



Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Engenharia Elétrica

Monografia

**ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE ÁUDIO PARA UMA MÁXIMA
COBERTURA HOMOGÊNEA DO AMBIENTE – ESTUDO DE CASO: AMBIENTE
ABERTO**

Jonas Tadeu Sotero Ferreira

João Monlevade - MG

2018

Jonas Tadeu Sotero Ferreira

**ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE ÁUDIO PARA UMA MÁXIMA
COBERTURA HOMOGÊNEA DO AMBIENTE – ESTUDO DE CASO: AMBIENTE
ABERTO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Sarah Negreiros de Carvalho Leite

João Monlevade - MG

2018



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
 Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
 Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
 Colegiado do Curso de Engenharia de Elétrica



ANEXO IV - ATA DE DEFESA

Aos 20 dias do mês de fevereiro de 2018, às 14 horas, no bloco C deste instituto, foi realizada a defesa de monografia pelo formando Jonas Tadeu Sotero Ferreira, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Dr. Fábio Lumertz Garcia, Dr. Glauco Ferreira Gazel Yared e Dr.^a Sarah Negreiros de Carvalho Leite.

O candidato apresentou a monografia intitulada: ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE ÁUDIO PARA UMA MÁXIMA COBERTURA HOMOGÊNEA DO AMBIENTE – ESTUDO DE CASO: AMBIENTE ABERTO. A comissão examinadora deliberou, por unanimidade, pela APROVAÇÃO do candidato, com a nota média 8.0, de acordo com a Tabela 1. Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da comissão examinadora e pelo formando.

Tabela 1 – Notas de avaliação da banca examinadora

Banca Examinadora	Nota
Prof. Dr. Fábio Lumertz Garcia	8.0
Prof. Dr. Glauco Ferreira Gazel Yared	8.0
Prof. ^a Dr. ^a Sarah Negreiros de Carvalho Leite	8.0
Média	8.0

João Monlevade, 20 de fevereiro de 2018.

Prof. Dr. Fábio Lumertz Garcia
 Professor Convidado

Prof.^a Dr.^a Sarah Negreiros de Carvalho
 Professora Orientadora

Prof. Dr. Glauco Ferreira Gazel Yared
 Professor Convidado

Jonas Tadeu Sotero Ferreira
 Aluno



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Colegiado do Curso de Engenharia de Elétrica



ANEXO II - TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado “ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE ÁUDIO PARA UMA MÁXIMA COBERTURA HOMOGÊNEA DO AMBIENTE – ESTUDO DE CASO: AMBIENTE ABERTO” é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 22 de fevereiro de 2018

Jonas Tadeu Sotero Ferreira

Nome completo do(a) aluno(a)

F383a

Ferreira, Jonas Tadeu Sotero.

Análise e otimização de sistemas de áudio para uma máxima cobertura homogênea do ambiente [manuscrito]: Estudo de caso - ambiente aberto / Jonas Tadeu Sotero Ferreira. - 2018.

87f.: il.: color.

Orientador: Profa. Dra. Sarah Negreiros de Carvalho Leite.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Engenharia elétrica. 2. Sistemas de áudio. 3. Otimização matemática. I. Leite, Sarah Negreiros de Carvalho. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 621.37

AGRADECIMENTOS

A Deus que é a razão de todas as coisas. Se cheguei onde estou foi por causa Dele.

A São Judas Tadeu, patrono das causas impossíveis e dos negócios sem remédio, que sempre intercedeu por mim.

Agradeço aos meus pais, Marciano e Suzana, que sempre estiveram ao meu lado me apoiando em minhas decisões e momentos de dificuldade.

Às minhas irmãs, Brenda e Jadhe, por todo companheirismo e apoio durante todo esse tempo.

À minha namorada Lísia, que esteve comigo durante essa longa caminhada, me dando forças para sempre seguir em frente.

À minha prima-irmã, Bruna, que me deu imenso apoio quando ainda estava iniciando essa caminhada.

A todos os meus familiares que, mesmo de longe, torciam pela minha vitória.

A todos os amigos e colegas de curso que compartilharam comigo essa jornada, em especial a Eduardo, Fabiana e Thiago, amizades que espero levar para vida toda.

À minha orientadora, Professora Doutora Sarah Negreiros de Carvalho Leite, por toda paciência, apoio e compreensão durante a realização deste trabalho.

À empresa MS SOM & LUZ e seus funcionários que me auxiliaram durante os experimentos práticos.

RESUMO

Sistemas de áudio são fundamentais em eventos de grande público. Estes são responsáveis por fazer com que toda a plateia ouça o que está sendo propagado. Este trabalho aborda como surgiu a necessidade dos sistemas de áudio e como eles foram evoluindo. São apresentados o funcionamento destes sistemas e algumas técnicas de montagens que são utilizadas na implementação prática. Durante este trabalho foram simulados os arranjos de áudio no software NS-1. Posteriormente, os arranjos simulados foram inseridos em um ambiente aberto e foram mensurados, via software Smaart, os níveis acústicos para validar a cobertura acústica homogênea do ambiente.

ABSTRACT

Audio systems are critical in events with large audience, once they are responsible for providing to the audience a good comprehension of the propagated sounds. In this way, this work addresses the importance of audio systems and their evolution. Systems operations and some practical implementations techniques are presented as well. During the development of this work, audio arrangements were simulated in NS-1 software. Afterward, the simulated arrangements were submitted to an open environment and, by the Smaart software, the acoustic levels were measured in order to validate the environment homogeneous acoustic coverage..

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: <i>Festival Woodstock</i> , imagem frontal do palco.	16
Figura 2: Visão lateral do palco utilizado no <i>Festival Woodstock</i>	17
Figura 3: Montagem palco Rock in Rio 1991.	18
Figura 4: Palco do Rock in Rio 1991, montagem finalizada.	18
Figura 5: Modelo de caixas de som utilizadas até o final da década de 1990.	19
Figura 6: Palco Rock in Rio 2001. São mostradas três das quatro torres de PA utilizadas.	20
Figura 7: Uma das torres de caixas de som utilizadas no Rock in Rio 2001.	21
Figura 8: Palco Rock in Rio 2015, vista frontal.	22
Figura 9: Palco no Rock in Rio 2015, vista frontal aproximada.	23
Figura 10: Sistema utilizado pela Banda Grateful Dead durante a década de 1980.	24
Figura 11: Diagrama de blocos de um sistema de áudio profissional.	27
Figura 12: Vista frontal Ls9 32.	29
Figura 13: Vista posterior Ls9 32.	29
Figura 14: Vista frontal DriveRack 4800.	30
Figura 15: Vista posterior DriveRack 4800.	30
Figura 16: Vista frontal DriveRack VENU360.	30
Figura 17: Vista posterior DriveRack VENU360.	31
Figura 18: Sistema de áudio utilizado.	31
Figura 19: Tela principal software de predição NS-1.	34
Figura 20: Tela para ajustes de parâmetros de resposta.	35
Figura 21: Função de transferência e resposta de fase em função do espectro de frequência.	36
Figura 22: Vista frontal M-Track Quad.	37
Figura 23: Vista posterior M-Track Quad.	37
Figura 24: Sistema de medição utilizado.	38
Figura 25: Exemplo de arranjo <i>end-fire</i>	40
Figura 26: Arranjo <i>end-fire</i>	40
Figura 27: Exemplo de arranjo cardioid.	41
Figura 28: Vista aérea do Parque de Eventos Pref. João Antônio de Carvalho.	42
Figura 29: Esquemático da aproximação realizada.	43
Figura 30: Vista do Parque de Eventos para um observador presente no palco.	44
Figura 31: Área de trabalho para as simulações.	45
Figura 32: Coordenadas dos pontos de medição.	46

Figura 33: Demonstração da aplicação das caixas modelo GEO S1230.	47
Figura 34: Angulações geradas automaticamente via NS-1.	47
Figura 35: Resposta resultadas das angulações geradas automaticamente.	48
Figura 36: Novos ângulos após terem sido feitas as correções.	49
Figura 37: Resposta após terem sido feitas as correções dos ângulos.	50
Figura 38: Resposta SPL referente aos ângulos apresentados na Figura 34.	51
Figura 39: Resposta SPL referente aos ângulos apresentados na Figura 36.	51
Figura 40: Arranjo LR convencional.	53
Figura 41: Resposta SPL para o arranjo LR convencional.	53
Figura 42: Arranjo <i>end-fire</i>	54
Figura 43: Resposta SPL para o arranjo <i>end-fire</i>	55
Figura 44: Arranjo <i>cardioid</i>	56
Figura 45: Resposta SPL para o arranjo <i>cardioid</i>	57
Figura 46: Resposta SPL <i>cardioid</i> com as caixas voltadas para o palco desligadas.	58
Figura 47: Resposta SPL grupo A. Ponto 1: roxa. Ponto 2: verde. Ponto 3: vermelha.	62
Figura 48: Resposta SPL grupo B. Ponto 5: verde. Ponto 6: azul. Ponto 7: amarela.	63
Figura 49: Resposta SPL grupo C. Ponto 4: verde. Ponto 6: azul. Ponto 8: vermelha.	64
Figura 50: Resposta SPL grupo D. Ponto 9: laranja. Ponto 10: verde. Ponto 11: azul.	64
Figura 51: Resposta SPL grupo E. Ponto 10: verde. Ponto 12: vermelha. Ponto 13: roxa.	65
Figura 52: Resposta SPL grupo F. Ponto 2: marrom. Ponto 6: azul. Ponto 10: verde.	66
Figura 53: Comparação entre a resposta flat e resposta corrigida para o ponto 10. Cor rosa: resposta corrigida. Cor verde: resposta flat.	67
Figura 54: Resposta SPL grupo A para sistema corrigido. Ponto 1: roxa. Ponto 2: verde. Ponto 3: vermelha.	68
Figura 55: Resposta SPL grupo B para sistema corrigido. Ponto 5: verde. Ponto 6: azul. Ponto 7: amarela.	69
Figura 56: Resposta SPL grupo C para sistema corrigido. Ponto 4: verde. Ponto 6: azul. Ponto 8: vermelha.	70
Figura 57: Resposta SPL grupo D para sistema corrigido. Ponto 9: laranja. Ponto 10: verde. Ponto 11: azul.	71
Figura 58: Resposta SPL grupo E para sistema corrigido. Ponto 10: verde. Ponto 12: vermelha. Ponto 13: roxa.	71
Figura 59: Resposta SPL grupo F para sistema corrigido. Ponto 2: marrom. Ponto 6: azul. Ponto 10: verde.	72

Figura 60: Resposta SPL grupo A arranjo end-fire. Ponto 1: roxa. Ponto 2: verde. Ponto 3: vermelha.	74
Figura 61: Resposta SPL grupo B arranjo end-fire. Ponto 5: verde. Ponto 6: azul. Ponto 7: amarela.....	75
Figura 62: Resposta SPL grupo C arranjo end-fire. Ponto 4: verde. Ponto 6: azul. Ponto 8: vermelha.	75
Figura 63: Resposta SPL grupo D arranjo end-fire. Ponto 9: laranja. Ponto 10: verde. Ponto 11: azul.	76
Figura 64: Resposta SPL grupo E arranjo end-fire. Ponto 10: verde. Ponto 12: vermelha. Ponto 13: roxa.....	77
Figura 65: Resposta SPL grupo F arranjo end-fire. Ponto 2: marrom. Ponto 6: azul. Ponto 10: verde.	78
Figura 66: Resposta SPL grupo A arranjo cardioid. Ponto 1: roxa. Ponto 2: verde. Ponto 3: vermelha.	79
Figura 67: Resposta SPL grupo B arranjo cardioid. Ponto 5: verde. Ponto 6: azul. Ponto 7: amarela.....	79
Figura 68: Resposta SPL grupo C arranjo cardioid. Ponto 4: verde. Ponto 6: azul. Ponto 8: vermelha.	80
Figura 69: Resposta SPL grupo D arranjo cardioid. Ponto 9: laranja. Ponto 10: verde. Ponto 11: azul.	81
Figura 70: Resposta SPL grupo E arranjo cardioid. Ponto 10: verde. Ponto 12: vermelha. Ponto 13: roxa.....	81
Figura 71: Resposta SPL grupo F arranjo cardioid. Ponto 2: marrom. Ponto 6: azul. Ponto 10: verde.	82

LISTA DE ABREVIACOES

LR – *left right*

PA – *Public Adress*

SPL – *Sound pressure level*

USB – *Universal Serial Bus*

WC - *Water Closet*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 História	14
1.2 Motivações e justificativas do projeto	24
1.3 Objetivos	25
<i>1.3.1 Objetivo geral</i>	25
<i>1.3.2 Objetivos específicos</i>	26
1.4 Estrutura do trabalho	26
2 O SISTEMA DE ÁUDIO	27
2.1 Sistema de áudio: princípios básicos	27
2.2 Equipamentos utilizados	28
2.2.1 Softwares utilizados	33
3 METODOLOGIA	39
3.1 Arranjos utilizados	39
<i>3.1.1 LR Convencional</i>	39
<i>3.1.2 End-fire</i>	39
<i>3.1.3 Cardioid</i>	41
4 LOCAL DE TRABALHO	42
5 SIMULAÇÕES	45
5.1 Análise do Arranjo LR Convencional	52
5.2 Análise do Arranjo <i>End-fire</i>	54
5.3 Análise do Arranjo <i>Cardioid</i>	56
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
6.1 Sistema <i>flat</i> + LR Convencional	61
6.2 Sistema corrigido + LR Convencional	67
6.3 Arranjo de Subgrave <i>end-fire</i>	73

6.4 Arranjo Subgrave <i>cardioid</i>	78
6.5 Considerações Finais	83
CONCLUSÃO.....	84
REFERÊNCIAS	86

1 INTRODUÇÃO

Festas e eventos que ocorrem em todo o mundo dependem de sistemas de sonorização que permita realizar shows em diferentes ambientes, para diferentes públicos e com alcances adaptáveis. Com o passar do tempo e a evolução tecnológica, os sistemas de áudio estão cada vez mais robustos, potentes e menores. Atualmente, existem diversas empresas de áudio que investem no desenvolvimento de novos produtos e novas tecnologias, impulsionando esse ramo numa velocidade incrível. Empresas como Yamaha, DiGiCo, JBL e LS Audio são apenas algumas, dentre as diversas empresas que atuam neste segmento.

Diariamente são realizados inúmeros eventos no mundo inteiro, pelos quais passam diversos artistas e milhares de pessoas. Uma das peças mais importantes neste tipo de situação, em que o artista precisa ser ouvido por todo o seu entorno, é o sistema de sonorização. Este sistema é responsável por proporcionar condições para que o sinal acústico chegue com qualidade a todo o público presente no local.

Nesses eventos, técnicos de áudio devem sempre estar preocupados em obter uma máxima cobertura homogênea do local onde se está trabalhando. Este trabalho discute diversos conceitos que contribuem para o alcance de uma cobertura aceitável do ambiente a partir de testes feitos com diferentes arranjos do sistema acústico.

Desta maneira, primeiramente, foram realizadas simulações de arranjos e, em seguida, foram aplicados todos os conceitos vistos em uma situação real, empregando um sistema de áudio em um evento. Deve-se considerar, entretanto, que existem alguns fatores que não podem ser alterados pelo homem, como a temperatura e umidade relativa do ar, que impedem uma perfeita homogeneização da cobertura do ambiente. Ao final deste trabalho, são apresentados resultados de cobertura de um show de pequeno porte, realizado no Parque de Exposições de Santa Bárbara do Tugúrio, Minas Gerais.

1.1 História

Para contextualizar melhor este projeto é necessário rever como surgiu a necessidade dos sistemas de áudio e como estes sistemas foram evoluindo historicamente. Apresenta-se a seguir, uma breve descrição de alguns eventos marcantes para os sistemas de áudio no mundo, os quais exigiram uma demanda muito grande por equipamentos de sonorização.

Anteriormente à década de 60, alguns pequenos festivais musicais ocorriam ao redor do mundo. Eram eventos locais e para pequenos públicos. Em 1969, aconteceu o *Festival*

Woodstock nos Estados Unidos. Com três dias de duração, o festival era direcionado ao rock e aos atos Contraculturais, que eram a prática de sexo e o uso de drogas (LANG, 2010).

Apesar de muitas polêmicas que cercaram - e ainda cercam - o *Festival Woodstock*, ele foi um marco importante para a cena mundial do áudio devido ao fato de ter reunido cerca de meio milhão de pessoas, (FERNANDES, 2017), coisa que nunca havia acontecido antes. Nesse contexto, Lemos (2011) afirma que a tecnologia disponível naquela época interferiu muito na qualidade sonora do festival, a ponto dos espectadores precisarem ficar muito próximos ao palco para poderem ouvir os shows, visto que a qualidade do áudio ficava muito prejudicada quando se distanciava do palco. Esta é uma falha muito comprometidora para um evento, mas compreensível, quando se consideram os recursos tecnológicos disponíveis à época.

Após 16 anos, em 1985, o empresário brasileiro Roberto Medina criou o que hoje é reconhecido como o maior festival de música do mundo, o Rock in Rio. Segundo o site oficial do evento, houve 17 edições e todas contaram com grande público. Considerando-se todas as edições, participaram do Rock in Rio 8,5 milhões de pessoas na plateia, 1.588 artistas escalados em seus palcos e 101 dias de festival desde sua primeira edição. Por conta destes imponentes números, o Rock in Rio é o evento de referência para os trabalhadores da área de áudio, possuindo os equipamentos mais sofisticados, as mais altas tecnologias, as melhores técnicas e os mais qualificados profissionais da área. De acordo com o Grupo 5W (2015), a obra *Rock in Rio 30 anos*, retrata muito bem a história dos primeiros 30 anos deste grandioso festival.

Pode-se considerar que *Woodstock* foi um precursor para o avanço das tecnologias sonoras e o Rock in Rio deu continuidade a este processo. As Figuras de 1 a 10 apresentam o desenvolvimento dos sistemas e das técnicas de som.

Traçando uma pequena linha do tempo dos acontecimentos marcantes para o áudio, tem-se inicialmente o *Festival Woodstock*, em 1969, como é mostrado na Figura 1. Vale destacar nesta imagem a forma precária de estruturação da sustentação dos equipamentos sonoros. Têm-se caixas de som muito grandes e em poucas unidades. De acordo com Lemos (2011), este sistema de sonorização foi insuficiente para fornecer uma cobertura total do ambiente onde ocorreu o festival.

Figura 1: *Festival Woodstock*, imagem frontal do palco.



Fonte: ALVES¹, 2009.

Analisando a estrutura em amarelo na Figura 1, observa-se que o sistema de som foi dividido em duas torres, em que cada uma possuía um sistema inferior e um sistema superior de caixas de som. O sistema foi dividido desta maneira para tentar abranger o máximo de pessoas no local, sendo os sistemas inferiores responsáveis por atender o público mais próximo ao palco, e os superiores responsáveis pelo público mais afastado.

Ainda sobre o *Festival Woodstock*, a Figura 2 permite dimensionar o tamanho e a quantidade dos equipamentos utilizados no palco, bem como o tamanho do palco em si. Observa-se que o palco é muito pequeno se comparado às estruturas utilizadas hoje.

¹ Disponível em: <<https://topicospeciais1.wordpress.com/2009/04/30/o-woodstock-brasiliense/>>. Acessado em 13/01/2017.

Figura 2: Visão lateral do palco utilizado no *Festival Woodstock*.



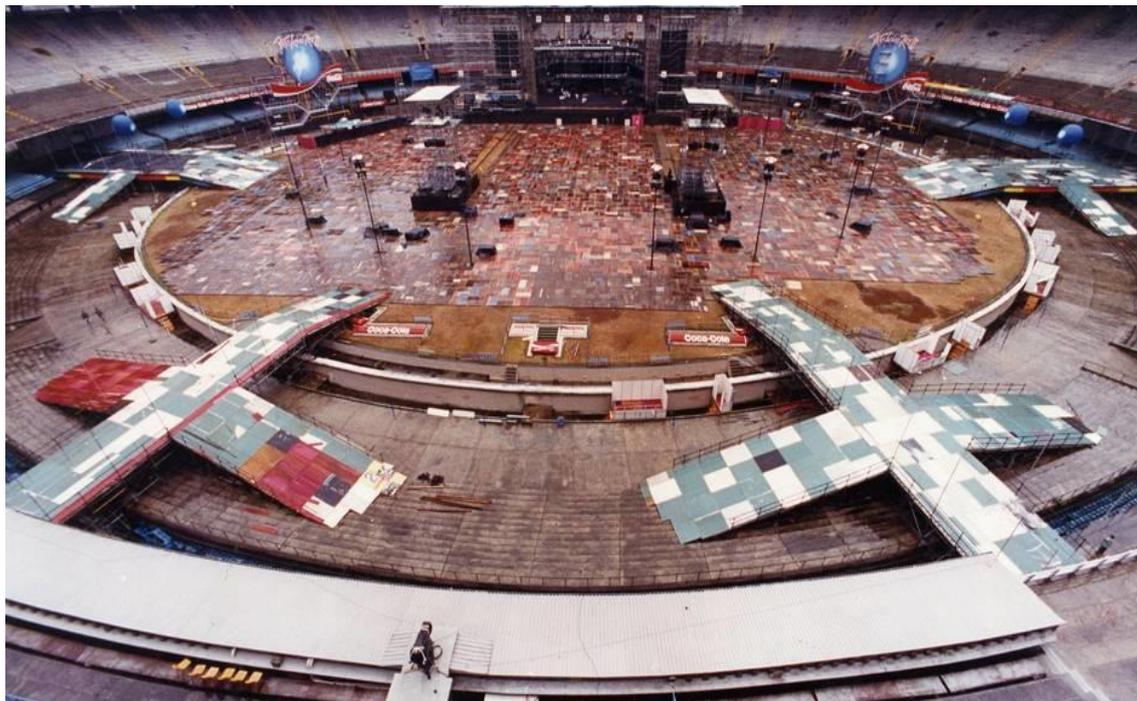
Fonte: PEIXOTO², 2012.

Quase duas décadas depois deste épico evento, houve a primeira edição do Rock in Rio, que se tornou o maior festival de música do mundo. Não foram encontrados registros fotográficos sobre o sistema de sonorização usado.

Na segunda edição do evento Rock in Rio, em 1991, foi apresentada uma estrutura muito maior em termos de mídia e cobertura do evento. As Figuras 3 e 4 retratam o sistema de som utilizado nesta edição. Observa-se que a tecnologia da época dispunha de caixas extremamente grandes e com potência relativamente baixa para os padrões atuais, resultando em imensos paredões de caixas de som, que podem ser vistos nas laterais do palco mostrado nas Figuras 3 e 4.

² Disponível em: <<https://hqrock.wordpress.com/tag/joe-cocker/>>. Acessado em 13/01/2017.

Figura 3: Montagem palco Rock in Rio 1991.



Fonte: O GLOBO³.

Figura 4: Palco do Rock in Rio 1991, montagem finalizada.



Fonte: MIRANDA⁴, 2016.

³ Disponível em: <<http://acervo.oglobo.globo.com/fotogalerias/o-festival-de-rock-em-1991-2001-2011-9938905>>. Acessado em 13/01/2017.

⁴ Disponível em: <http://revista.cifras.com.br/artigo/veja-15-curiosidades-sobre-o-rock-in-rio-1991-que-chega-ao-seu-25o-aniversario_11356>. Acessado em 13/01/2017.

Conforme pode ser visto na Figura 3, a utilização de torres de sustentação para caixas de som passou a ser implicitamente uma norma, sendo necessárias, no mínimo, duas dispostas nas laterais do palco. Este arranjo é normalmente denominado de *Public Address* (PA), ou *endereçado ao público*, se traduzido para o Português.

Como já mencionado, os sistemas de sonorização da época eram muito grandes e tinham baixa potência. Uma caixa pesava entre 80 Kg e 130 Kg dependendo do modelo, e tinha dimensões de altura, largura e profundidade de cerca de: 1067 mm, 670 mm e 749 mm respectivamente, como ilustra a Figura 5. Um evento como a segunda edição do Rock in Rio, que necessitava de dezenas destas caixas em cada lado do palco, tornava o trabalho de montagem muito oneroso, além de exigir estruturas rígidas de sustentação do arranjo, capazes de suportar o peso e espaço para montagem. Todos esses inconvenientes foram determinantes para motivar o avanço das tecnologias que culminaram em produtos mais leves e potentes.

Figura 5: Modelo de caixas de som utilizadas até o final da década de 1990.



Fonte: BOLERO INSTRUMENTOS MUSICAIS⁵.

Em 2001 ocorreu a terceira edição do Rock in Rio, sendo considerado o evento que marcou a evolução do sistema com a utilização dos PA's mais modernos. Os novos modelos de caixas de som eram mais compactos, leves e com excelente qualidade sonora. Este evento foi marcado pela estreia dos arranjos denominados *Line Array*, que consistem em um arranjo vertical de alto-falantes. O sistema de som principal da terceira edição do Rock in Rio contou

⁵ Disponível em: <<http://www.boleromusic.com.br/produto/caixa-acustica-leacs-kf750/93909>>. Acessado em 13/01/2017.

com quatro PA's, sendo dois à direita e dois à esquerda do palco. A Figura 6 mostra três das quatro torres de PA citadas.

Figura 6: Palco Rock in Rio 2001. São mostradas três das quatro torres de PA utilizadas.



Fonte: FILIPO⁶, 2014.

A principal mudança da estrutura de sonorização se deu no tamanho das caixas de som, o que reduziu consideravelmente o espaço ocupado pelos sistemas de áudio. O peso das caixas também diminuiu, facilitando o manuseio e montagem. Pode-se dizer que esta evolução acrescentou benefícios sonoros e estéticos aos eventos.

Comparando as Figuras 3 e 6, observa-se que os gigantescos paredões utilizados em 1991 foram substituídos por apenas algumas colunas de caixas de som. Na Figura 3 as caixas de som foram escondidas por uma tela específica para este fim. Já na Figura 6, vê-se que a torre de caixas de som é parte do cenário do evento, contribuindo para a estética do espetáculo.

Segundo Maiocchi (2013), os primeiros passos para o desenvolvimento do sistema *Line Array* foram dados em 1957, quando Harry Olson, pioneiro na área de engenharia

⁶ Disponível em: <<http://globoesporte.globo.com/olimpiadas/noticia/2014/12/vila-dos-atletas-fecha-ano-60-pronta-e-tem-sobras-do-palco-do-rock-rio.html>>. Acessado em 19 de janeiro de 2017.

acústica, demonstrou o efeito de se colocar diversos alto falantes alinhados verticalmente. Em seu experimento, Olson comprovou uma redução na dispersão vertical e um incremento na dispersão horizontal, sendo esse resultado, justamente o princípio básico do *Line Array*. Ainda de acordo com Maiocchi (2015), o Dr. Cristian Heil baseando-se nos estudos de Olson, apresentou em meados da década de 1990, na AES (*Audio Engineering Society*) que em uma configuração seguindo esse princípio não existem interferências destrutivas no plano horizontal e que podem ocorrer interferências construtivas no plano vertical.

O sistema *Line Array*, segundo Gomes (2009), trouxe diversas melhorias, pois, por serem caixas mais potentes, menos unidades são utilizadas. São mais fáceis de montar devido ao fato de serem mais leves e mais fáceis de serem alinhar, devido à sua alta diretividade. Contudo, são difíceis de serem projetadas e produzidas. Isso produziu um efeito de clonagem, principalmente no Brasil, fazendo com que as qualidades principais deste sistema sejam perdidas.

O espaço utilizado por um sistema *Line Array* é bem reduzido em comparação com os sistemas utilizados anteriormente. A Figura 7 mostra uma das quatro torres de PA utilizadas no sistema de som principal da terceira edição do Rock in Rio, em 2001.

Figura 7: Uma das torres de caixas de som utilizadas no Rock in Rio 2001.



Fonte: MELLO⁷, 2001.

⁷ Disponível em: <<http://www.musitec.com.br/revistas/?c=1253>>. Acessado em 19 de janeiro de 2017.

Na edição de 2015 do Rock in Rio, havia diversas marcas e modelos de sistemas *Line Array* disponíveis, que proporcionavam alta qualidade no tratamento do áudio. Foram utilizados quatro torres de sustentação, com cada torre apresentando três colunas de caixas de som. Segundo Sabatinelli (2015), o alto número de caixas de som permite que o sistema trabalhe sem chegar a seus limites, evitando forçar os equipamentos utilizados. Em 2001, quando se tinha apenas uma coluna de caixas de som, todo o sinal gerado era transmitido por meio dessas caixas. Já, em 2015, com três colunas, o sinal, ou conjunto de sinais, era recebido por cada coluna, permitindo maior clareza e inteligibilidade para o sistema. As Figuras 8 e 9 apresentam o esquema de três colunas e quatro PA's.

Figura 8: Palco Rock in Rio 2015, vista frontal.



Fonte: G1⁸, 2015.

⁸ Disponível em: <<http://g1.globo.com/musica/rock-in-rio/2015/fotos/2015/09/rock-rio-2015-1-dia-fotos.html#F1777460>>. Acessado em 25 de janeiro de 2017.

Figura 9: Palco no Rock in Rio 2015, vista frontal aproximada.



Fonte: G1⁹, 2015.

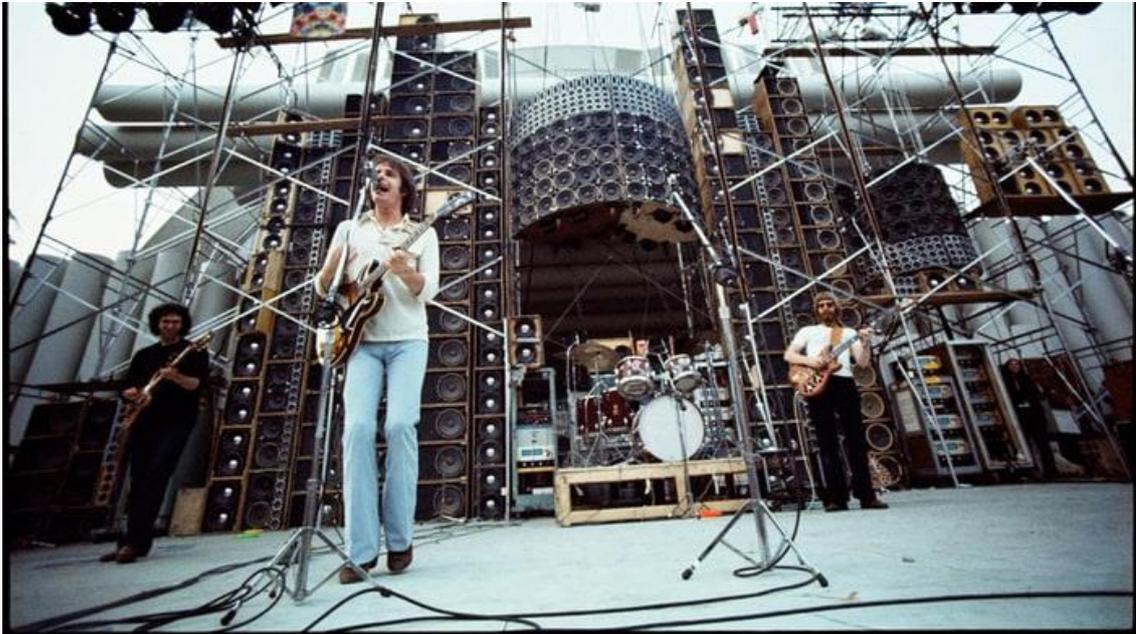
Na atualidade, uma característica importante sobre os PA's é que estes devem ser divididos nas laterais do palco. Sempre se tem o PA principal e, dependendo do tamanho do local, PA's auxiliares. Tomando como base a Figura 8, as duas torres de caixas mais próximas ao palco são denominados como PA *left* (esquerda) e PA *right* (direita). Ainda na Figura 8, têm-se duas torres de caixas mais distantes do palco, denominadas de *outfill*, uma em cada extremidade do palco, chamadas de *outfill left* e o *outfill right*.

Outro termo muito utilizado no mundo do áudio é o *cluster*, que faz referência a uma torre de caixas de som. Por exemplo: o PA *left* é um *cluster*, o PA *right* é um *cluster*, e assim por diante. Desta forma, resumindo-se a Figura 8 com as nomenclaturas citadas, verifica-se a seguinte formação: dois *clusters* como PA's principais (PA *left* e PA *right*) e dois *clusters* como *outfills* (*outfill left* e o *outfill right*).

A Figura 10 permite realizar uma comparação em termos do tamanho entre os sistemas empregados antigamente e os atuais. Trata-se do sistema de som utilizado pela banda norte-americana *Grateful Dead* em suas exibições. Observa-se paredões enormes de caixas de som empilhadas, caixas muito próximas umas das outras, sistema pesado, de difícil montagem e manipulação. Comparando com as Figuras 8 e 9, é possível notar como os sistemas se desenvolveram fisicamente, proporcionando também melhorias em desempenho e qualidade sonora.

⁹ Disponível em: <<http://g1.globo.com/musica/rock-in-rio/2015/fotos/2015/09/rock-rio-2015-2-final-de-semana-fotos.html#F1777498>>. Acessado em 25 de janeiro de 2017.

Figura 10: Sistema utilizado pela Banda Grateful Dead durante a década de 1980.



Fonte: FEAR,¹⁰ 2017.

1.2 Motivações e justificativas do projeto

Os eventos que exigem sistemas de áudio podem ser divididos em duas categorias: eventos de grande e pequeno porte. Exemplos de eventos de grande porte são os festivais Rock in Rio e Lollapalozza. Já eventos de pequeno porte são, por exemplo, aqueles promovidos por empresários e prefeituras em diversas cidades do Brasil, como feiras agropecuárias.

Para se ter uma ideia do quão impactante são estes eventos, considerando-se a nível de Brasil, segundo Aranha e Miguel (2013), 307 shows internacionais passaram em solo brasileiro. Em 2016, em mais uma edição do Rock in Rio (ROCK IN RIO, 2017), houve 160 atrações e 595 mil espectadores durante os dias de festival. A partir destes dados é possível ter uma noção de como estes eventos são importantes para o mercado de áudio e o desenvolvimento de novas tecnologias para este segmento.

Em um evento de grande porte o projeto de áudio ganha relevante valor. Estão envolvidos profissionais altamente capacitados e grandes empresas de sonorização. O projeto

¹⁰ Disponível em: <<http://www.rollingstone.com/movies/news/grateful-dead-doc-long-strange-trip-premieres-at-sundance-w462673>>. Acessado em 21 de maio de 2017.

de áudio começa semanas ou até meses antes da sua montagem. O que determina o quão demorado será a elaboração do projeto é o tamanho do evento em que se irá trabalhar.

Outra vertente deste trabalho são os eventos de pequeno porte. Estes são muito mais numerosos, se comparados aos de grande porte realizados no Brasil. Para este tipo de evento, o mercado de técnicos em áudio é extremamente escasso, encontrando-se no mercado um grande número dos profissionais pouco qualificados. Além disso, as condições de trabalho que as empresas de sonorização encontram são precárias e impedem o alcance de resultados ideais, no que se refere a uma cobertura homogênea e de qualidade do áudio.

Baseando-se nessas informações, este trabalho tenta disseminar um pouco de conhecimento acerca da área de áudio, tentando demonstrar a relevância de um bom projeto para a realização de um evento. Esta obra contribui também para o aperfeiçoamento profissional das pessoas que trabalham na área, mostrando de maneira clara e objetiva os benefícios de se saber trabalhar com diversos arranjos em sistemas de sonorização, e apresentando aspectos positivos e negativos de cada um deles. Além disso, comprova aos produtores de eventos, a importância de se ter um bom projeto de sonorização para que o público tenha a melhor percepção sonora possível ao estar presente num evento que foi corretamente planejado do ponto de vista acústico.

1.3 Objetivos

Neste trabalho são tratados os seguintes problemas encontrados em projetos de áudio em eventos de pequeno porte:

1.3.1 Objetivo geral

Os espectadores constituem a parte mais importante de qualquer espetáculo. Em vista disso, eles devem ter a melhor percepção sonora possível num evento. Por vezes, essa percepção não é obtida devido ao fato de a maioria das pessoas relacionadas à produção de eventos não darem a devida importância ao projeto e à implementação do sistema de sonorização. O objetivo geral deste trabalho é desenvolver o projeto de áudio de maneira otimizada, de forma a proporcionar uma cobertura homogênea de um ambiente destinado a eventos de pequeno porte. Além disso, é demonstrada, por meio de um embasamento teórico/prático a importância de se ter um bom projeto de áudio. Durante o trabalho foi projetado e implementado o arranjo acústico para um ambiente de pequeno porte.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são: mostrar qualidades e defeitos de arranjos de sistemas acústicos; indicar ações e soluções para os problemas encontrados; definir se as mudanças feitas no sistema atendem às expectativas.

1.4 Estrutura do trabalho

O Capítulo 2 apresenta uma contextualização do problema abordado neste trabalho, nele são mostrados os principais obstáculos que impedem a confecção correta de um projeto de áudio e o que vem sendo feito para mudar essa realidade. No Capítulo 3 são descritos os equipamentos utilizados na parte experimental deste trabalho. Também são apresentadas as técnicas de alinhamento de sistemas de áudio e os arranjos a serem utilizados. O Capítulo 4 apresenta os resultados das simulações executadas em softwares direcionados para o projeto de sistemas de áudio. O Capítulo 5 apresenta a demonstração e a análise dos resultados da aplicação das metodologias e arranjos propostos no Capítulo 3. Fechando este trabalho, o Capítulo 6 apresenta as principais conclusões e propostas para trabalhos futuros.

2 O SISTEMA DE ÁUDIO

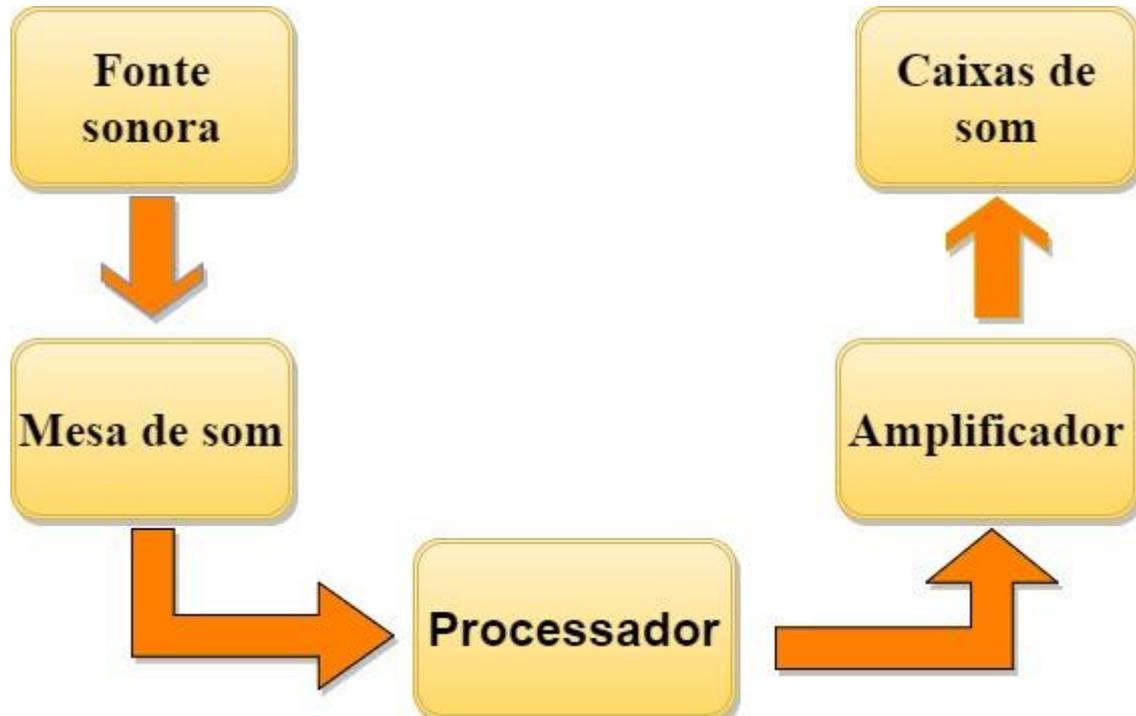
Nesse Capítulo mostra-se como um sistema de áudio funciona. Os dados e explicações apresentados são referentes ao sistema de áudio utilizado nos experimentos práticos realizados. Vale lembrar que o sistema utilizado neste trabalho é de pequeno porte, contudo, os conceitos demonstrados são amplamente estendidos para sistemas de médio e grande porte.

A obra *Sound Check - O Básico de Som e Sistemas de Sonorização* (MOSCAL, 2001) é uma ótima sugestão de leitura.

2.1 Sistema de áudio: princípios básicos

Todo sistema de áudio profissional deve ter uma configuração mínima que pode ser vista na Figura 11.

Figura 11: Diagrama de blocos de um sistema de áudio profissional.



A fonte sonora produz o sinal de áudio, que pode ser uma pessoa cantando, um instrumento, um CD *player* ou até mesmo uma banda musical completa. Neste ponto, o sinal gerado está num estado puro, isto é, não existe nenhum componente atuando sobre ele.

Esta fonte sonora deve ser conectada a uma mesa de som. O termo “mesa de som” é um nome informal, comumente utilizado, empregado para denominar um console de áudio, que também pode ser chamado de *Mixer*. Este componente do sistema contém diversas entradas, ou seja, diversas fontes sonoras podem ser ligadas a ele. A característica principal de um console é que nele se tem acesso separadamente a cada fonte sonora ligada. Sendo assim, pode-se alterar diversos parâmetros de determinada fonte, sem em nada alterar as demais fontes conectadas à mesa. Cada entrada de um console é representada por um canal, em que se pode alterar os parâmetros das fontes desejadas, como será apresentado mais adiante.

O sistema de áudio é dividido em bandas de frequências, mais comumente conhecidas como vias. Como o sinal de saída do console não faz essa distinção de vias, esse trabalho é feito pelo processador. A saída do console é ligada as entradas do processador, que por sua vez fazem a divisão das bandas de frequências desejadas, e enviam os respectivos sinais.

Cada via provida pelo processador deve ser conectada a um canal de amplificação. O número de canais de amplificação necessários em um sistema depende do número de caixas a serem utilizadas. Os amplificadores têm obrigação de alimentar todas as caixas da maneira mais uniforme possível. Assim, após o sinal sair do processador ele deve ser ligado a um amplificador. Para concluir o diagrama de blocos, o sinal que provém do amplificador é ligado às caixas de som, encerrando o processo.

Como foi exposto, esse diagrama de blocos atende perfeitamente aos sistemas de médio e grande porte. O diferencial está na quantidade de equipamentos utilizados.

2.2 Equipamentos utilizados

Com base na Figura 11, é possível expandir as análises, demonstrando mais detalhadamente os equipamentos utilizados neste experimento e dissertar sobre alguns conceitos.

O console ou *mixer* utilizado no experimento foi o modelo Ls9 32 da Yamaha. Este contém 32 entradas e 16 saídas. As entradas são responsáveis por receber o sinal provindo das fontes sonoras, e as saídas responsáveis por enviar os sinais recebidos para o processador. A Figura 12 mostra a parte frontal e a Figura 13 mostra a parte posterior do *mixer* utilizado.

Figura 12: Vista frontal Ls9 32.



Fonte: Blog TeclaCenter Instrumentos Musicais¹¹.

Figura 13: Vista posterior Ls9 32.



Fonte: Blog TeclaCenter Instrumentos Musicais¹².

Cada uma das 32 entradas deste console é representada por um canal, como pode ser visto em destaque na Figura 12. Cada canal pode ser processado individualmente, e esse processamento é composto de equalização, ganho, inversão de fase, compressão, dentre outros. O *mixer* é extremamente importante pois, tem a capacidade de fazer a interação de um grande número de entradas e enviá-las para o número de saídas desejado.

Todos os comandos e ações são realizados por meio do painel encontrado no canto superior direito da Figura 12. Este painel dá acesso a todas as configurações do *mixer*. As saídas têm os mesmos parâmetros de processamento que as entradas. Na Figura 13, as 32 entradas são representadas à direita; e as 16 saídas, à esquerda.

¹¹ Disponível em: <<http://blog.teclacenter.com.br/informacoes-sobre-mixer-ou-console-digital-yamaha-ls-9/>>. Acessado em: 03 de março de 2017.

¹² Disponível em: <<http://blog.teclacenter.com.br/informacoes-sobre-mixer-ou-console-digital-yamaha-ls-9/>>. Acessado em: 03 de março de 2017.

O processador é considerado o coração do sistema, pois faz a conexão entre o console e os amplificadores que alimentam as caixas de som. As saídas do *mixer* são conectadas às entradas do processador. As saídas do processador, por sua vez, são ligadas às entradas dos amplificadores. Os processadores utilizados como parâmetro foram o DriveRack 4800, mostrado nas Figuras 14 e 15, que dispõe de quatro entradas e oito saídas; e o DriveRack VENU360, mostrado nas Figuras 16 e 17, que dispõe de três entradas e seis saídas. Ambos são da marca dbx. A diferença entre os modelos consiste apenas na quantidade de recursos que cada um possui: o 4800 possui mais recursos que o VENU360.

Figura 14: Vista frontal DriveRack 4800.



Fonte: DBX BY HARMAN¹³.

Figura 15: Vista posterior DriveRack 4800.



Fonte: DBX BY HARMAN¹⁴.

Figura 16: Vista frontal DriveRack VENU360.



Fonte: DBX BY HARMAN¹⁵.

¹³ Disponível em: <<http://dbxpro.com/en-US/products/driverack-4800>>. Acessado em: 03 março de 2017.

¹⁴ Disponível em: <<http://dbxpro.com/en-US/products/driverack-4800>>. Acessado em: 03 março de 2017.

¹⁵ Disponível em: <<http://dbxpro.com/en-US/products/driverack-venu360>>. Acessado em: 03 março de 2017.

Figura 17: Vista posterior DriveRack VENU360.



Fonte: DBX BY HARMAN¹⁶.

Para se ter um bom rendimento em sistemas de áudio, as caixas de som utilizadas só reproduzem determinadas faixas de frequências. Sendo assim, os amplificadores devem receber o sinal na faixa de frequências adequada as caixas que ele alimenta. A importância do processador se dá devido à incapacidade do console de fazer essa divisão de frequências. Resumindo, cada saída do processador envia um sinal com faixa de frequência definida para o amplificador.

Para o sistema utilizado neste trabalho, um dos arranjos utilizados é mostrado na Figura 18, têm-se três faixas de frequências definidas e configuradas nas saídas dos processadores. São elas: subgrave – 20 Hz até 100 Hz, médio-grave – 160 Hz até 2 kHz e agudo – 2 kHz até 20 kHz. As caixas que se encontram no chão recebem a via de subgrave, e as caixas que estão penduradas recebem as vias de médio-grave e agudo. Cada caixa do arranjo *line array* (caixas penduradas) deve receber duas vias de sinal.

Figura 18: Sistema de áudio utilizado.



¹⁶ Disponível em: <<http://dbxpro.com/en-US/products/driverack-venu360>>. Acessado em: 03 março de 2017.

Nota-se na Figura 18 a presença dos PA's *left* e *right*, que têm por encargo reproduzir as frequências médio-graves e agudos. Por fim, dispostas ao chão, têm-se as caixas responsáveis por reproduzir as frequências subgraves. É necessário uma entrada do processador para cada PA e uma outra entrada referente ao subgrave. Ao todo são utilizadas três entradas do processador, e conseqüentemente, três saídas do console.

Na Figura 18 observa-se que as caixas que reproduzem as médias e altas frequências (caixas penduradas) totalizam 12 unidades por lado, que foram divididas em quatro blocos. Cada bloco corresponde a seis unidades de caixas. Com isso o PA *left* tem um bloco que corresponde às seis caixas superiores e um bloco que corresponde às seis caixas inferiores. O mesmo acontece com o PA *right*. Essa divisão por bloco é importante pois, desta maneira cada bloco tem parâmetros de processamento individual, fazendo com que se tenha maior domínio do sistema de áudio.

Cada bloco necessita de duas vias de saídas processadas, como se têm quatro blocos, são necessárias oito saídas de processador. Em razão disso, o DriveRack 4800 foi escolhido para ser o processador responsável pelo processamento dos PA's. As saídas do processador foram configuradas da seguinte maneira: para o PA *left* as saídas um e dois foram configuradas com as frequências de médio-grave e as saídas três e quatro com as frequências de agudo. Para o PA *right* as saídas cinco e seis foram configuradas com as frequências de médio-grave e as saídas sete e oito com as frequências de agudo. A entrada um deste processador fornece sinal para as saídas do PA *left* e a entrada dois para as saídas do PA *right*.

O DriveRack VENU360 é o responsável pelo processamento das caixas de subgrave. Neste caso, a entrada um do processador fornece sinal para todas as seis saídas. Neste sentido, cada saída é configurada com a faixa de frequências específica para o subgrave.

De forma resumida, têm-se três sinais de saída vindos da mesa de som; dois deles são conectados às entradas do DriveRack 4800 para alimentar as saídas dos PA's, e o terceiro sinal é conectado ao VENU360 para alimentar as saídas do subgrave.

O próximo estágio do diagrama de blocos mostrado na Figura 11 é o sistema de amplificação. Este é responsável por fornecer a potência necessária para alimentar as caixas de som. Os amplificadores também são divididos em função das faixas de frequências definidas anteriormente. Sendo assim, o subgrave é alimentado por um conjunto de amplificadores; o médio-grave por outro conjunto e, por fim, o agudo por um terceiro conjunto de amplificadores. O número de amplificadores a serem utilizados depende do número de caixas necessárias para realizar o evento.

Um ponto importante a se observar é que a escolha do amplificador que alimenta a caixa é feita por meio de uma análise dos parâmetros das caixas, parâmetros do amplificador e de um cálculo minucioso de demanda de potência. Contudo, tal processo não é discutido neste trabalho. Aos interessados no tema, o livro *Amplificadores de Áudio: Fundamentos, Características e Aplicações* (BORTONI, 2002) trata amplamente da questão “amplificadores”. Já a obra *Caixas Acústicas e Alto-Falantes* (DICKASON, 1996), traz um trabalho mais direcionado ao leitor que tenha interesse em se aprofundar na área de caixas acústicas.

2.2.1 Softwares utilizados

Este experimento conta com a utilização de dois softwares. Primeiramente, é analisado o NS-1, obtido gratuitamente no site da empresa NEXO - uma empresa que fabrica equipamentos de áudio profissional, ele realiza a predição do projeto e permite realizar vários testes de arranjos e sistemas de maneira rápida e prática. De maneira que é possível chegar ao local do evento com o arranjo do sistema já definido.

Este programa funciona da seguinte maneira: ao abri-lo, é necessário incluir informações de temperatura e umidade do ar, para que os resultados sejam mais confiáveis. Essas informações são inseridas através do menu principal em: *Options > Edit air absorption*. A partir daí, é preciso esboçar o local onde ocorrerá o evento. Instruções de como se criar o local de trabalho são oferecidas ao usuário através do menu *Help*. Criado o local de trabalho, é o momento de adicionar os equipamentos a serem utilizados. Diversos modelos de equipamentos já estão disponíveis neste software, porém todos são da marca NEXO. É nesta etapa que os testes de arranjos e posicionamentos das caixas devem ser realizados.

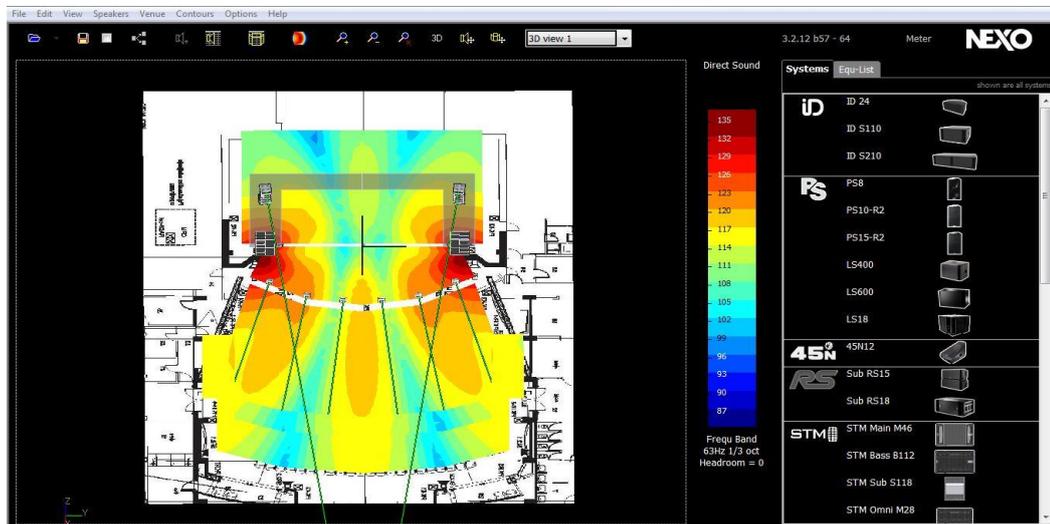
Neste trabalho as palavras decibel (dB) e SPL serão muito usadas. O logaritmo na base 10 que relaciona duas potências elétricas é definido com sendo a unidade de medida “bel”. Desta forma, o decibel representa a décima parte do bel. (MACHADO, 2001)

O termo *Sound pressure level* ou nível de pressão sonora é a medida que leva em consideração as variações de pressão com relação ao ar e o limiar de audição de uma pessoa. O movimento das moléculas de ar gera um ruído aleatório, e esse ruído é considerado o limiar inferior de pressão sonora, ou seja, 0 dB SPL. O limiar superior se encontra em aproximadamente 130 dB SPL, que é considerado o limiar da dor do sistema auditivo humano. É importante salientar que um equipamento que esteja aferindo 80 dB SPL, não

indica que todas as frequências mensuradas tenham 80 dB SPL, o que ocorre é uma integração entre todas as frequências para se chegar a esse valor. (MCCARTHY, 2007)

Concluídos esses passos, é possível obter uma resposta de Frequência x Magnitude (dB), que aparece em forma de mapa de calor, dentro do ambiente especificado. Para esta tela, existem frequências pré-definidas, basta escolher a desejada e efetuar a criação do mapa de calor. Um exemplo pode ser visto na Figura 19, no qual se observa a legenda para o mapa de calor mostrado. Na parte superior temos um *menu* que permite fazer alterações no desenho, de acordo com a vontade e necessidade do responsável pelo manuseio da ferramenta.

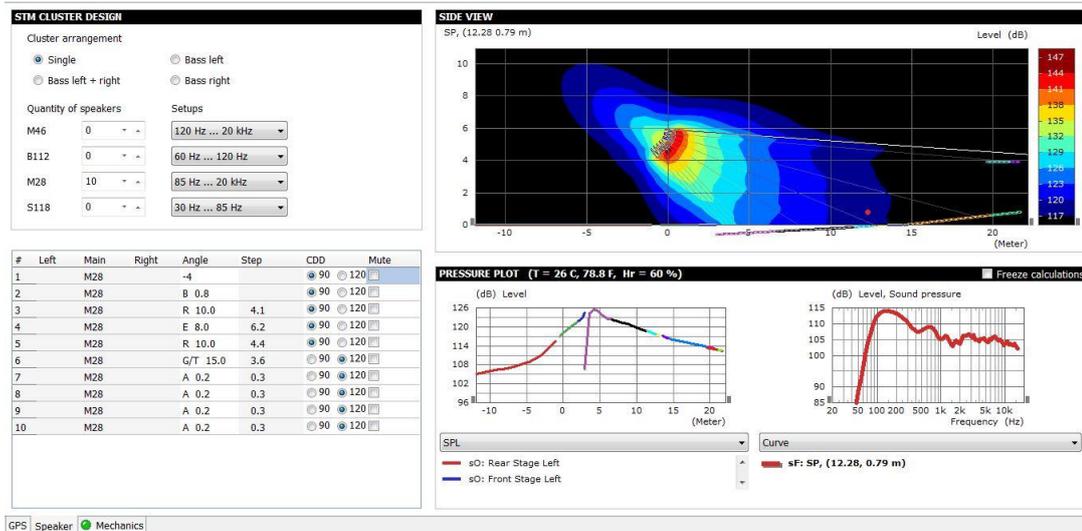
Figura 19: Tela principal software de predição NS-1.



Ao dar um duplo clique sobre alguma caixa de som contida na tela mostrada na Figura 19, abre-se outra tela que pode ser observada na Figura 20. No lado esquerdo desta imagem é apresentada uma aba denominada *STM Cluster Design*, que permite escolher o ângulo de cada caixa, ligar e desligar cada uma delas e ajustar as faixas de frequências com que elas trabalharão.

Ainda analisando a Figura 20, tem-se a aba *Side View*, que exibe a resposta em Magnitude (dB) x Altura x Distância em forma de mapa de calor. Abaixo da aba *Side View* vê-se a *Pressure Plot*. Nela, à esquerda, nota-se um gráfico em linha correspondente à resposta em Magnitude (dB) x Distância. Para esse e para o gráfico contido na *Side View*, o parâmetro representado em magnitude pode ser uma frequência específica ou nível de pressão sonora em SPL (*Sound Pressure Level*). Essa escolha é feita através do menu encontrado no lado esquerdo inferior da aba *Pressure Plot*.

Figura 20: Tela para ajustes de parâmetros de resposta.



À direita da *Pressure Plot* tem-se um gráfico de Pressão sonora (dB) x Frequência. Este funciona da seguinte maneira: o usuário clica com o botão direito do mouse sobre o gráfico contido na aba *Side View*, escolhe a opção *New point* e define as coordenadas para um ponto. O gráfico contido à direita em *Pressure Plot* responde de acordo com a localização deste ponto. Quando escolhido mais de um ponto, as respostas em frequência se sobrepõem. Um ponto vermelho contido entre 10 e 15 metros é o criador da resposta de Pressão sonora (dB) x Frequência mostrada na Figura 20. O NS-1 tem diversas outras funções. Estas são, porém, as mais relevantes para este trabalho.

O segundo software utilizado neste trabalho é o *Smaart*, em sua oitava versão. Este programa é o responsável por transformar os sinais sonoros em informações de fase e magnitude no espectro de frequência, e é indispensável para experimentos como esse. Contudo, não é gratuito, e sua licença deve ser adquirida junto à empresa *Rational Acoustics*. Devido ao seu alto custo, muitas empresas e profissionais não têm acesso a ele.

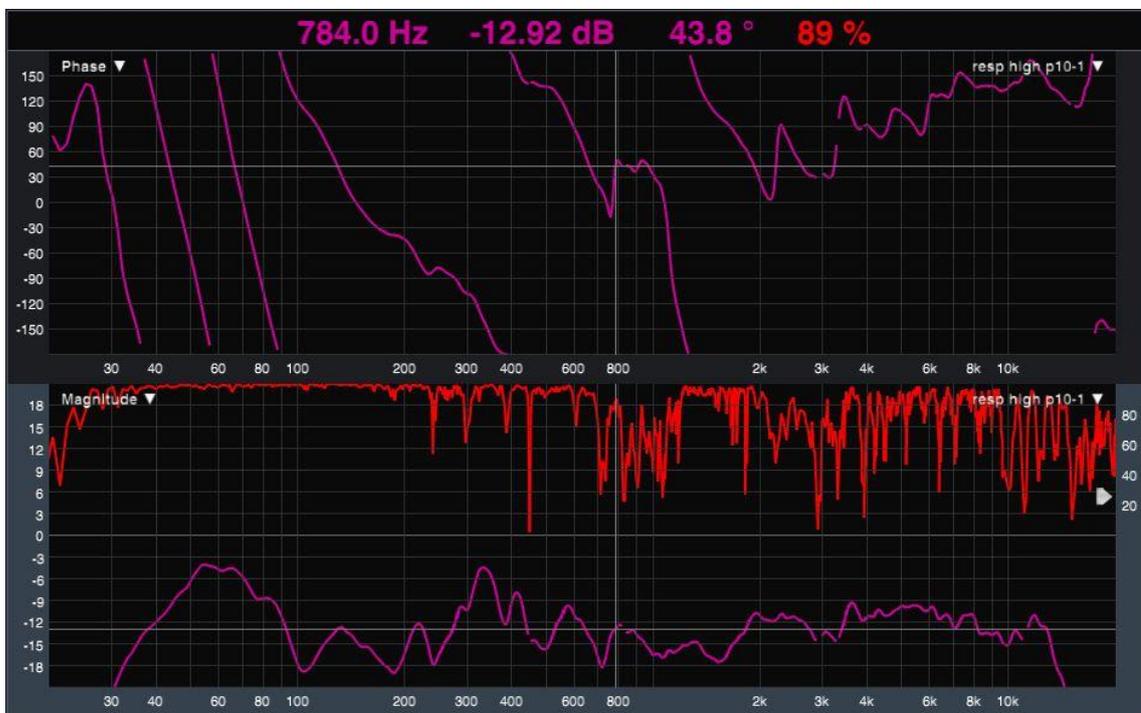
O *Smaart* tem uma infinidade de funções, e todas elas podem ser encontradas detalhadamente no manual do usuário fornecido pela *Rational Acoustics*. A partir da Figura 21 são descritas as funções utilizadas neste experimento. Pode-se dividir essa ilustração em três partes: cabeçalho, Fase x Frequência e Magnitude (dB) x Frequência.

O cabeçalho retrata pontualmente as informações contidas nos dois gráficos existentes, que são da esquerda para a direita, frequência, magnitude, fase e coerência, respectivamente. O espectro de frequência do *Smaart* está compreendido entre 20 Hz e 20 kHz e, com o cursor

na tela, é possível selecionar qualquer frequência dentro desse espectro e ter acesso a todas as suas informações.

As informações de fase e magnitude em função da frequência são exibidas nos dois gráficos logo abaixo do cabeçalho. A linha em vermelho no gráfico de Magnitude x Frequência é chamada de “coerência”. A coerência é uma medida que relaciona a linearidade do sistema e sua relação sinal ruído, normalmente expressa em porcentagem. Quanto maior seu valor melhor a coerência. Esta é uma informação sobre a qualidade da medição feita, e é expressa em função de porcentagem.

Figura 21: Função de transferência e resposta de fase em função do espectro de frequência.



Os gráficos apresentados na Figura 21 fazem parte de uma função do software chamada de *Transfer Function*. Como as respostas são obtidas através de uma função de transferência, apresentam no mínimo dois sinais envolvidos: um de referência e outro para comparação. Para que estes sinais sejam recebidos pelo *Smaart*, uma placa de áudio deve ser utilizada. Nesta experiência utiliza-se a *M-Track Quad*, da marca *M-AUDIO*. Esta tem quatro entradas na parte frontal - Figura 22, e quatro saídas na parte posterior - Figura 23. Sua interação com o computador/*Smaart* é feita através de um cabo USB.

O sinal utilizado para realizar as medições foi o ruído rosa [MONTEIRO, 2000]. A escolha desse ruído se deu pelo fato dele compreender todo o range de frequências audíveis,

entre 20 Hz e 20 kHz, e também ao fato de os equipamentos utilizados conterem geradores desse tipo de ruído. Qualquer sinal que compreenda o range de frequências audíveis pode ser utilizado para se fazer uma medição.

Figura 22: Vista frontal M-Track Quad.



Fonte: M-TRACK QUAD.¹⁷

Figura 23: Vista posterior M-Track Quad.



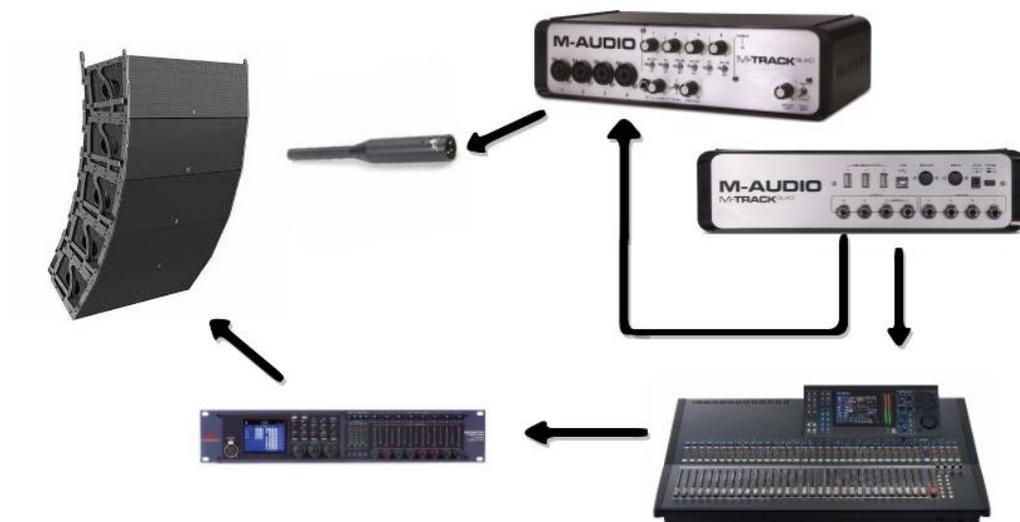
Fonte: M-TRACK QUAD.¹⁸

A *M-Track Quad* é utilizada da seguinte maneira: o software gera um ruído rosa que é enviado para as saídas da placa, onde uma saída está ligada a uma entrada da placa - sinal de referência -, e outra saída está ligada ao console, que envia este sinal para ser reproduzido nas caixas de som - sinal a ser comparado. Segundo Oliveira (2007), a fim de analisar se o sistema tem resposta em frequência plana, o ruído rosa é utilizado por diversos engenheiros de áudio. O sinal a ser comparado é capturado através de um microfone, específico para este fim, ligado a outra entrada da placa. Sintetizando, uma entrada da placa recebe o sinal referência e outra entrada recebe o sinal a ser comparado. Com isso, a função de transferência está pronta para ser utilizada. A Figura 24 ilustra as ligações citadas.

¹⁷ Disponível em: <http://www.maudiodobrasil.com.br/prod_img.asp?id=50>. Acessado em 12 de junho de 2017.

¹⁸ Disponível em: <http://www.maudiodobrasil.com.br/prod_img.asp?id=50>. Acessado em 12 de junho de 2017.

Figura 24: Sistema de medição utilizado.



3 METODOLOGIA

Neste Capítulo é mostrada a teoria das técnicas utilizadas na parte experimental deste trabalho. Os arranjos escolhidos foram o LR Convencional, o *end-fire* e o *cardioid*. Existem diversos outros arranjos, contudo, estes foram escolhidos por sua simplicidade de implementação. Os arranjos trabalhados neste projeto são referentes às características das caixas de subgrave, os PA's *left* e *right* não se alteram.

3.1 Arranjos utilizados

3.1.1 LR Convencional

A montagem LR Convencional é a mais simples de todas. As caixas de subgrave são divididas em *left* e *right* assim como os PA's. A Figura 18 mostra um exemplo de um sistema LR Convencional. Este é denominado de LR pois, PA e subgrave atuam em dois canais, *left* e *right*, ou seja, apenas duas saídas da mesa alimentam os processadores. Na Figura 18, de maneira simples, uma saída da mesa alimenta as caixas do lado esquerdo e outra saída alimenta as caixas do lado direito.

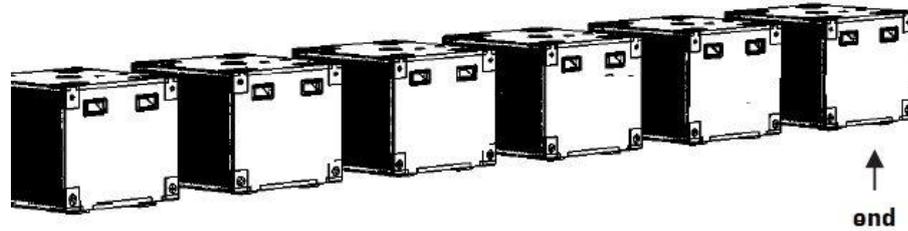
Analisando os processadores, o 4800 não sofre nenhuma alteração. A mudança ocorre no VENU360 que envia sinal para as caixas de subgrave. Neste caso a saída 1 do equipamento é alimentada pela entrada 1 e a saída 2 é alimentada pela entrada 2. Agora, os mesmos dois sinais que vão para as entradas do 4800 também são direcionados para as entradas do VENU360.

Este arranjo é extremamente utilizado devido a sua simplicidade e rapidez de montagem.

3.1.2 End-fire

Neste arranjo as caixas de subgrave são alinhadas na horizontal e espaçadas uniformemente. A Figura 25 ilustra como as caixas devem ser montadas.

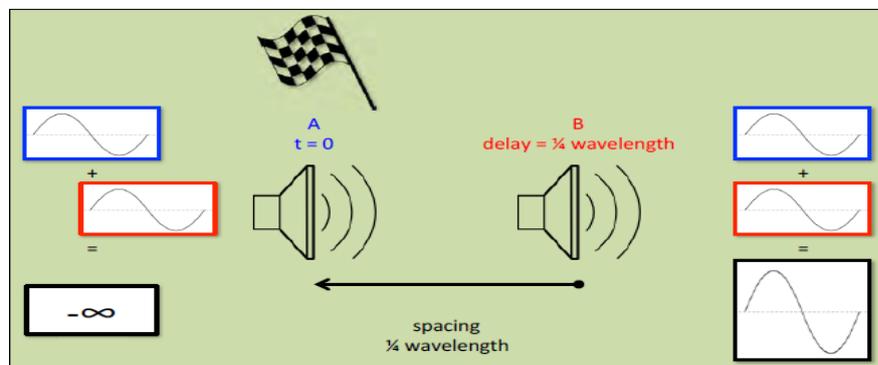
Figura 25: Exemplo de arranjo *end-fire*.



Fonte: Manual de Operação ¹⁹Subwoofer Sky Sound Bass 1800.

Para que ocorram interferências construtivas das ondas sonoras é necessário “atrasar” as caixas que se encontram a frente. A Figura 26 exemplifica o caso de dois alto falantes, onde, segundo SUBWOOFER (2014) o falante que se encontra a frente deve ser atrasado de $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda e o espaçamento entre eles também deve ser de $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda. A soma desses dois fatores totaliza um atraso de $\frac{1}{2}$ do comprimento de onda, e com isso, uma interferência construtiva é criada.

Figura 26: Arranjo *end-fire*.



Fonte: Subwoofer Array Designer²⁰.

Este conceito pode ser estendido para quantas caixas de som se desejar, lembrando sempre que o espaçamento entre duas caixas deve ser o mesmo e que os atrasos (*delays*) devem ser sobrepostos. Para aplicar o espaçamento entre caixas pode-se tomar como base a frente de cada um, assim, a distância medida será de frente a frente.

¹⁹ Disponível em: < <http://www.studior.com.br/mabass18.pdf>> Acessado em: 22 de maio de 2016.

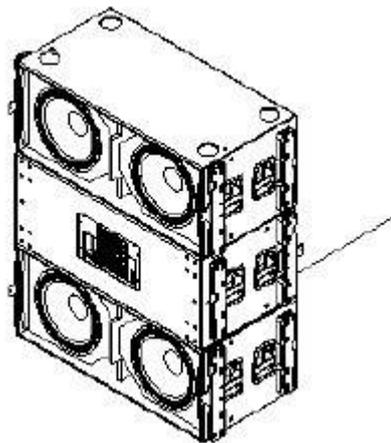
²⁰ Disponível em: < <https://www.merlijnvanveen.nl/en/calculators/28-sad-subwoofer-array-designer-en>> Acessado em: 11 de junho de 2016.

Observando a Figura 25, segundo o manual de operação Subwoofer Sky Sound Bass (STUDIO R, 2014), a aplicação dos *delays* faz com que a segunda caixa espere a onda irradiada pela primeira. O *delay* da terceira caixa, que deve ser duas vezes o *delay* da segunda caixa, faz com que a terceira caixa também espere a chegada da onda sonora vinda da primeira caixa, e assim por diante. Desta forma, o sinal irradiado na direção do público é a soma dos sinais de cada uma das caixas com os respectivos atrasos.

3.1.3 Cardioid

Existem algumas configurações cardioides. Neste trabalho foi empregada a configuração mostrada na Figura 27, que envolve as caixas direcionadas para o público e uma caixa invertida. De acordo com o manual de operação *Subwoofer Sky Sound Bass 1800* (Studio R, 2014), a caixa voltada para trás deve ter um *delay* de 1 m ou 3 ms e ter sua polaridade invertida.

Figura 27: Exemplo de arranjo cardioid.



Fonte:: Department Engineering²¹, D.A.S Audio.

O objetivo da caixa voltada para trás é eliminar a pressão sonora que é irradiada para trás. Esse objetivo é alcançado através da inserção das ações de processamento citadas anteriormente.

²¹ Disponível em: <http://www.dasaudio.com/en/support/technical-articles/cardioid-subwoofer-set-up/> Acessado em 02 de maio de 2016.

4 LOCAL DE TRABALHO

Para que as simulações sejam realizadas é preciso ter informações sobre o local a ser trabalhado. Este experimento foi realizado no Parque de Eventos Pref. João Antônio de Carvalho, localizado na cidade de Santa Bárbara do Tugúrio na Zona da Mata mineira. As medidas referentes ao local a ser trabalhado foram retiradas da planta baixa do Projeto de Prevenção e Combate a Incêndio e Pânico, documento este que foi cedido gentilmente pela prefeitura local. A Figura 28, retirada do *Google Earth*, fornece uma vista aérea do Parque de Eventos.

Figura 28: Vista aérea do Parque de Eventos Pref. João Antônio de Carvalho.

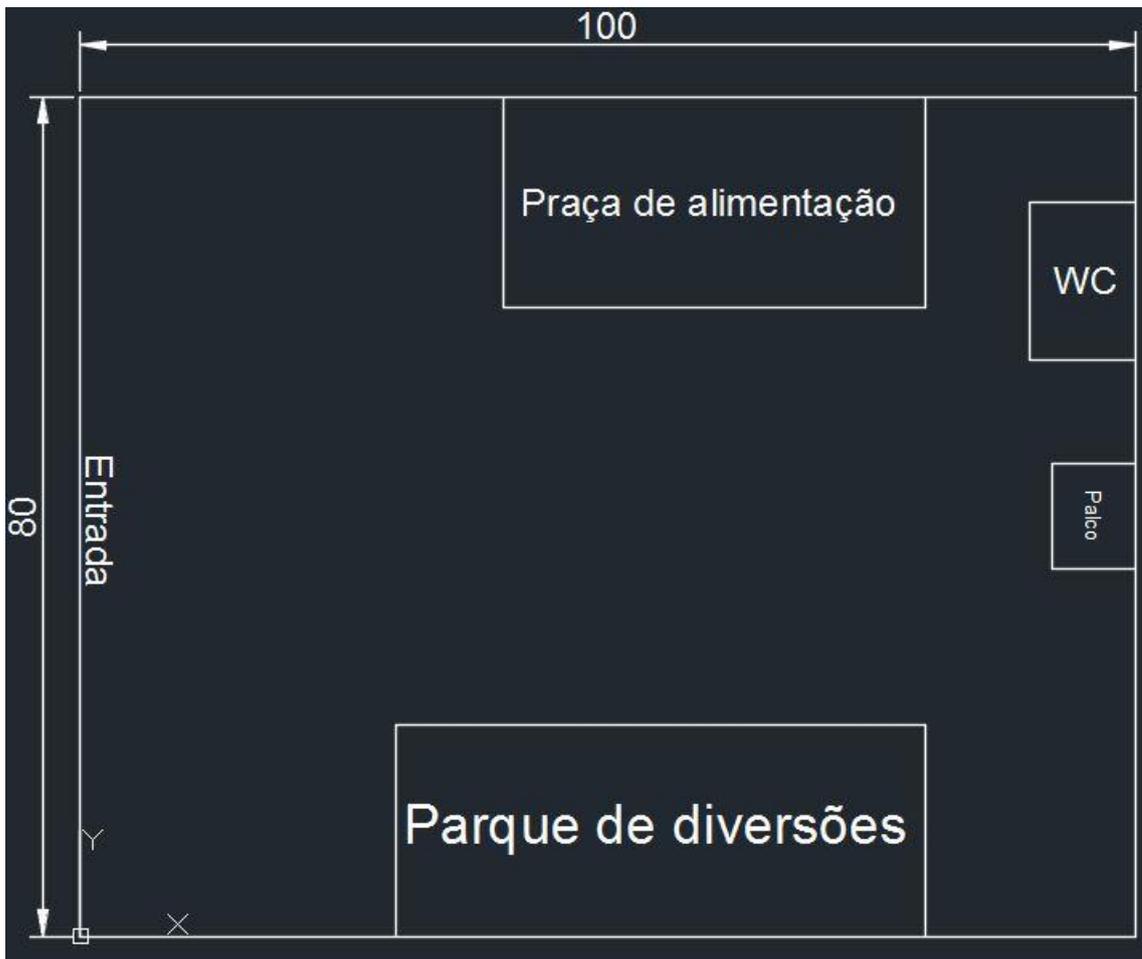


Fonte: GOOGLE. Google Earth. Versão 9.1.39..3. 2017. Parque de Eventos Pref. João Antônio de Carvalho²².

Este local tem uma área total de 8997 m², e formato irregular. Para facilitar um pouco a modelagem do local, o terreno foi aproximado a um retângulo de 100 m de comprimento e 80 m de largura, mostrado na Figura 29.

²²Disponível em: <https://earth.google.com/web/@-21.23949874,43.55797579,656.88533201a,288.05535363d,35y,-0h,0t,0r>. Acessado em 13 de outubro de 2017.

Figura 29: Esquemático da aproximação realizada.



Como se pode notar, após a montagem do palco, praça de alimentação, parque de diversões e outros elementos que não estão sendo mostrados, o local tende a se parecer com um retângulo, validando assim, a aproximação. O local destinado ao público também pode ser usado como argumento para validar essa aproximação.

Para situar o leitor, a localização da entrada do local e do palco, especificados na Figura 29 correspondem, respectivamente, à parte inferior e superior da Figura 28. Um observador que estiver em cima do palco, olhando em direção à entrada do Parque de Eventos tem a seguinte visão, como mostrado na Figura 30. Deve-se observar, como apresentado na Figura 29 que, à direita do palco se encontra a Praça de Alimentação, lugar de concentração de público.

Figura 30: Vista do Parque de Eventos para um observador presente no palco.

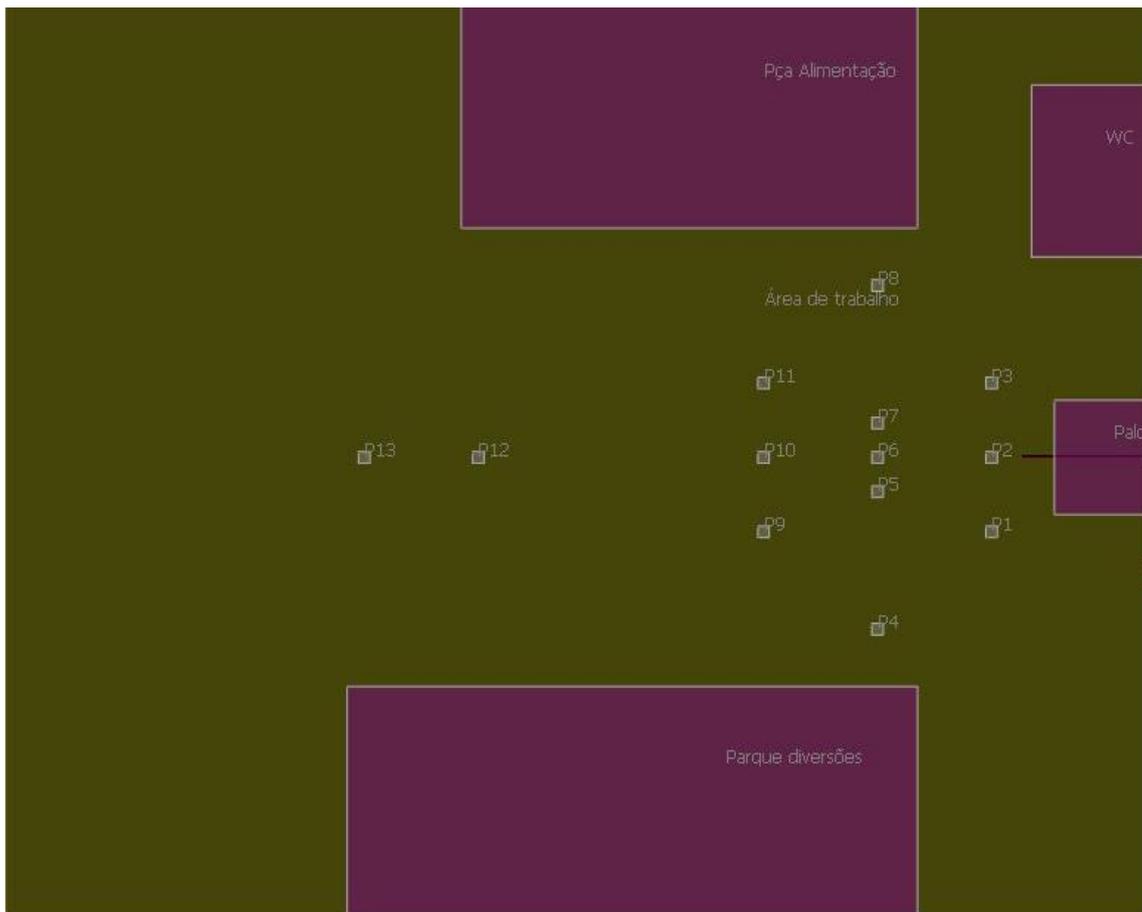


Para dar início às simulações, neste caso, é necessário ter dados de área e localização do Palco, WC, Praça de Alimentação e Parque de Diversões. Baseando-se na Figura 29, essas medidas dadas em comprimento x largura são: Palco – 8 m x 10 m; WC – 10 m x 15 m; Praça de Alimentação – 40 m x 20 m e Parque de Diversões – 50 m x 20 m.

5 SIMULAÇÕES

Conhecendo o local onde se irá trabalhar é possível dar início às simulações utilizando a ferramenta NS-1. Como dito anteriormente, o primeiro passo a ser executado é a montagem do local de trabalho dentro do software. Neste passo tem-se uma imagem semelhante à Figura 29, porém, com o *layout* do NS-1. O resultado deste procedimento inicial pode ser visto na Figura 31. Como podemos observar na Figura 31 temos 13 pontos espalhados no plano de trabalho. Esses pontos demonstram o posicionamento dos microfones que serão utilizados durante o processo de medição. SUBWOOFER (2014) sugere algumas configurações para o posicionamento dos microfones e, baseando-se nesses exemplos e no local onde serão feitas as medições, foram escolhidos os pontos mostrados.

Figura 31: Área de trabalho para as simulações.



A Figura 32 mostra o posicionamento destes microfones, Para facilitar o entendimento criou-se um sistema de coordenadas imaginário onde o ponto verde, visto no centro de uma

das extremidades do palco, corresponde às coordenadas (0,0) deste sistema. O eixo horizontal, correspondente a x, tem valores positivos à esquerda. De modo semelhante, o eixo vertical, correspondente a y, tem valores positivos para cima. Todos os valores explicitados são dados em metros

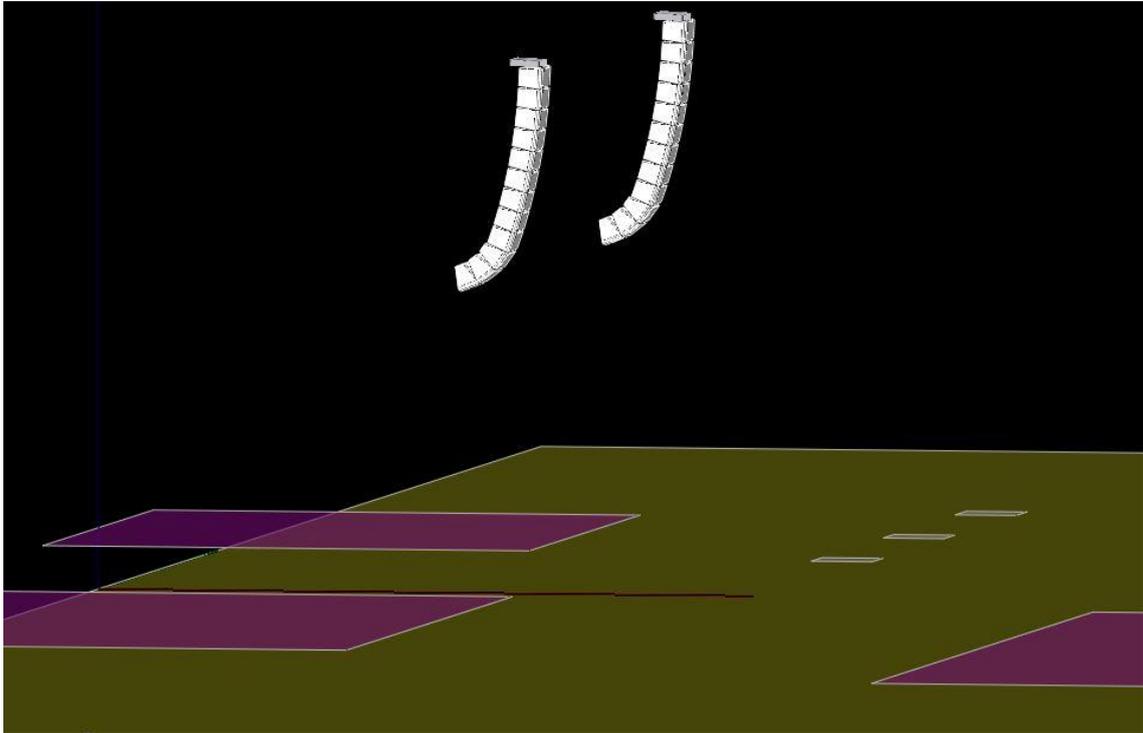
Figura 32: Coordenadas dos pontos de medição.



Após criar a área de trabalho no ambiente NS-1, foram adicionados os equipamentos a serem utilizados. Nas simulações são utilizadas 18 unidades da GEO S1210 e seis unidades da GEO S1230 para reprodução das altas frequências. As caixas de subgrave são do modelo SUB RS18 são utilizadas em 24 unidades.

Cada *cluster* tem nove unidades da GEO S1210 e três unidades da GEO S1230. As GEO S1230 são as caixas encontradas mais abaixo do *cluster*, isso ocorre, pois, elas têm uma possibilidade maior de angulação, e isso permite que possam cobrir maior área nas proximidades do público. Esse fato é apresentado a seguir, na Figura 33.

Figura 33: Demonstração da aplicação das caixas modelo GEO S1230.

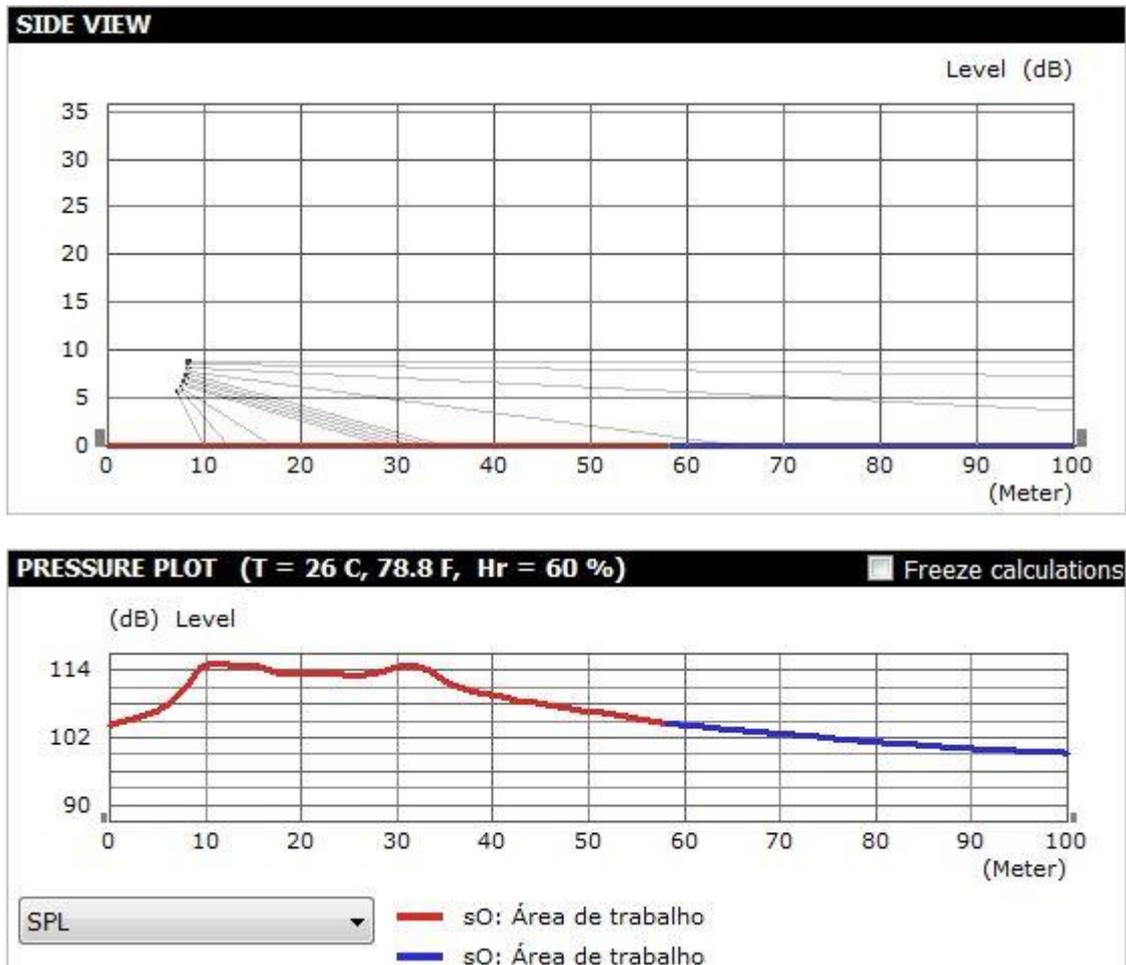


Depois de acrescentadas as caixas de altas frequências à área de trabalho o software gera automaticamente um layout de angulação para as caixas, essas angulações dependem da quantidade de caixas utilizadas e do tamanho do local a se sonorizar. A Figura 34 representa as angulações das caixas para as características deste trabalho e a Figura 35 mostra a resposta resultante destas angulações.

Figura 34: Angulações geradas automaticamente via NS-1.

#	Speakers	Angle	Step	CCD	Mute
1	GEO S121	0		<input checked="" type="radio"/> 80 <input type="radio"/> 12	<input type="checkbox"/>
2	GEO S121	0.80		<input checked="" type="radio"/> 80 <input type="radio"/> 12	<input type="checkbox"/>
3	GEO S121	2.00		<input checked="" type="radio"/> 80 <input type="radio"/> 12	<input type="checkbox"/>
4	GEO S121	5.00		<input checked="" type="radio"/> 80 <input type="radio"/> 12	<input type="checkbox"/>
5	GEO S121	8.00	30.7	<input checked="" type="radio"/> 80 <input type="radio"/> 12	<input type="checkbox"/>
6	GEO S121	0.20	1.6	<input checked="" type="radio"/> 80 <input type="radio"/> 12	<input type="checkbox"/>
7	GEO S121	0.20	1.5	<input checked="" type="radio"/> 80 <input type="radio"/> 12	<input type="checkbox"/>
8	GEO S121	0.20	1.5	<input checked="" type="radio"/> 80 <input type="radio"/> 12	<input type="checkbox"/>
9	GEO S121	0.20	1.5	<input checked="" type="radio"/> 80 <input type="radio"/> 12	<input type="checkbox"/>
10	GEO S123	16.0	11.7	<input checked="" type="radio"/> 80 <input type="radio"/> 12	<input type="checkbox"/>
11	GEO S123	(16.0)	4.4	<input checked="" type="radio"/> 80 <input type="radio"/> 12	<input type="checkbox"/>
12	GEO S123	(16.0)	2.7	<input checked="" type="radio"/> 80 <input type="radio"/> 12	<input type="checkbox"/>

Figura 35: Resposta resultadas das angulações geradas automaticamente.



Algumas informações importantes devem ser levadas em consideração nestas imagens. Na Figura 34, a caixa numerada com 1 é a mais alta no sistema e a caixa número 12 é a mais próxima do chão. Na parte superior da Figura 35 cada caixa tem uma linha que aponta para onde ela está direcionando sua energia, maior nível de pressão sonora, e o direcionamento destas linhas é dado por cada ângulo mostrado na Figura 34.

O resultado gerado automaticamente pelo software é aceitável, mas pode ser melhorado. O direcionamento das caixas 1, 2 e 3 faz com que se perca energia. A caixa número 3, a uma distância de 100 metros, está com seu foco direcionado a mais de 4 metros de altura, aonde não há público. Nota-se também uma enorme distância entre as caixas 3 e 5.

Outro importante ponto a se observar é a quantidade de pressão acumulada na região de 30 metros, que pode ser visto no *Pressure Plot* da Figura 35. Isso ocorre, pois, têm-se cinco caixas direcionadas para esta região.

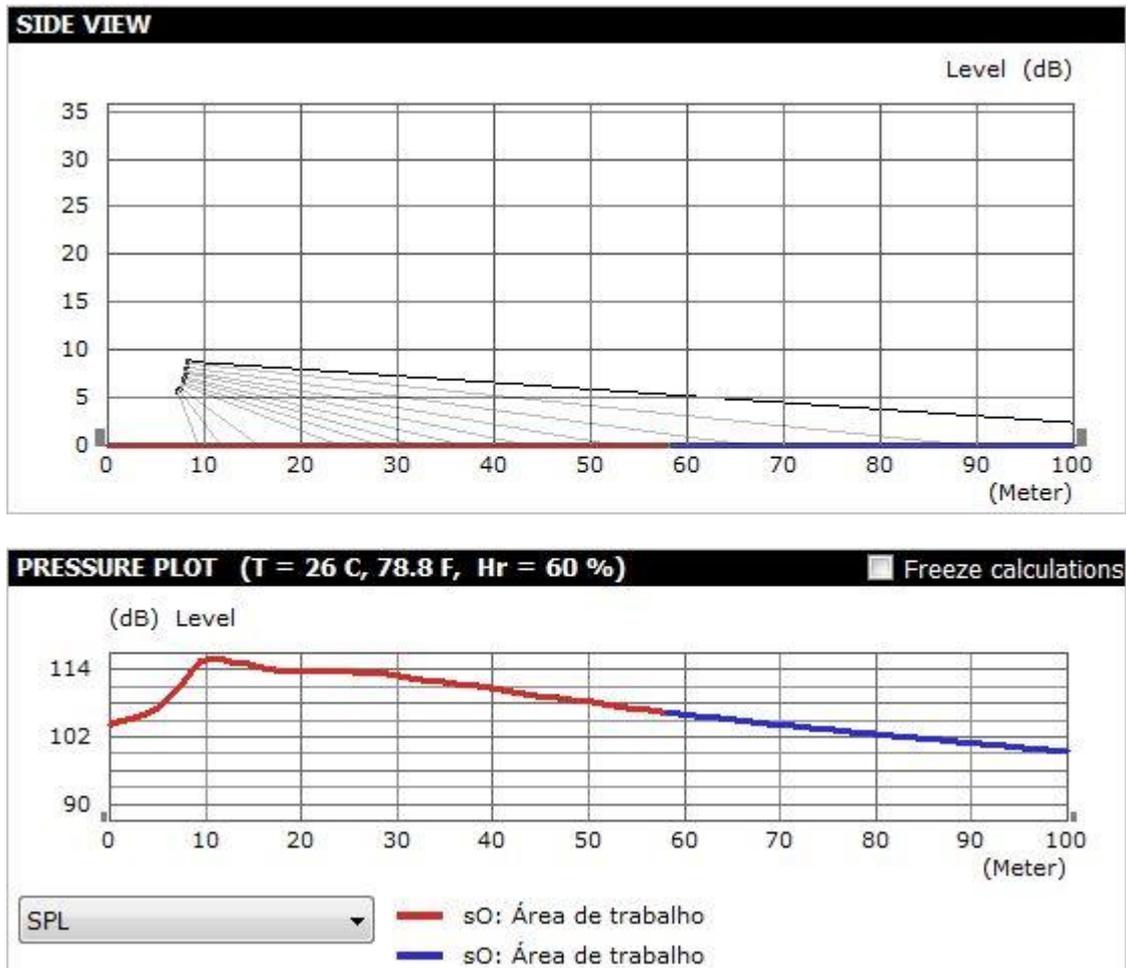
Com o intuito de deixar a resposta de pressão mais bem distribuída ao longo do comprimento do local, algumas alterações nos ângulos das caixas são realizadas e após algumas tentativas chegou-se ao resultado mostrado nas Figuras 36 e 37.

Figura 36: Novos ângulos após terem sido feitas as correções.

#	Speakers	Angle	Step	CCD	Mute
1	GEO S121	-4		<input checked="" type="radio"/> 80 <input type="radio"/> 12 <input type="checkbox"/>	
2	GEO S121	2.00		<input checked="" type="radio"/> 80 <input type="radio"/> 12 <input type="checkbox"/>	
3	GEO S121	2.00	22.8	<input checked="" type="radio"/> 80 <input type="radio"/> 12 <input type="checkbox"/>	
4	GEO S121	2.00	13.7	<input checked="" type="radio"/> 80 <input type="radio"/> 12 <input type="checkbox"/>	
5	GEO S121	2.00	9.2	<input checked="" type="radio"/> 80 <input type="radio"/> 12 <input type="checkbox"/>	
6	GEO S121	2.00	6.6	<input checked="" type="radio"/> 80 <input type="radio"/> 12 <input type="checkbox"/>	
7	GEO S121	2.00	5.0	<input checked="" type="radio"/> 80 <input type="radio"/> 12 <input type="checkbox"/>	
8	GEO S121	2.00	3.9	<input checked="" type="radio"/> 80 <input type="radio"/> 12 <input type="checkbox"/>	
9	GEO S121	3.15	4.1	<input checked="" type="radio"/> 80 <input type="radio"/> 12 <input type="checkbox"/>	
10	GEO S123	16.0	8.4	<input checked="" type="radio"/> 80 <input type="radio"/> 12 <input type="checkbox"/>	
11	GEO S123	(16.0)	3.8	<input checked="" type="radio"/> 80 <input type="radio"/> 12 <input type="checkbox"/>	
12	GEO S123	(16.0)	2.4	<input checked="" type="radio"/> 80 <input type="radio"/> 12 <input type="checkbox"/>	

No gráfico *Side View* da Figura 35 nota-se que existem linhas que saem das caixas, o manual do software NS-2 denomina essas linhas como raios. A coluna *Step* vista nas Figuras 34 e 36 apresenta o passo entre dois raios. O valor do *Step* é gerado automaticamente, e não pode ser alterado de forma manual pelo usuário. A coluna CCD contida nas Figuras 34 e 36 nos permite escolher qual a cobertura horizontal desejada, porém, essa escolha deverá ser feita com base no equipamento a ser utilizado.

Figura 37: Resposta após terem sido feitas as correções dos ângulos.



É necessário destacar o reposicionamento das caixas nas imagens anteriores, agora se tem uma distribuição melhor da energia e conseqüentemente, menos energia é desperdiçada. Esse nova distribuição fez com que os ângulos das caixas sejam mais lineares, sem grandes variações. A caixa número 1 teve seu ângulo modificado para que fosse possível aproveitar a energia que estava sendo perdida anteriormente.

Nesta nova configuração diminui-se a pressão sonora na região de 30 metros, e se ganhou entre 2 e 3 dB em todo o restante da faixa a ser sonorizada. Com essas correções foi possível se ter uma melhor distribuição da pressão sonora em relação ao tamanho do local.

As Figuras 38 e 39 seguintes demonstram as respostas de pressão sonora em todo o ambiente de trabalho, antes e depois das correções feitas. Nas Figuras 38 e 39 a parte mais escura do mapa de calor correspondem ao valor de 117 dB. A escala decai 3 dB a cada mudança de cor para tons mais claros.

Figura 38: Resposta SPL referente aos ângulos apresentados na Figura 34.

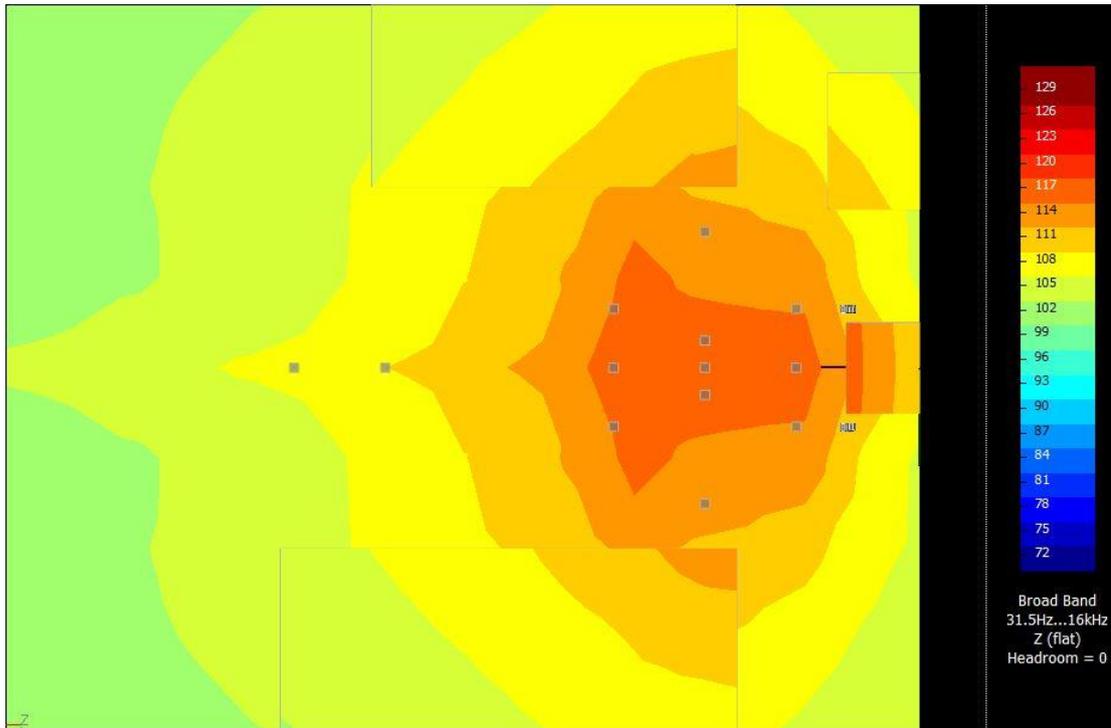
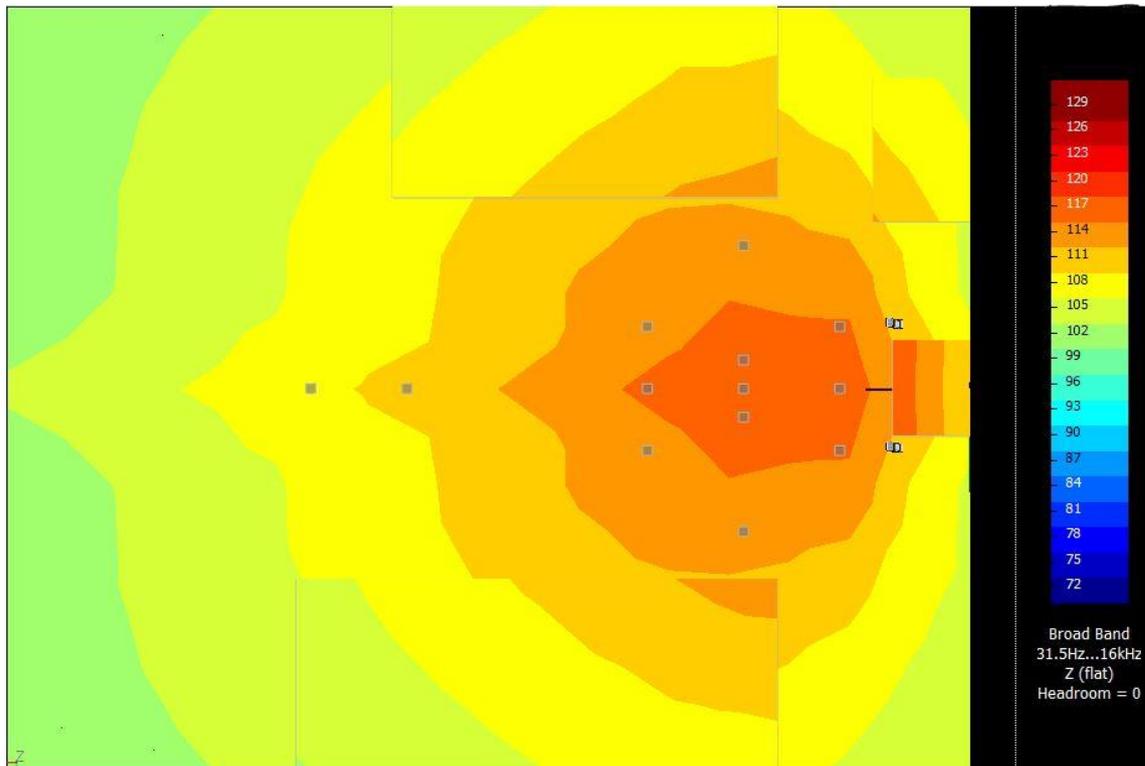


Figura 39: Resposta SPL referente aos ângulos apresentados na Figura 36.



Uma informação é que dos 13 pontos utilizados para medição, onde se encontram os microfones. O ponto 10 é que deve ter maior atenção, devido ao fato de o console que controla o sistema estar localizado neste ponto. É neste ponto que o técnico de som fica durante o evento, servindo referência. Vale lembrar que as medições foram feitas enquanto não havia público no local, pois, durante o evento é praticamente impossível realizar medições com essa quantidade de pontos.

As Figuras 38 e 39 confirmam as análises feitas sobre as Figuras 35 e 37, e justificam as mudanças realizadas nas angulações das caixas. É possível observar na Figura 38 o acúmulo de energia contida na região próxima a 30 metros de distância do palco. Após a alteração dos ângulos observa-se na Figura 39 uma melhor distribuição de pressão sonora.

Para exemplificar essa melhor distribuição, observe o ponto 12. Na Figura 38 este ponto tem pressão sonora de 108 dB, já na Figura 39 este ponto tem 111 dB de pressão sonora. Após alteração da angulação das caixas e, conseqüentemente, a retirada do acúmulo de energia na faixa dos 30 metros, é possível observar que a área de 111 dB na Figura 39 é maior em comparação com a Figura 38.

Tendo finalizado e otimizado o arranjo das caixas de altas frequências vamos agora acrescentar as caixas de subgrave de acordo com os arranjos descritos no Capítulo 3.

5.1 Análise do Arranjo LR Convencional

O arranjo LR convencional tem o layout apresentado na Figura 40 no ambiente NS-1. Como se pode ver na Figura 40, têm-se 12 caixas de subgrave para cada lado. A resposta de pressão sonora para este arranjo é apresentada na imagem a seguir.

Analisando a Figura 41 é possível observar que a parte mais escura do gráfico corresponde 135 dB. A cobertura da área correspondente aos 135 dB está irradiando muita pressão sonora para as laterais do palco, sendo que, seria mais apropriado que esta energia estivesse sendo direcionada mais para o centro do palco. Além disso, há um buraco na cobertura dos 135 dB.

Figura 40: Arranjo LR convencional.

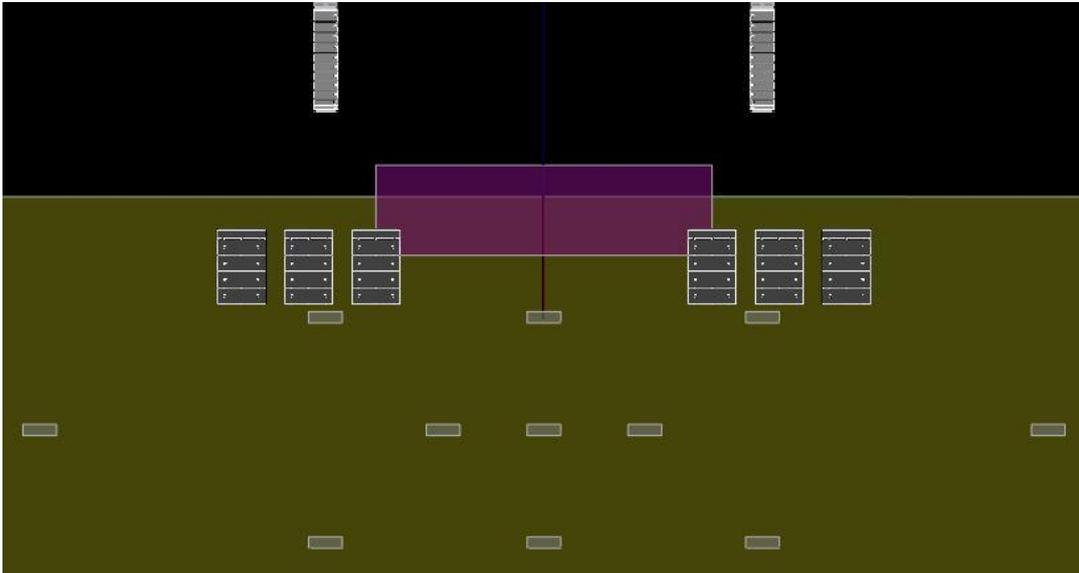
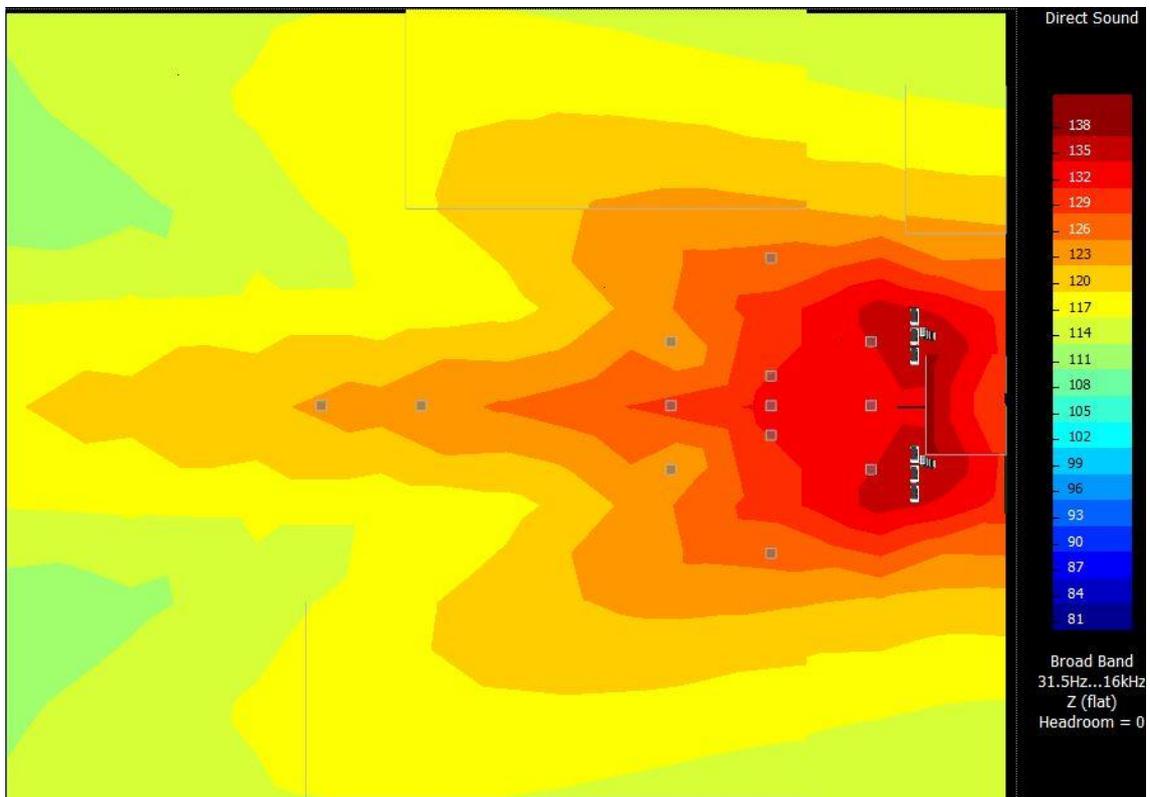


Figura 41: Resposta SPL para o arranjo LR convencional.



De acordo com o aumento da distância e a diminuição da pressão sonora vê-se que a resposta SPL do sistema tende ao formato de um tridente. Até a faixa dos 15 metros se tem uma excelente cobertura, porém, analisando a linha de medição onde se encontra o ponto 10, observa-se alguns problemas. O ponto 10 recebe 129 dB, uma boa pressão sonora para essa distância, entretanto, os pontos 9 e 11 apresentam uma queda de 6 dB, correspondente a uma queda de metade da potência, o que não é desejável.

Como esta caixa tem um tipo de irradiação omnidirecional ela irradia pressão sonora para frente e para trás, e essa energia enviada para a parte de trás é um problema, pois, normalmente parte dessa pressão sonora é irradiada para dentro do palco. No caso do arranjo LR convencional, nota-se pela Figura 41 que temos muita pressão sonora sendo irradiada para o palco, e este é um ponto negativo deste arranjo.

5.2 Análise do Arranjo *End-fire*

O arranjo discutido agora será o *end-fire*, onde também foram utilizados 12 caixas de subgrave de cada lado. A Figura 42 representa a montagem deste arranjo dentro do software NS-1 e a Figura 43 representa a resposta SPL para este caso.

Figura 42: Arranjo *end-fire*.

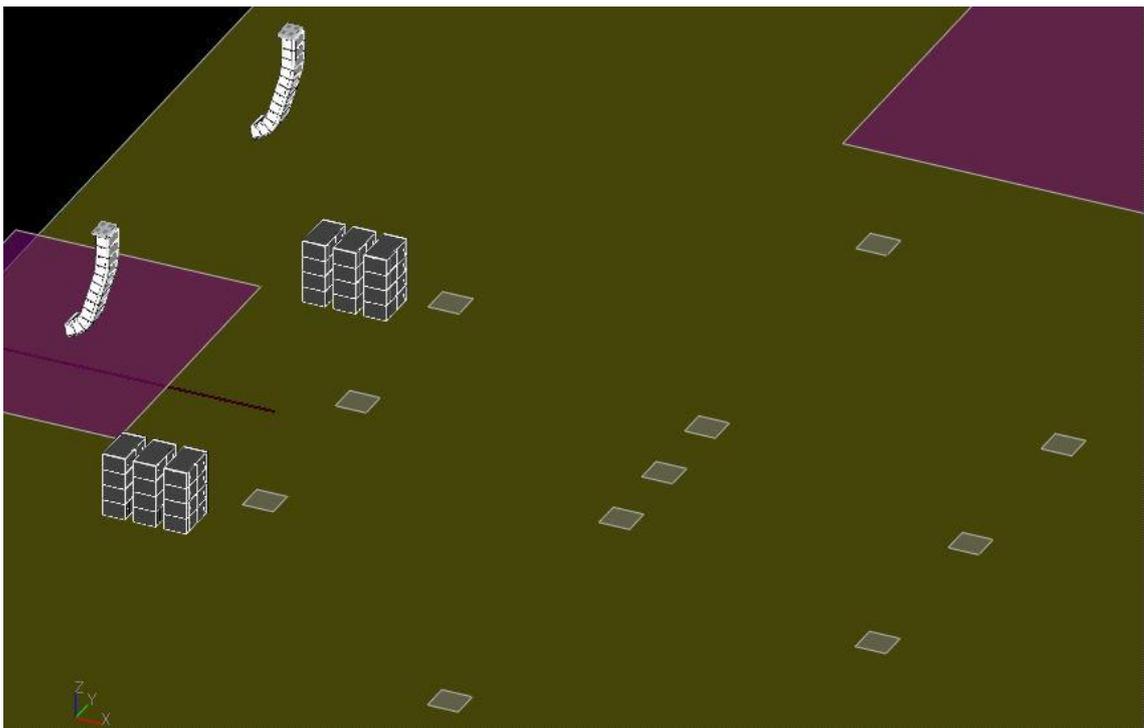
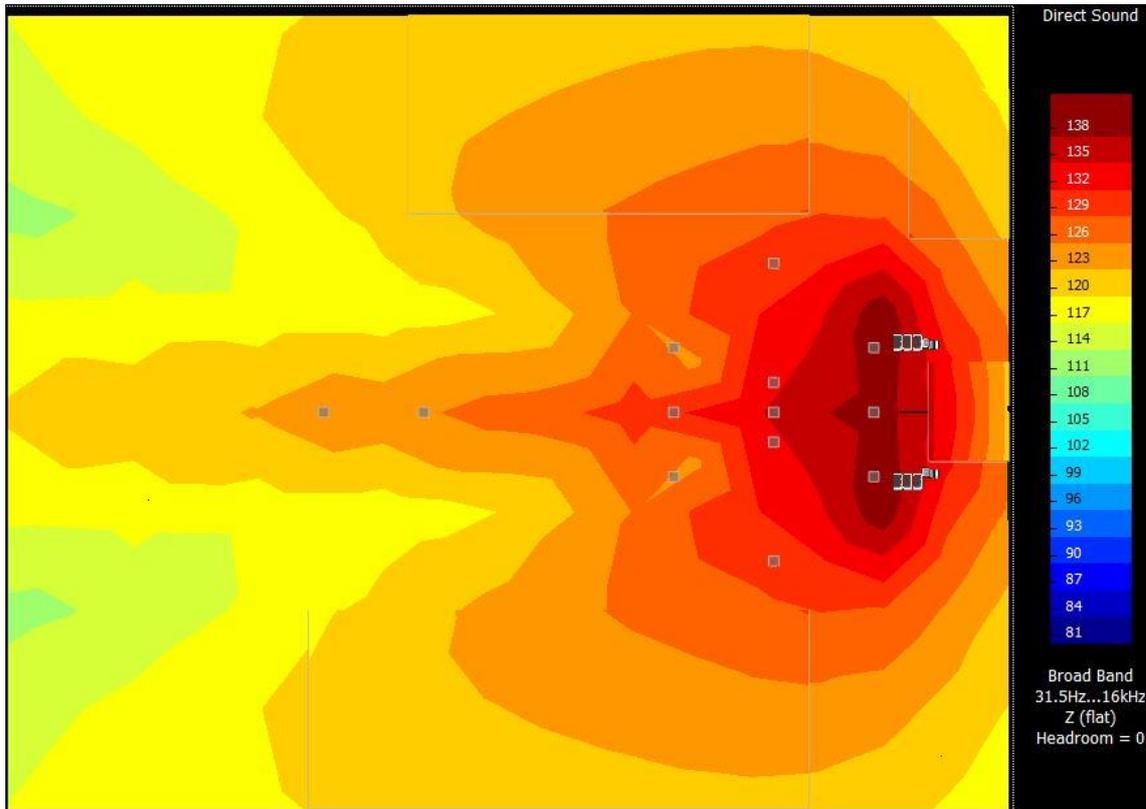


Figura 43: Resposta SPL para o arranjo *end-fire*.

Na Figura 43 percebe-se que a área mais escura do gráfico corresponde 138 dB, e esta área tem um formato mais coerente com o local de trabalho, pois, sua faixa de extensão engloba os pontos 1, 2 e 3, pontos estes que são locais muito importantes de concentração de público. O formato de tridente também está presente neste arranjo, porém aqui se tem um formato mais arredondado do que o obtido na Figura 41. Desta forma, a região que compreende os primeiros 15 metros e a região dos pontos 4 e 8 tem um ganho de 3 dB de pressão sonora.

O ponto 10 tem os mesmos 129 dB que no arranjo LR convencional, entretanto, a área de cobertura de 126 dB do *end-fire* é muito maior. De maneira geral, comparando as áreas de coberturas das amplitudes em dB o arranjo *end-fire* consegue oferecer maiores áreas de cobertura. Um exemplo pode ser visto analisando a amplitude de 123 dB, a área de 123 dB do *end-fire* é muito maior que a área de 123 dB do LR convencional.

Mesmo tendo mais pressão sonora, a queda observada nos pontos 9 e 11 no LR convencional ainda continua acontecendo, apesar de agora ser de uma maneira menos crítica do que no caso anterior.

Para concluir a análise do *end-fire* pode-se perceber que, tendo a mesma quantidade de caixas que o LR convencional, um valor maior de pressão sonora e melhor cobertura foram obtidos.

5.3 Análise do Arranjo *Cardioid*

O último arranjo a ser analisado é o *cardioid*. Neste arranjo foram utilizados nove caixas de subgrave de cada lado. As Figuras 44 e 45 representam o arranjo *cardioid* no ambiente NS-1 e sua resposta em SPL, respectivamente.

Figura 44: Arranjo *cardioid*.

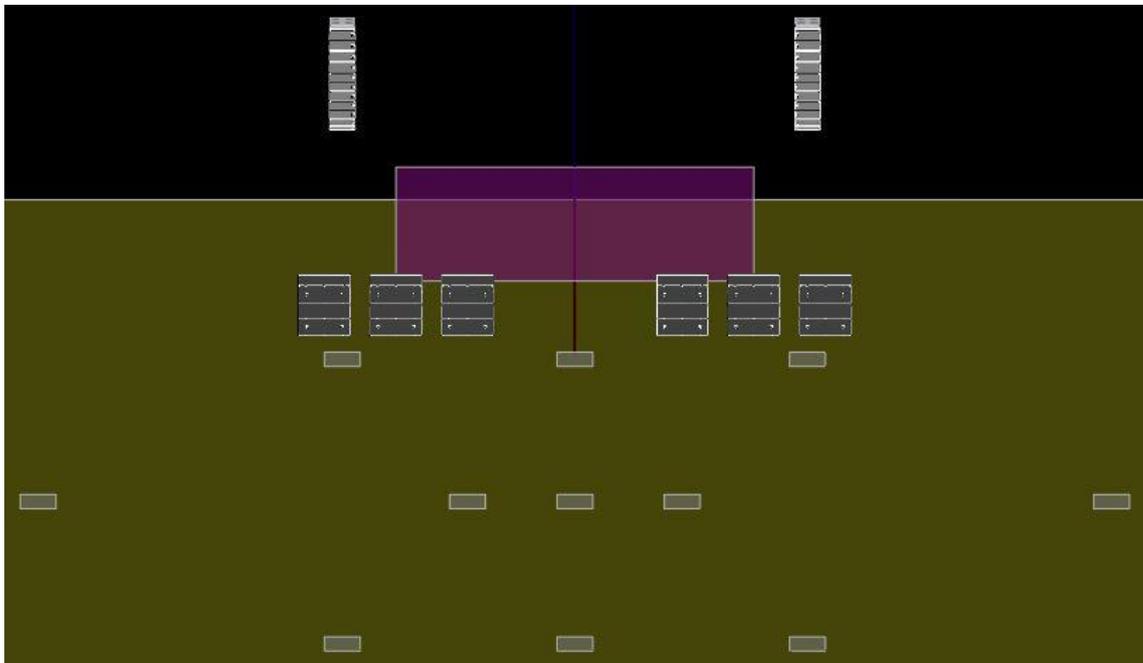
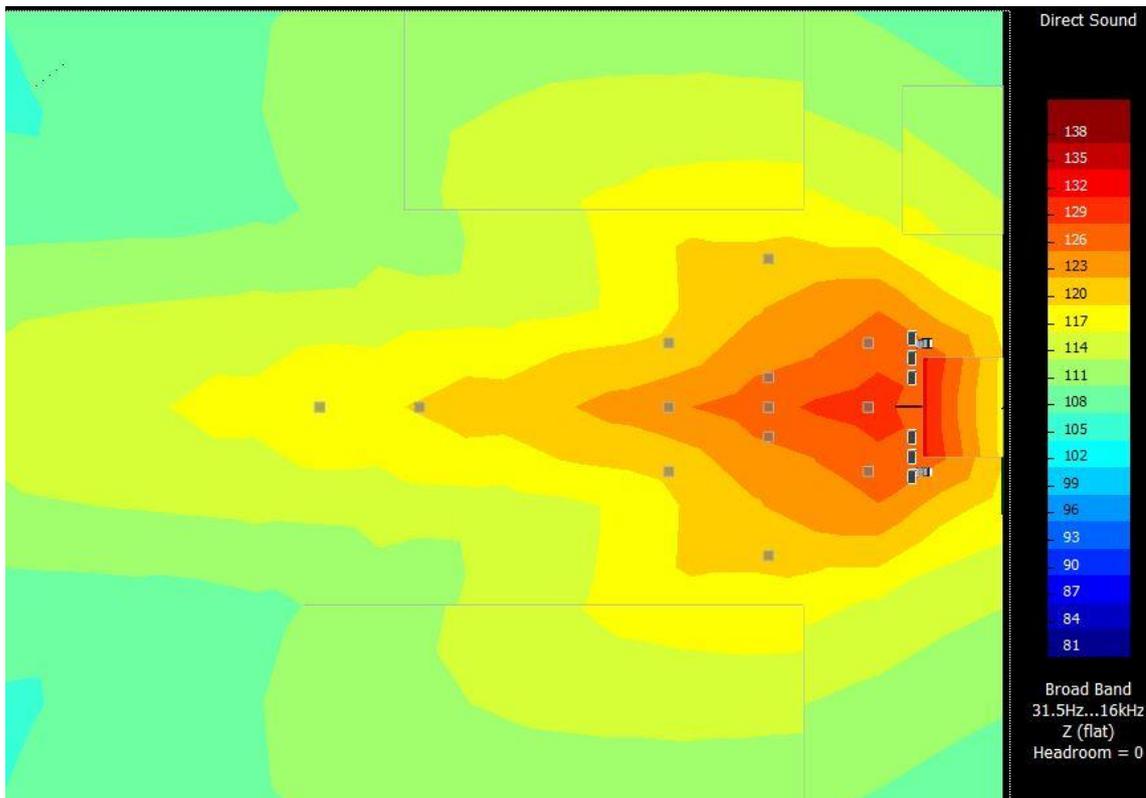


Figura 45: Resposta SPL para o arranjo *cardioid*.

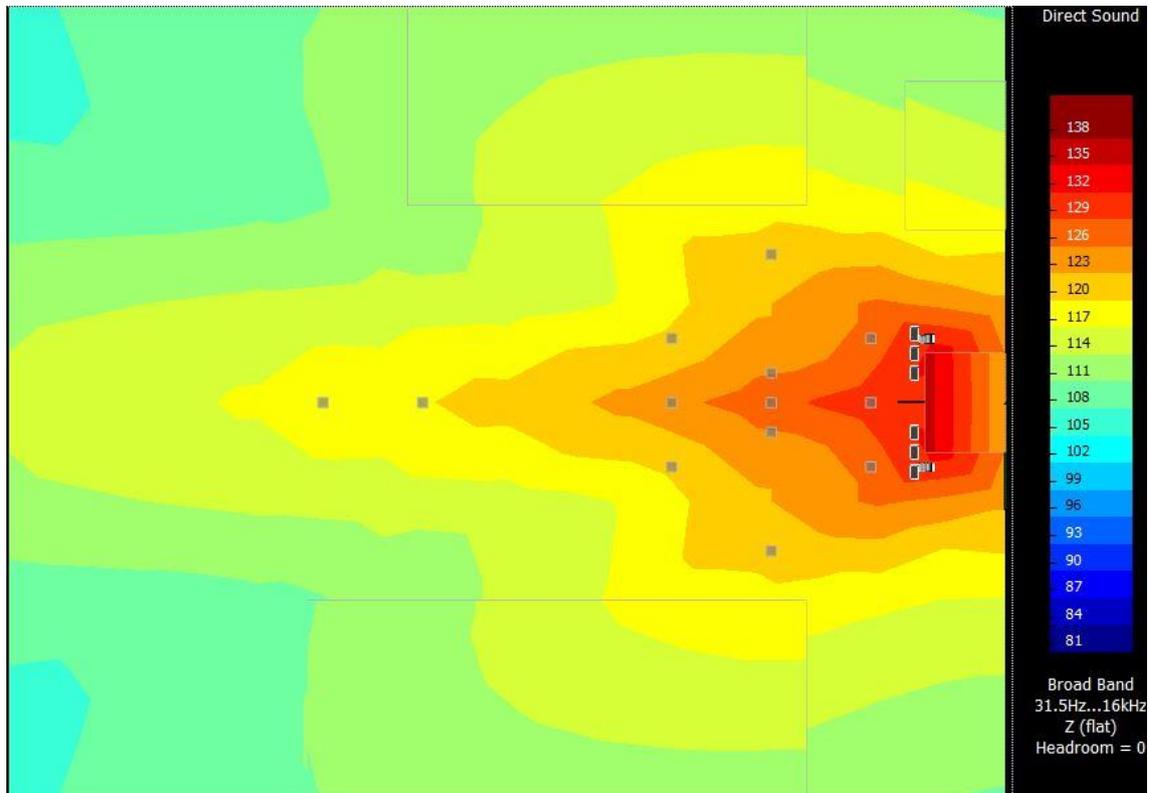
Para este caso a cor mais escura do gráfico corresponde a 129 dB. Esse decaimento de amplitude se dá devido à diminuição do número de caixas e também ao arranjo escolhido, já que agora se tem caixas viradas para trás. Essas caixas com direção contrária ao público tem a finalidade de causar interferências destrutivas nas ondas que são irradiadas na direção do palco, e assim, diminuir a pressão sonora que retorna ao palco.

Como nos arranjos anteriores, o formato de tridente também está presente, entretanto, em menor influência se comparado com os modelos vistos anteriormente, além do mais, neste caso os formatos das áreas de cobertura têm menos irregularidades, fazendo com que ocorram menores variações de pressão sonora. Por exemplo, observe que os pontos 1, 3, 5, 6 e 7, estão dentro da mesma faixa de amplitude em dB, no caso 126 dB. Algo semelhante ocorre com os pontos 4, 8, 9, 11 e 12, que tem a mesma amplitude de pressão sonora, que é de 120 dB. Ou seja, apenas duas áreas de cobertura compreendem 10 dos 13 pontos de medição, o que nos diz que a energia do sistema está bem distribuída no local a ser sonorizado.

A fim de ilustrar o efeito das caixas que atuam viradas para o lado contrário ao do público a Figura 46 nos mostra a resposta SPL do arranjo quando essas caixas são desligadas. Podem-se observar nesta Figura que a área de mais SPL, no caso 132, está contida em cima

do palco, o que é extremamente ruim. Algo semelhante pode ser visto na resposta SPL do arranjo LR convencional.

Figura 46: Resposta SPL *cardioid* com as caixas voltadas para o palco desligadas.



Comparando as Figuras 45 e 46 se vê nitidamente a diferença que fazem as caixas que ficam voltadas para o palco, opostos ao público. A Figura 45 apresenta a menor pressão sonora no palco, resultado este obtido através do arranjo *cardioid*.

Algumas conclusões podem ser tiradas com relação às análises realizadas. Sobre o LR convencional, tem-se uma boa pressão SPL, entre o ponto 2 e o ponto 10, onde se tem uma distância de 10 metros, tem-se apenas uma queda de 3 dB, entre o ponto 10 e o ponto 13, distância de 35 metros, queda de somente 6 dB. Contudo, seu formato de cobertura é bem direcional, ou seja, não são bem aproveitados em locais de grande largura. Outro ponto negativo é a quantidade de pressão sonora irradiada na direção do palco, onde dependendo da aplicação pode causar sérios problemas.

O *end-fire* é o arranjo que proporciona maior nível de pressão sonora. Trabalha muito bem nos primeiros 20 metros e tem menor direcionalidade que o LR, ou seja, demonstrou melhor resposta nas laterais do local trabalhado. O decaimento entre os pontos 10 e 13 é o

mesmo que do LR, porém, no caso dos pontos 2 e 10 tem-se 9 dB de diferença. Com relação ao SPL irradiado na direção do palco, é menor do que o LR e maior que o *cardioid*.

O *cardioid* é o arranjo que proporciona formatos de cobertura mais regulares. Entre os pontos 2 e 10 tem-se uma queda de 6 dB, queda esta que é a mesma entre os pontos 10 e 13. É o arranjo que oferece menor SPL no palco, contudo, também oferece menor SPL voltado ao público. Por curiosidade, para que esse arranjo obtenha mesmo nível de SPL que o arranjo *end-fire* seria necessário muito mais caixas de subgrave. É possível que essa informação soe de maneira estranha, mas analisando apenas a quantidade, o *cardioid* gasta mais unidades para produzir menos nível SPL. Isso ocorre devido às caixas que estão voltadas na direção do palco.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Antes de apresentar os resultados práticos deste projeto são feitas algumas considerações. Tendo realizado as simulações, no ambiente NS-1, agora é empregado o software Smaart para realizar as medições.

Como dito anteriormente, para se ter uma cobertura homogênea de áudio deve-se obter respostas planas dentro deste software. A resposta plana irá garantir que o sistema está reproduzindo fielmente o que é gerado pelas fontes sonoras.

Deve-se ressaltar também que a resposta plana desejada não é a resposta final do sistema entregue ao público. Este trabalho trata apenas da parte de alinhamento e otimização do sistema, e essa parte é feita antes da chegada do público ao evento. Após esta etapa de alinhamento, os técnicos responsáveis pelas bandas que se apresentarão no local, farão a passagem de som, e após a passagem de som, se tem a resposta do sistema que será ouvida pelo público.

A passagem de som é onde ocorre o teste de todos os equipamentos e instrumentos que serão utilizados durante a apresentação do artista. Nesta etapa, o técnico responsável pela banda irá equalizar e fazer o ajuste de volume de todos os instrumentos e microfones necessários para a realização do show. Portanto, o resultado final de funcionamento do sistema de sonorização depende diretamente a influência do técnico responsável pelo artista.

No ato do alinhamento se deseja uma resposta plana para que o sistema não interfira nos sinais gerados pelas fontes sonoras, ou seja, uma resposta plana garante que tudo o que for gerado será reproduzido fielmente. O que o público irá ouvir dependerá, da mixagem feita pelo técnico responsável pela banda.

Durante as medições foram coletados dados em todos os 13 pontos para cada arranjo apresentado anteriormente. Entretanto, os dados são apresentados de forma agrupada para facilitar a exploração e análise. Deste modo, cada gráfico apresenta a resposta do grupo de pontos a que ele pertence, e isso irá diminuir o número de gráficos que deverão ser analisados pelo leitor.

Os pontos foram divididos da seguinte maneira:

- Grupo A: pontos 1, 2 e 3;
- Grupo B: pontos 5, 6, e 7;
- Grupo C: pontos 4, 6 e 8;
- Grupo D: pontos 9, 10 e 11;

- Grupo E: pontos 10, 12 e 13;
- Grupo F: pontos 2, 6 e 10;

A escala apresentada nos gráficos de medição é diferente da escala apresentada nas simulações. Para que as escalas fossem correspondentes seria necessário que os microfones estivessem calibrados, contudo, não havia disponibilidade de usar o aparelho de calibração. Desta forma, as análises são baseadas na comparação entre dois ou mais pontos.

A escala apresentada nas simulações fornecem uma resposta de pressão sonora para todo o espectro de frequências, já no Smaart, tem-se uma amplitude em dB para cada frequência. Para efetuar as comparações entre os pontos, aproximações médias das amplitudes no espectro foram realizadas. Através destas aproximações se pode inferir sobre o aumento ou decaimento em dB de um ponto em relação ao outro.

Os resultados são apresentados da seguinte forma: resposta do sistema *flat* + LR convencional, resposta do sistema corrigido + LR convencional, arranjo *end-fire* e por fim o arranjo *cardioid*.

6.1 Sistema *flat* + LR Convencional

Os gráficos demonstrados a seguir são referentes ao sistema *flat* juntamente com o arranjo de subgrave LR convencional. O sistema no estado *flat* indica que o áudio não sofreu nenhuma alteração, correção ou equalização. A simulação para este estado do sistema está mostrada na Figura 39, do Capítulo 5.

O sistema que se encontra num estado *flat* significa que ele não sofreu nenhuma alteração de processamento, ou seja, nenhum filtro, ganho/atenuação ou equalizador está atuando sobre ele.

A Figura 47 representa a resposta SPL para o grupo de pontos A. Os pontos 1, 2 e 3 são representados pelas cores roxa, verde e vermelha respectivamente.

Figura 47: Resposta SPL grupo A. Ponto 1: roxa. Ponto 2: verde. Ponto 3: vermelha.

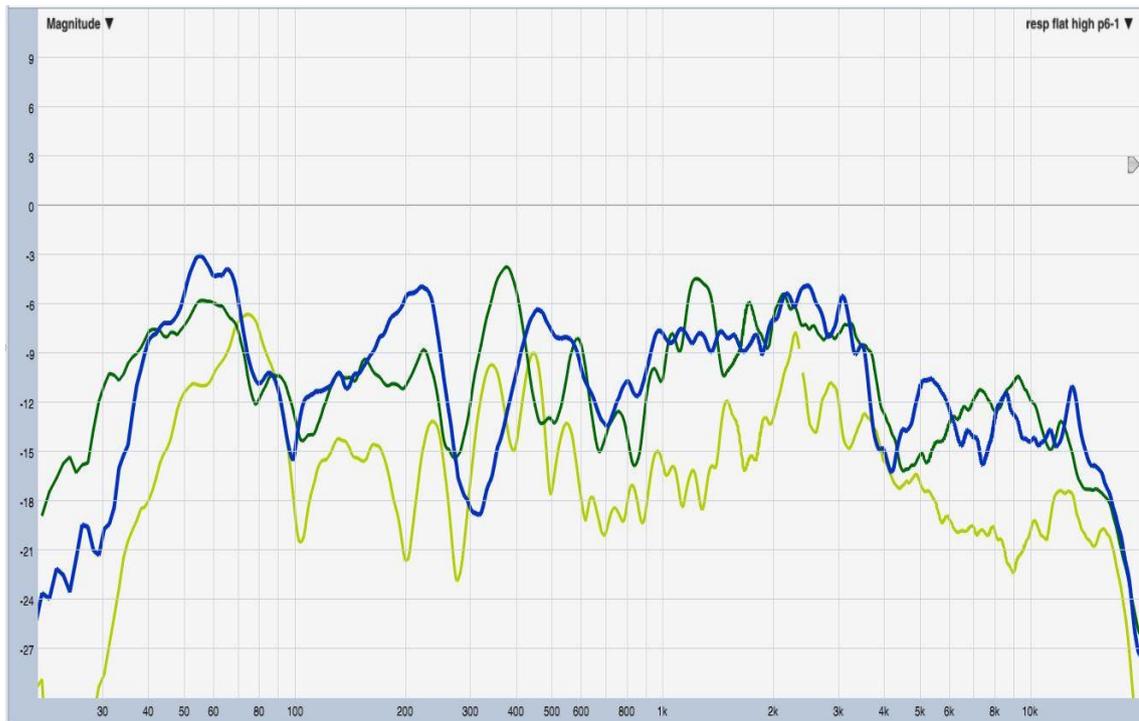


De acordo com as simulações, os pontos pertencentes a este grupo devem ter o mesmo SPL. Entretanto, a Figura 47 mostra que isso não ocorre. Deve-se observar que os pontos 1 e 3 tem respostas parecidas, porém, a partir de 125 Hz, o ponto 3 tem 6 dB a menos de SPL que o ponto 1. A partir dessa diferença entre os pontos 1 e 3 é possível ver que os PAs não estão respondendo com o mesmo nível de pressão sonora. Analisando o ponto 2 observa-se uma diferença de aproximadamente 10 dB com relação ao ponto 1, diferença esta que aumenta a partir da frequência de 2 kHz. Isso indica que interferências destrutivas estão atuando nesse ponto, e isso é extremamente prejudicial para se obter a cobertura homogênea desejada.

Ao observar os pontos 1 e 3 percebe-se curvas semelhantes, porém, com uma diferença de SPL entre elas, essa diferença pode estar sendo causada por diversos fatores, como cabeamento, sistema de amplificação ou polaridades invertidas dos componentes internos das caixas de som. Para resolver esse problema é necessário checar todas essas etapas. Por se tratar de um sistema real, não ideal, torna-se impraticável alcançar respostas totalmente idênticas, mas é necessário que elas sejam as mais próximas possíveis.

A Figura 48 apresenta a resposta para o grupo de pontos B, na qual as cores verde, azul e amarela representam os pontos 5, 6 e 7, respectivamente.

Figura 48: Resposta SPL grupo B. Ponto 5: verde. Ponto 6: azul. Ponto 7: amarela.



Assim como aconteceu com os pontos 1 e 3, os pontos 5 e 7 tem respostas semelhantes, porém, o ponto 7 tem 5 dB a menos. Nas frequências próximas de 1 kHz e de 9 kHz essa diferença é ainda maior. De acordo com as simulações, todo este grupo de pontos deveria ter mesma pressão sonora. Isso ocorre apenas para os pontos 5 e 6. O ponto 6 apresenta uma boa resposta, com exceção das frequências que estão entre 200 Hz e 400 Hz, onde se nota um vale na forma de onda.

A Figura 49 expõe a resposta para o grupo de pontos C. A cor azul representa o ponto 6, a cor verde o ponto 4 e a cor vermelha o ponto 8. Fazendo uma média dos valores das curvas para os pontos 4 e 8, observa-se que elas tem praticamente a mesma amplitude em dB, porém, existem picos e vales muito discrepantes nessas respostas. Diferenças de amplitudes no espectro de frequência são extremamente normais, pois, não existem sistemas ideais, entretanto, variações muito grandes dificultam o trabalho de alinhamento.

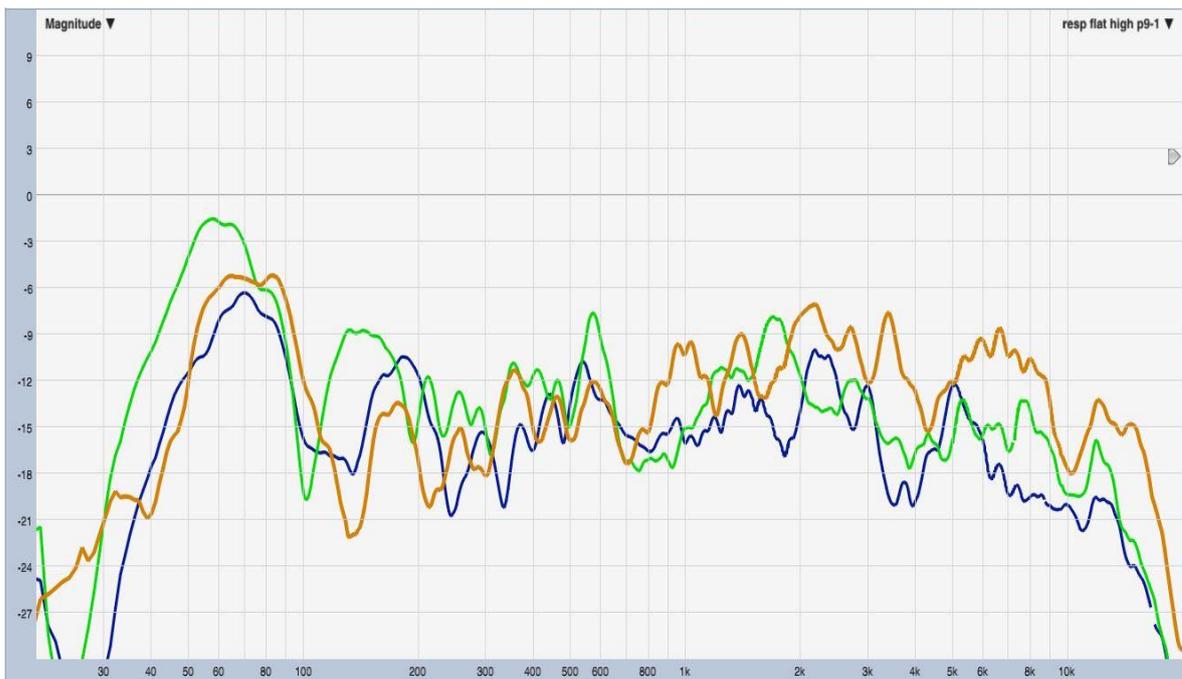
As simulações indicam que o ponto 6 dever ter 3 dB a mais que os pontos 4 e 8. Isso é verdade para a maior parte do espectro de frequência, exceto nos pontos nos quais se tem os picos vistos nas curvas verde e vermelha. De maneira geral, esse grupo de pontos condiz com o que foi apresentado nas simulações

Figura 49: Resposta SPL grupo C. Ponto 4: verde. Ponto 6: azul. Ponto 8: vermelha.



A Figura 50 apresenta o resultado obtido pelo grupo de pontos D, na qual estão compreendidos os pontos 9, 10 e 11, representados pelas cores laranja, verde e azul, respectivamente.

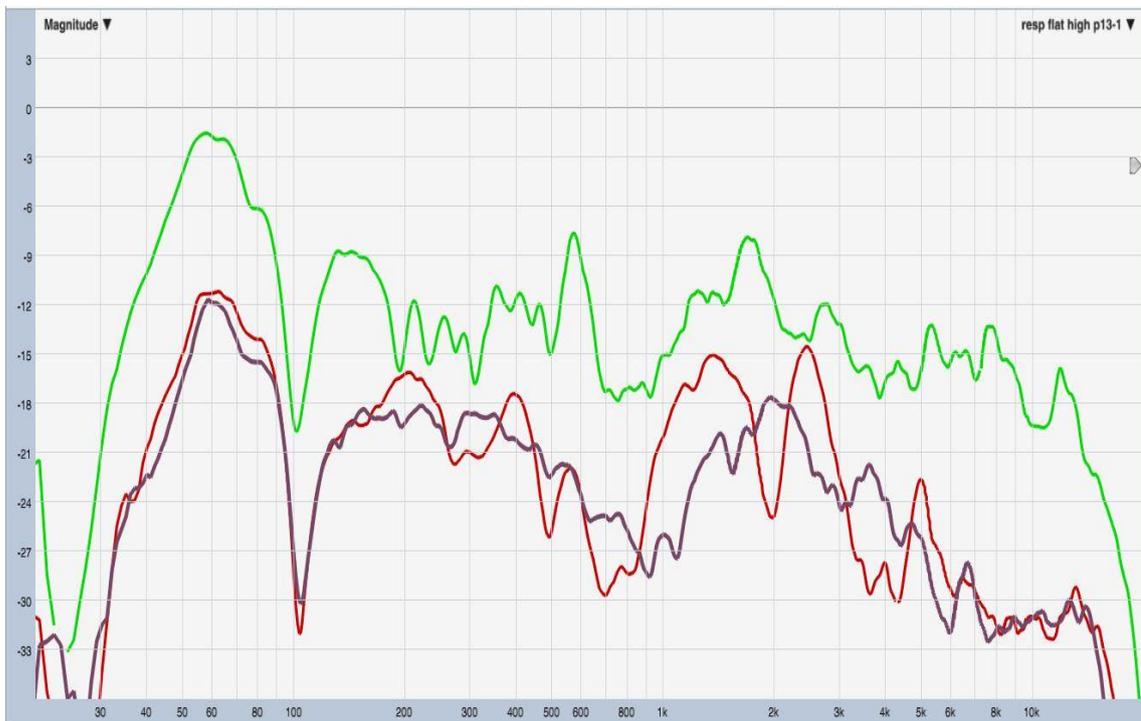
Figura 50: Resposta SPL grupo D. Ponto 9: laranja. Ponto 10: verde. Ponto 11: azul.



As curvas referentes aos pontos 9 e 11 se assemelham até aproximadamente 700 Hz, a partir do qual ocorre um decaimento na curva azul, referente ao ponto 11. O resultado das simulações mostrou que o ponto 10 deve ter 3 dB a mais que os pontos 9 e 11. Em média os pontos 9 e 10 tem praticamente o mesmo SPL, e ambos tem maior SPL que o ponto 11. Destaca-se novamente a grande quantidade de vales nos gráficos apresentados, o que dificulta as operações de correções do sistema para se obter a cobertura homogênea de áudio no sistema.

Os resultados do grupo E é mostrado na Figura 51. Nela, as cores verde, vermelha e roxa correspondem aos pontos 10, 12 e 13, respectivamente. Pode-se dizer que os pontos 12 e 13 tem o mesmo nível de pressão sonora, e, de acordo com a simulação, o ponto 13 deveria ter 3 dB a menos. A simulação também expôs que o ponto 10 deveria ter 3 dB a mais que o ponto 12, e 6 dB a mais que o ponto 13. Na prática, o ponto 10 tem 9 dB a mais que os outros dois pontos.

Figura 51: Resposta SPL grupo E. Ponto 10: verde. Ponto 12: vermelha. Ponto 13: roxa.



Observando a resposta dos pontos 12 e 13 pode-se notar a presença de vales com 9 dB de diferença em relação às frequências próximas. Outro ponto importante a se ressaltar é que, a partir de 2 kHz tem-se um decaimento bastante acentuado.

O grupo F, Figura 52, apresenta os pontos 2, 6, e 10, sendo mostrados pelas cores marrom, azul e verde, respectivamente. Deve-se notar que, quanto maior a distância do ouvinte ou, no caso deste trabalho, do microfone de medição, menor será a pressão sonora. Dessa forma, seria esperado que o ponto 2 tivesse maior SPL, o ponto 10 menor SPL e o ponto 6 um valor intermediário. Entretanto, o maior valor de SPL visto na Figura 52 é o do ponto 6. O ponto 2, que deveria apresentar maior pressão sonora, é o que tem a menor resposta.

Figura 52: Resposta SPL grupo F. Ponto 2: marrom. Ponto 6: azul. Ponto 10: verde.



Para aprimorar o sistema melhorando a cobertura, foram realizadas algumas correções, tendo como referência o ponto 10. Foram empregadas as ferramentas que o processador disponibiliza para efetuar ações de correção. A Figura 53 apresenta os gráficos com as respostas com e sem correções, medidas no ponto 10.

Observando a Figura 53, percebe-se uma melhora nas frequências acima de 2 kHz, um ganho nas frequências próximas de 800 Hz, e uma melhora na frequência de 100 Hz, porém, o vale contido nessa frequência ainda é um problema. Essas correções foram realizadas através dos equalizadores contidos no processador. O problema de se ter tantos picos e vales numa resposta é que, por exemplo, quando se tenta corrigir um vale, dando um ganho na frequência, os picos que cercam esse vale também sofreram influência deste ganho aplicado. Isso ocorre,

pois, a seletividade dos equipamentos utilizados não é ideal. Portanto, ao dar um ganho em 300 Hz, por exemplo, frequências acima e abaixo desse valor também serão afetadas pelo ganho. A quantidade de frequências que serão afetadas dependerá da seletividade do equipamento utilizado. Esse efeito pode ser visto no pico contido próximo à frequência de 300 Hz. Quando se tenta melhorar a resposta do vale encontrado em 100 Hz, o pico presente nos 300 Hz acaba sendo amplificado.

Figura 53: Comparação entre a resposta flat e resposta corrigida para o ponto 10. Cor rosa: resposta corrigida. Cor verde: resposta flat.



De maneira geral, através das correções feitas, melhoras foram alcançadas. Agora, são apresentadas como essas correções afetaram os demais pontos de medição comparando as curvas corrigidas com as curvas em *flat*, apresentadas anteriormente. Também é avaliado o arranjo de subgrave LR convencional. As análises feitas no arranjo das caixas de subgrave (faixa de 20 Hz a 100 Hz) terá como base a Figura 41 do Capítulo 5.

6.2 Sistema corrigido + LR Convencional

A Figura 54 mostra a resposta para o grupo A de pontos, após as correções. Nesta imagem os pontos 1, 2 e 3 são representados pelas cores roxa, verde e vermelha respectivamente.

Figura 54: Resposta SPL grupo A para sistema corrigido. Ponto 1: roxa. Ponto 2: verde. Ponto 3: vermelha.

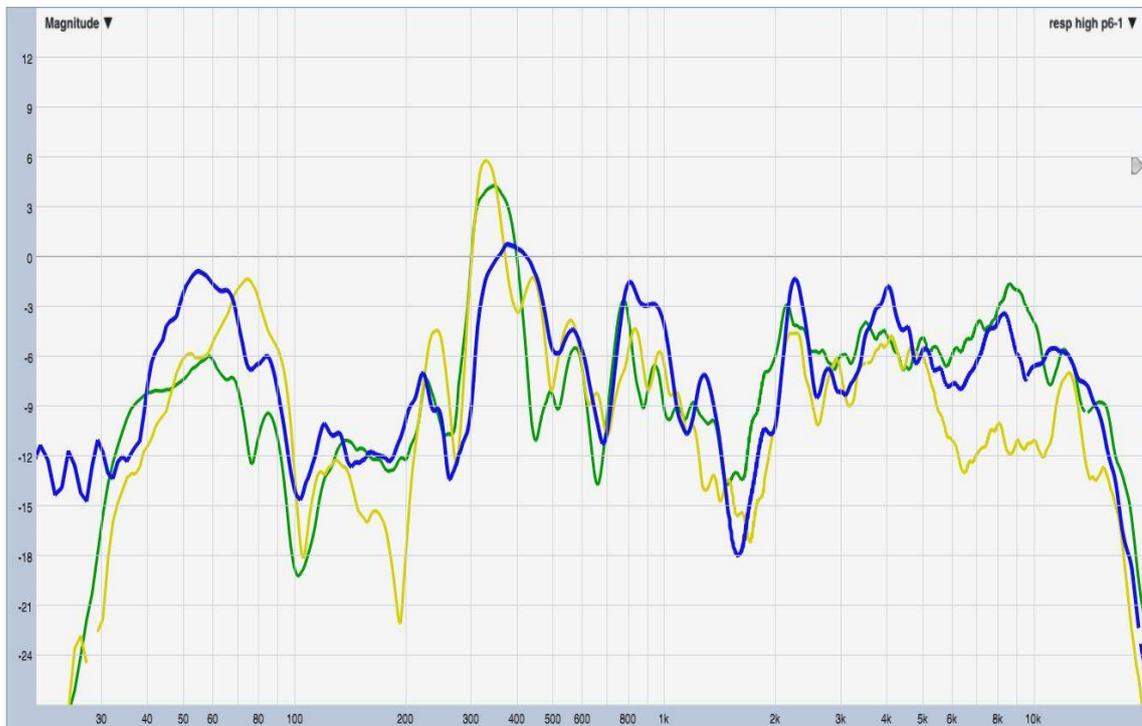


Após as correções, a diferença de amplitude entre os pontos 1 e 3 vista na Figura 47 não mais existe. Agora esses dois pontos tem a mesma amplitude de pressão sonora. Na Figura 47 observa-se que a resposta do ponto 2 tinha 10 dB a menos que o ponto 1 e aproximadamente 6 dB a menos que o ponto 3. Agora, de acordo com a Figura 54, a faixa que compreende a frequências entre 200 Hz e 3 kHz, tem a mesma amplitude de pressão sonora para os três pontos. Acima de 3 kHz o ponto 2 tem 6 dB a menos que os demais. Apesar da melhoria da resposta para estes pontos, as diferenças de amplitudes entre picos e vales aumentaram. Isso por ser visto, por exemplo, nas faixas de frequências entre 300 Hz e 700 Hz ou entre 1 kHz e 2 kHz.

Das simulações, no arranjo LR convencional, o ponto 2 deveria ter um valor de 3 dB a menos que os pontos 1 e 3, contudo, como pode-se ver na Figura 54, essa diferença supera 9 dB. Além disso, um vale surgiu entre 40 Hz e 50 Hz, o que não é visto no outros pontos deste grupo. Pode-se dizer que, no ponto 2, ao invés de ocorrer uma interferência construtiva, tem-se uma interferência destrutiva, o que reflete no aumento da diferença de amplitude.

A seguir, a Figura 55 expõe as resposta para o grupo B, onde as cores verde, azul e amarela, correspondem aos pontos 5, 6 e 7, respectivamente.

Figura 55: Resposta SPL grupo B para sistema corrigido. Ponto 5: verde. Ponto 6: azul. Ponto 7: amarela.

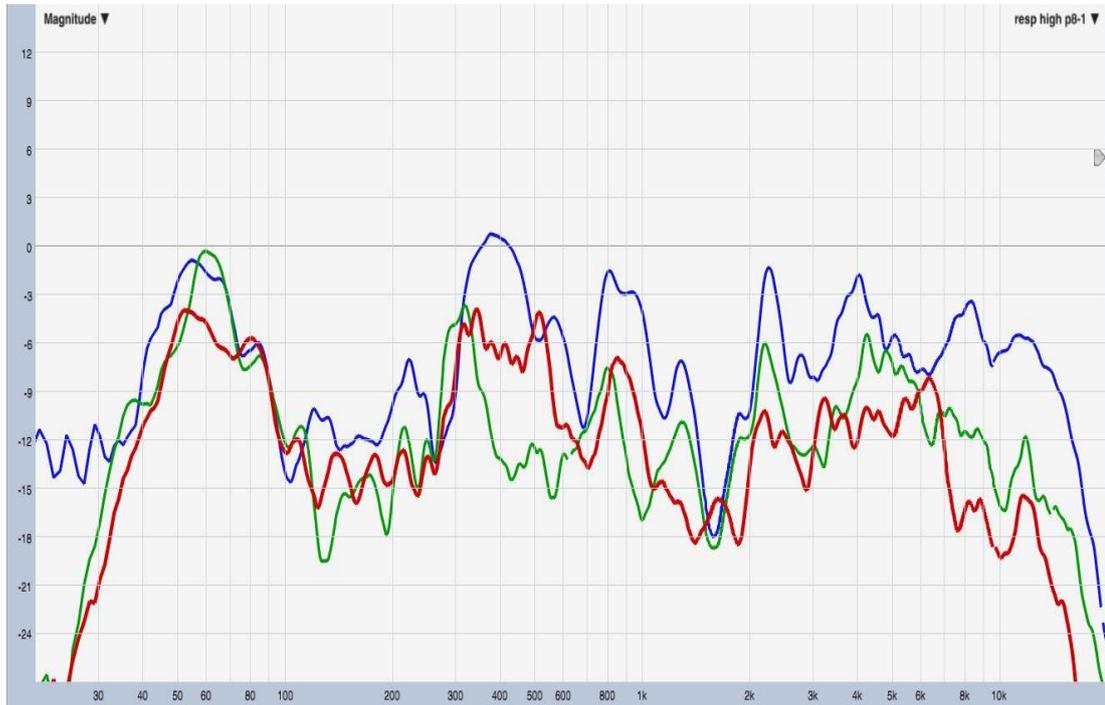


A diferença de 5 dB entre o ponto 7 e o ponto 5 exibida na Figura 48 foi eliminado, e as respostas tem amplitudes semelhantes, exceto na faixa de 200 Hz e entre 6 kHz e 10 kHz, onde se observa diferenças de aproximadamente 6 dB. Comparando aa Figuras 48 e 55, é nítida a melhoria obtida nas proximidades de 300 Hz e a partir de 3 kHz após as correções, entretanto, um vale entre 1 kHz e 2 kHz ainda persiste.

A Figura 41 demonstra que esses pontos devem ter o mesmo nível SPL para o arranjo LR. Entretanto, pela Figura 55 vê-se que os pontos 5 e 7 tem aproximadamente 3 dB a menos que o ponto 6. Pode-se levar em consideração que os pontos 5 e 7 estão na fronteira de mudança de amplitude na Figura 41, sendo assim, essa diferença de amplitude pode ser considerada coerente com as simulações.

O grupo C é exibido pela Figura 56, na qual a cor verde representa o ponto 4, a azul o ponto 6 e a vermelha o ponto 8. As amplitudes dos pontos 4 e 8 são semelhantes e o ponto 6 tem 3 dB a mais que o outros dois pontos. A melhoria acima de 3 kHz e o vale entre 1 kHz e 2 kHz também se apresentam nesta Figura.

Figura 56: Resposta SPL grupo C para sistema corrigido. Ponto 4: verde. Ponto 6: azul. Ponto 8: vermelha.



Sobre o subgrave, a diferença de 6 dB que deve ocorrer entre o ponto 6 e os outros dois pontos não ocorre. O que ocorre é que os pontos 4 e 6 tem mesma amplitude, e que o ponto 8 tem 3 dB a menos que os outros.

A Figura 57 se refere ao grupo D, na qual estão compreendidos os pontos 9, 10 e 11, representados pelas cores laranja, verde e azul respectivamente.

O valor de SPL é praticamente o mesmo para todos os pontos deste grupo. Nota-se na Figura 57 que o vale contido entre 1 kHz e 2 kHz é menos acentuado. Contudo, surge um vale entre as frequências de 90 Hz e 300 Hz. A diferença entre o pico contido em 80 Hz e o vale citado é de 23 dB. Ou seja, nos pontos 9 e 11, as frequências entre 90 Hz e 250 Hz praticamente não são ouvidas. A situação deste vale no ponto 10 também é ruim. A simulação para o arranjo LR demonstra que os pontos 9 e 11 devem ter 6 dB a menos que o ponto 10, porém, pela Figura 57, todos os pontos deste grupo tem a mesma amplitude de pressão sonora.

As respostas dos pontos pertencentes ao grupo E são exibidas pela Figura 58. Nela, a cor verde representa o ponto 10, a cor vermelha o ponto 12 e a cor roxa o ponto 13.

Figura 57: Resposta SPL grupo D para sistema corrigido. Ponto 9: laranja. Ponto 10: verde. Ponto 11: azul.

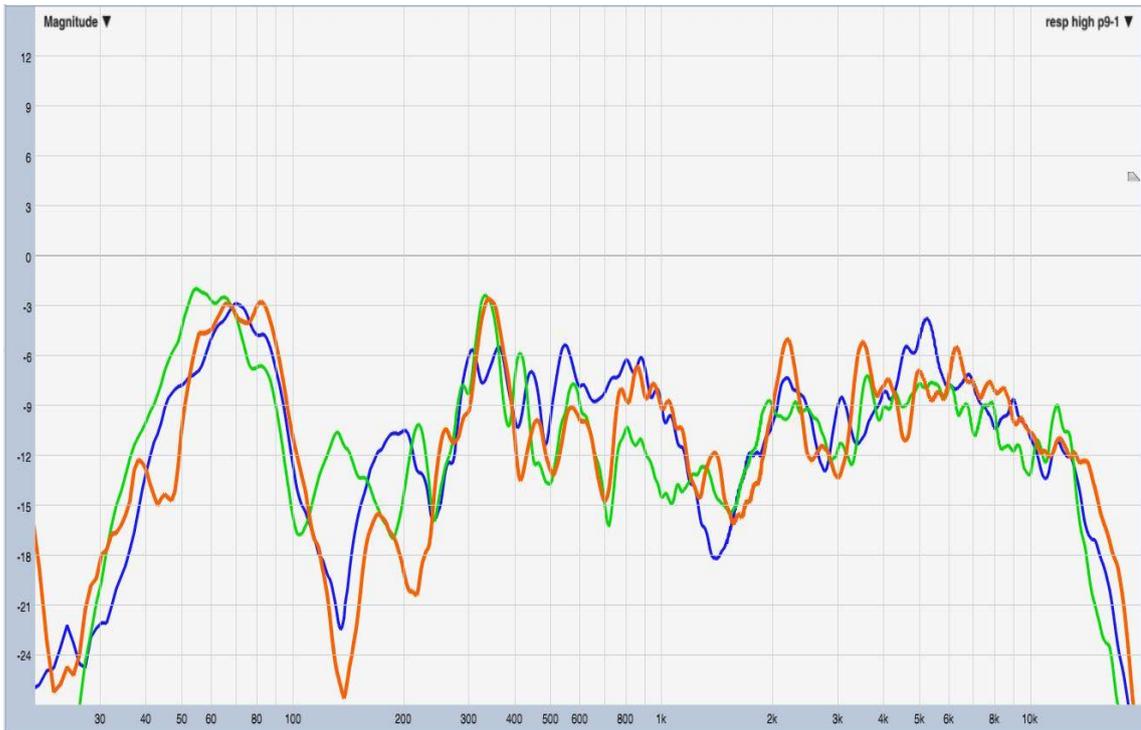
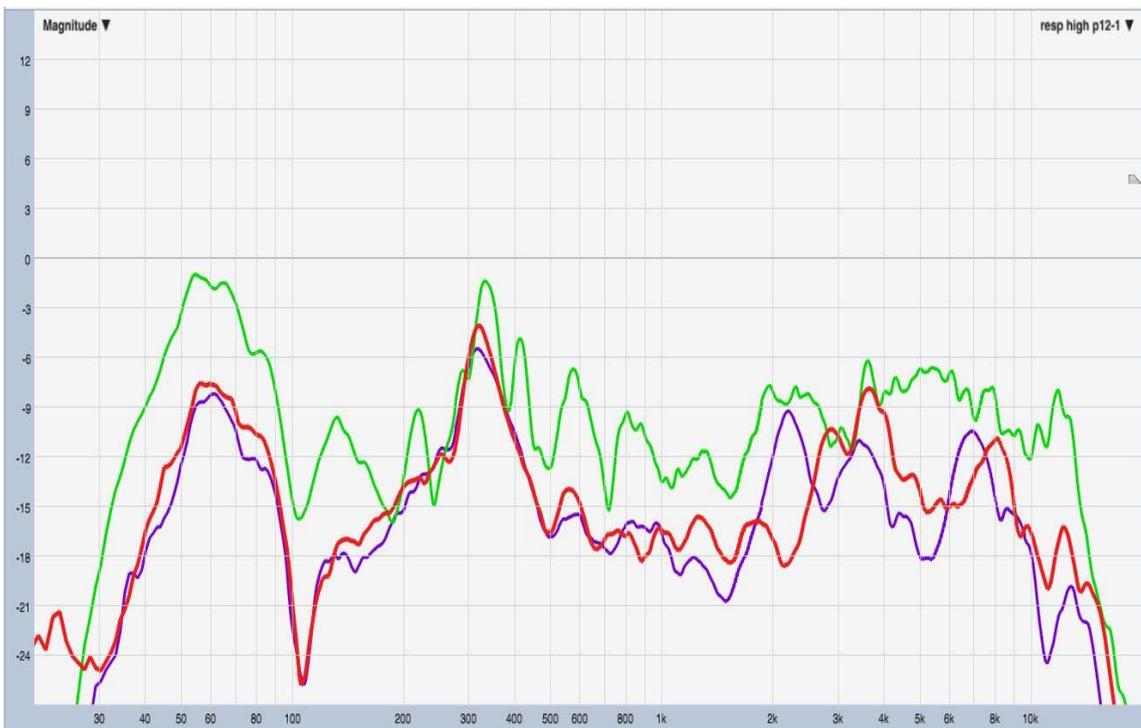


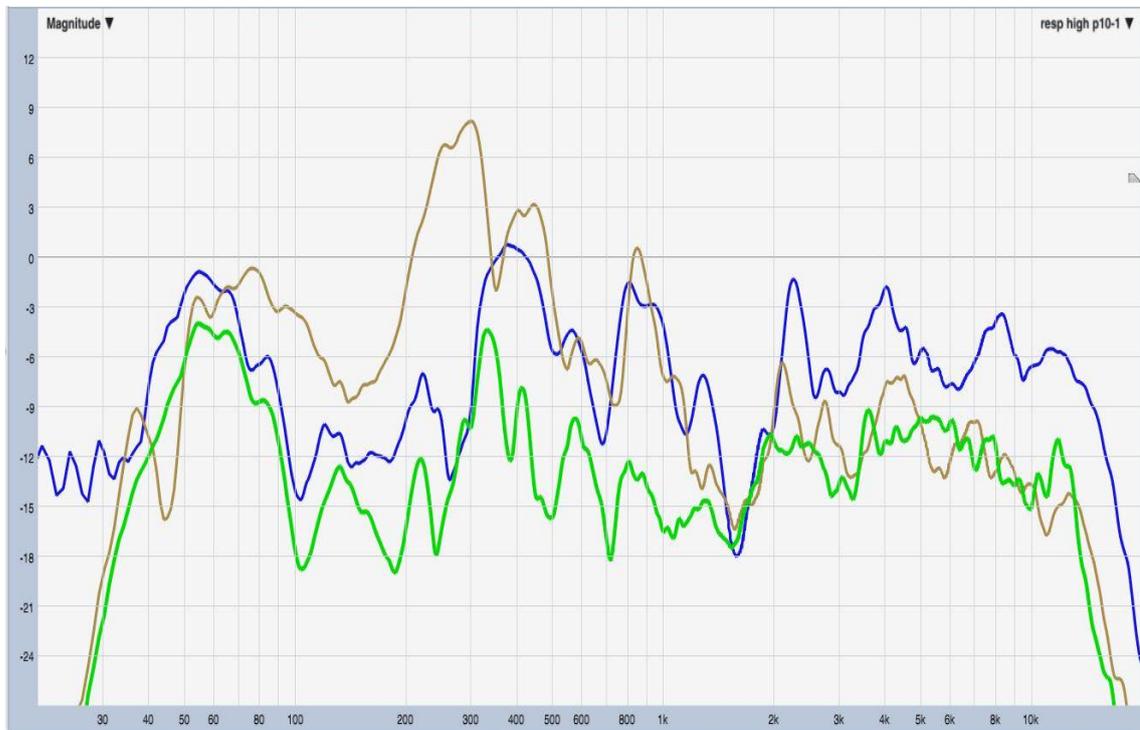
Figura 58: Resposta SPL grupo E para sistema corrigido. Ponto 10: verde. Ponto 12: vermelha. Ponto 13: roxa.



O vale próximo a 100 Hz ainda se faz presente. Assim como na Figura 51, as respostas dos pontos 12 e 13 tem a mesma amplitude de pressão sonora. O decaimento entre o ponto 10 e 12 é de 6 dB na prática, assim como mostrado na simulação. Assim, apesar da distância, tem-se pouca perda de amplitude. Novamente, é importante ressaltar o decaimento da amplitude a partir de 2 kHz. Pela Figura 41, o ponto 10 deve ter 6 dB a mais que os demais pontos deste grupo. Observando a Figura 58, esse diferença é de pouco mais de 6 dB.

Para finalizar, a Figura 59 exibiu os resultados para o grupo F. A cor marrom corresponde ao ponto 2, a cor azul ao ponto 6 e a cor verde ao ponto 10.

Figura 59: Resposta SPL grupo F para sistema corrigido. Ponto 2: marrom. Ponto 6: azul. Ponto 10: verde.



Até aproximadamente 1 kHz, a pressão sonora diminui a medida que a distância aumenta, ou seja, o ponto 2 tem maior SPL e o ponto 10 tem o menor SPL. A partir de 2 kHz, os pontos 2 e 10 tem o mesmo SPL e o ponto 6 tem o maior nível de pressão sonora das três curvas. Como mostrado na simulação, o ponto 10 deve ter menor nível de pressão sonora que os outros dois pontos.

Num contexto geral, englobando os 13 pontos, as correções trouxeram importantes melhorias para as frequências acima de 2 kHz, todavia o surgimento de vales profundos diminuiu a importância dessas correções.

A maioria dos vales ocorre devido interações de ondas de frequências que estão fora de fase e também por mau dimensionamento do sistema. Um ponto importante é que os dois piores vales vistos ocorrem em torno de 100 Hz e próximo de 2 kHz. Essas são as frequências de corte do sistema, ou seja, nessas regiões de frequência tem-se o ponto crítico de interação entre duas fontes sonoras. A região de 100 Hz é onde ocorre a transição entre os alto falantes de subgrave para os alto falantes de médio-grave, e a região de 2 kHz é o local de transição entre os alto falantes de médio-grave para os *drivers*. Os *drivers* são componentes que reproduzem as frequências acima de 2 kHz e estão presentes nas caixas de *line array* juntamente com os alto falantes de médio-grave.

A Seção 2.2 definiu que as frequências de subgrave estão compreendidas entre 20 Hz e 100 Hz, e as frequências de médio-grave em 160 Hz até 2 kHz. As baixas amplitudes encontradas nas frequências de 100 Hz a 200 Hz também pode ser explicada pelo fato de se ter um buraco entre 100 Hz e 160 Hz. Isso é uma falha do sistema. Essa falha até pode ser atenuada fazendo uso de um equalizador, por exemplo, mas isso afetaria outros parâmetros do sistema. Ou seja, aplicando ganhos nessa faixa de frequências, isso afetaria as frequências próximas, fazendo com que os picos adjacentes tem-se sua amplitude ainda mais aumentada.

Pelas respostas obtidas, pode-se concluir que os componentes deste sistema estão fora de fase. Com o auxílio do Smaart, é possível fazer o ajuste de fase destes componentes, no entanto, este ajuste não será apresentado, uma vez que este procedimento envolve diversos conceitos de fase, ajustes de tempo dos componentes e necessita de alguns recursos do Smaart que não foram citados.

6.3 Arranjo de Subgrave *end-fire*

Agora são apresentados os resultados das medições realizadas para o arranjo de subgrave *end-fire*. As análises são baseadas na simulação do arranjo, Figura 43, e na comparação feita com os resultados do arranjo LR convencional. Os gráficos apresentam as respostas para o grupo de pontos que ele compreende. O grupo A é exibido pela Figura 60, na qual os pontos 1, 2 e 3 correspondem as resposta nas cores roxa, verde e vermelha, respectivamente.

Figura 60: Resposta SPL grupo A arranjo end-fire. Ponto 1: roxa. Ponto 2: verde. Ponto 3: vermelha.

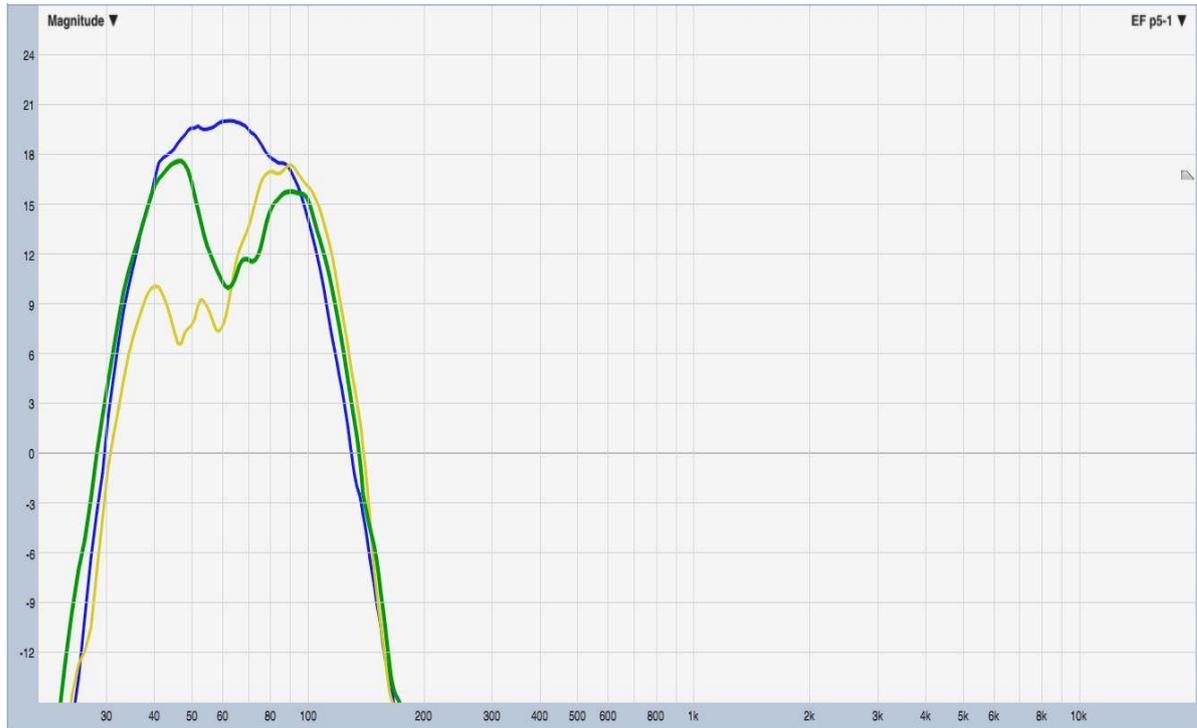


O primeiro ponto a ser destacado é a diferença de amplitude que este arranjo tem em relação ao LR, essa diferença pode ser vista nitidamente na Figura 60. Essa é uma característica deste arranjo. Pela Figura 41, todos os pontos deste grupo devem ter o mesmo SPL, todavia, o ponto 2 tem 9 dB a menos que os outros pontos. Essa diferença de amplitude do ponto 2 também ocorre no arranjo LR. Destaca-se na Figura 54 a ocorrência de um vale próximo a 50 Hz e a diferença de amplitude entre os pontos 1 e 3. Com a mudança de arranjo, essas características negativas apresentadas pelo arranjo LR não mais existem, assim, houve melhorias na resposta do sistema.

A Figura 61 demonstra o resultado para o grupo B. As cores verde, azul e amarela correspondem aos pontos 5, 6 e 7, respectivamente.

A simulação indica que o ponto 6 deve ter 3 dB a mais que os outros pontos. Pela Figura 61, nota-se que essa diferença é um pouco maior devido aos vales encontrados nos pontos 5 e 7. Entre 50 Hz e 80 Hz ocorre um decaimento de amplitude do ponto 5, e no ponto 7 tem-se um decaimento para frequências abaixo de 70 Hz. Esses decaimentos de amplitude em faixas de frequências específicas são indesejáveis, pois, as respostas deveriam ser semelhantes, tendo apenas uma diferença de SPL entre elas, como demonstra a simulação.

Figura 61: Resposta SPL grupo B arranjo end-fire. Ponto 5: verde. Ponto 6: azul. Ponto 7: amarela.



Elaborado pelo Autor.

Os pontos 4, 6 e 8, representados pelas cores verde, azul e vermelha, respectivamente, podem ser observados na Figura 62.

Figura 62: Resposta SPL grupo C arranjo end-fire. Ponto 4: verde. Ponto 6: azul. Ponto 8: vermelha.



As respostas para os pontos 4 e 8 são praticamente idênticas.. De acordo com a Figura 43 esses dois pontos devem ter 6 dB a menos que o ponto 6. Verificando a Figura 62 nota-se que essa diferença é um pouco maior que isso, o que é considerado normal se tratando de um sistema real. Observando as Figuras 55 e 56, as respostas para os pontos 4 e 8 são diferentes, e isso quer dizer que os dois lados das caixas de som não estão respondendo da mesma maneira. Com o arranjo *end-fire*, até agora essas diferenças não estão ocorrendo, o que significa que há uma resposta mais homogênea para ambos os lados do sistema.

O grupo de pontos D é mostrado pela Figura 63. O ponto 9 é exibido pela cor laranja, o ponto 10 pela cor verde e o ponto 11 pela cor azul.

Apesar das respostas nos pontos 9 e 11 serem praticamente iguais, um decaimento para frequências abaixo dos 60 Hz pode ser notado. Essa menor amplitude faz com que a diferença existente entre o ponto 10 seja bem maior que 6 dB. Apesar disso, tem-se uma resposta excelente no ponto 10.

Para demonstrar os resultados para o grupo E, a seguir tem-se a Figura 64. As curvas verde, vermelha e roxa representam os pontos 10, 12 e 13, respectivamente.

Figura 63: Resposta SPL grupo D arranjo end-fire. Ponto 9: laranja. Ponto 10: verde. Ponto 11: azul.



Figura 64: Resposta SPL grupo E arranjo end-fire. Ponto 10: verde. Ponto 12: vermelha. Ponto 13: roxa.



A partir da simulação, o ponto 10 deve ter 6 dB a mais que os outros pontos deste grupo e os pontos 12 e 13 devem ter a mesma amplitude. Analisando a Figura 64 vê-se que, o que foi apresentado na simulação pode ser comprovado nas medições, têm-se uma diferença entre as amplitudes dos pontos 12 e 13, porém essa diferença é inferior a 3 dB, e esse valor é aceitável.

A comparação entre os pontos 2, 6 e 10 é apresentada pela Figura 65, onde o ponto 2 é mostrado pela cor marrom, o ponto 6 pela cor azul e o ponto 10 pela cor verde.

Pelo fato do ponto 2 ser o mais próximo do palco espera-se que ele tenha a maior amplitude de pressão sonora. Mas, observando a Figura 65 nota-se que este ponto tem a resposta com menor amplitude. Portanto, sabe-se que um cancelamento está ocorrendo neste ponto. Entretanto, as simulações apresentam que o ponto 6 deve ter 6 dB a mais que o ponto 10. Na prática, esses dois pontos tem o mesmo SPL, o que significa que a energia contida no ponto 6 foi mantida até o ponto 10.

Figura 65: Resposta SPL grupo F arranjo end-fire. Ponto 2: marrom. Ponto 6: azul. Ponto 10: verde.



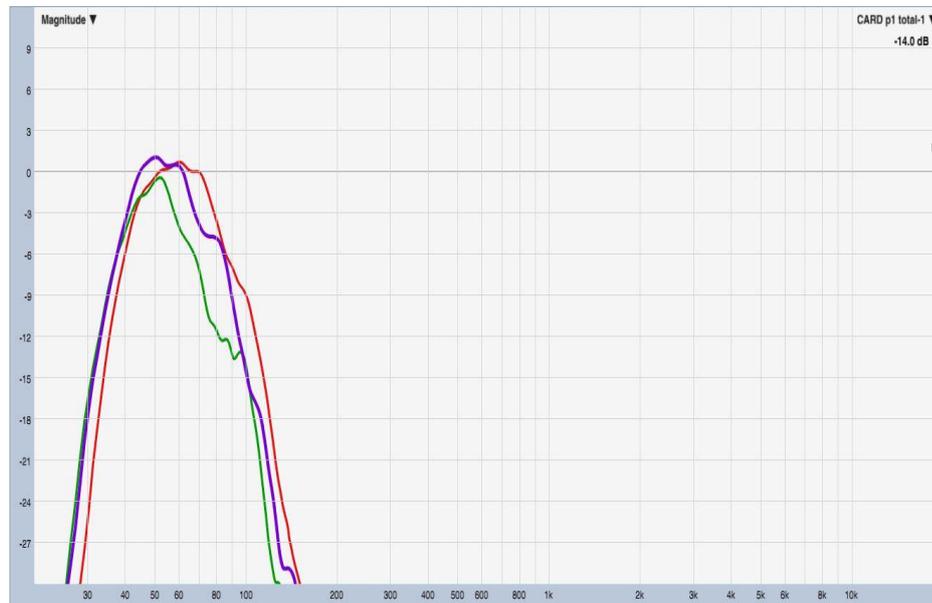
O arranjo *end-fire* trouxe um aumento de pressão sonora em todos os pontos. Além disso, a diferença de amplitude entre frequências próximas diminuiu bastante em comparação com o arranjo LR. O pior caso analisado no arranjo *end-fire* foi para o ponto 2, cuja amplitude é inferior ao esperado. Os pontos 4, 5, 7 e 8 foram os casos onde se encontrou maiores variações nas amplitudes das frequências. Porém, a variação encontrada nesses pontos é menor do que as variações constatadas no arranjo LR convencional.

6.4 Arranjo Subgrave *cardioid*

Neste momento, são apresentados os resultados das medições realizadas para o arranjo *cardioid* de subgrave. Neste arranjo, observa-se uma menor amplitude nas respostas, isso ocorre pela própria característica do arranjo e também porque, se tem menos caixas de som do que nos outros arranjos mostrados. Por fatores técnicos, o arranjo foi realizado com 18 caixas ao invés de 24.

O grupo A é exibido pela Figura 66, na qual os pontos 1, 2 e 3 correspondem as resposta nas cores roxa, verde e vermelha, respectivamente.

Figura 66: Resposta SPL grupo A arranjo cardioid. Ponto 1: roxa. Ponto 2: verde. Ponto 3: vermelha.



Da simulação, o ponto 2 deveria ter 3 dB a mais que os demais, e os pontos 1 e 3 ter mesma amplitude. A igualdade entre os pontos 1 e 3 foi observada na prática, contudo, o ponto 2 tem amplitude menor que os demais. Observando as Figuras 54 e 60 pode-se notar que o ponto 2 se comporta de maneira semelhante, sempre com amplitude menor do que o esperado.

A resposta para o conjunto de pontos B é exibida pela Figura 67, para qual as cores verde, azul e amarela, condizem com os pontos 5, 6 e 7, respectivamente.

Figura 67: Resposta SPL grupo B arranjo cardioid. Ponto 5: verde. Ponto 6: azul. Ponto 7: amarela.



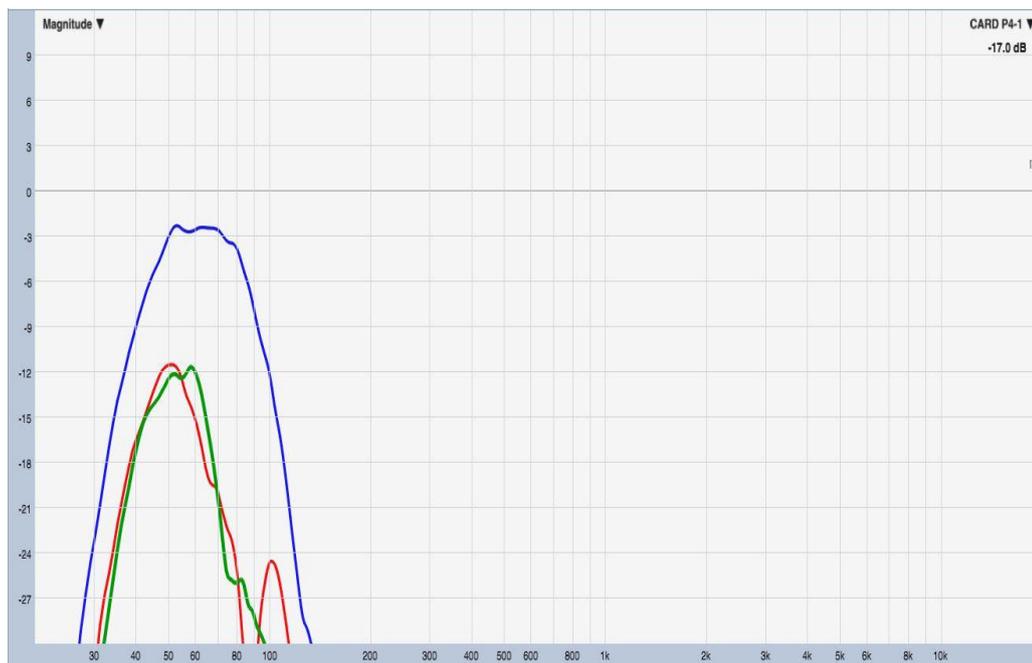
De acordo com a simulação, os três pontos deveriam ter mesma amplitude. Porém, nota-se pela Figura 67 que os pontos 5 e 7 tem cerca de 3 dB a menos que o ponto 6. Apesar dos pontos 5 e 7 terem menores amplitudes, sua resposta no domínio da frequência são praticamente iguais. Isso quer dizer que os dois lados do sistema estão respondendo de maneira semelhante.

Os pontos contidos no grupo C são exibidos pela Figura 68. Para o ponto 4 a cor correspondente é a verde, para o ponto 6 é a azul e para o ponto 8 é a vermelha.

Pela Figura 45, os pontos 4 e 8 devem ter menos 6 dB em relação ao ponto 6. Na prática essa diferença supera os 9 dB. Através das amplitudes apresentadas pelos pontos 4 e 8, pode-se dizer que nesses pontos o subgrave praticamente não é ouvido. Este seria o pior caso das análises feitas até o momento.

As respostas para o grupo D são apresentadas pela Figura 69. O ponto 9 é representado pela cor laranja, o ponto 10 pela cor verde e o ponto 11 pela cor azul.

Figura 68: Resposta SPL grupo C arranjo cardioid. Ponto 4: verde. Ponto 6: azul. Ponto 8: vermelha.



Observando a Figura 45, o ponto 10 tem mais 3 dB com relação aos outros dois pontos. Contrapondo essa informação com a Figura 69 nota-se que essa diferença é próxima dos 6 dB. Observa-se ainda, uma diferença entre as curvas que representam os pontos 9 e 11, isso significa que o sistema não está conseguindo atingir esses pontos da mesma forma como desejado.

Figura 69: Resposta SPL grupo D arranjo cardioid. Ponto 9: laranja. Ponto 10: verde. Ponto 11: azul.



O grupo de ponto E tem suas respostas apresentadas pela Figura 70, sendo os pontos 10, 12 e 13 correspondem às cores verde, vermelha e roxa, respectivamente.

Figura 70: Resposta SPL grupo E arranjo cardioid. Ponto 10: verde. Ponto 12: vermelha. Ponto 13: roxa.



A simulação mostra que o ponto 10 deve ter 3 dB a mais que o ponto 12 e 6 dB a mais que o ponto 13. Pela Figura 70, vê-se que o ponto 10 tem de 9 dB a mais que os pontos 12 e 13, ou seja, nestes pontos a amplitude de resposta do arranjo é muito pequena, comprometendo os resultados desejados. Nos pontos 12 e 13, dos arranjos estudados, o *cardioid* apresenta o pior resultado.

A Figura 71 demonstra os resultados para o grupo F. As cores marrom, azul e verde representam os pontos 2, 6 e 10, respectivamente.

Figura 71: Resposta SPL grupo F arranjo cardioid. Ponto 2: marrom. Ponto 6: azul. Ponto 10: verde.



Na Figura 71 pode-se notar que, apesar do pico em 50 Hz, encontrado no ponto 2, todos os pontos tem a mesma amplitude. De acordo com a Figura 45, o ponto 2 deveria ter 6 dB a mais que o ponto 10 e 3 dB a mais que o ponto 6. Apesar de, essas respostas não corresponderem ao que foi simulado, o fato de o ponto 2 não ter amplitude menor que os demais é uma característica positiva, visto que, nos arranjos anteriores isso não foi alcançado.

Como pontos críticos do arranjo *cardioid* podem-se citar os pontos 4 e 8, onde se tem baixa amplitude de resposta e grande parte do espectro de frequência nesses pontos foi comprometido. A resposta dos pontos 9 e 11, apesar de apresentarem amplitudes razoáveis,

não são iguais, ou seja, os sistema está reagindo de modo diferente em pontos onde deveria responder de forma igual, ou pelo menos semelhante.

6.5 Considerações Finais

O objetivo principal deste trabalho é ter a máxima cobertura homogênea no local estudado. Assim, o arranjo LR convencional apresentou a pior resposta dentre os arranjos de subgraves estudados. Nele podem-se observar diversas e numerosas variações de amplitudes entre as frequências. As características encontradas fazem com que esse arranjo não seja a melhor opção para esse projeto.

Comparando os resultados entre os arranjos *end-fire* e *cardioid*, observa-se que no grupo A o *cardioid* tem melhor resposta no espectro de frequência e apresenta boa amplitude no ponto 2. No grupo B o *cardioid* continua tendo melhor resposta em frequência, o arranjo *end-fire* apresenta muita variação de amplitude na resposta em frequência. Sobre o grupo de pontos C, apesar das grandes variações nas amplitudes das frequências, o *end-fire* oferece melhor resultado pois, a resposta do *cardioid* nos pontos 4 e 8 é ruim, com baixíssimo nível de pressão sonora.

No grupo de pontos D, ambos os arranjos oferecem respostas ruins nos pontos 9 e 11, mas para o resultado no ponto 10, o *end-fire* demonstrou melhor resposta. Para o grupo E, apesar de apresentar baixa amplitude nos ponto 12 e 13, o *cardioid* tem resposta mais homogênea que o *end-fire*. A cerca do grupo F, se têm respostas boas no espectro de frequências, entretanto, o arranjo *cardioid* tem melhor resultado no ponto 2.

Como dito anteriormente, o arranjo *end-fire* oferece maior resposta SPL, e isso pode ser comprovado nos diversos gráficos exibidos, todavia, o foco deste trabalho é obter uma cobertura homogênea e não maior nível de pressão sonora. De maneira geral, o *cardioid* nos ofereceu melhor cobertura homogênea no local trabalhado, porém, apresentou baixo nível de pressão sonora. Para que esse problema seja resolvido uma solução seria adicionar mais caixas ao arranjo, para que, seja possível ganhar mais pressão sonora. O acréscimo de mais caixas geraria a necessidade de se refazer as simulações.

Sobre os resultados obtidos pelas caixas de altas frequências, conclui-se que não foram satisfatórios. Pode-se observar em todos os pontos que a diferença de amplitude entre as frequências é muito grande em todo o espectro. Vales e picos muito discrepantes ocorrem inúmeras vezes em todos os pontos analisados. A principal justificativa para esse resultado não satisfatório é que todo o PA utilizado não é original, ou seja, as caixas utilizadas são

cópias. Caixas originais têm alto custo financeiro, e a empresa que cedeu os equipamentos para o experimento não dispunha de um sistema original.

Outros fatores importantes que contribuíram para esses resultados foram o vento e o calor. No local aonde foram realizadas as medições ventava bastante, e o vento atrapalha na captação de altas frequências, então isso tem influência direta na obtenção de dados. Já a influência do calor ocorre no microfone, caso a temperatura esteja muito alta, a curva de resposta do microfone sofre algumas alterações. Nos dias das medições foram computadas temperaturas na faixa dos 28° C no local de trabalho.

CONCLUSÃO

Viu-se que os festivais de música deram um *start* para as tecnologias de áudio profissional. A partir desses festivais, necessidades de melhorias foram surgindo com o tempo. É considerável o quanto evoluíram essas tecnologias em tão pouco tempo.

Os sistemas de áudio funcionam como quebra-cabeças, onde cada peça é fundamental para que o todo funcione, se uma dessas peças não está de acordo, o resultado final é prejudicado.

As simulações são um ponto muito importante para o dimensionamento de um sistema de áudio, pois, através delas pode-se obter o melhor resultado prático. Nas simulações, é possível testar diversos arranjos e configurações, e isso é feito em questão de minutos. As medições reais não são idênticas aos resultados simulados, porém, esses resultados devem ser parecidos.

Apesar dos resultados práticos não terem sido tão satisfatórios e, desta forma, o objetivo de se ter uma cobertura homogênea não ter sido alcançado completamente, conseguiu-se demonstrar a importância de um sistema de áudio para um evento e quão importante é a parte de dimensionamento do sistema. Além disso, foram apresentados os pontos positivos e negativos dos arranjos demonstrados.

O fato das caixas utilizadas não serem originais, afetam muito o resultado final e, infelizmente, essa realidade é muito presente nos eventos realizados no Brasil. Um sistema original de fabricantes de referência são extremamente caros, podendo chegar a valores acima de R\$1.000.000,00.

Neste trabalho, foram apresentados três arranjos, LR Convencional, *end-fire* e *cardioid*, em experimentos futuros outros arranjos como *arc-delay* e *straight-line* podem ser

acrescentados. O local de trabalho também pode ser alterado, por exemplo, pode-se realizar um experimento em um local fechado. Experimentos envolvendo a percepção auditiva humana e a resposta final do sistema também podem ser feitos futuramente.

REFERÊNCIAS

ALVES, Sammya, 2009. **“O Woodstock Brasileiro”**; Revista Tópicos Especiais. Disponível em: <<https://topicosespeciais1.wordpress.com/2009/04/30/o-woodstock-brasiliense/>>. Acessado em 13/01/2017.

ARANHA, Carla; MIGUEL, Christian. **Mercado de show atrai empreendedores**. Exame. São Paulo, mar. 2013. Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/pme/mercado-de-shows-atrai-empresarios/>>. Acessado em 05 de junho de 2017.

BORTONI, R. **Amplificadores de Áudio: Fundamentos, Características e Aplicações**. Rio de Janeiro: H. Sheldon, 2002, 169p.

CAIXA ACÚSTICA LEACS KF750; **Bolero Instrumentos Musicais**. Disponível em: <<http://www.bolermusic.com.br/produto/caixa-acustica-leacs-kf750/93909>>. Acessado em 13/01/2017.

DICKASON, V. **Caixas Acústicas e Alto-Falantes**. Tradução de Homero Sette Silva. Rio de Janeiro: H. Sheldon, 1996, 278p.

DriveRack 4800; **dbx by Harman**. Disponível em: <<http://dbxpro.com/en-US/products/driverack-4800>>. Acessado em: 03 de março de 2017.

DriveRack VENU360; **dbx by Harman**. Disponível em: <<http://dbxpro.com/en-US/products/driverack-venu360>>. Acessado em: 03 de março de 2017.

ENGINEERING DEPARTMENT, D.A.S AUDIO. **Setting up a Cardioid Subwoofer System**. Valencia, Espanha, 2009. 31p. Disponível em: <http://www.dasaudio.com/en/support/technical-articles/cardioid-subwoofer-set-up/> Acessado em 02 de maio de 2016.

FEAR, David. 2017. **“Sundance 2017: Grateful Dead Doc 'Long Strange Trip' Is Heartbreaking Tribute”**: Rolling Stone. Disponível em: <<http://www.rollingstone.com/movies/news/grateful-dead-doc-long-strange-trip-premieres-at-sundance-w462673>>. Acessado em 21 de maio de 2017

FERNANDES, Cláudio. **"Festival de Rock Woodstock"**; Brasil Escola. Disponível em <<http://brasilecola.uol.com.br/datas-comemorativas/woodstock-maior-dos-festivais.htm>>. Acessado em 12 de janeiro de 2017.

FILIPO, Leonardo, 2014. **“Vila dos Atletas fecha ano 60% pronta e tem sobras do palco do Rock in Rio”**: Globo Esporte. Disponível em: <<http://globoesporte.globo.com/olimpiadas/noticia/2014/12/vila-dos-atletas-fecha-ano-60-pronta-e-tem-sobras-do-palco-do-rock-rio.html>>. Acessado em 19 de janeiro de 2017.

GOMES, Romeu, 2009. **“Iniciando No Audio Profissional VIII - PA, Line Array, Fly PA e Delay”**; Equipa Show. Disponível em <https://www.equipashow.com.br/index.php?link1=not&pgid=lermtc&mtc_id=26>. Acessado em 20 de janeiro de 2017.

G1 2015, acervo **GLOBO.COM**. Disponível em: <<http://g1.globo.com/musica/rock-in-rio/2015/fotos/2015/09/rock-rio-2015-1-dia-fotos.html#F1777460>>. Acessado em 25 de janeiro de 2017.

G1 2015, acervo **GLOBO.COM**. Disponível em: <<http://g1.globo.com/musica/rock-in-rio/2015/fotos/2015/09/rock-rio-2015-2-final-de-semana-fotos.html#F1777498>>. Acessado em 25 de janeiro de 2017.

GOOGLE. Google Earth. Versão 9.1.39..3. 2017. **Parque de Eventos Prof. João Antônio de Carvalho**. Disponível em: <https://earth.google.com/web/@-21.23949874,-43.55797579,656.88533201a,288.05535363d,35y,-0h,0t,0r>. Acessado em 13 de outubro de 2017.

GRUPO 5W. **Rock in Rio 30 anos**. Rio de Janeiro, 2015. 336p.

HEIL, C.; URBAN, M. **Sound Fields Radiated by Multiple Sound Sources Array**. In: Audio Engineering Society 92nd Convention, 1992, Viena. França: 1992.

Informações sobre mixer ou console digital yamaha ls-9 / ls9 32 ou 16 canais; Blog TeclaCenter Instrumentos Musicais. Disponível em: <<http://blog.teclacenter.com.br/informacoes-sobre-mixer-ou-console-digital-yamaha-ls-9/>>. Acessado em: 03 de março de 2017.

LANG, M.; Warren, H. G. **The Road to Woodstok**. New York: Ecco, 2010. 352p.

LEMONS, Rafael, 2011. “**De Woodstock ao Rock in Rio, a evolução do som nos festivais**”; Veja. Disponível em <<http://veja.abril.com.br/entretenimento/de-woodstock-ao-rock-in-rio-a-evolucao-do-som-nos-festivais/>>. Acessado em 12 de janeiro de 2017.

MACHADO, R. M. **SOM AO VIVO – Conceitos e aplicações básicas**. Rio de Janeiro. H. Sheldon, 2001, 14p.

MAIOCCHI, Carlos, 2013. “**Historia de los Line Array**”; Equaphon University. Disponível em <<http://www.equaphon-university.net/historia-de-los-line-array/>>. Acessado em 20 de janeiro de 2017.

MANUAL de Operação Subwoofer Sky Sound Bass 1800. **Studio R**. 2014. Disponível em: <<http://www.studior.com.br/mabass18.pdf>> Acessado em: 22 de maio de 2016. [Referência utilizada para o texto e para a figura 25].

MCCARTHY, B. **Sound Systems: Design and Optimization**. Oxford, Inglaterra, 2007, 14p.

MELLO, André Luiz, 2001. “**Rock in Rio 3 – Parte 1. Brasileiros Já Podem Produzir Megaeventos de Nível Internacional**”; *Áudio, Música & Tecnologia*. Disponível em: <<http://www.musitec.com.br/revistas/?c=1253>>. Acessado em 19 de janeiro de 2017.

MIRANDA, Igor, 2016. “**Veja 15 curiosidades sobre o Rock In Rio 1991, que chega ao seu 25º aniversário**”; *Revista Cifras*. Disponível em: <http://revista.cifras.com.br/artigo/veja-15-curiosidades-sobre-o-rock-in-rio-1991-que-chega-ao-seu-25o-aniversario_11356>. Acessado em 13/01/2017.

MONTEIRO, Ruy LB. AES BRASIL. 2000.

MOSCAL, T. **Sound Check - O Básico de Som e Sistemas de Sonorização**. Tradução de Joel Brito. Rio de Janeiro: H. Sheldon, 2001, 124p.

M-TRACK QUAD; M-AUDIO. Disponível em: <http://www.maudiodobrasil.com.br/prod_img.asp?id=50>. Acessado em 12 de junho de 2017.

NS-1 NEXO. Software livre. Versão v3.2.12 b76. França, 2017. Disponível em: <<https://nexo-sa.com/systems/software/>>. Acessado em 10 de junho de 2017.

O GLOBO, Acervo O GLOBO. Disponível em: <<http://acervo.oglobo.globo.com/fotogalerias/o-festival-de-rock-em-1991-2001-2011-9938905>>. Acessado em 13/01/2017.

OLIVEIRA, M. A. **Sinais e Ruídos - conceitos básicos**. Marcio Andrey Oliveira. Ago. 2007. Disponível em: <<http://marcioandreyoliveira.blogspot.com.br/2007/08/sinais-e-rudos-conceitos-bsicos.html>>. Acessado em 17 de junho de 2017.

PEIXOTO, Irapuan, 2012. “**Joe Cocker fará shows nos Brasil**”; HQROCK Quadrinhos, música e afins. Disponível em: <<https://hqrock.wordpress.com/tag/joe-cocker/>>. Acessado em 13/01/2017.

RATIONAL ACOUSTICS. **Smaart v8 User Guide. USA**: 2016, 210p. Disponível em: <<http://www.rationalacoustics.com/download/Smaart-v8-User-Guide.pdf>>. Acessado em 10 de junho de 2017.

ROCK IN RIO. Disponível em: <<http://rockinrio.com/rio/pt-BR>>. Acessado em 12 de janeiro de 2017.

SABATINELLI, R. **ROCK IN RIO, o uso otimizado da tecnologia em um dos maiores festivais do mundo**. Música e Tecnologia, Rio de Janeiro, n.290, p38-44, 2015.

SUBWOOFER Array Designer. **Merlijn van Veen**. 2014. 10p. Disponível em: <<https://www.merlijnvanveen.nl/en/calculators/28-sad-subwoofer-array-designer-en>> Acessado em: 11 de junho de 2016.