’ a opção ‘Transformação Afim’. Marcar também a caixa ‘Deslocar’ e no eixo X digitar o valor de 22.000.000. Para finalizar clicar em ‘OK’.

Transformar Coordenadas

Tipo de transformação: Transformação Afim

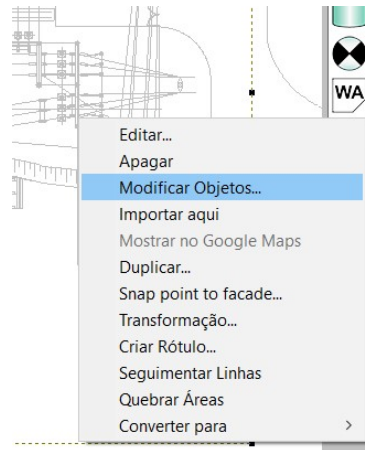
Rotação/Ajuste de Escala  Deslocar

$$\begin{pmatrix} X_{novo} \\ Y_{novo} \\ Z_{novo} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.00000 & 0.00000 \\ 0.00000 & 1.00000 \\ & 1.00000 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 22000000 \\ 0.00 \\ 0.00 \end{pmatrix}$$

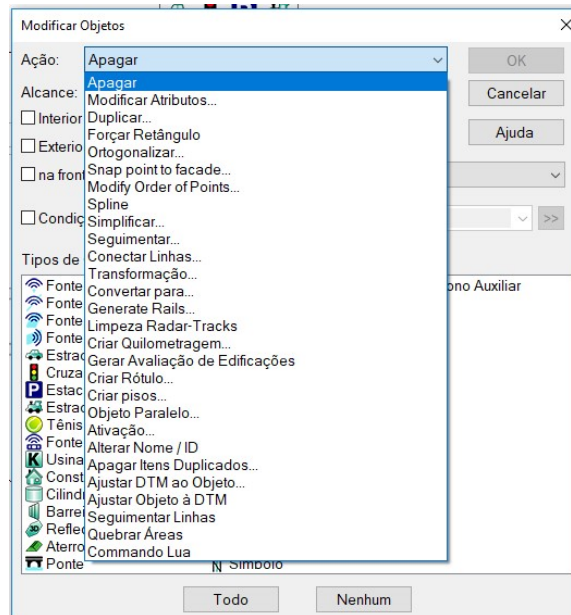
OK Cancelar Ajuda

Depois de tudo devidamente corrigido, clica-se em ‘OK’ e ‘Abrir’ nas janelas ‘Opções de Importação ASCII’ e ‘Importar arquivos’, respectivamente.

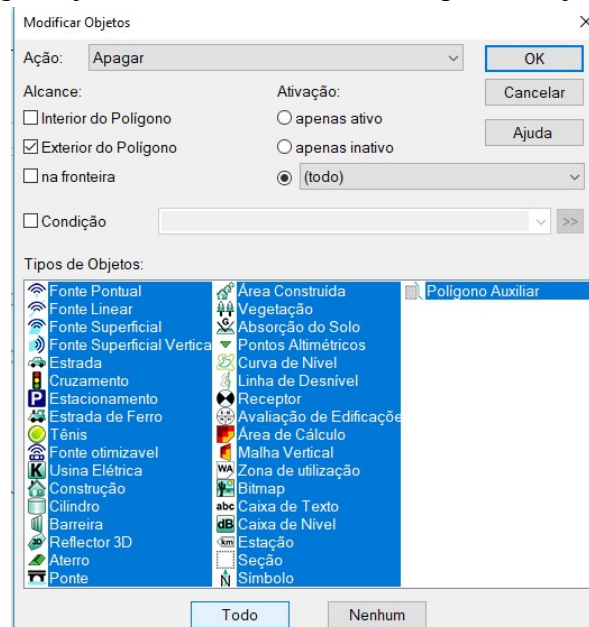
Caso os ‘Pontos Altimétricos’ estejam presentes em uma área do ambiente de desenvolvimento, maior do que a desejada, seleciona-se inicialmente a região de interesse utilizando a ferramenta ‘Seção’, da biblioteca do software. Após, ativando ‘Editar modo’, clica-se sobre esta marcação e com o botão direito do mouse seleciona-se ‘Modificar Objetos...’.



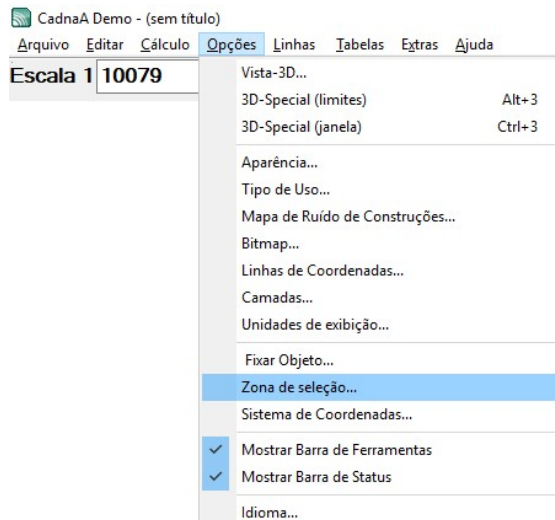
Com a janela ‘Modificar Objetos’ aberta, ativa-se no item ‘Ação’ a opção ‘Apagar’.



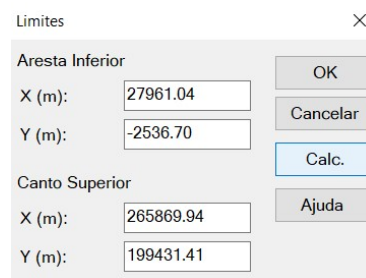
Com a opção ‘Apagar’ ativada, seleciona-se a caixa ‘Exterior do Polígono’, para que sejam apagados apenas os objetos fora da seção criada, e clica-se em ‘Todo’ na parte inferior da janela. Com todos os ‘Tipos de Objetos’ selecionados, no momento em que for clicado em ‘OK’ os mesmos serão apagados. Cabe aqui ressaltar, que ao surgir a janela ‘Alterar Objetos’, clica-se em ‘Todo’, para que o processo seja agilizado. Ressalta-se que a seção selecionada deve contemplar toda a imagem contendo o Bitmap, caso contrário, a mesma poderá ser apagada, juntamente com os demais tipos de objetos.



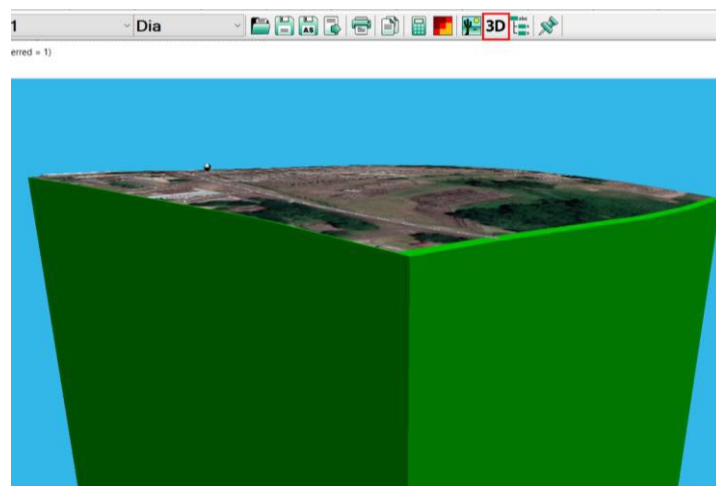
Para eliminar a parte branca da tela, ativa-se a opção ‘Zona de seleção...’, presente na aba ‘Opções’ da barra de menu do software. A figura abaixo indica o caminho a ser seguido.



Ao acionar a opção ‘Zona de seleção...’, a janela ‘Limites’ é aberta. Na mesma deve-se clicar em ‘Calc.’ e após em ‘OK’ para concluir a etapa. Com isso, a área de trabalho do CadnaA será melhor organizada, evitando que uma possível poluição visual seja mantida junto ao modelo.

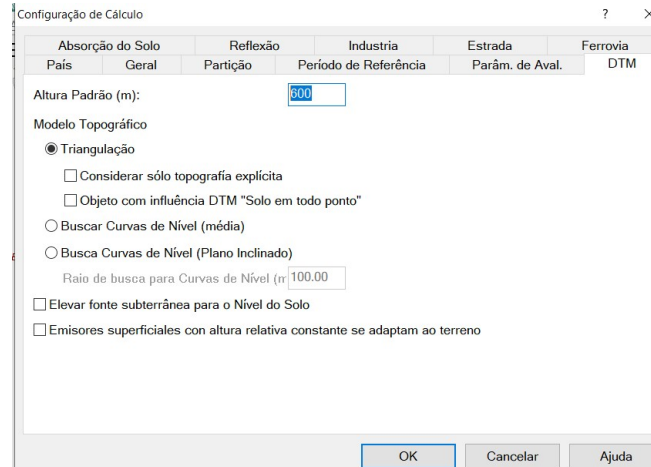


Configurada a área de trabalho do CadnaA, apaga-se a borda da área desenhada clicando na mesma e apertando a tecla ‘Del’ do PC/Notebook. Para verificar como ficou o terreno ativa-se a ferramenta ‘3D’ na barra de comandos do software. Caso surja apenas uma barra vertical verde na tela, deve-se utilizar a seta ‘Page Down (Pg Dn)’ do teclado do PC/Notebook (teclas e nomenclatura podem muda de um equipamento para outro), ajustando o Zoom, e garantindo com isso uma melhor visualização do terreno. Feito isso, a janela ‘CadnaA 3D’ deve ser fechada.

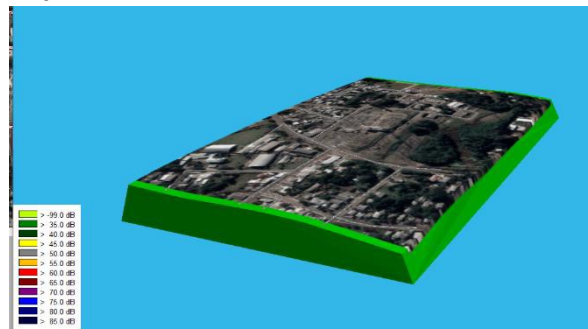




Dando continuidade, deve-se diminuir a altura da base do terreno, para então melhorar a capacidade de processamento do PC/Notebook, pois, haverá redução dos cálculos a serem realizados. Clicar na aba ‘Cálculo’ do menu e em seguida na opção ‘Configuração...’, com isso a janela ‘Configuração de Cálculo’ é aberta. Selecionar a aba ‘DTM’ e ajustar a opção ‘Altura Padrão’ para 600 m (de acordo com dados de referência obtidos em [https://pt.wikipedia.org/wiki/Passo\\_Fundo](https://pt.wikipedia.org/wiki/Passo_Fundo)), confirmando com um ‘OK’.



Após a realização do passo anterior abre-se novamente a ferramenta 3D, confirmando o correto ajuste da ‘Altura Padrão’.

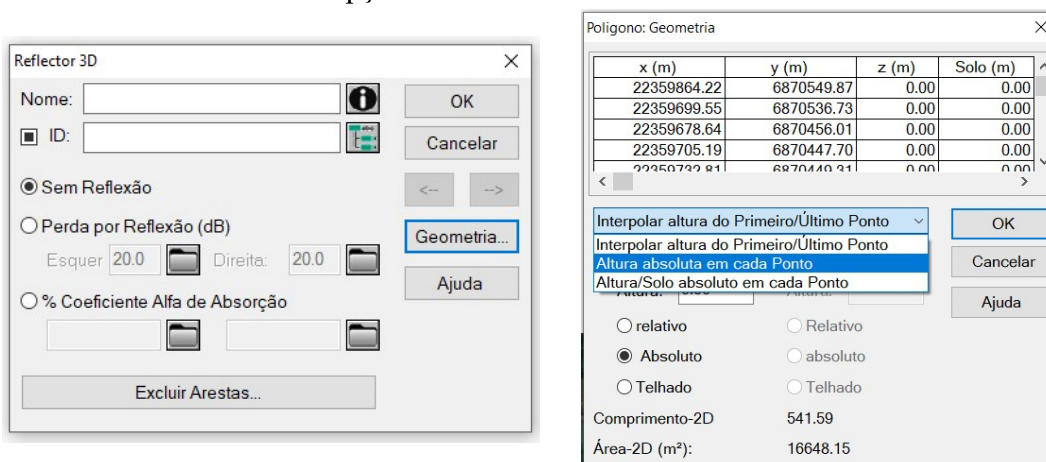


A altura do terreno pode ser definida conforme o local a ser simulado. Transpondo esta etapa, altera-se as configurações do terreno para casos em que existam barrancos, terraplanagens e afins.

Para tal, deve-se utilizar a ferramenta ‘Reflector 3D’, presente na biblioteca do CadnaA, e em seguida desenha-se um polígono com o formato desejado, fechando-o com um clique no botão direito do mouse.



Após a realização do passo anterior, e ativando a ferramenta 'Editar modo', com a seta do mouse se dá um duplo clique na borda do polígono, a fim de alterar a altura do mesmo. A janela 'Reflector 3D' é aberta (à esquerda), e nela deve-se selecionar a opção 'Geometria...'. Feito isso, a janela 'Polígono: Geometria' surge na tela, sendo necessário escolher a opção de altura que melhor se adequa ao modelo em desenvolvimento, ou seja, absoluta. Utiliza-se ainda a opção 'Altura absoluta em cada Ponto'.



Para adicionar o valor de altitude do terreno clica-se 2 vezes na primeira cédula da coluna z (m). Com isso a janela 'Ponto do Polígono' surge na tela e serve para adicionar o valor desejado para a 'Altura abs. Z (m)', de todos os pontos utilizados no desenvolvimento da forma geométrica. Ao abrir tal janela, pode-se observar na tela de desenvolvimento do software, que o primeiro ponto definido na criação do polígono, estará piscando, e neste caso, o mesmo deve ter sua 'Altura abs. Z (m)' ajustada. Ao selecionar a seta, destacada na figura abaixo, desloca-se o sinal piscante para os demais pontos criados no momento da geração do polígono, para os quais deve-se também ajustar o valor da altura. Definiu-se como valor para a 'Altura abs. Z (m)' de todos os pontos 663.00 m, o qual foi verificado a partir de medição prévia no local da subestação.

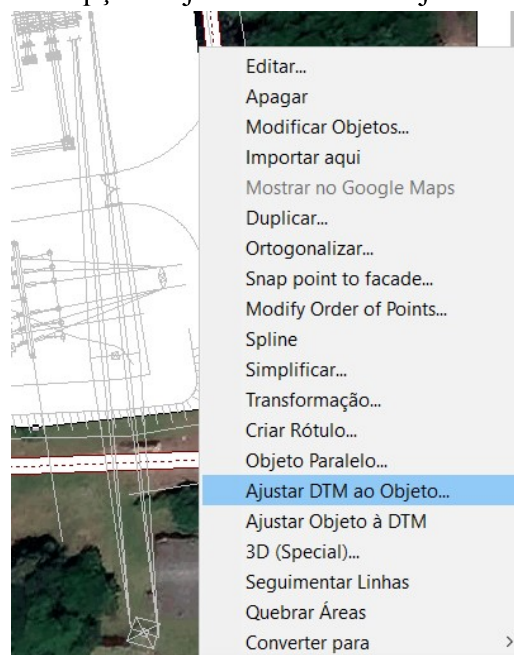


Ponto do Polígono		OK	
Coordenadas		OK	
Abcissa X (m):	22359864.22	Cancelar	
Ordenada Y (m):	6870549.87	<--	-->
Altura abs. Z (m):	663.00	Novo	
Altura do Solo (m):	662.79	Ponto Ref.	
Dist. do primeiro	0.00	Ajuda	

Ao finalizar clica-se em 'OK', para todas as janelas abertas. Para visualizar a efetiva configuração da etapa realizada, utiliza-se a opção '3D', presente na barra de ferramentas superior, ou o atalho ALT+3.



Após conferir a altura, inicia-se a etapa de transformação do polígono criado em terreno propriamente dito. Para isso, clica-se na borda do mesmo e em seguida com o botão direito, seleciona-se a opção 'Ajustar DTM ao Objeto...'



Isso abrirá a janela 'Ajustar DTM ao Objeto', a qual apresenta as configurações para o formato do terreno. A opção 'Espessura/Espessura Adicional (m)' da janela refere-se ao aumento da área ao redor do polígono. Caso o mesmo tenha sido desenhado exatamente na borda do terreno utilize um valor pequeno, porém, existindo uma margem, a mesma pode ser compensada nessa caixa.

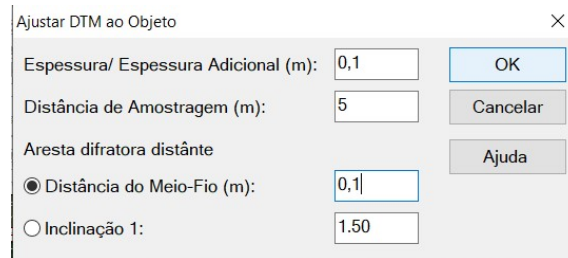
A segunda caixa, 'Distância de Amostragem (m)', trata da qualidade de ligação entre a forma poligonal criada e o terreno. Neste caso para suavizar o contorno, opta-se



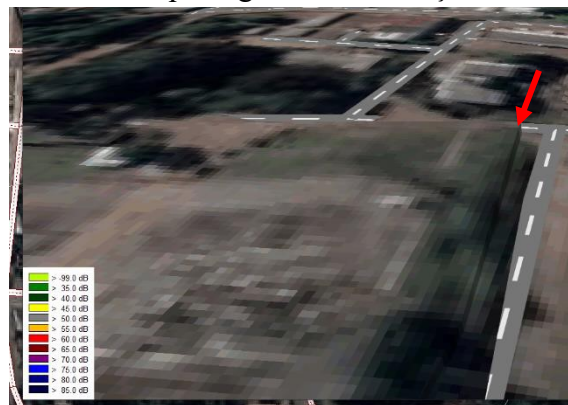
por valores menores, melhorando a resolução. Se as distâncias entre pontos forem longas e retas não é necessário valores pequenos, mesmo assim a quantidade de cálculos presente na simulação é reduzida.

O item ‘Aresta difratora distante’ permite a escolha entre as opções ‘Distância do Meio-Fio (m)’ e ‘Inclinação 1’. As mesmas indicam, respectivamente, a distância entre a base e o topo do terreno e um possível degrau.

Os valores utilizados para configurar esta etapa são apresentados na figura abaixo. Após a digitalização dos mesmos, clica-se em ‘OK’.



Ao clicar em OK o terreno será ajustado e poderá então ser visualizado a partir da seleção da ferramenta ‘3D’, presente na barra superior do software, abaixo das abas do menu. A figura que segue, mostra um pequeno degrau, indicado por uma seta na cor vermelha, o qual representa a terraplanagem da subestação.

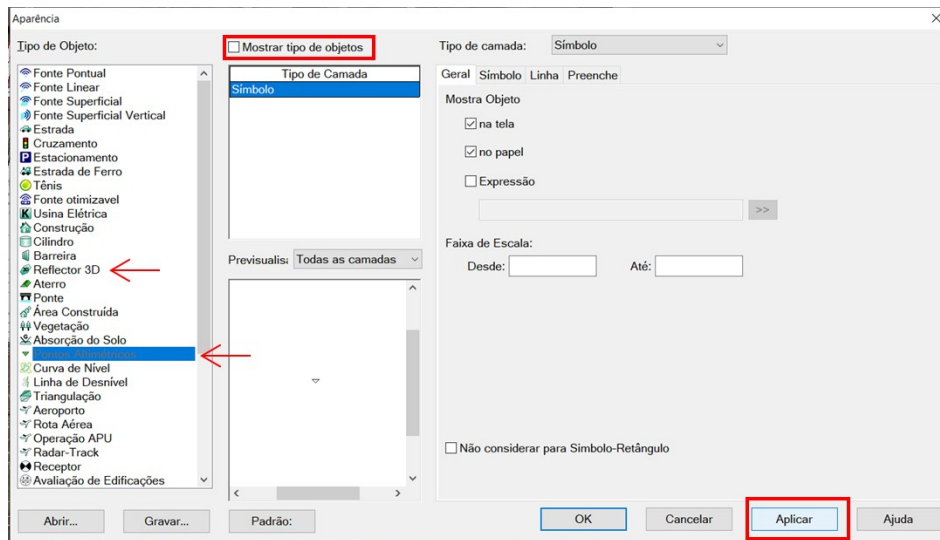


Para melhorar a visualização é possível tornar invisível o polígono, desenhado a partir da utilização da ferramenta ‘Reflector 3D’, e também os pontos altimétricos. Para isso clica-se na aba ‘Opções’ do menu e depois na opção ‘Aparência...’.





Na janela ‘Aparência’ seleciona-se ‘Pontos Altimétricos’ e desmarca-se a opção ‘Mostrar tipos de objetos’. Repete-se o passo para ‘Reflector 3D’. Após, clica-se em ‘Aplicar’ e ‘OK’.



Com isso finaliza-se a etapa de ajuste do terreno, restando para a sequência do trabalho, inserir os obstáculos mais importantes, os quais farão parte do modelo, e executar a simulação.

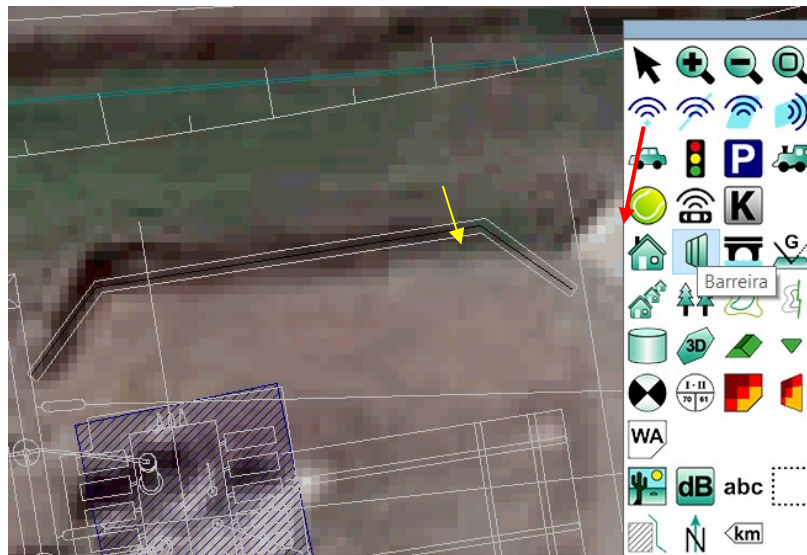
### 3.5. CONFIGURAR OBSTÁCULOS

A presente seção trata da configuração dos obstáculos existentes no ambiente a ser simulado ou daqueles que formarão um cenário futuro. Aqui a percepção do profissional é fundamental, pois, o excesso de obstáculos, principalmente dos que possuem pequenas dimensões, dificultará o processamento do modelo e não gerará influência significativa no resultado final da simulação acústica. Para o caso da subestação analisada, não serão contabilizadas as estruturas de seccionadores e outras de tamanhos menores, pois, exercem pouca influência. Somente estruturas grandes e sólidas serão criadas.

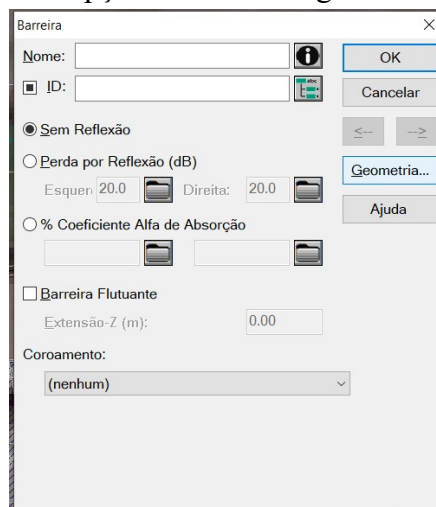
Para o posicionamento das mesmas, as quais não foram importadas pelo OpenStreetMap, usa-se a imagem do Bitmap, e como desvios pequenos não influenciam drasticamente na simulação, a construção será feita a partir de simples observação visual.

Primeiro insere-se a barreira presente no interior da subestação (a posição da mesma é indicada na figura abaixo pela seta vermelha), encontrada junto aos transformadores próximos a esquina entre as avenidas João Catapan e Pedro Luizetto. Para isso seleciona-se ‘Barreira’ na biblioteca de ferramentas do software, desenhando-a na sequência. Após a inserção do último ponto clica-se no botão direito do mouse para confirmar o desenho. A mesma pode ser vista como uma linha sólida na cor preta, indicada pela seta de cor amarela.





Após a realização do passo anterior e ativando a opção 'Editar modo', deve-se dar um duplo clique sobre a linha que representa a barreira. A janela 'Barreira' é então aberta e deve ser utilizada para configurá-la. Define-se se a mesma não reflete ('Sem Reflexão'), se existe 'Perda por Reflexão (dB)' ou se há '% Coeficiente Alfa de Absorção'. Ainda é possível indicar se a barreira é flutuante ('Barreira Flutuante') ou se possui 'Coroamento'. A imagem abaixo indica como tais opções foram configuradas.



Clicando na opção 'Geometria ...', a janela 'Polígono: Geometria' é aberta. Nela é possível definir a altura da barreira, selecionando a opção 'Interpolar altura do Primeiro/Último Ponto' e digitalizando na sequência o seu valor ('Primeiro Ponto' → 'Altura'). Confirma-se a configuração em 'OK' nesta janela e novamente na janela 'Barreira', fechando-as na sequência. Para que os valores presentes nas colunas 'z (m)' e 'Solo (m)' apareçam é necessário salvar o arquivo .cna ('Arquivo' → 'Gravar') e reabrir as janelas indicadas aqui neste parágrafo. A imagem abaixo ilustra como os dados devem aparecer.



Polígono: Geometria

x (m)	y (m)	z (m)	Solo (m)
22359735.57	6870531.37	670.30	666.30
22359737.55	6870534.06	670.32	666.32
22359749.26	6870535.97	670.04	666.04
22359752.03	6870533.99	669.92	665.92

Interpolat altura do Primeiro/Último Ponto

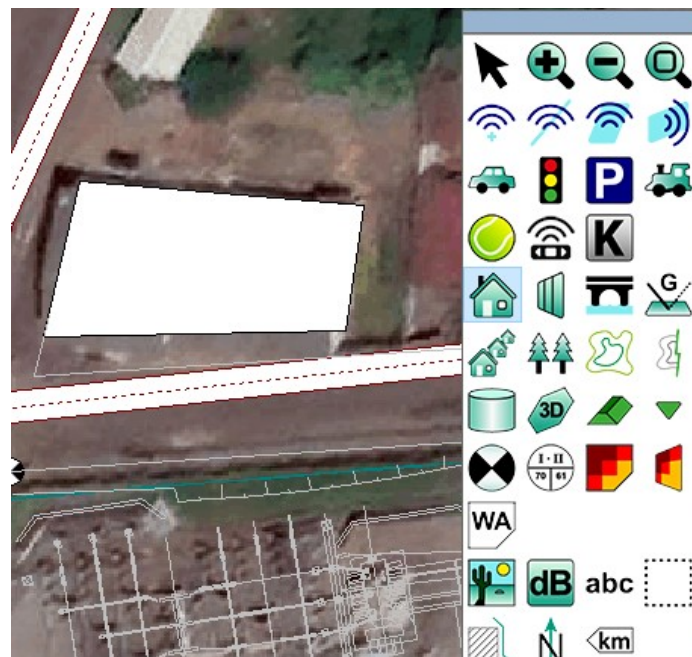
Primeiro Ponto:  Extremidade:  Altura:

relativo  Relativo  
 Absoluto  absoluto  
 Telhado  Telhado

Comprimento-2D: 18.61  
Área-2D (m<sup>2</sup>): 33.81

OK Cancelar Ajuda

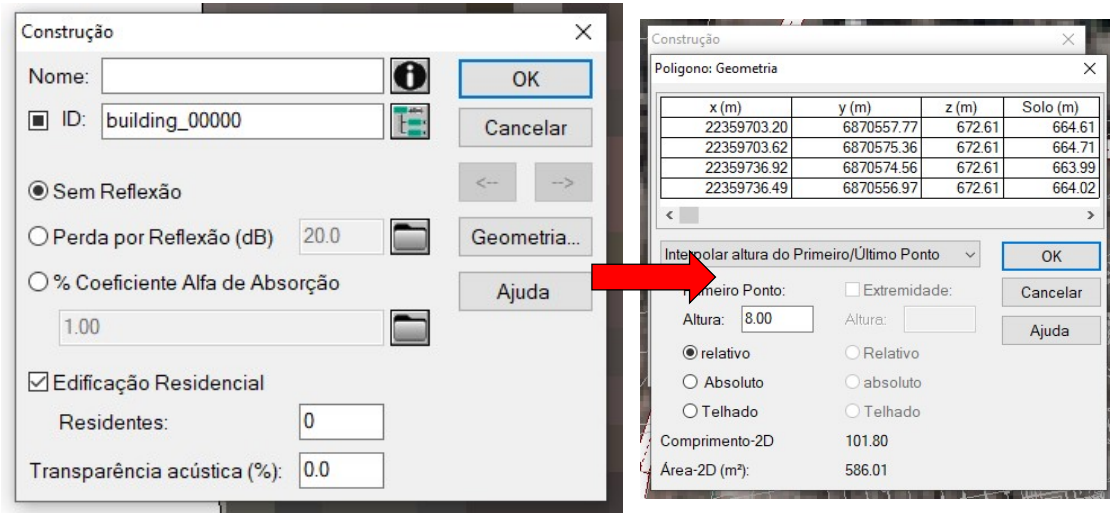
Para a inserção de construções diversas existem diferentes procedimentos. O primeiro método possui precisão menor, sendo executado ao ativar a opção ‘Construção’, presente na biblioteca de ferramentas do CadnaA. Feito isso, clica-se nos cantos da obra e ao final da definição do contorno da mesma, aciona-se o botão direito do mouse para finalizar o passo.



Ativando a opção ‘Editar modo’ e dando um duplo clique na borda da residência, abre-se a janela ‘Construção’ (imagem abaixo, à esquerda, contendo a configuração a ser definida). Para ajustar à altura clica-se na opção ‘Geometria...’, abrindo a janela ‘Polígono: Geometria’ (imagem abaixo, posicionada à direita), na qual digitaliza-se o

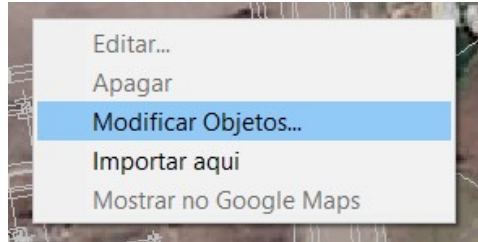


valor (8.00) na cédula 'Altura'. As demais informações de configuração são indicadas na mesma janela. Finalizando, clica-se em 'OK' nas duas janelas que se apresentam abertas.

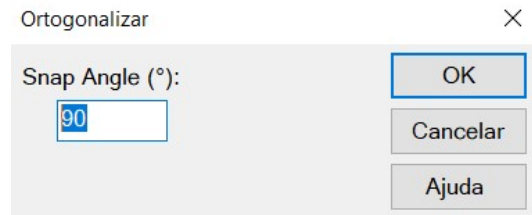
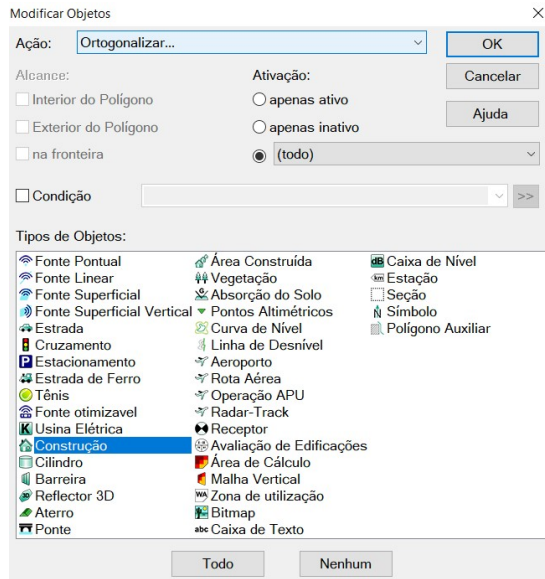


A altura definida para a primeira construção permanece salva na cédula 'Altura' para as demais configurações. Neste caso, para alterá-la deve-se repetir os passos indicados acima.

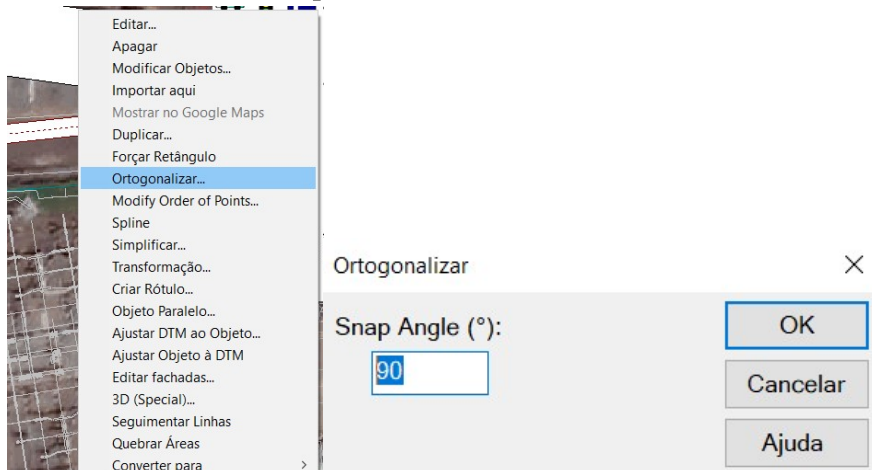
Para ortogonalizar as construções configuradas, existem 2 formas, as quais possibilitam, ou ajustar individualmente as obras ou todas conjuntamente. Para definir o conjunto, clica-se com o botão direito do mouse na área de trabalho do software e em seguida ativa-se a opção 'Modificar Objetos'.



Na sequência, seleciona-se em 'Ação' (janela 'Modificar Objetos') a opção 'Ortogonalizar...', marcando em 'Tipos de Objetos' o item 'Construção' e clicando em 'OK'. Depois disso digitaliza-se o valor do ângulo, geralmente 90°, na janela 'Ortogonalizar', clicando em 'OK' e 'Todo' (janela 'Alterar Objetos') para finalizar o passo.



Para ortogonalizar apenas uma estrutura por vez, clica-se na borda do desenho e após no botão direito do mouse, selecionando na sequência a opção ‘Ortogonalizar...’. A janela ‘Ortogonalizar’ é aberta e no item ‘Snap Angle (°)’ digitaliza-se o valor do ângulo e clica-se em ‘OK’, finalizando o passo.



Outra forma de desenhar as construções, principalmente em situações onde se conhece as dimensões dos empreendimentos, utiliza também a ferramenta ‘Construção’, da biblioteca do CadnaA, e assim como no método anterior, deve-se clicar em um dos cantos da construção para iniciar o processo, dando sequência na definição das dimensões utilizando o teclado numérico do PC/Notebook. Os valores para ‘X(m)’ e ‘Y(m)’ devem ser digitalizados via teclado, e encontram-se configurados com a unidade ‘metros - m’. A imagem abaixo, da janela ‘Entrada de Ponto’, ilustra a configuração de um ponto digitalizado e as outras configurações pertinentes a esta etapa.



Entrada de Ponto

Coordenadas

X (m):

Y (m):

Relativo  Polar

OK

Cancelar

Ajuda

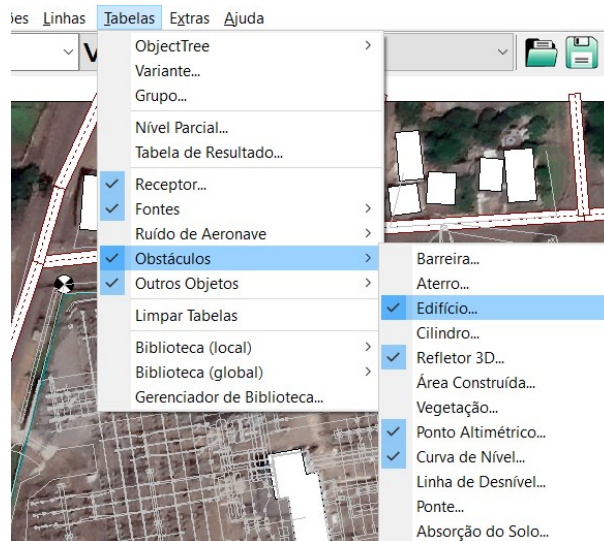
Caso alguma das construções fique fora de posição ou com a rotação errada, utilizando a seta do mouse, seleciona-se a borda do desenho e após clica-se novamente na mesma, mantendo-se o botão pressionado e arrastando o objeto até o local desejado. Para rotacionar segue-se o mesmo processo, porém, deve-se pressionar a tecla 'ALT'. Ressalta-se que se deve evitar o clique sobre os pontos que formam a geometria do desenho.

A escolha do melhor método é critério do profissional que desenvolverá o modelo a ser simulado, o qual deve atender suas necessidades. Em relação a criação das construções, as mesmas também são definidas de acordo com convicções e expertise do criador. No caso da subestação Santa Marta, a configuração criada ficou conforme as imagens abaixo.





No caso de alguma construção ficar sem a configuração de altura, é possível editá-la nas tabelas de construção. Para acessar a opção deve-se selecionar na aba ‘Tabelas’, do menu, ‘Obstáculos’ e após, ‘Edifício...’. Feito isso surge na tela a janela ‘Construção’, na qual pode-se realizar os devidos ajustes, utilizando a coluna ‘Altura’ da tabela.



Finaliza-se assim o capítulo 2 ‘Modelo’ e suas respectivas seções. Podem haver diferenças entre os vários modelos criados a partir deste material, porém, as mesmas não devem impedir a correta simulação.

#### 4. FONTES SONORAS

Neste capítulo insere-se as fontes sonoras existentes no ambiente a ser simulado. No caso da subestação, as fontes sonoras mais relevantes são os transformadores, que geram um ruído bem superior há outras que podem existir (estradas, cruzamentos, etc.). Assim sendo, não é necessário configurar as fontes sonoras secundárias.

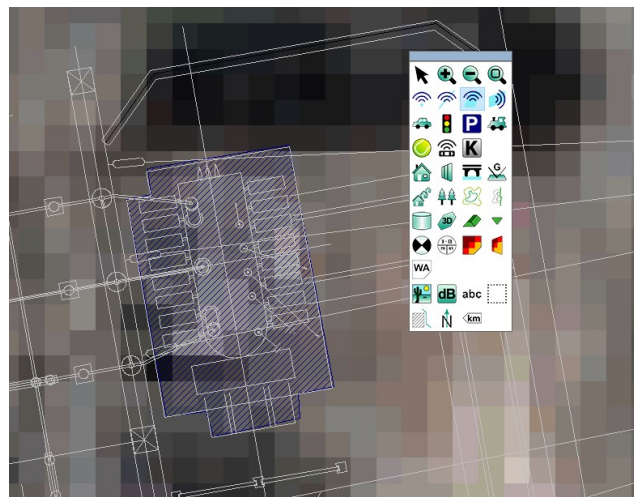


#### 4.1. INSERIR OBJETO SONORO

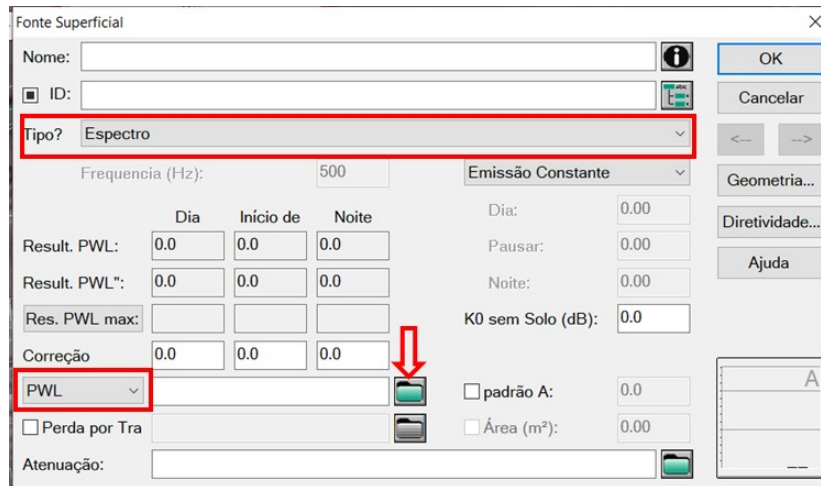
Como o transformador é um objeto de grandes dimensões o mesmo não pode ser considerado uma fonte pontual, por isso deve-se construí-lo junto ao modelo como um bloco emissor de som. Para isso seleciona-se a ferramenta ‘Fonte Superficial’, presente na biblioteca do software e ilustrada na figura abaixo.



Após ativar a ferramenta, deve-se desenhar a área vinculada à vista superior do transformador, definindo assim suas respectivas dimensões. A criação do desenho segue os mesmos critérios utilizados para o desenvolvimento das construções. Após concluir este passo, verifica-se o surgimento de uma área hachurada na cor azul, como ilustra a figura abaixo.



Ativa-se na sequência ‘Editar modo’, selecionando a borda da área desenhada com a seta do mouse. A janela ‘Fonte Superficial’ é então aberta com um duplo clique. A janela em questão, apresentada abaixo, é utilizada para configurar a fonte sonora.



Existem diversas opções para configurar as fontes sonoras. No primeiro retângulo vermelho, indicado na imagem acima, é possível selecionar o ‘Tipo’ de som emitido pela fonte de ruído a ser configurada. Para este trabalho seleciona-se a opção ‘Espectro’. Isso se deve ao fato de medições terem sido realizadas na prática, obtendo-se com isso o espectro sonoro gerado por cada um dos transformadores presentes na subestação, garantindo a possibilidade de inserir tais dados na simulação.

Na segunda caixa marcada em vermelho seleciona-se a opção ‘PWL’, oferecendo a possibilidade de indicar a pressão sonora total da área criada. Caso seja feito um levantamento mais preciso desse valor, pode-se optar por ‘PWL”’, referente ao nível de ruído gerado por metro quadrado.

Para inserir um espectro sonoro e vinculá-lo a alguma fonte de ruído, clica-se na pasta indicada pela seta vermelha da figura acima. A janela ‘Níveis Sonoros (local)’ é aberta, possibilitando a criação da tabela de tal espectro, como ilustra a imagem abaixo. No interior da mesma clica-se com o botão direito do mouse, selecionando na sequência a opção ‘Inserir depois’. Com isso, uma linha será inserida na tabela com o intuito de configurar o espectro.



Após inserir tal linha, com um duplo clique em uma das cédulas, abre-se a janela ‘Espectro’, a qual permite configurar o mesmo.





Espectro

ID: transformador\_1

Nome:

Fonte:

Tipo: Lw do Lp + distância + partição esférica

Espectro: Linear Tot-A: 96.3 Tot-Lin: 108.6

Espectro bandas de 1/3 de oitavas

25	50	100	200	400	800	1600	3150	6300
56.4	56.8	77.3	66.3	71.5	69.6	67.9	63.7	53.8
31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
54.1	58.3	94.1	79.2	77.1	70.6	67.3	61.4	50.6
40	80	160	315	630	1250	2500	5000	10000
54.9	55.8	71.7	72.5	71.3	68.4	66.3	57.6	50.3

Distância (m): 2.00

Parte da Esfera 50.0

OK Cancelar Novo Ajuda

No retângulo 1 'ID', em vermelho, insere-se o nome do espectro do transformador. Este nome é utilizado posteriormente para vincular o mesmo ao respectivo objeto sonoro.

No retângulo 2 'Tipo', seleciona-se a opção mostrada, pois, a mesma indica a potência sonora medida a uma certa distância do transformador e a partição de esfera, que representa a direção do som.

No retângulo 3, marca-se a opção 'Espectro bandas de 1/3 de oitavas', já que observou-se a partir de diversos trabalhos científicos que os transformadores emitem som tonal, e neste caso, a norma ABNT NBR 10151 obriga realizar o monitoramento sonoro dos mesmos a partir da medição de bandas de 1/3 de oitava.

O quadro 4 mostra as caixas onde devem ser digitalizados os valores das pressões sonoras, relativas as várias frequências do espectro de ruído. Os valores presentes correspondem aos medidos na prática para um dos seis transformadores existentes na subestação Santa Marta.

No quadro 5 insere-se o valor da distância entre o microfone e o transformador, utilizada no momento da medição. Cabe ressaltar que o valor indicado na figura acima corresponde ao exigido pela norma ABNT NBR 10151.

No quadro 6 indica-se que a área desenhada emite som em apenas uma direção (o valor 50 é percentual (%) e quando digitalizado informa o anteriormente descrito). Isso porque será construído todo o bloco do transformador, e assim, o som de um lado do equipamento, não interfere naqueles emitidos pelos outros lados.



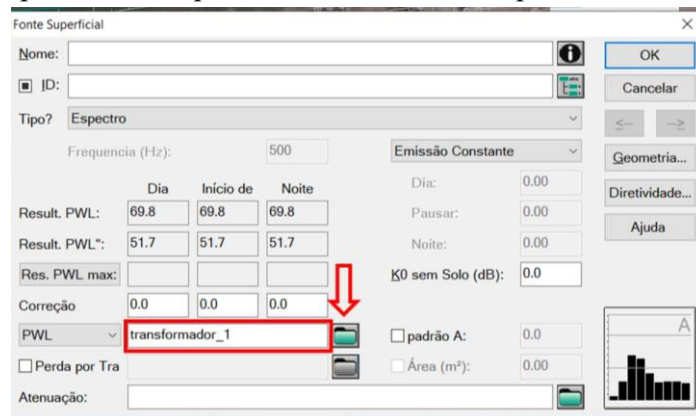
Após inserir os dados apresentados na figura acima clica-se em ‘OK’ para finalizar a etapa. Com o primeiro espectro definido, repete-se os passos para aqueles vinculados aos outros transformadores existentes na subestação. A imagem abaixo mostra como fica a tabela de espectros para a presente simulação (Observação: para facilitar a criação do modelo, inserir valores aleatórios para os espectros dos 5 transformadores restantes).

Níveis Sonoros (local)

Nome	ID	Tipo	Espectro de Oitava (dB)											Fonte	
			Ponderar.	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	A	lin	
transformador_1		Lw (c)		44.0	55.0	83.0	72.0	35.0	23.0	23.0	23.0	23.0	70.2	84.8	
transformador_2		Lw (c)		41.6	52.6	80.6	69.6	32.6	20.6	20.6	20.6	20.6	71.3	85.7	
transformador_3		Lw (c)		47.8	58.8	86.8	75.8	38.8	26.8	26.8	26.8	26.8	74.0	88.6	
transformador_4		Lw (c)		45.4	56.4	84.4	73.4	36.4	24.4	24.4	24.4	24.4	71.6	86.2	
transformador_5		Lw (c)		44.0	55.0	83.0	72.0	35.0	23.0	23.0	23.0	23.0	70.2	84.8	
transformador_6		Lw (c)		40.6	51.6	79.6	68.6	31.6	19.6	19.6	19.6	19.6	66.8	81.4	

Com os espectros de todos os transformadores criados, pode-se finalizar os desenhos das áreas dos demais, as quais posteriormente serão transformadas em blocos sonoros.

Caso a janela ‘Fonte Superficial’ tenha sido fechada, com um duplo clique na borda da área desenhada para o primeiro transformador, abre-se a mesma novamente. Seleciona-se então a pasta ao lado da opção ‘PWL’, como indicado na figura abaixo. Feito isso, a lista de espectros criada anteriormente é aberta. Nela, seleciona-se com um clique a linha vinculada ao transformador analisado e após finaliza-se o passo dando um ‘OK’. Neste caso, tal espectro aparecerá ao lado da pasta na janela ‘Fonte Superficial’ e será vinculado ao equipamento em questão no momento em que novo ‘OK’ for dado.



A partir daqui deve-se ajustar a altura dos transformadores. Para isso, ativa-se ‘Editar modo’, seleciona-se a borda do transformador que terá sua altura ajustada e com um duplo clique abre-se a janela ‘Fonte Superficial’. Com esta janela aberta, seleciona-se a direita da mesma, a opção ‘Geometria..’. Selecionando tal opção, abre-se a janela ‘Polígono: Geometria’ e nela define-se a opção ‘Interpolador altura do Primeiro/Último Ponto’, marca-se a caixa ‘relativo’ e digitaliza-se o valor da altura na caixa correspondente, assim como mostrado abaixo. Para finalizar clica-se em ‘OK’ nas janelas que se encontram abertas, até retornar ao ambiente de desenvolvimento.



Polígono: Geometria

x (m)	y (m)	z (m)	Solo (m)
22359736.94	6870529.89	0.00	0.00
22359738.96	6870520.15	0.00	0.00
22359745.14	6870521.10	0.00	0.00
22359743.00	6870531.43	0.00	0.00

< >

Interpolar altura do Primeiro/Último Ponto

Primeiro Ponto:  Extremidade:

Altura:  Altura:

relativo  Relativo

Absoluto  absoluto

Telhado  Telhado

Comprimento-2D: 32.99

Área-2D (m<sup>2</sup>): 63.95

OK Cancelar Ajuda

Para os demais transformadores seguem-se os mesmos passos. Antes de dar sequência, configura-se os 5 equipamentos restantes, todos com uma altura de 4 m.

Após transpor a etapa anterior é necessário ortogonalizar as superfícies dos transformadores já citados. Para isso, clica-se com o botão direito do mouse na área de trabalho e após em 'Modificar Objetos...'. Ao abrir a janela 'Modificar Objetos', seleciona-se a ação desejada, 'Ortogonalizar...', marca-se 'Fonte Superficial' em 'Tipos de Objetos' e clica-se em 'OK'. Ao surgir na tela a janela 'Ortogonalizar', digitaliza-se o valor para a caixa 'Snap Angle (°)', 90, finalizando com 'OK' e 'Todo', na janela 'Alterar Objetos'.

Modificar Objetos

Ação:

Alcance:  Interior do Polígono  Exterior do Polígono  na fronteira

Ativação:  apenas ativo  apenas inativo  (todo)

Condição  >>

Tipos de Objetos:

- Fonte Pontual
- Fonte Linear
- Fonte Superficial**
- Fonte Superficial Vertical
- Estrada
- Cruzamento
- Estacionamento
- Estrada de Ferro
- Tênis
- Fonte otimizável
- Usina Elétrica
- Construção
- Cilindro
- Barreira
- Reflector 3D
- Aterro
- Ponte
- Área Construída
- Vegetação
- Absorção do Solo
- Pontos Altimétricos
- Curva de Nível
- Linha de Desnível
- Aeroporto
- Rota Aérea
- Operação APU
- Radar-Track
- Receptor
- Avaliação de Edificações
- Área de Cálculo
- Malha Vertical
- Zona de utilização
- Bitmap
- Caixa de Texto
- Caixa de Nível
- Estação
- Seção
- Símbolo
- Polígono Auxiliar

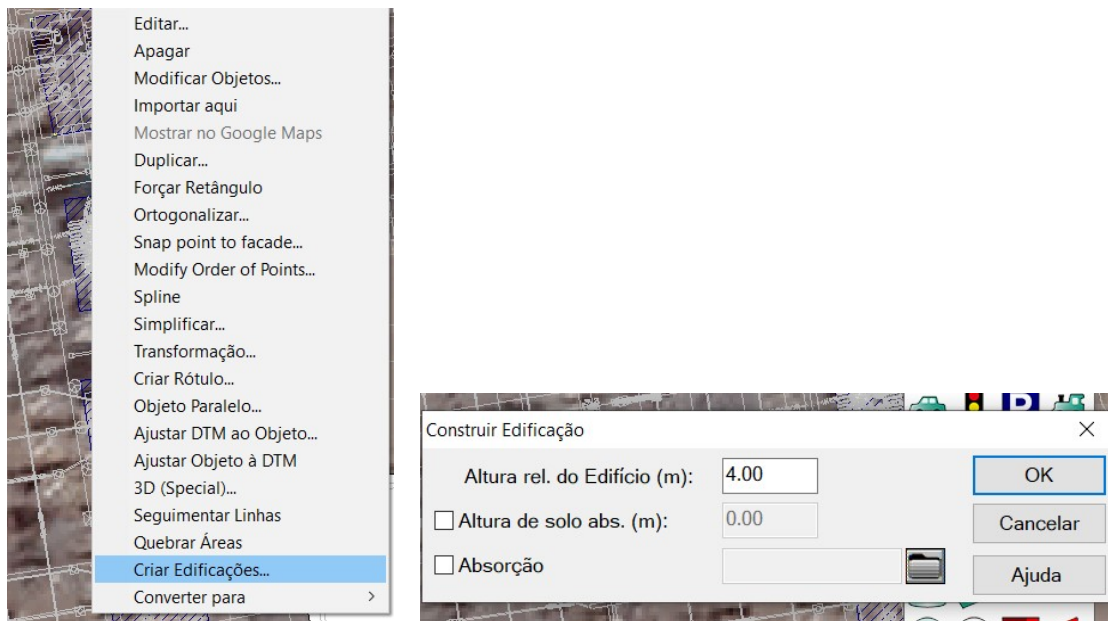
Todo Nenhum



## 4.2. GERAR BLOCOS

Nessa etapa geram-se os blocos sonoros a partir das áreas superficiais criadas na seção 3.1, com isso os mesmos irão emitir som em todas as direções, representando com mais fidelidade o cenário real, encontrado na subestação.

Para isso, ativa-se 'Editar modo' e clica-se com o botão direito do mouse nas bordas das áreas criadas anteriormente para os transformadores, selecionando na sequência a opção 'Criar Edificações...'. Com a janela 'Construir Edificação' aberta, digitaliza-se o valor do campo 'Altura rel. do Edifício (m)' e finaliza-se dando 'OK'. Repete-se esses passos para todos os transformadores existentes na subestação.



Para a simulação em desenvolvimento, associada a subestação Santa Marta, o modelo acústico, criado até aqui, fica conforme mostra a imagem abaixo. Os blocos de cor azul representam os transformadores, os quais diferem-se das residências, configuradas anteriormente, sendo esta, a forma do CadnaA demonstrar que trata-se de uma superfície emissora de som.





Com os transformadores já inseridos e os blocos gerados, finaliza-se na sequência a configuração dos espectros dos mesmos, iniciada na seção 3.1.

### 4.3. CONFIGURAR ESPECTROS

Nesta seção indica-se como os espectros ficaram distribuídos após os passos da etapa anterior (3.2), sendo possível ajustá-los para que se aproximem daqueles existentes no cenário real.

Seleciona-se inicialmente a aba ‘Tabelas’, do menu. Depois disso, encontra-se a opção ‘Fontes’ e por último clica-se em ‘Fonte Superficial Vertical...’. Com a janela ‘Fonte Superficial Vertical’ aberta, observa-se então as superfícies laterais existentes em cada um dos transformadores, junto de seus respectivos espectros. Ao selecionarmos qualquer linha desta janela, é possível visualizar na área de trabalho bidimensional à qual superfície a mesma corresponde, já que dois pontos surgem em seus vértices, como mostram as setas na imagem abaixo.

Fonte Superficial Vertical						
		Fechar	Editar...	Sincr. Gráfico		
Nome	M.	ID	Resultados PWL			
			Dia	Início de Noite:		Noite
			(dBA)	(dBA)		(dBA)
			69.8	69.8	69.8	69.8
			69.8	69.8	69.8	69.8
			69.8	69.8	69.8	69.8
			69.8	69.8	69.8	69.8
			70.9	70.9	70.9	70.9
			70.9	70.9	70.9	70.9
			70.9	70.9	70.9	70.9
			70.9	70.9	70.9	70.9
			73.6	73.6	73.6	73.6
			73.6	73.6	73.6	73.6
			73.6	73.6	73.6	73.6
			73.6	73.6	73.6	73.6
			71.2	71.2	71.2	71.2
			71.2	71.2	71.2	71.2
			71.2	71.2	71.2	71.2
			71.2	71.2	71.2	71.2
			69.8	69.8	69.8	69.8
			69.8	69.8	69.8	69.8
			69.8	69.8	69.8	69.8
			69.8	69.8	69.8	69.8
			66.4	66.4	66.4	66.4
			66.4	66.4	66.4	66.4

Caso exista a necessidade de ajustar os valores de pressão sonora, para alguma superfície lateral em específico, com um duplo clique na linha correspondente a mesma, abre-se a janela ‘Fonte Superficial Vertical’ (segunda figura apresentada abaixo). Nas caixas vinculadas a opção ‘Correção’, soma-se ou diminui algum valor do nível de ruído já cadastrado e com isso, caso uma das direções esteja com valores diferentes dos reais



(mensurados na prática utilizando sonômetro), pode-se ajustá-los, sem que seja necessário modificar todo o espectro.

Para esse exemplo foram reduzidos em 5 dB os valores emitidos pela superfície lateral selecionada na primeira figura apresentada abaixo.

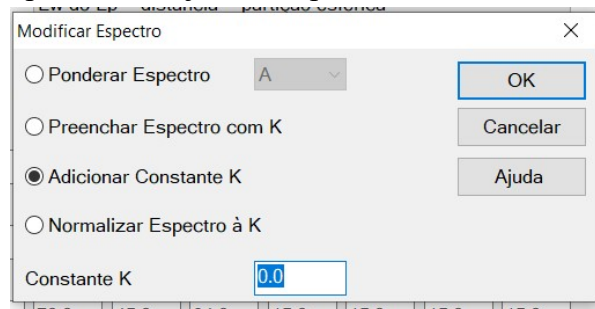
Fonte Superficial Vertical

Nome	M.	ID	Resultados PWL			Resultados PWL"			Lw / Li		Correção			Redução do Som		Atenuação		Tempo d	
			Dia (dBA)	Início de Noite (dBA)	Noite (dBA)	Dia (dBA)	Início de Noite (dBA)	Noite (dBA)	Tipo	Valor	norm. dB(A)	Dia dB(A)	Início de Noite dB(A)	Noite dB(A)	R	Área (m²)	Dia (min)	Es (s)	
			69.8	69.8	69.8	55.7	55.7	55.7	Lw	transformador_1		0.0	0.0	0.0					
			69.8	69.8	69.8	53.7	53.7	53.7	Lw	transformador_1		0.0	0.0	0.0					
			69.8	69.8	69.8	55.7	55.7	55.7	Lw	transformador_1		0.0	0.0	0.0					
			64.8	64.8	64.8	48.7	48.7	48.7	Lw	transformador_1		-5.0	-5.0	-5.0					

Para uma situação em que todos os níveis de ruído diferem daqueles reais (mensurados na prática), é possível alterar o espectro de forma rápida usando o ícone de calculadora, como mostrado na figura abaixo. Para acessar tal ferramenta, inicialmente ativa-se 'Editar modo' e seleciona-se a borda do transformador que deverá ter seus níveis de ruído ajustados. Feito isso, com um duplo clique na mesma borda, abre-se a janela 'Fonte Superficial Vertical', como ilustrado na figura acima, selecionando então a pasta na cor verde, associada a opção 'PWL'. A janela 'Níveis Sonoros' surgirá na tela, sendo possível, dando um duplo clique na linha que representa o espectro de interesse, abrir a janela 'Espectro', apresentada abaixo.



Na janela ‘Espectro’, clica-se no ícone de calculadora, abrindo assim a janela ‘Modificar Espectro’, ilustrada na figura abaixo. Seleciona-se então ‘Adicionar Constante K’ e digitaliza-se algum valor para a mesma, clicando-se em ‘OK’ para finalizar a etapa. Dessa forma todo o espectro será ajustado a partir da constante K.



## 5. ANÁLISES

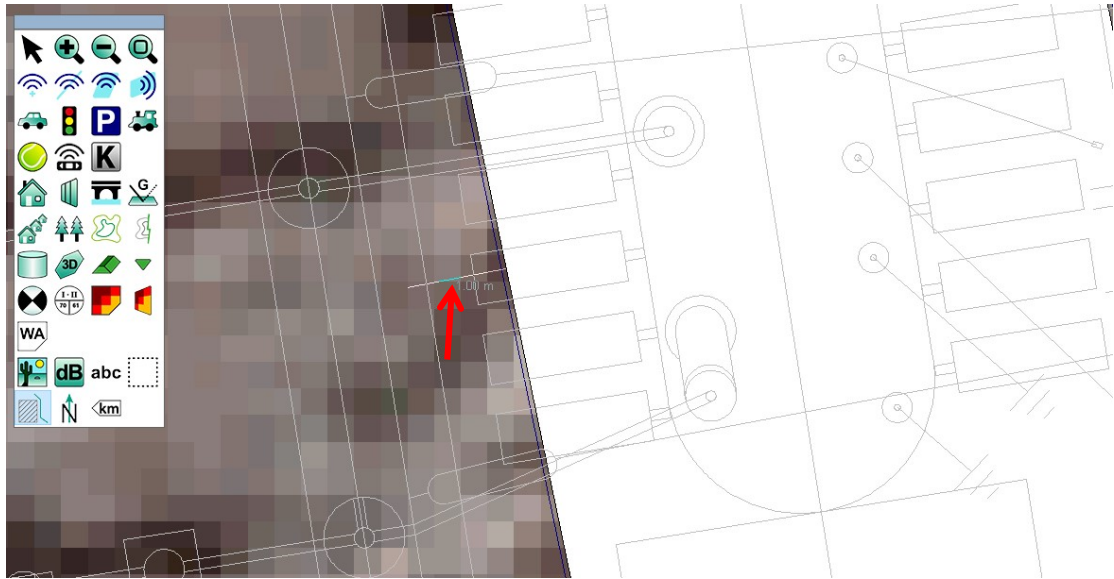
Nesta etapa serão adicionados receptores e rótulos, além de configurar as diferentes variantes para os cálculos, tornando possível a verificação numérica dos níveis sonoros.

### 5.1. INSERIR RECEPTORES

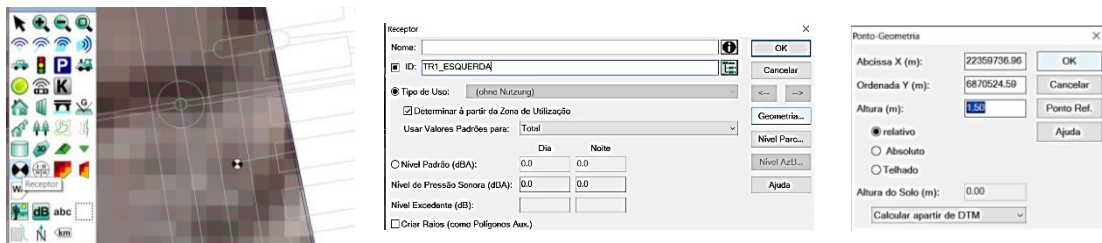
Os receptores são utilizados com o intuito de observar o comportamento do ruído (dB) gerado pelas fontes sonoras vinculadas ao modelo, e podem ser posicionados em qualquer local, de acordo com o interesse do profissional. Ao serem inseridos no modelo, registrarão os valores de pressão sonora, os quais são observados via tabela de receptores ou em caixas de texto que também podem ser inseridas.

Inicialmente serão introduzidos receptores próximos aos transformadores, possibilitando verificar se os valores adotados para o espectro refletem os níveis de ruído mensurados na prática. Caso o cenário real não seja observado, pode-se ajustar novamente os espectros sonoros dos transformadores, conforme os passos indicados na seção 3.3.

Supondo que as medições foram realizadas à 1 m de distância de cada face do transformador e também que o sonômetro foi posicionado na parte central de cada lateral, seleciona-se a ferramenta ‘Polígono Auxiliar’, na biblioteca de ferramentas do software, para então, a partir dela, melhor definir o ponto em que o receptor deve ser fixado. Sendo assim, com a ferramenta ativada, clica-se na borda da lateral do transformador, preferencialmente na região central, e mede-se 1 m a partir dela, encontrando com isso o ponto no qual o receptor será posicionado. Utiliza-se o botão direito do mouse para confirmar o procedimento. Após a inserção dos receptores, todas as linhas criadas podem ser apagadas.



Após a definição da posição insere-se o receptor. Para isso seleciona-se a ferramenta 'Receptor' na biblioteca do software. Para configurá-lo, ativa-se 'Editar modo', clica-se duas vezes na sua borda e insere-se primeiramente o nome desejado, em 'ID', junto a janela 'Receptor'. Ainda, seleciona-se 'Geometria...', para definir a sua altura na janela 'Ponto-Geometria'. O valor a ser digitalizado nesse caso é de 1.5 m, conforme especificado na norma ABNT NBR 10151. Repita este passo para as laterais de todos os transformadores. As imagens abaixo ilustram o que foi descrito neste parágrafo.



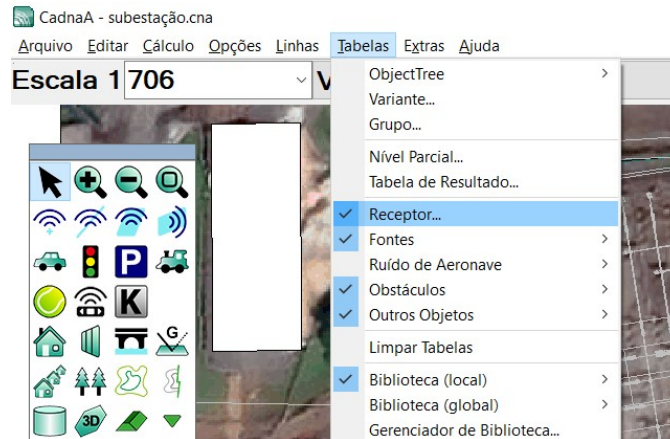
Ao finalizar a inserção e a configuração de todos os receptores, o modelo a ser simulado se aproximará do apresentado na figura abaixo.







Para ver os níveis sonoros de cada um dos receptores criados, existem 2 métodos, como citado anteriormente. Um deles requer a inserção de caixas de texto na área de simulação e o outro possibilita a visualização através de uma tabela de receptores. Para visualizar a tabela, seleciona-se a aba ‘Tabelas’, do menu, e após clica-se em ‘Receptor’.



Com isso, será aberta a tabela ‘Receptor’, a qual contém informações como o nível sonoro, coordenadas, altura e identificação dos receptores adicionados ao modelo. A figura abaixo mostra tal tabela.

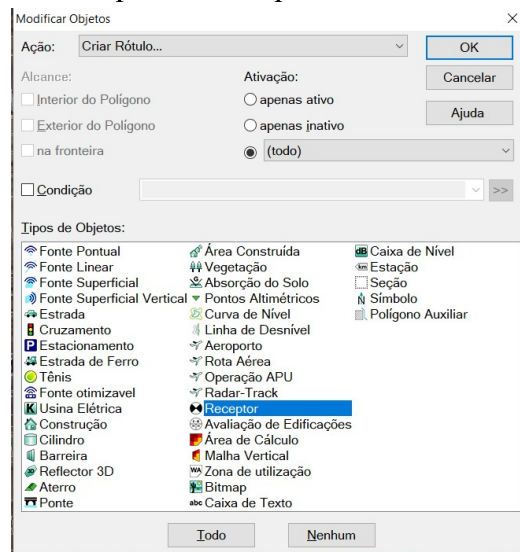
Receptor												
Fechar	Editar...	Sincr. Gráfico	Copiar...	Imprimir...	Fonte...	Ajuda	Pesquisar			Limpar		
Nome M.	ID	Nível Lr				Tipo de Uso	Altura	Coordenadas				
		Diã	Noite	Diã	Noite			X	Y	Z	(m)	(m)
		(dBA)	(dBA)	(dBA)	(dBA)		(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
	TR1_ESQUERDA	0.0	0.0	0.0	0.0	x	Total	1.50	r22359736.96	6870524.59	0.00	
	TR1_CIMA	0.0	0.0	0.0	0.0	x	Total	1.50	r22359739.62	6870531.49	0.00	
	TR1_DIREITA	0.0	0.0	0.0	0.0	x	Total	1.50	r22359745.17	6870526.05	0.00	
	TR1_TR2	0.0	0.0	0.0	0.0	x	Total	1.50	r22359742.39	6870518.06	0.00	
	TR2_ESQUERDA	0.0	0.0	0.0	0.0	x	Total	1.50	r22359739.33	6870509.85	0.00	
	TR2_DIREITA	0.0	0.0	0.0	0.0	x	Total	1.50	r22359747.16	6870511.09	0.00	
	TR2_TR3	0.0	0.0	0.0	0.0	x	Total	1.50	r22359744.52	6870503.32	0.00	
	TR3_ESQUERDA	0.0	0.0	0.0	0.0	x	Total	1.50	r22359740.67	6870495.92	0.00	
	TR3_DIREITA	0.0	0.0	0.0	0.0	x	Total	1.50	r22359751.74	6870497.43	0.00	
	TR3_TR4	0.0	0.0	0.0	0.0	x	Total	1.50	r22359746.83	6870489.63	0.00	
	TR4_ESQUERDA	0.0	0.0	0.0	0.0	x	Total	1.50	r22359742.61	6870480.77	0.00	
	TR4_DIREITA	0.0	0.0	0.0	0.0	x	Total	1.50	r22359752.21	6870482.69	0.00	
	TR4_BAIXO	0.0	0.0	0.0	0.0	x	Total	1.50	r22359748.47	6870475.90	0.00	
	TRdireita_BAIXO	0.0	0.0	0.0	0.0	x	Total	1.50	r22359800.93	6870497.30	0.00	
	TRdireita_ESQUERDA	0.0	0.0	0.0	0.0	x	Total	1.50	r22359803.48	6870500.38	0.00	
	TRdireita_DIREITA	0.0	0.0	0.0	0.0	x	Total	1.50	r22359812.54	6870501.61	0.00	
	TRdireita_CIMA	0.0	0.0	0.0	0.0	x	Total	1.50	r22359807.45	6870504.46	0.00	
	TRresquerda_BAIXO	0.0	0.0	0.0	0.0	x	Total	1.50	r22359704.40	6870424.51	0.00	
	TRresquerda_ESQUERDA	0.0	0.0	0.0	0.0	x	Total	1.50	r22359696.72	6870428.80	0.00	
	TRresquerda_CIMA	0.0	0.0	0.0	0.0	x	Total	1.50	r22359702.64	6870434.85	0.00	
	TRresquerda_DIREITA	0.0	0.0	0.0	0.0	x	Total	1.50	r22359708.39	6870430.28	0.00	

A outra forma de visualizar o nível sonoro dos receptores requer a inserção de caixas de texto individuais para cada um deles. Para isso clica-se com o botão direito do mouse na área de trabalho do CadnaA, e após seleciona-se ‘Modificar Objetos...’.

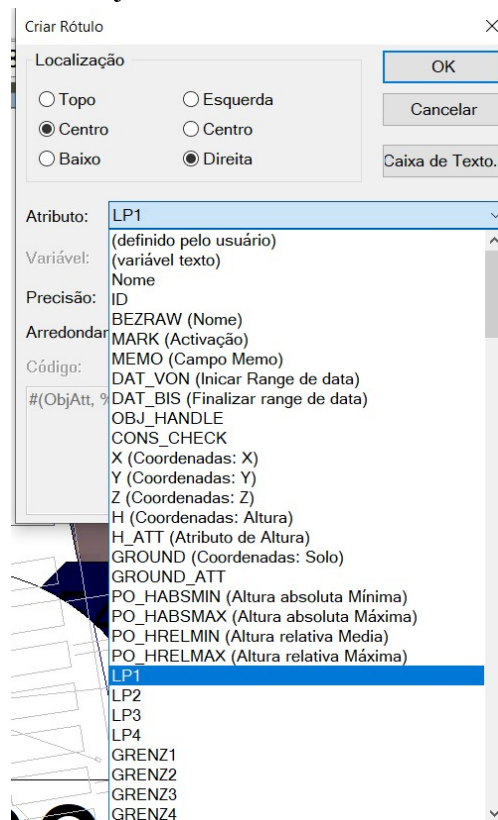




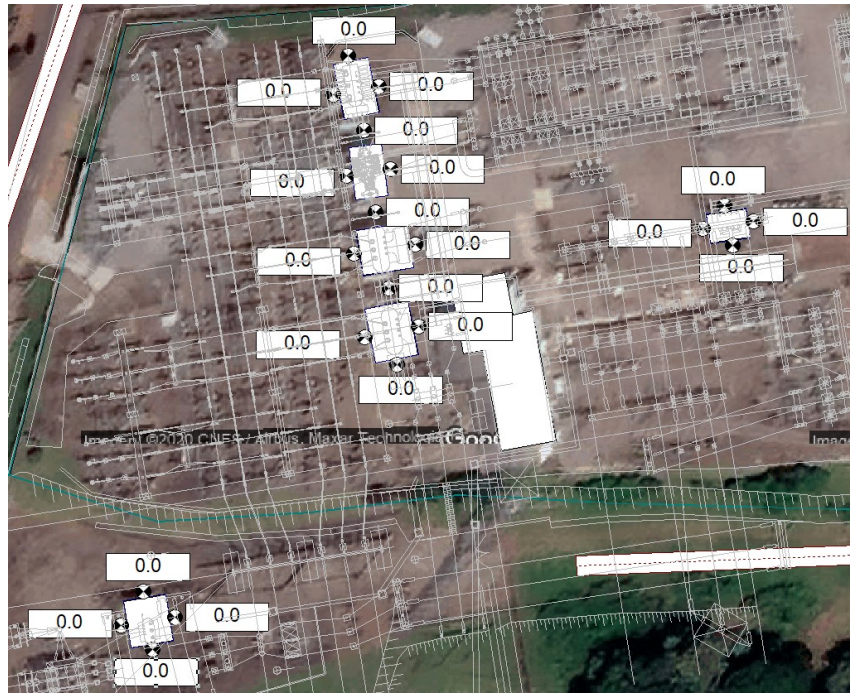
Na janela ‘Modificar Objetos’ seleciona-se a ação ‘Criar Rótulo...’, marcando em ‘Tipos de Objetos’ o item ‘Receptor’. Na sequência clica-se em ‘OK’.



Após a realização do passo acima, a janela ‘Criar Rótulo’ surge na tela de desenvolvimento do software, permitindo escolher a ‘Localização’ da caixa em relação ao receptor e o ‘Atributo’ que irá ser mostrado. Seleciona-se a posição desejada e ‘LP1’, que indica o nível sonoro captado pelo receptor. Para finalizar clica-se em ‘OK’ e depois em ‘Todo’, na janela ‘Alterar Objetos’.



Com os rótulos criados é possível movê-los, para isso clica-se na borda da caixa de texto e depois arrasta-se a mesma até a posição desejada.



## 5.2. INSERIR LABEL (AVALIAÇÃO DE EDIFICAÇÕES)

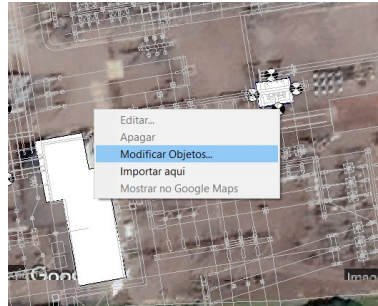
*Labels* são rótulos inseridos nas construções e apresentam o nível sonoro incidente nas fachadas das mesmas. Para tal, não é necessária a inserção de caixas de texto, sendo possível vinculá-los ao modelo de duas formas.

Primeiramente seleciona-se o ícone ‘Avaliação de Edificações’, presente na biblioteca de ferramentas do software, e em seguida clica-se dentro da construção que deseja-se monitorar o nível de ruído. Essa forma é mais simples e prática, mas acaba sendo trabalhosa em situações onde existem muitas construções.

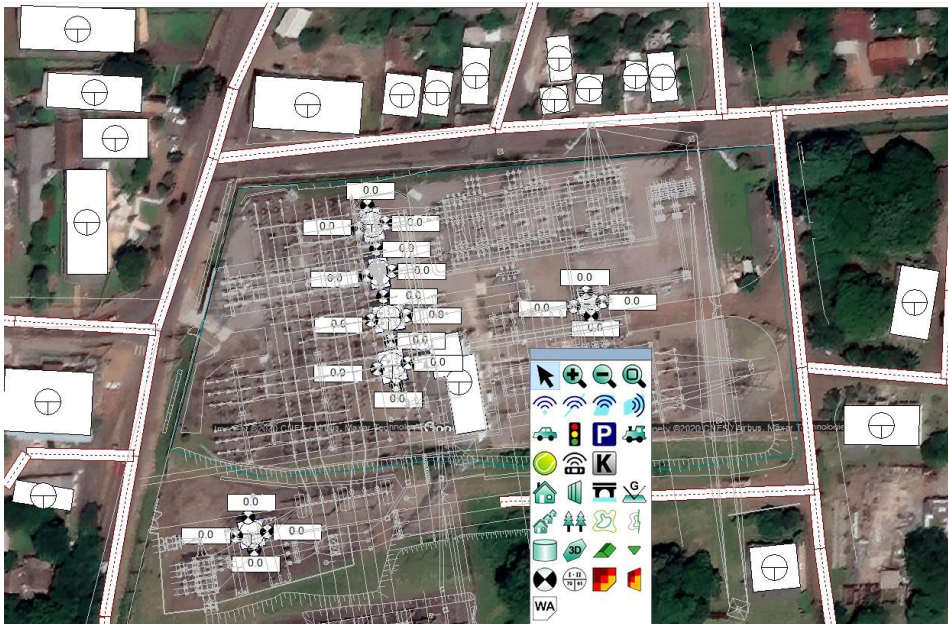




Em situações onde existem muitas construções é possível inserir tal ferramenta utilizando a opção ‘Modificar Objetos...’. Neste caso, ativa-se ‘Editar modo’ (biblioteca de ferramentas) e em seguida com o botão direito do mouse na área de trabalho seleciona-se a opção, abrindo após a janela ‘Modificar Objetos’.



Na janela informada seleciona-se no item ‘Ação’ a opção ‘Gerar Avaliação de Edificações’, marcando em seguida, em ‘Tipos de Objetos’, o item ‘Construção’, dando ‘OK’. Feito isso, na janela ‘Alterar Objetos’, a qual surge na tela, aciona-se ‘Todo’. O passo é então finalizado, garantindo a inserção dos *Labels* em todas as construções, inclusive naquelas referentes aos transformadores, as quais podem ser apagadas clicando em suas bordas e em seguida na tecla ‘Del’.



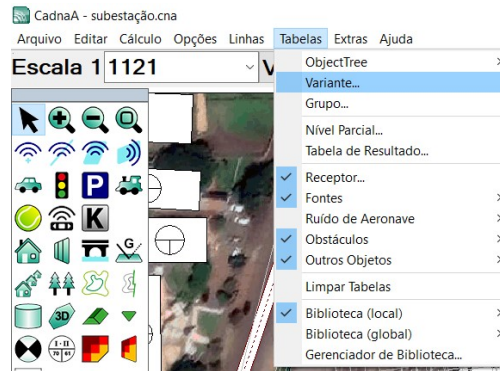
### 5.3. CONFIGURAR CENÁRIOS COM VARIANTES

Aqui serão definidos diferentes cenários para simulação, utilizando variantes, habilitando-as ou desabilitando-as de acordo com a configuração desejada, sem haver necessidade de criar um novo modelo acústico.

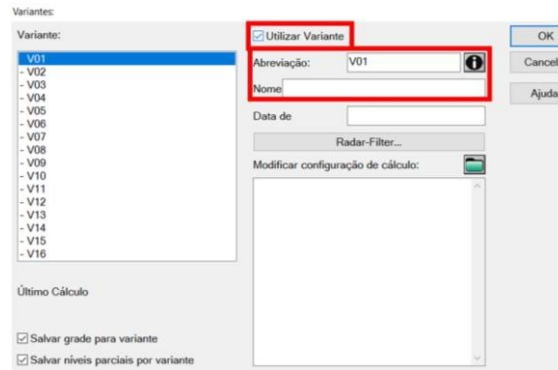
O exemplo apresentado mostra como introduzir dois diferentes tipos de barreiras, sem excluir o que existe no modelo atual, criado até aqui. É possível também, simular transformadores com ou sem ventilação variando o espectro dos mesmos, configurá-los como desligados, entre outras possibilidades.



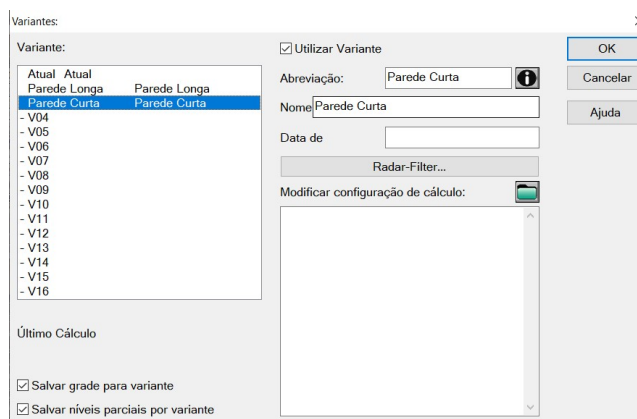
Inicialmente na aba ‘Tabelas’, do menu, seleciona-se a opção ‘Variante...’, como ilustrado na figura abaixo.



Feito isso, a janela ‘Variantes:’ é aberta. Nela é possível criar a(s) alternativa(s) desejada, a ser implementada, definindo o ‘Nome’ e a ‘Abreviação’ da mesma (mantendo ‘Utilizar Variante’ ativa), finalizando-a com a seleção da próxima variante (V01, V02, V03, Vn...). Clica-se em ‘OK’ para concluir o passo.



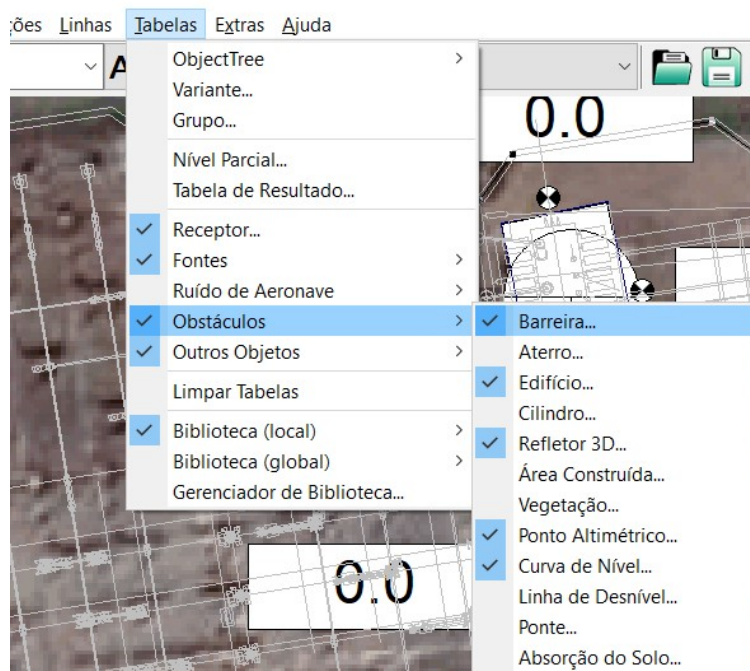
Para esse exemplo utilizar-se-á uma variante relativa a configuração atual da subestação (Atual), outra com uma parede contínua na lateral esquerda de todos os transformadores (Parede Longa) e por fim serão criadas 4 paredes menores (Parede Curta). Isso pode ser visualizado junto a figura da direita, apresentada abaixo. A partir destas três variantes serão criados 2 novos cenários para simulação. A figura à esquerda mostra as opções de variantes já definidas.





Para desenvolver as estratégias informadas acima, deve-se criar as barreiras faltantes e que devem ser utilizadas, adicionando-as posteriormente junto às variações pertinentes, definidas acima. As etapas para o desenvolvimento das barreiras encontram-se descritas na seção 3.5. Configura-se as 4 barreiras curtas próximas as laterais dos transformadores com 4 m de altura e a barreira contínua com 6 m.

Feito isso, para defini-las de acordo com as variantes vislumbradas, na aba ‘Tabelas’, do menu, seleciona-se a opção ‘Obstáculos’ e após ‘Barreira...’.



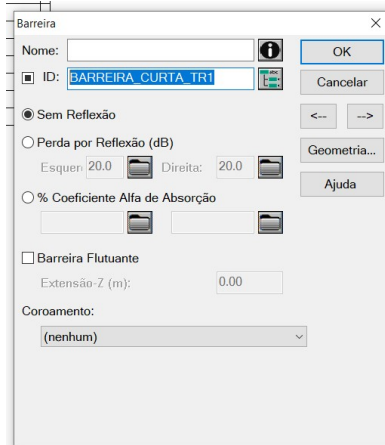
Abre-se assim a janela ‘Barreira’, onde apresentam-se destacadas as barreiras criadas, sem identificação. O profissional que utilizar esta apostila como material de aprendizagem, pode ficar à vontade em relação ao desenvolvimento de outros tipos de meios para criar as variações desejadas.

Barreira									
Fechar		Editar...		Sincr. Gráfico		Copiar...		Imprimir...	
Nome	M.	ID	Absorção		Ext-z	Cantilever		Altura	
			Esquerda	direita		horiz.	vert.	Iniciar	Fim
					(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
								4.00	r
								2.30	r
								5.00	r
								2.50	r
								4.00	r
								4.00	r
								4.00	r
								4.00	r
								6.00	r

Para que seja possível escolher qual das barreiras será apresentada em cada uma das variantes é necessário identificá-las com um ‘ID’. Para isso, seleciona-se a linha



correspondente aquela que será nomeada, e após um duplo clique, digitaliza-se o nome da mesma. Um exemplo é apresentado na figura abaixo.

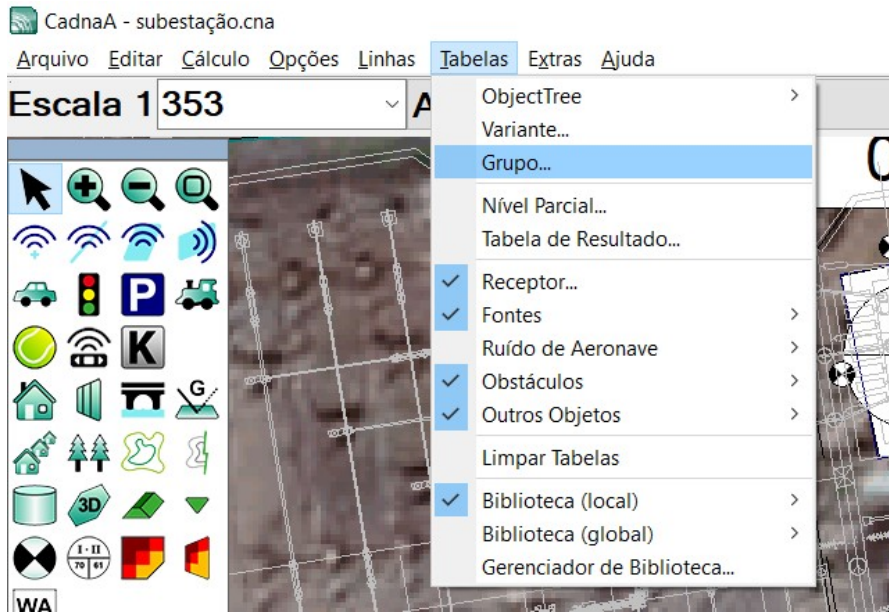


Após a identificação de todas as barreiras desenvolvidas, a tabela ficará similar a apresentada na figura abaixo.

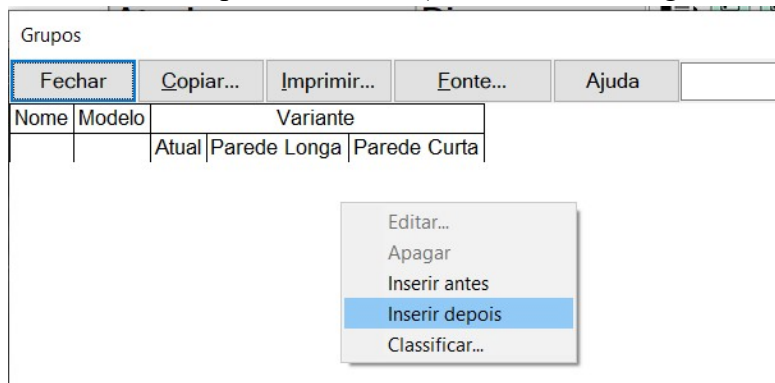
Barreira

		Fechar	Editar...	Sincr. Gráfico	Copiar...	Imprimir...	Fonte...	Ajuda		
Nome	M.	ID		Absorção		Ext-z	Cantilever		Altura	
				Esquerda	direita		horiz.	vert.	Iniciar	Fim
						(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
									4.00	r
									2.30	r
									5.00	r
									2.50	r
			BARREIRA_CURTA_TR1						4.00	r
			BARREIRA_CURTA_TR2						4.00	r
			BARREIRA_CURTA_TR3						4.00	r
			BARREIRA_CURTA_TR4						4.00	r
			BARREIRA_LONGA						6.00	r

As definições pertinentes, para que as barreiras criadas apareçam nas variantes de simulação, podem então ser realizadas. Para isso, na aba 'Tabelas', clica-se em 'Grupo...', permitindo a abertura da janela 'Grupos'.



Na janela informada insere-se as linhas para criar as configurações, clicando com o botão direito do mouse na área branca e depois em 'Inserir depois'. Tais linhas são utilizadas para indicar inicialmente, na coluna 'Modelo', o nome dos grupos de barreiras criadas, ou das mesmas individualmente. Note que as Variantes, para o exemplo da apostila, já se encontram no topo desta tabela (Atual; Parede Longa e Parede Curta).



Para o exemplo da apostila, serão criados 2 grupos/modelos para vincular a eles as barreiras especificadas acima, sendo assim insere-se 2 linhas. Com um duplo clique na linha que representa o modelo de interesse, abre-se a janela 'Grupo', tornando-se possível identifica-lo a partir das opções 'Nome: (referente a coluna 'Nome' da janela 'Grupos)'' e 'Padrão: (referente a coluna 'Modelo' da janela 'Grupos)'' , além de outras configurações. Para o caso das barreiras curtas, como as mesmas foram definidas a partir de 4 nomes diferentes (BARREIRA\_CURTA\_TR1; BARREIRA\_CURTA\_TR2; BARREIRA\_CURTA\_TR3; BARREIRA\_CURTA\_TR4), porém são equivalentes, pode-se utilizar um asterisco (\*) para criar um grupo/modelo somente, que as represente. No CadnaA, o asterisco indica que a informação anterior ou posterior a ele, não influencia. Porém, caso o mesmo seja adicionado no início (Exp: \*BARREIRA\_CURTA\_TR1), e posteriormente existir alguma letra, o programa





interpreta que aquilo que está posicionado anteriormente a letra, não importa para o modelo.

Grupo

Nome:

Padrão:

Objetos compatíveis:

Ativar

Desativar

fazer nada

ObjectTree

Level:

Sub-ID:

automatisch vergeben

OK

Cancelar

<-- -->

Nível Parcial...

Ajuda

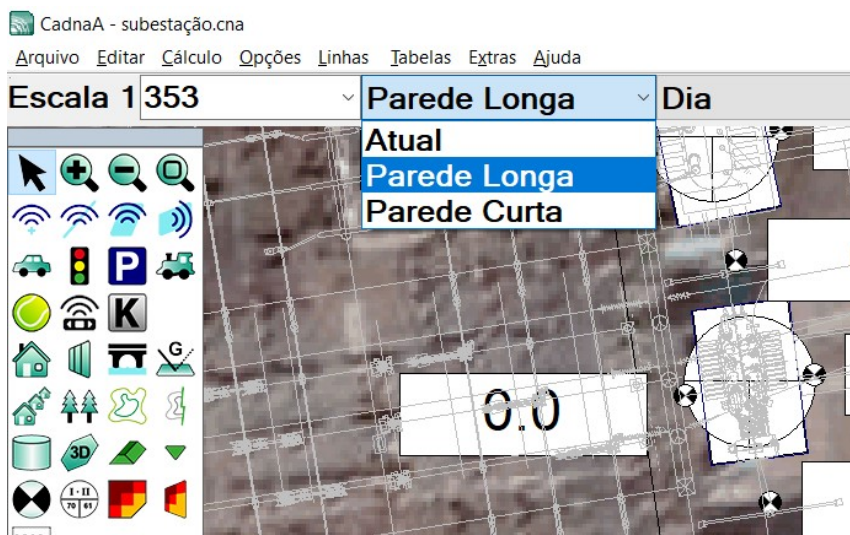
Desta maneira o programa entende que qualquer informação que comece com o termo “BARREIRA\_CURTA”, independente do que esteja escrito após, será utilizado no modelo. Na linha restante, define-se o modelo como BARREIRA\_LONGA, deixando a tabela como apresentado na figura abaixo.

Nome	Modelo	Variante		
		Atual	Parede Longa	Parede Curta
(sem título)	BARREIRA_CURTA*			
(sem título)	BARREIRA_LONGA			

Note que o termo BARREIRA\_LONGA não carrega consigo o asterisco, pois, existe apenas uma barreira com esse nome. Na janela ‘Grupos’, colunas pertencentes a ‘Variante’ (Atual; Parede Longa; Parede Curta) insere-se os símbolos (+) e (-), os quais correspondem respectivamente, a adição ou não da barreira no modelo a ser simulado.

Nome	Modelo	Variante		
		Atual	Parede Longa	Parede Curta
(sem título)	BARREIRA_CURTA*	-	-	+
(sem título)	BARREIRA_LONGA	-	+	-

Por fim, dependendo da variante escolhida no momento da simulação, as barreiras podem ser observadas no modelo. Para aquelas que não estiverem ativas em determinada simulação, aparecerá na tela do software apenas linhas pontilhadas. Para alterar a variável que está sendo simulada, basta clicar na caixa que carrega as opções de variantes, presente na barra superior do software.



## 6. CÁLCULOS

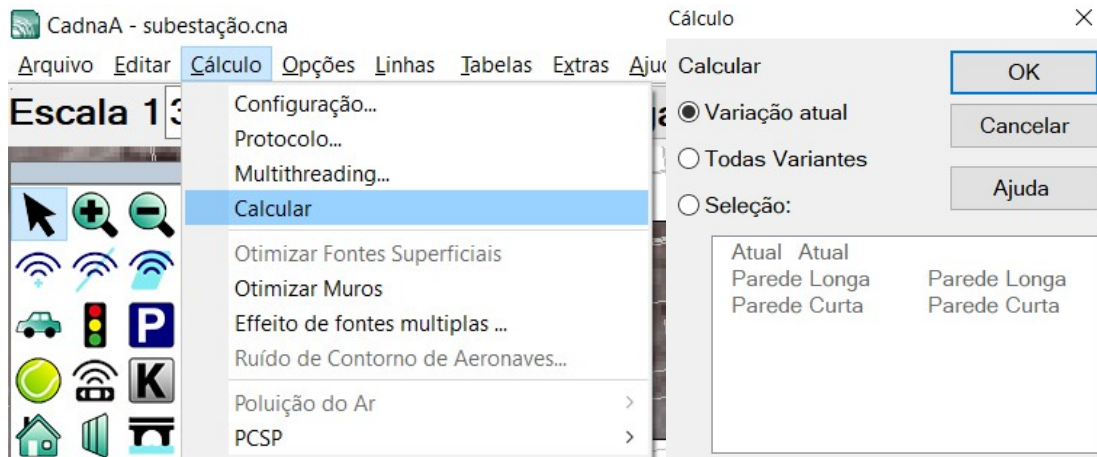
Neste capítulo explora-se as funcionalidades e áreas de cálculos presentes no software CadnaA.

### 6.1. CALCULADORA

A ferramenta 'Calcular' é a responsável pela apresentação dos valores de níveis sonoros, seja através da opção 'Avaliação de Edificações' ou 'Receptor', inseridas anteriormente. Para calcular esses níveis existem duas formas, na primeira clica-se no ícone presente na barra de ferramentas superior, como indicado na imagem abaixo. Destaca-se que os cálculos serão realizados, levando em conta a variante que está selecionada.



A segunda forma requer a seleção da ferramenta 'Calcular' a partir da aba 'Cálculo', presente no menu do software. Ao acionar tal ferramenta a janela 'Cálculo' é aberta, sendo possível a partir da mesma, definir quais variantes deseja-se calcular.



Após a seleção de como calcular, as ferramentas ‘Avaliação de Edificações’ e ‘Receptor’ mostrarão os níveis sonoros presentes na região do entorno da subestação. A figura abaixo indica os valores de ruído para a variante atual, porém, cabe destacar que nem todos os espectros sonoros cadastrados para os transformadores, tiveram seus dados reais digitalizados.



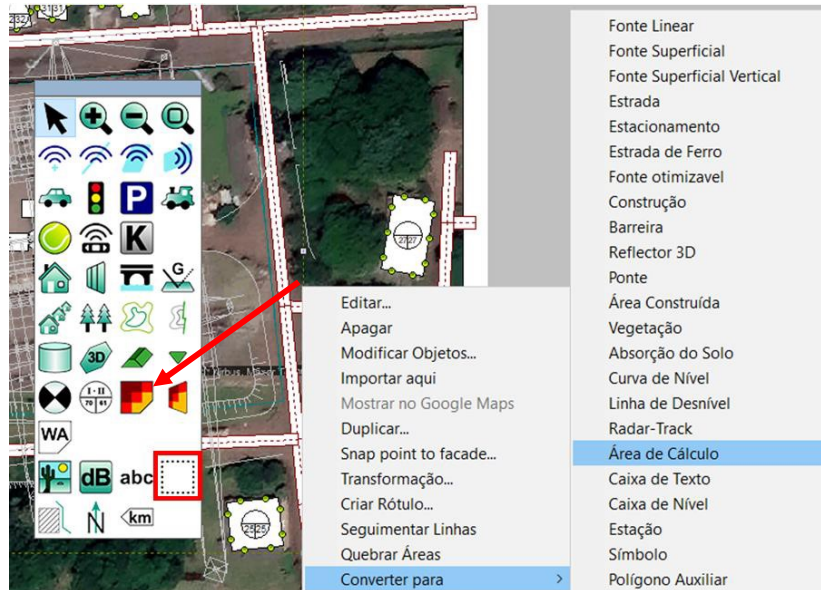
## 6.2. ÁREA DE CÁLCULO

Existem duas diferentes áreas de cálculo que podem ser definidas. Uma delas chama-se horizontal padrão, sendo observada a partir da vista superior da subestação, a outra trata-se da área de cálculo vertical, a qual mostra a dispersão do som verticalmente.

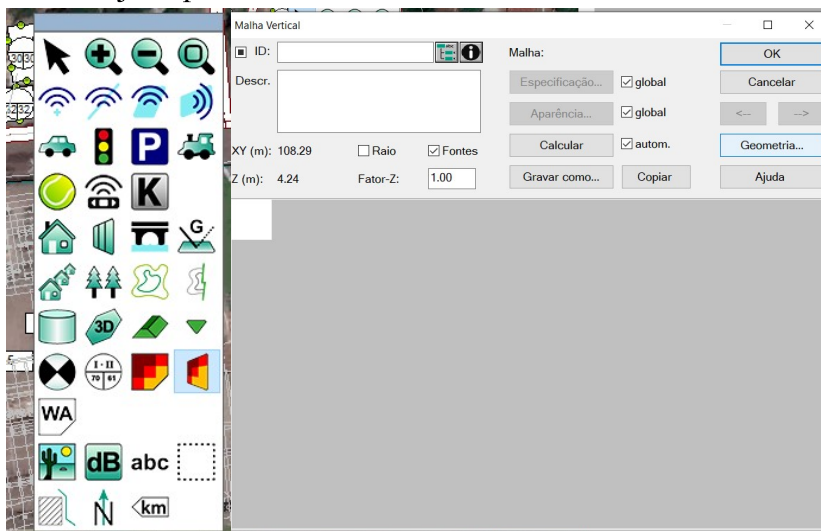
A zona de cálculo horizontal reduz os esforços de processamento do programa, já que não requer o cálculo da distribuição sonora de toda a área de trabalho, sendo realizado apenas dentro de uma área pré-selecionada. Para isso basta desenhar a seção de interesse, seleciona-la, clicar com o botão direito do mouse sobre a mesma escolhendo a opção



‘Converter para’, ativando após a ferramenta ‘Área de Cálculo’. Outra forma de criar tal área, utiliza a ferramenta ‘Área de Cálculo’ presente na biblioteca do software, como indicado pela seta vermelha.



Para inserir a área de cálculo vertical basta selecionar a ferramenta ‘Malha Vertical’ na biblioteca do software, desenhando na sequência a linha que indica o local onde o cálculo será efetuado. Para alterar a altura de tal área, basta dar um duplo clique com a seta do mouse sobre a linha e na janela ‘Malha Vertical’ escolher a opção ‘Geometria...’. Nova janela é aberta, ‘Polígono: Geometria’, onde digitaliza-se no quadro ‘Altura’ o valor desejado para a mesma.



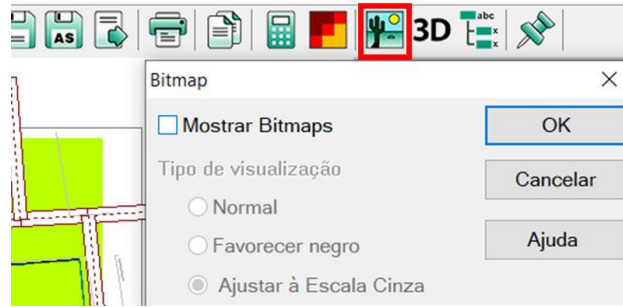
Na janela de ‘Malha Vertical’ também é possível alterar a aparência da malha e as especificações de cálculo, as quais são apresentadas a seguir.

### 6.3. CONFIGURAÇÃO DE GRID

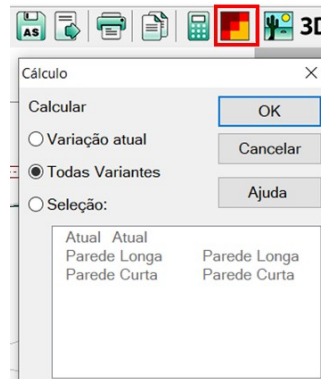
Aqui configura-se as cores que aparecerão na área de cálculo. Primeiro é necessário desativar o bitmap, para que seja possível visualizar tal região. Para isso clica-



se em 'Exibir propriedades dos bitmaps', como destacado na figura abaixo. Após, desmarca-se a caixa 'Mostrar Bitmaps' e clica-se em 'OK'.



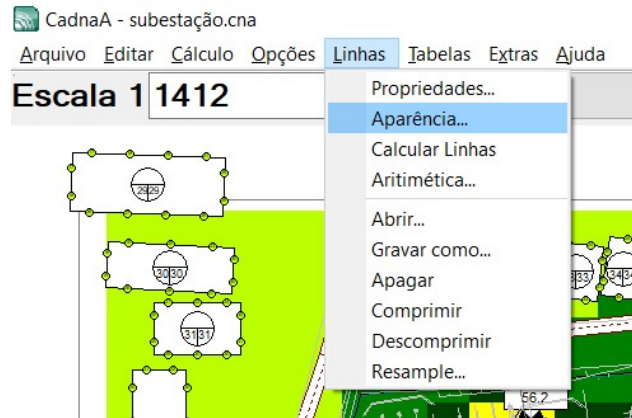
Agora, com o bitmap oculto, é possível simular a distribuição sonora clicando no ícone de simulação 'Calcular Linhas', marcando na janela 'Cálculo' todas as variantes e finalizando com 'OK'.



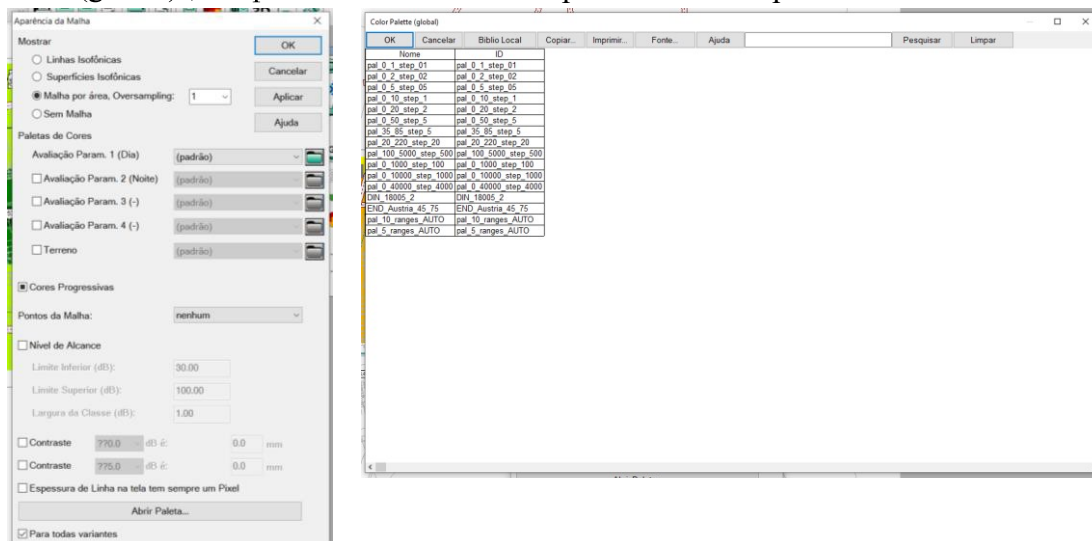
Feito isso a aparência da simulação ficará similar àquela apresentada na imagem abaixo.



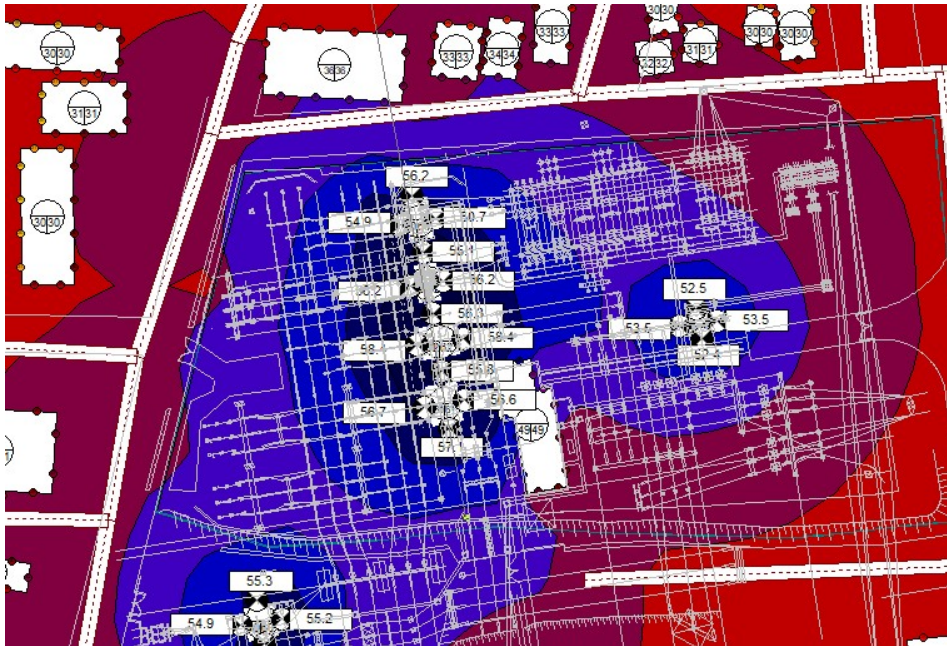
Para alterar a configuração de cores, além de outras propriedades, clica-se na aba 'Linhas', do menu, selecionando a opção 'Aparência...'.



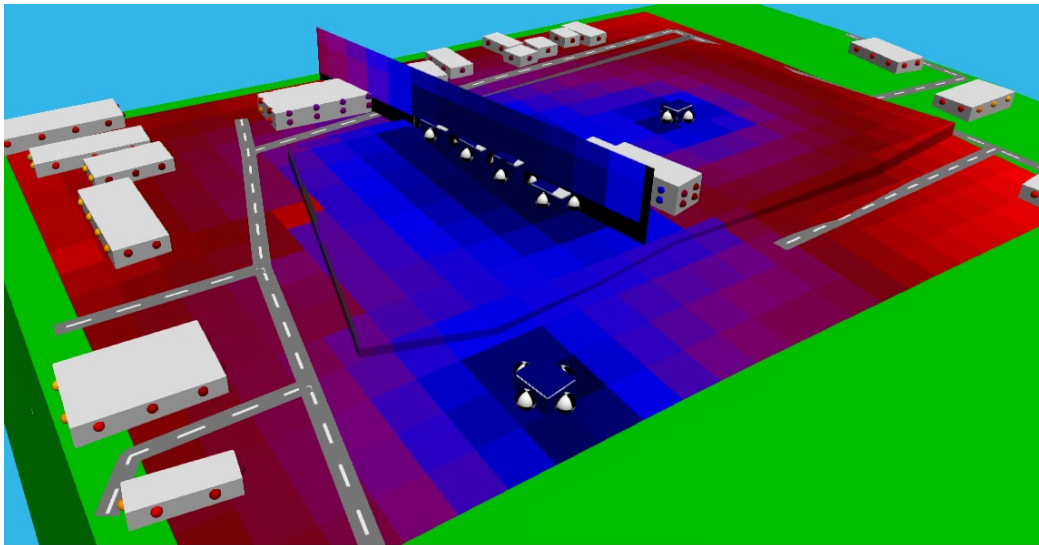
A janela 'Aparência da Malha' é então aberta, possibilitando alterar o modo como as cores se distribuem. No item 'Paletas de Cores', opção 'Avaliação Param. 1 (Dia)' é possível selecionar a pasta verde, à direita. Dessa forma surge na tela a janela 'Color Palette (global)', na qual observa-se todas as paletas de cores pré-existentes.



Ainda na janela 'Color Palette (global)' é possível criar uma paleta de cores personalizada, clicando com o botão direito mouse na área em branco e selecionando a opção 'Inserir depois', acrescentando assim uma nova linha, abaixo de 'pal\_5\_ranges\_AUTO pal\_5\_ranges\_AUTO', na qual estará inserida a nova configuração. Para simulação aqui apresentada, utilizou-se a configuração que varia de 0 a 50 dB, com cores sendo alternadas a cada 5 dB, além de selecionar na janela 'Aparência da Malha' a opção 'Superfícies Isofônicas'. A figura abaixo ilustra como ficou a tela do software após o processamento.



Para configurar a área de cálculo vertical é necessário dar um duplo clique sobre a linha criada anteriormente. Ao abrir a janela ‘Malha Vertical’ marca-se as caixas de texto ‘global’, para que as configurações da zona de cálculo vertical se mantenham as mesmas que as horizontais. A vista 3D da subestação, com a zona de cálculo vertical, é apresentada abaixo.



‘É proibida a reprodução total ou parcial deste material, por quaisquer meios sem autorização escrita do LINTEC’

‘Material produzido no âmbito do projeto de P&D intitulado como: Pesquisa da eficiência de técnicas de redução de ruído em subestações urbanas visando o conforto da comunidade (CONTRATO N° CEEE-GT/5000003835)’

## **APÊNDICE B**

Artigo: Comparative evaluation of different barrier configurations for electricity substation noise reduction by acoustic simulation



## Comparative evaluation of different barrier configurations for electricity substation noise reduction by acoustic simulation

Avaliação comparativa de diferentes configurações de barreira para redução de ruído de subestação elétrica por simulação acústica

Comparativa de diferentes configuraciones de barrera para la reducción de ruido de subestaciones eléctricas mediante simulación acústica

Received: 04/22/2021 | Reviewed: 05/04/2021 | Accept: 05/07/2021 | Published: 05/21/2021

### **Mateus Da Silva**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5831-3649>  
Universidade de Passo Fundo, Brazil  
E-mail: 151996@upf.br

### **Ademilson Setti**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2108-6600>  
Universidade de Passo Fundo, Brazil  
E-mail: ade.setti@gmail.com

### **Diego Darci Langaro**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9853-6505>  
Universidade de Passo Fundo, Brazil  
E-mail: diegodlangaro@gmail.com

### **Charles Leonardo Israel**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9422-2824>  
Universidade de Passo Fundo, Brazil  
E-mail: israel@upf.br

### **Giulia Ciacci Zanella**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1283-549X>  
Universidade de Passo Fundo, Brazil  
E-mail: giuzanella123@gmail.com

### **Daniel Wagner de Castro Lima**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0218-2728>  
Companhia Estadual de Energia Elétrica - GT (CEEE-GT), Brazil  
E-mail: daniel.lima@ceee.com.br

### **Roberto Arnt Tarrago**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8344-0567>  
Companhia Estadual de Energia Elétrica - GT (CEEE-GT), Brazil  
E-mail: roberto.tarrago@ceee.com.br

### **Luciano Hoffmann Paludo**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4101-9237>  
Companhia Estadual de Energia Elétrica - GT (CEEE-GT), Brazil  
E-mail: lhpaludo@gmail.com

### **Abstract**

From an analytical study related to an electric power substation, a computational model for acoustic simulation was developed, which made it possible to verify the sound pressure behavior in the regions adjacent to it. With the objective of mapping changes in the level of sound pressure, thus enabling checks related to the operation of acoustic barriers. The model was calibrated based on data from experimental measurements linked to the transformers present in the substation and the values measured around the substation. With that, four different types of acoustic barriers were tested, in which their respective top geometries were changed. From then on, variations in vertical and horizontal sound dispersion were examined, in addition to the noise level in the homes and buildings neighboring the substation. According to the simulation of the different variations and barrier configurations, reduction values from 3 dB to 17 dB were found. Finally, the possible difficulties for the practical implementation of each barrier configuration were indicated.

**Keywords:** Substation; Noise mitigation; Sound analysis; Acoustic map; Acoustic barriers.

### **Resumo**

A partir de um estudo analítico, relacionado à uma subestação de energia elétrica, desenvolveu-se um modelo computacional para simulação acústica, o qual possibilitou verificar o comportamento da pressão sonora nas regiões adjacentes à mesma. Tendo como objetivo mapear as alterações do nível de pressão sonora, assim possibilitando

verificações relacionadas ao funcionamento de barreiras acústicas. Calibrou-se o modelo a partir de dados oriundos de medições experimentais vinculadas aos transformadores presentes na subestação e à valores mensurados no entorno da mesma. Com isso, testou-se quatro diferentes tipos de barreiras acústicas, nas quais foram alteradas as suas respectivas geometrias de topo. A partir de então, examinou-se as variações na dispersão sonora vertical e horizontal, além do nível sonoro incidente nas residências e construções vizinhas a subestação. De acordo com a simulação das diferentes variações e configurações de barreira, foram encontrados valores de redução de 3 dB até 17 dB. Por fim, indicou-se as possíveis dificuldades para a implementação prática de cada uma das configurações de barreira.

**Palavras-chave:** Subestação; Mitigação de ruído; Análise Sonora; Mapa acústico; Barreiras acústicas.

### Resumen

A partir de un estudio analítico, relacionado con una subestación de energía eléctrica, se desarrolló un modelo computacional de simulación acústica que permitió verificar el comportamiento de la presión sonora en las regiones adyacentes a la misma. Con el objetivo de cartografiar los cambios en el nivel de presión sonora, posibilitando así controles relacionados con el funcionamiento de las barreras acústicas. El modelo fue calibrado en base a datos de mediciones experimentales vinculadas a los transformadores presentes en la subestación y los valores medidos alrededor de la subestación. Con esto, se probaron cuatro tipos diferentes de barreras acústicas, en las que se cambiaron sus respectivas geometrias superiores. A partir de entonces, se examinaron las variaciones en la dispersión del sonido vertical y horizontal, además del nivel de ruido en las viviendas y edificios aledaños a la subestación. De acuerdo con la simulación de las diferentes variaciones y configuraciones de barrera, se encontraron valores de reducción de 3 dB a 17 dB. Finalmente, se indicaron las posibles dificultades para la implementación práctica de cada configuración de barrera.

**Palabras clave:** Subestación; Mitigación de ruido; Análisis de sonido; Mapa acústico; Barreras acústicas.

## 1. Introduction

The World Health Organization (WHO), in 2011, classified noise pollution as the second largest polluting source, only behind air pollution. Due to its severity, not only hearing loss is taken into account, but also factors such as irritability, concentration difficulties, increased blood pressure, accelerated pulse, psychological effects, behavioral and sleep changes (WHO, 2011).

In a study by de Castro et al. (2019), in two different schools, regarding the impact of noise pollution in relation to the levels of learning and concentration, it was possible to observe that the noise negatively affected the students' performance, having been aggravated in the case of rooms with a higher noise level, which indicates the need to reduce it. In another study by Assunção et al. (2019), in relation to cognitive performance, it indicated problems related to memory and the sleep cycle of people exposed to intense noise.

To reduce noise and mitigate the aforementioned problems, actions can be taken at one or more of the following points: at the emitting source, propagation medium or the receiver (Bies & Hansen, 2003). This study seeks ways to mitigate noise in its propagation medium, by using acoustic barriers, adding to them configurations and characteristics that can reduce the sound level of a certain region, causing little or no adverse effect to the people who are there.

The main noise sources of the simulated substation are the power transformers. The substation has six transformers in three different voltage levels.

Different geometries for barriers and top geometries were studied in order to improve their characteristics regarding acoustic absorption and reflection, thus seeking a configuration that contemplates noise reduction without causing unwanted impacts. The simulation was built to resemble reality as much as possible, and from the initial model different barriers were created and the effectiveness of each one was verified.

Sound can be characterized as the variation of pressure caused by the vibration of a material, and promotes an increase in the agitation of molecules, thus reaching the ear. The human ear is able to distinguish sounds present in only one frequency range, which starts at 20 Hz, representing the lowest sounds, and ends at 20000 Hz, characterizing high-pitched sounds. The frequencies below 20 Hz are called infrasounds and those above 20000 Hz are called ultrasounds (Bies & Hansen, 2003).

When the sound you hear is unpleasant, annoying and/or may generate damage to human health is classified as noise (ABNT NBR 10151, 2020). Besides not hearing all the sound frequencies the human ear has different perceptions for each frequency variation, thus generating different isophonic lines. The isophonic lines translate into equal sensitivities for different points of the same curve (Bies & Hansen, 2003).

The way sound is propagated outdoors is directly influenced by weather conditions, i.e. air humidity, wind, temperature, soil sound absorption coefficient and vegetation. Each condition influences in a way the way the sound behaves and thus changes the way it is transported (Wakefield Acoustics, 2012).

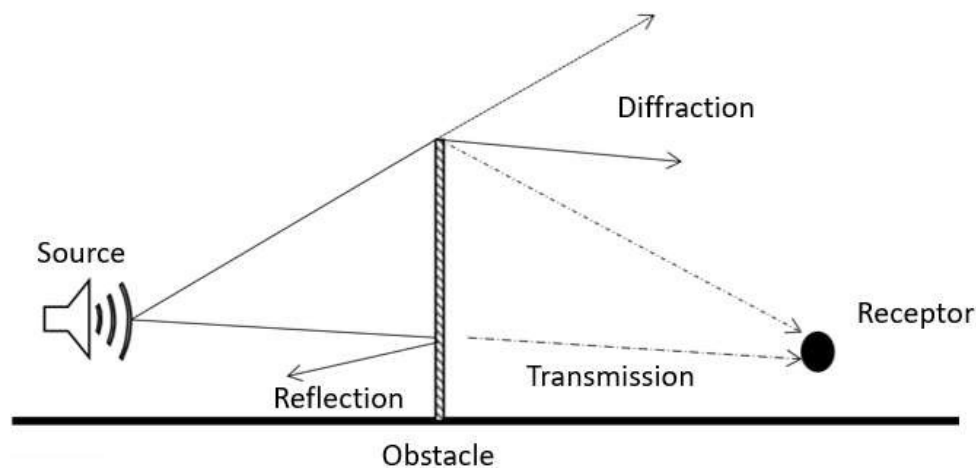
The sound absorption generated by the atmosphere and humidity varies according to the sound frequency, being higher for higher frequencies. This occurs due to the shorter wavelength, which is lost more easily during induction transfer between molecules (Larsson, 1997).

When the sound source or the receiver are close to the ground the sound wave can be influenced by it, because part of it will be affected by reflections and may cause interference in the direct wave, thus generating the so-called ground effect, which is the combination of both waves, the direct and the reflected (Leissing, 2007).

Other characteristics that can influence the wave are the frequency and rigidity of the ground. If the surface is porous, it will have absorbing characteristics, thus reducing the sound power, occurring the opposite if the soil is reflective. The frequencies that are most influenced by the soil are between 200 and 600 Hz (Attenborough, 2002).

The sound wave, when intercepted by some kind of obstacle, modifies a series of different factors, such as reflection, absorption, diffraction and transmission. Some of them can be eliminated or attenuated, depending on the type of material and characteristics that will describe the obstacle. Examples of how such factors happen can be seen in Figure 1 (Daigle, 1999).

**Figure 1 - Sound wave propagation by obstacle.**



Source: FHWA (2014).

The wave that falls on the top of the barrier suffers diffraction, varying according to the angle of incidence and the shape of this top, as well as the wavelength (FHWA, 2014). The receiver is affected only by the transmitted and diffracted waves since the reflected waves return towards the source and the absorbed waves are dissipated in the form of heat by the barrier material (Freitas & Trabulo, 2007).

High frequency sound waves are hardly diffracted because they have a small wavelength, unlike low frequency waves, which are diffracted at a greater angle towards the receiver due to their large wavelength, making the barriers less efficient for low frequencies (FHWA, 2014)(Hendriks et al., 2013).

## 2. Methodology

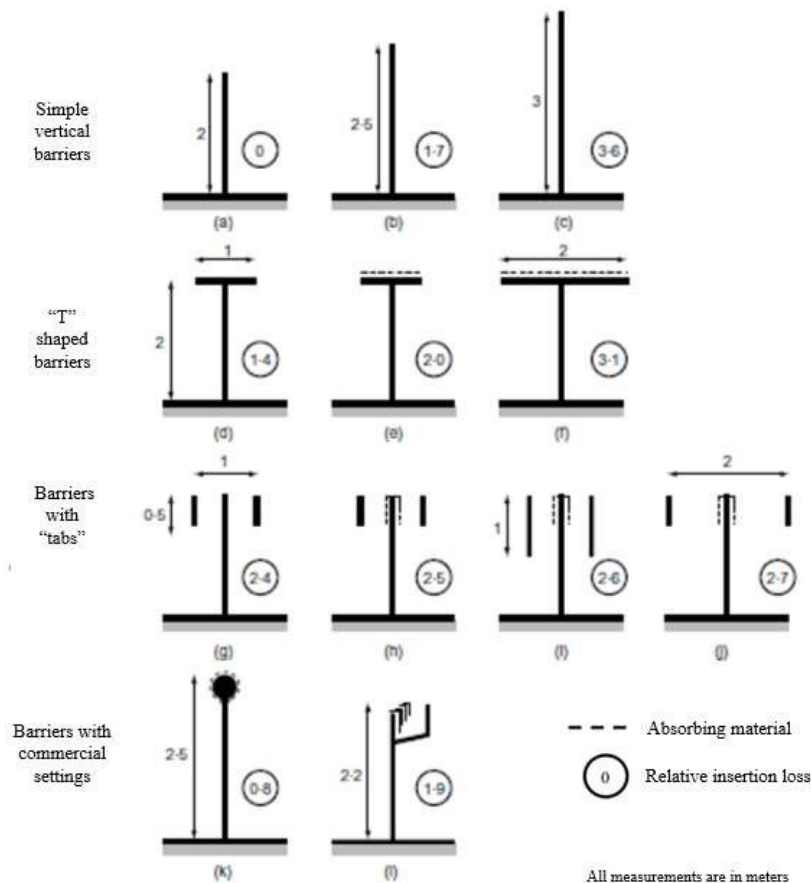
To achieve the stated objectives the best indicator that can be used to check the influence or effectiveness of a barrier is called Insertion Loss (IL). In summary, IL represents how much the sound level was affected before and after the insertion of the barrier, indicating if the barrier is capable of attenuating the sound (Radoi, 2015).

The performance of a barrier is in part linked to factors related to its construction. In this section some of these factors will be addressed, which were considered more important for the present work (Freitas & Trabulo, 2007).

The geometry of the barrier interferes with how the sound is reflected by it, but this also depends on the angle at which the wave is reflected (Tadeu et al., 2012).

Another geometric factor that influences the IL is the geometry in barrier top, which aims to alter the diffraction angle and decrease the sound level, increasing considerably the insertion loss (Daigle, 1999). During a study the variation of the IL was compared, having as reference a barrier of 2 meters of height, showing the influence of a top geometry in a "T" shape with lateral flaps, as shown in Figure 2 (Watts, 2002).

Figure 2 – Top configurations.



Source: Watts (2002).

The insertion loss also varies according to the distance between barrier and sound source, or barrier/receiver, so that the closer to the source or receiver it is, the greater the IL (Hendriks et al., 2013).

Fachin (2005) indicates that the comparative method covers facts and data in order to show similarities and divergences in elements present in both cases, so a comparative methodology was used, in order to find the IL values generated by each variant, being the variant C1A, created from the actual situation of the substation.

In order to increase the reliability of the simulation results and improve its accuracy, the substation was modeled from a map file, imported into CadnaA via GoogleMaps. Also, a substation plan was inserted to the modeling in order to allow a more accurate identification and positioning of the transformers. The terrain around the substation was also inserted, as well as the relief topography where the substation is located.

From the technical drawings of the transformers (TR1, TR2, TR3, TR4, TR5 and TR6), shown in Fig. 3 (a), it was possible to find their dimensions, being the noise spectra obtained from an experimental test and presented in (Langaro & Setti, 2020).

### 3. Development

In order to glimpse the possible noise reduction, 4 different configurations were simulated, each containing their respective acoustic barriers, comparing them with the current situation in the substation. The synthesis of all configurations created, C2, C3, C4 and C5, plus the current situation, C1A, is presented in Table 1.

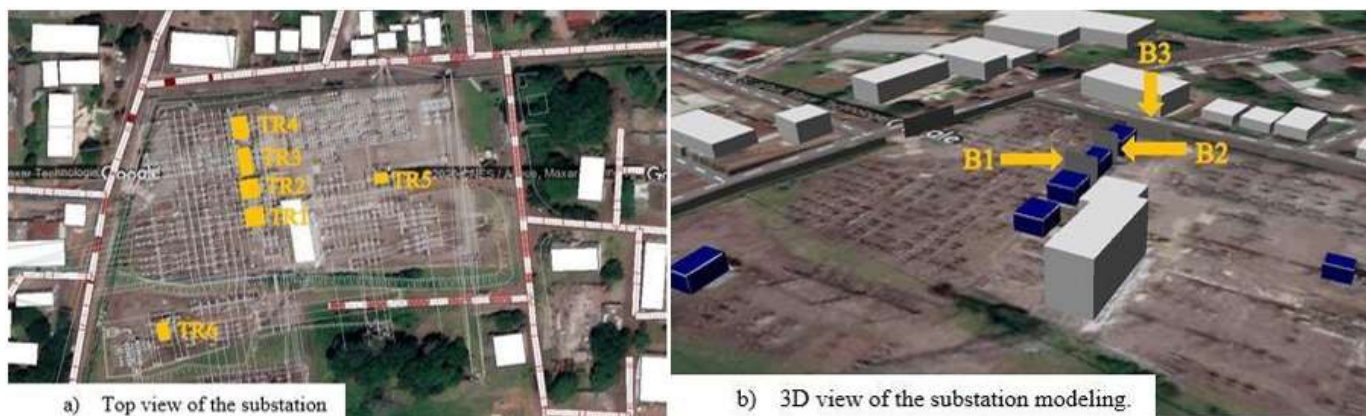
The first configuration defined, C2, is 2 meters longer than the transformer side, i.e. on a 6 meter long side the barrier will be 8 meters long, 1 meter more for each side and 6 meters high. In the second one, C3, it was chosen to completely enclose the sides of the transformers, defining the height as also being 6 meters. Also, it should be noted that these barriers were positioned at a distance of 3 m from each side of the transformers, thus seeking to avoid possible heating when they are in operation.

For the third configuration tested, C4, barriers have been defined with a height higher than the previous ones, of 9 meters, which have been positioned where the substation walls are, i.e. on their perimeter. Finally, a configuration was tested using perimeter barriers together with others near the transformers, C5.

All the configurations created were tested by adding top geometries next to the barriers in T format. The length of the tabs was defined as 1.5 meters. Vertical calculation areas were created to allow the visualization of the variations generated by each of the different arrangements.

The current simulated configuration, C1A, is presented below, as well as the barriers already present (B1, B2 and B3 - Figure 6 (b)) for noise reduction. It is possible to observe the bitmap and the substation plan together with the existing constructions in the adjacent region. Figure 6 (a) shows the upper view of the substation, modeled in the CadnaA software, making it possible to view the map file. In Figure 6 (b) a 3D image of the modeled area is shown.

**Figure 3** - Views of the substation simulation.



Source: Authors.

In the top of Figure 10, the positioning of the barriers is indicated, in green those used to enclose the transformers, as defined for C3, in orange the side barriers, for the C2 configuration, and in yellow, the positioning of the barrier on the perimeter of the substation, configuration C4, as shown in Table 1. It should be noted that the locations of the barriers in green and yellow were also defined for the case of C5.

**Figure 4 - Position of the simulated barriers.**



Source: Authors.

Among the TR2, TR3 and TR4 transformers, positioned closer to the upper edges of the images, no new barriers have been inserted, as the substation already contemplates 2 barriers of 8.20 meters in height between them.

Table 1, previously commented, and presented below, synthesizes the analyzed and simulated configurations, facilitating the understanding regarding the strategies created. In this table the indicative TR, refer to transformers, LTR refer to the width of the transformer, CTR refer to the length of the transformer.

**Table 1** – Summary of Defined and Simulated Strategies.

Configuration	Top Geometry	Enclosure of the TR		Positioning	Dimensions	
		Yes	No		Height	Length
C1A			X	B1 – between TR2 and TR3 B2 – between TR3 and TR4 B3 – between TR4 and Perimeter (Figure 6)	B1 – 8,2 m B2 – 8,2 m B3 – 4 m	B1 – 7,5 m B2 – 7,5 m B3 – 18 m
C2	X		X	Next to the TRs (Figure 7)	6 m	CTR + 2 m LTR + 2 m
C3	X	X		Next to the TRs (Figure 7)	6 m	-
C4	X		X	Substation Perimeter (Figure 8)	9 m	310 m
C5	X	X		Next to the TRs (Figure 10)	6 m	-
				Substation Perimeter (Figure 8)	9 m	310 m

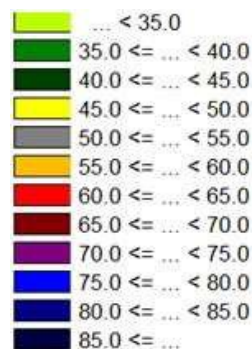
Source: Authors.

#### 4. Results and Discussion

The simulation of the substation from the current C1A configuration, has the purpose of observing the noise behavior in the region without implementing the strategies defined for this study. Using such simulation and based on direct and numerical comparisons, it is intended to verify the efficiency of the configurations created, analyzing possible variations in the noise maps. This will make it possible to conclude on benefits obtained from the use of barriers, as well as the influence of their top geometries and other criteria already defined.

In Figure 5 is presented the legend referring to the colors present in the simulation, which inform the intervals between noise levels and ensure a correct interpretation of the noise.

**Figure 5** - Color legend present in the simulation.

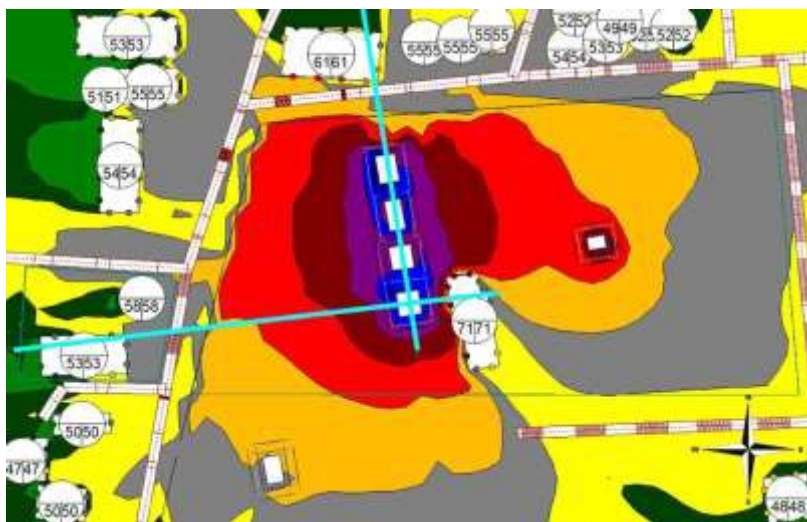


Source: Authors.

The current noise distribution over the entire substation area as well as the sound level in the nearby houses are indicated in Figure 6 as horizontal noise maps. The noise map shows sound levels ranging from 35 dB, in regions further away from the substation, to more than 85 dB, close to TR4 and TR1 transformers, which corroborates the experimental study of Langaro and Setti (2020), used to calibrate the simulated model and indicated in this work as C1A.

When examining the maximum noise levels, defined by Municipal Law N° 4763 and Resolution N°. 02/2015, it can be seen that some locations adjacent to the substation are impacted with an incidence of noise above that allowed. Both the experimental study of Langaro and Setti (2020) and the acoustic simulation of the current situation of the substation indicate the veracity of what was exposed. Thus, it is expected that with the proposed configurations, which are presented in sequence, it will be possible to define a viable alternative to mitigate the noise at accepted levels, which meet the regulations in force.

**Figure 6 - Top view of the substation with the C1A configuration.**



Source: Authors.

Figure 6 shows two blue lines crossing the transformers and the control building, located in the center of the substation, which indicate the position of the vertical calculation areas, which will be presented later. Still in Figure 6 it is possible to verify that the sound waves disperse in a radial way, being slightly contained by the existing barriers and walls that surround the substation.

The following are the variations caused by the barriers arranged on the four sides of the transformers, a configuration called C2. These barriers are 2 meters larger than the dimensions of the transformer sides, thus reducing sound diffraction. The upper view of the simulation is shown next in Figure 7, indicating the sound level at the homes after the barriers are inserted. When comparing the results obtained with the C2 and C1A configurations, a reduction of approximately 3% is noticed when simulating with C2.

In Figure 7 the influence of the barriers on the form of sound dispersion is visible, causing a large reduction in the regions after the barriers, which correspond to the colors red and bordered. In the regions where there was no interference the sound was dispersed in a very similar way to the dispersion that occurred in the C1A configuration, thus generating a low level of noise mitigation.



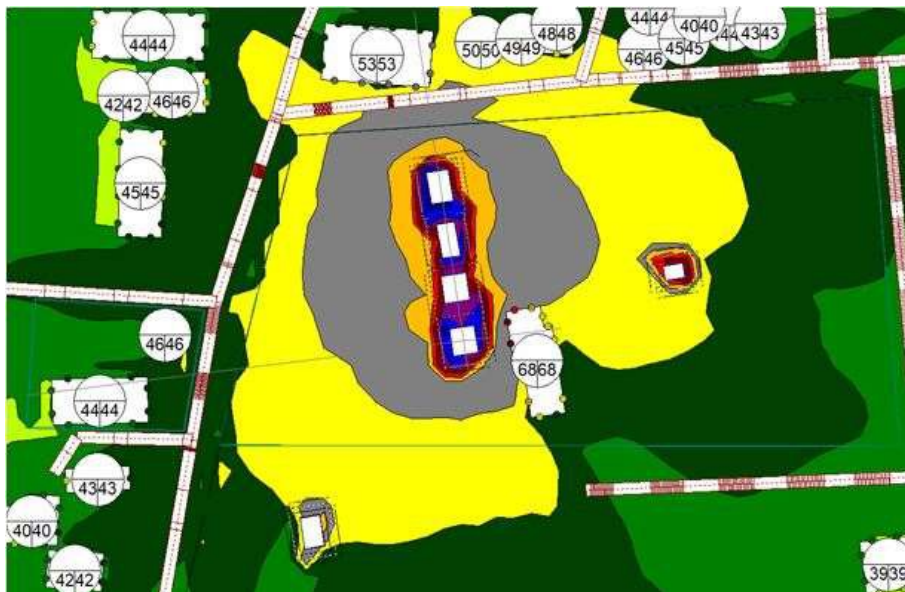
**Figure 7** - Top view of the substation with the C2 configuration.



Source: Authors.

The C3 configuration, presented below, contemplates barriers that enclose the transformer sides, having 6 meters and height and being positioned 3 meters from them, in the same way as in C2. The horizontal noise map generated by the C3 configuration is shown in Figure 8, together with the noise level at the homes near the substation. When the values of C1A and C3 are compared, a reduction of about 13% in the sound pressure level can be verified. Due to the encapsulation characteristic of the adopted configuration, the sound wave is dispersed with lower levels than the other configurations, this way it propagates with less energy, in and around the substation. Another explanation for this can be found in Figure 1 located in section 2.3, which indicates that the total enclosure reduces the diffraction of the sound wave since it will not circumvent the barrier or move towards the residence.

**Figure 8** - Top view of the substation with the C3 configuration.



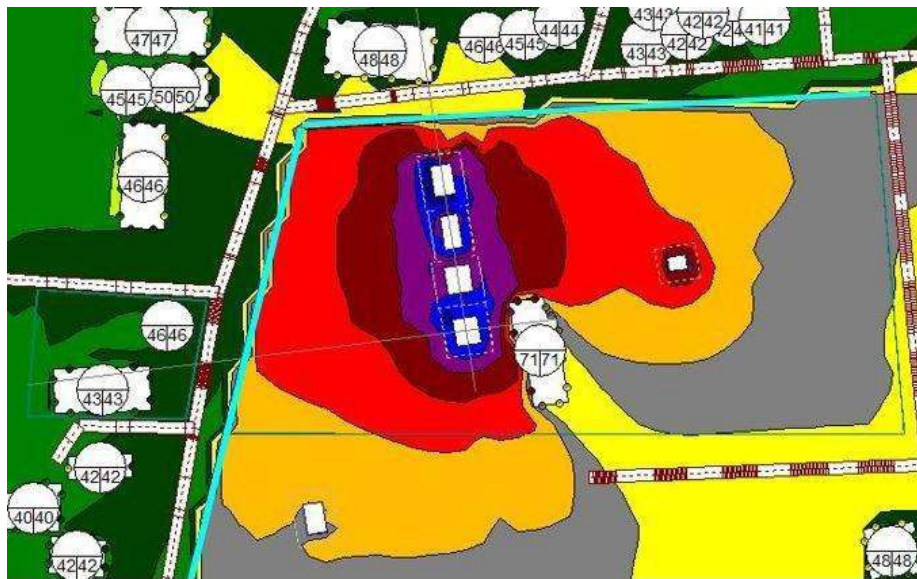
Source: Authors.

The following are the simulations with barriers on the perimeter of the substation, a configuration named C4, 9 meters high. The upper view of the substation with the sound level of the nearby residences and the position of the barriers in blue is

shown in Figure 9. This shape of barrier has a more expensive construction due to the size and position of the barriers, but has the advantage of the distance from the transformers, not hindering the cooling and care with their wiring. Such a barrier format may have the disadvantage of municipal regulations related to the environment and urban issues.

The values of the noise level incident in homes, from the simulation of the C4 configuration, are up to 21% lower than those presented for C1A, and this reduction is partly generated by the shadow zone of the barriers, which extends over the dwellings adjacent to the substation, thus allowing noise attenuation.

**Figure 9** - Top view of the substation with the C4 configuration.



Source: Authors.

Finally, a simulation was carried out combining the variants named C3 and C4, this configuration features barriers that enclose the transformer sides, as well as barriers on the substation perimeter. Such configuration is indicated in Table 1 as C5.

Figure 10 shows the upper view of the substation, indicating from the color scheme the distribution and intensity of the noise as well as the level incident in the neighboring homes. By comparing it with the simulation of the current substation situation, C1A, a noise reduction of up to 29% can be verified. In comparison with the configurations C3 and C4, which originate C5, a reduction of 4 to 6 dB can be noticed.

**Figure 10** - Top view showing sound values and sound distribution for the C5 configuration.



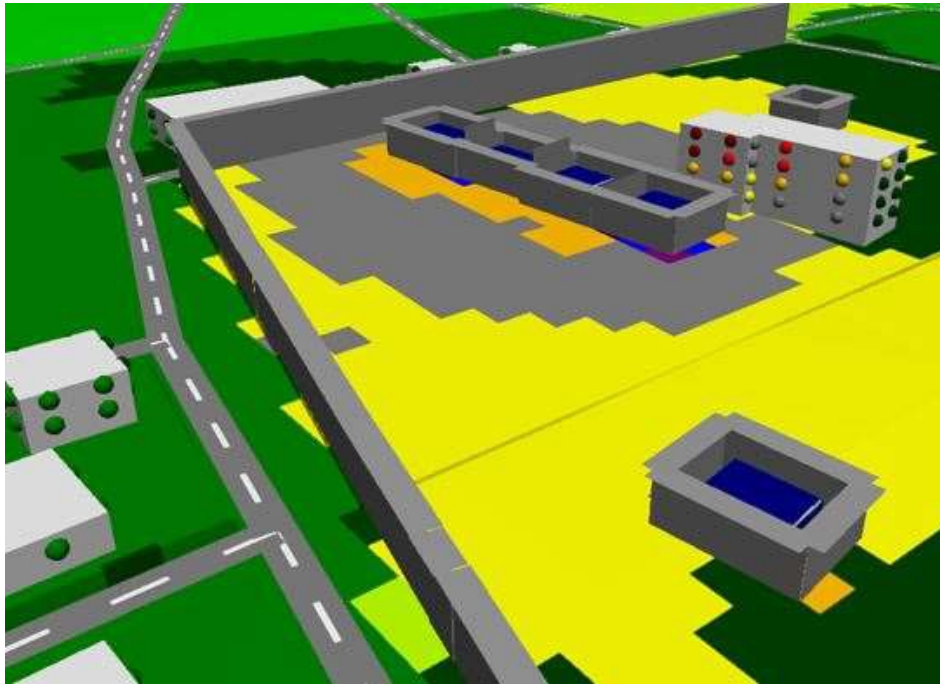
Source: Authors.

In order to improve understanding of the C5 configuration, a 3D view of it is shown in Figure 11. The areas represented in the various colors, as defined in the legend of Figure 5, make it difficult to propagate the sound wave, dissipating much of its energy, already in the vicinity of the transformers.

Presented below is Table 2, which illustrates vertical noise maps, generated from numerical simulation. The images were obtained by applying a cut in relation to a section of the transformers, indicated by a blue line next to Figure 6. The transformers are installed near the substation command building. The vertical sections have been defined to facilitate the analysis, with a standard height of 20 meters.

Such a table has been set up to ensure the possibility of directly visually analyzing variations in sound pressure levels when the different settings, already detailed in Table 1, are tested. Besides these, configurations C2, C3 and C4 were simulated, without the use of top geometries.

**Figure 11** - 3D view of the C5 configuration.



Source: Authors.


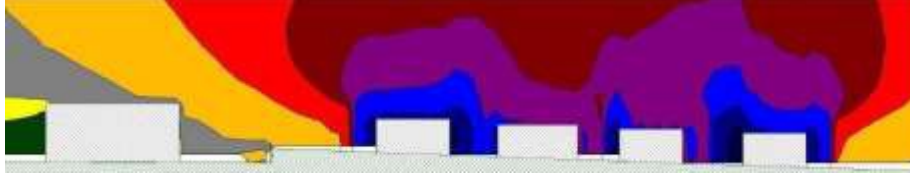

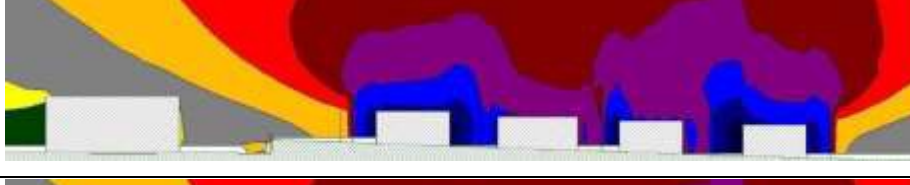


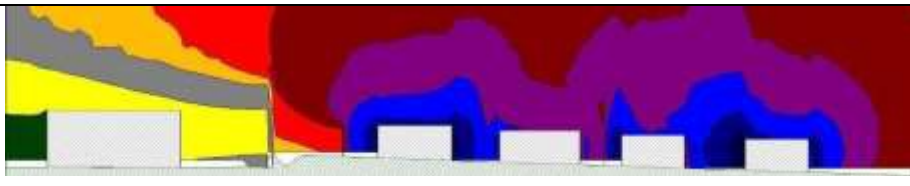

The calculation area used to generate the results of Table 2 was positioned on the central transformers, TR1 to TR4, extending it to one of the residences neighboring the substation, illustrated to the left of the figure (white block, bottom left corner). To facilitate the understanding of the vertical section, the observer should orient himself/herself by the wind rose present in the lower right corner of the figure, positioning him/herself on the left and viewing the substation in an easterly direction, according to Figure 6. This cutting section is applied to all the configurations, in order to guarantee a pattern for the area studied. Analyzing the dispersion of the vertical sound maps, it can be seen that the propagation takes place in a radial way, the configuration being called C1A relative to the simulation with the condition in which the substation is currently located, that is, standard condition.

The configurations described as C2, C3, C4 and C5 bring with them, in numerical simulation, a variant called top, in which a T-shaped flap is added next to the barrier. For variants C2, C3 and C4, one more possibility is incorporated into the analysis, not inserting flaps at the top of the barrier. When comparing the settings created with the standard model (C1A), noise attenuation is noticeable on both the left and right edges of all images contained in Table 2. In some cases, there is alternation between the bordering and gray areas, which have sound ranges of 65 to 70 dB and 50 to 55 dB respectively.

Another important characteristic found is linked to top geometries, which tend to reduce the radius of the sound wave in the horizontal direction of propagation and increase the noise in the vertical direction. This characteristic becomes important in regions where there are buildings adjacent to the analyzed site.

The C4 and C5 configurations presented the best results in the simulation, as can be seen through their respective images. It is observed that the inclusion of barriers, enclosing the transformers and bypassing a good part of the substation perimeter, provides an attenuation that guarantees sound levels close to the residence that vary from 35 to 55 dB, alternating between the green, yellow and gray areas, according to data in Figure 5.

**Table 2** - Vertical Noise Maps on Central Transformers.

Configuration	Vertical Noise Map/Transformers
C1A	
C2 Simple	
C2 With Top	
C3 Simple	
C3 With Top	
C4 Simple	
C4 With Top	
C5 With Top	

Source: Authors.

Table 3 summarizes the results of the vertical calculation areas that cross the TR1 transformer and the command building (further right), as indicated by one of the blue lines in Figure 6. More to the left, of all the images linked to the table, one of the residences near the substation. To facilitate the understanding of this cut, the observer should be guided by the TR6 transformer, which is located further south of the substation, viewing it in a north direction, as shown in Figure 6.

All the configurations indicated in Table 1 were simulated, adding to them the configurations C2, C3 and C4, without the use of top geometry. Visually, using the color maps, it is noticed, due to the radial dispersion of the colored areas, that the noise levels are lower for all variations, when compared to the current configuration, C1A.

When analyzing the C2 and C3 settings, with top and simple, a very small change in their respective color maps is noticed. The little influence of the top geometries, in these cases, is due to the low frequencies emitted by the transformers, which as explained in section 2.5, facilitates the diffraction of the sound wave, making noise mitigation difficult. Furthermore, it can be seen that the lower noise levels observed in the C3 configurations, if compared to those linked to C2, are the result of the encapsulation of the transformers.

The C4 and C5 configurations present lower noise levels, close to the residence, if compared to the other variations. This is due to the greater height of the barrier positioned at the substation perimeter, corroborating what was indicated in section 2.3. This situation occurs because the diffraction, due to the barrier being higher, makes the arrival of the sound wave to the receiver (residence) difficult.









Using the 'Insertion Loss' indicator, presented in section 2.3, which describes if the sound level was affected by the insertion of the barriers, it is also possible to evaluate the vertical noise maps indicated in Table 3. Thus, it is assumed that the most significant results are linked to the C4 and C5 configurations, mixing the encapsulation of the transformers and the barrier installed at the substation perimeter with a height of 9 m, even without observing significant changes due to the use of top geometries.

In Table 4 the main results obtained in the simulations are summarized and linked to their respective configurations. Criteria of greater relevance (CRAEB), related to each variation, are also highlighted. In addition, the maximum sound pressure level outside the substation perimeter, found in each of the simulations, and the values of the highest insertion loss (IL), generated by each configuration, when compared to the results relative to the current situation, C1A, are presented. It should be noted that the points where the greatest noise reductions occur are not coincident for all variations.

The alternatives C3 and C4 presented similar noise reductions, however, due to different reasons. In variant C3, the encapsulation of the transformers proved to be more effective for noise reduction, since it prevents diffraction through the sides of the barriers, while for C4, the acoustic shadow zone, generated by a barrier that has greater height, made such reduction possible.

Also, it can be identified that for the C4 and C5 configurations, the greatest differences between sound pressure levels are obtained, when they are compared to the current configuration, C1A.

**Table 3 - Vertical Noise Maps Over the Command Building.**

Configuration	Vertical Noise Map/Command Building
C1A	
C2 Simple	
C2 With Top	
C3 Simple	
C3 With Top	
C4 Simple	
C4 With Top	
C5 With Top	

Source: Authors.

**Table 4 - Overview of Results for Different Settings.**

Summary of Results– Horizontal Maps			
Configuration	Maximum Sound Pressure Level (dB)	Higher Insertion Loss (dB)	CRAEB*
C1A	61	-	-
C2	59	4	Barriers installed next to the transformers
C3	53	12	Total encapsulation of transformers
C4	50	13	Higher barrier height
C5	48	17	Total enclosure of the transformers allied to the greater height of the barrier

\*CRAEB – most relevant criterion for increasing barrier efficiency. Source: Authors.

## 5. Conclusion

From simulations, detailed throughout the study, it is concluded that there is a possibility of obtaining real efficiency gains, mitigating the noise existing today, when different types of barriers are installed at strategic points of the substation.

It was highlighted configurations where the barriers were positioned in the perimeter of the substation, with a greater height than the others tested, besides those that use the idea of total enclosure of the transformers.

The use, in some variants, of top geometries did not generate the results previously glimpsed, due to the characteristics of the noise emitted by the sound sources present in the substation. Another conclusion regarding such geometries is associated with their dimensions, which generate an increase in efficiency as the top width approaches the height of the barrier. In this research such a possibility would be made impossible due to the interference between the top of the barrier and the transformer wiring.

In cases where less noise reductions are required, it is advisable to use the four side barriers to the transformers, linked to the C2 configuration. This is because, besides the smaller amount of material to be used in their construction, there will be less influence on heat exchanges, avoiding the heating of the transformer.

In the situation where the transformers are enclosed, C3, the reduction was more accentuated, mitigating on average 9 dB, and may reach 12 dB in some homes near the substation. Such configuration can be used in situations where a great sound reduction is necessary, however in some cases it will be necessary to rethink the form of cooling of the transformers, in view of their loss of efficiency due to heating.

Looking for a solution that corrects all the inconveniences highlighted above, the configuration with higher barriers, C4, positioned on the perimeter of the substation is indicated, thus reducing the sound level in nearby residences without affecting the heat changes of the transformers. This configuration generated similar results to those associated with the enclosure of the transformers, with an average reduction of 9 dB, which can reach 13 dB in some points. In this case the obstacle would be the large amount of material needed to build the barrier, which could also infringe some municipal regulations.

The last simulated configuration combined the enclosure of the transformers and barriers installed in the perimeter of the substation, generating a large reduction in sound level, around 14 dB with values reaching 17 dB in some homes.



Finally, it is observed that the use of acoustic barriers can be a viable solution for several situations, whether occasional or not. However, a previous analysis is needed, not only related to the issue of noise reduction, but also related to costs, compliance with current regulations, operational safety, among others.

It is still indicated for future studies to evaluate the case with greater specificity, for the implantation of barriers with the best cost benefit, also verifying the possibility of using barriers of different materials and acoustic properties.

## Acknowledgements

The authors thank the financial support of the Companhia Estadual de Energia Elétrica – Geração e Transmissão (CEEE-GT) and especially to the manager, Daniel Wagner de Castro Lima, through the Research and Development Program of the National Electric Power Agency (ANEEL) under contract no. 5000003835, as well as the institutional support of the Fundação Universidade de Passo Fundo (FUPF). They also thank the colleagues of LINTEC, Juliano Wagner Daronch and Pamela de Matos, for their assistance with the article.

## References

- ABNT NBR 10151, de 31 de março de 2020. Acústica - Medição e avaliação de níveis de pressão sonora em áreas habitadas – Aplicação de uso geral. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Assunção, A. A., Abreu, M. N. S., & Souza, P. S. N. (2019). Prevalência de exposição a ruído ocupacional em trabalhadores brasileiros: resultados da Pesquisa Nacional de Saúde. *Cad. Saúde Pública*, 35(10).
- Attenborough, K. (2002). Sound Propagations close to the ground. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 34, 51-82. 10.1146/34.081701.143541
- Bies, D. A., & Hansen, C. H. (2003), *Engineering Noise Control: Theory and Practice*. Spon Press.
- Daigle, G. (1999). Final Report: Technical assessment of the effectiveness of noise walls. *I-INCE Publication*, 99-1, 137-161. <http://i-ince.org/>
- de Castro, A. C. L., Fontes, K. D. de S. A., Ferreira, T. E. D., & Gontijo, H. M. (2019). Addressing the impact of environmental noise in public schools in the city of Minas Gerais. *Research, Society and Development*, 8(3), e1683716. 10.33448/rsd-v8i3.716
- Fachin, O (2005). *Fundamentos de Metodologia*. Editora Saraiva.
- Federal Highway Administration. (2014). *Environment*. <https://www.fhwa.dot.gov/environment/noise/>
- Freitas, E., & Trábulo, L. (2007). Desempenho de Barreiras Acústicas: Dois métodos de avaliação. *Revista Engenharia Civil*. 29, 15-26. <http://repositorium.sdum.uminho.pt/>
- Hendriks R., Rymer B., Buehler D., & Andrews J. (2013). Technical Noise Supplement to the Caltrans Traffic Noise Analysis Protocol: A Guide for the Measuring, Modeling, and Abating Highway Operation and Construction Noise Impacts. Departamento de transportes de California.
- Langaro, D. D., & Setti, A. (in press). Padronização de Medições de Níveis de Pressão Sonora e Estudo de Caso Sobre Ruídos Acústicos em Subestação de Energia Elétrica. Passo Fundo, 2020.
- Larsson, C. (1997). Atmospheric absorption conditions for horizontal sound propagation. *Applied Acoustics*, 50(3), 231-245. 10.1016/S0003-682X(96)00068-0
- Leissing, T. (2007). *Nonlinear outdoor sound propagation*. (Dissertação de mestrado). Departamento de Engenharia Civil e Ambiente da Universidade tecnológica de Chalmers,
- Lei Nº 4763, de 18 de janeiro de 2011. Dispõe sobre os valores máximos de ruído e dá outras providências. <https://leismunicipais.com.br/a/rs/p/passo-fundo/lei-ordinaria/2011/476/4763/lei-ordinaria-n-4763-2011-modifica-a-redacao-da-lei-n-2427-de-27-de-abril-de-1988-e-da-outras-providencias>
- Resolução Nº. 02/2015. Regulamenta o volume e a frequência dos sons produzidos por fontes fixas e dá outras providências. <http://www.pmpf.rs.gov.br/servicos/geral/multimedia/propostaDeResolucaoCMMA.pdf>
- Radoi, A. (2015). *The Establishing of the Insertion Loss of the Noise Barriers*. DAAAM International Scientific Book (pp.173-188). B. Katalinic
- Tadeu A., António, J., & Castro, I. (2012). Sound pressure attenuation provided by a 3D rigid acoustic barrier on a building façade: the influence of its longitudinal shape. *Boundary Elements and Other Mesh Reduction Methods XXXIV*, 53, 25-27. 10.2495/BE120221
- Wakefield Acoustics Ltd., (2012). *City of Vancouver Noise Control Manual*.
- Watts, G. (2002). Barrier designs to reduce road traffic noise. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. 153(2), 79-86. 10.1680/tran.2002.153.2.79

WHO - World Health Organization. (2011). Burden disease from environmental noise qualification of healthy life years lost in Europe. *Quantifying environmental health impacts*. [https://www.who.int/quantifying\\_ehimpacts/publications/e94888/en/#:~:text=Environmental%20burden%20of%20diseas,e%20from%20noise%20in%20Europe%20%2D%20WHO%20EURO&text=The%20health%20impacts%20of%20environmental,the%20western%20part%20of%20Europe](https://www.who.int/quantifying_ehimpacts/publications/e94888/en/#:~:text=Environmental%20burden%20of%20diseas,e%20from%20noise%20in%20Europe%20%2D%20WHO%20EURO&text=The%20health%20impacts%20of%20environmental,the%20western%20part%20of%20Europe)



# UPF

UNIVERSIDADE  
DE PASSO FUNDO

UPF Campus I - BR 285, São José  
Passo Fundo - RS - CEP: 99052-900  
(54) 3316 7000 - [www.upf.br](http://www.upf.br)