

APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP PARA DETERMINAÇÃO DE TECNOLOGIAS DE CONTROLE DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS PROVENIENTES DA PRODUÇÃO DE CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE (CBUQ)

Ana Gabriela Stein Nascimento¹, Andrielly Moutinho Knupp², Hellington Silva Rodrigues de Souza¹, Jéssica Thessalônica Carvalho Guimarães¹

¹Discente do Curso de Engenharia Ambiental na Faculdade Brasileira – Multivix Vitória

²Docente do Curso de Engenharia Ambiental na Faculdade Brasileira – Multivix Vitória

RESUMO

A poluição do ar oferece riscos à saúde humana e ao meio ambiente, assim, é necessário que tecnologias de tratamento de poluentes atmosféricos sejam aplicadas antes de sua liberação para a atmosfera. A produção de Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) é um dos responsáveis pela emissão de gases e partículas como, por exemplo, fumos de asfalto, materiais particulados, monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, metano, óxidos de enxofre e nitrogênio. Neste trabalho, foi utilizado o método Analítico Hierárquico (AHP – Analytic Hierarachy Process) para seleção da melhor tecnologia de tratamento de efluentes gasosos provenientes de usinas de asfalto, por meio de avaliação de aspectos econômicos, operacionais e ambientais. Os resultados permitiram inferir que o melhor sistema para tratamento de efluentes atmosféricos, de acordo com a prioridade global calculada, é o lavador de gases do tipo *Venturi*.

Palavras-chave: Poluentes Atmosféricos; Concreto Betuminoso Usinado a Quente; Método AHP.

ABSTRACT

The air pollution offers risks to the human health and to the environment, therefore, it is necessary that technologies for treatment of atmospheric pollutants be applied before its release into the atmosphere. The production of bituminous asphalt concrete is one of the responsible for the emission of gases and particles such as particulate materials, carbon moxide, carbon dioxide, hydrocarbon aromatic polycyclic, methane, sulfur oxides and nitrogen oxides. In this study, the Analytic Hierarachy Process (AHP) have been used to select the best technology for treatment of gaseous effluents from asphalt plants through the evaluation of economic, operational and environmental aspects. The results allowed concluding that the best system for the atmospheric effluents treatment, in accordance with the calculated global priority, is the Venturi wet scrubber.

Keywords: Air Pollutants; Hot Mix Asphalt; AHP Method.

1. INTRODUÇÃO

A poluição atmosférica urbana vem se tornando um dos maiores problemas ambientais da sociedade atual, não só dos países industrializados, mas também daqueles em desenvolvimento. Com o aumento das emissões atmosféricas nas últimas décadas, principalmente nos grandes centros urbanos, são notáveis os impactos causados pela poluição atmosférica nas comunidades e no meio ambiente, que são afetados negativamente de modo constante pelos níveis elevados de poluição do ar. A qualidade do ar é diretamente influenciada pela distribuição de emissões veiculares e industriais e a intensidade das mesmas revela-se de crucial importância para estudo destas emissões (CETESB, 2011).

Segundo a Resolução nº 003/1990 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA, 1990), poluente atmosférico pode ser definido como qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos em legislação, e que tornem ou possam tornar o ar impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público, danoso aos materiais, à fauna e à flora ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade.

Inúmeras são as atividades industriais que lançam poluentes para a atmosfera, dentre elas a produção de asfalto do tipo CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente) é uma das responsáveis pela emissão de material particulado (MP), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x), óxidos de enxofre (SO_x), metano (CH₄), carbono orgânico total (COT), compostos orgânicos voláteis (COVs) e ácido clorídrico (HCl) (US EPA, 2000). Assim, faz-se necessária a aplicação de tecnologias de tratamento e controle de emissões atmosféricas industriais.

Além do controle ambiental e proteção à saúde humana, o tratamento de efluentes gasosos gerados em processos industriais apresentam vantagens econômicas e operacionais, que, segundo Theodore (2008), seria lucro e proteção. Por exemplo, os lucros podem resultar da utilização de gases de alto-forno para aquecimento e geração de energia, mas as impurezas contidas nos gases devem ser removidas para promover uma queima satisfatória.

Para que a remoção de determinado poluente seja efetuada, o efluente gasoso deve passar através de um dispositivo ou sistema de controle que recolhe ou destrói o poluente e libera um efluente mais limpo para a atmosfera. O dispositivo ou sistema de controle selecionado deve ser específico para o poluente de interesse a fim de que a eficiência necessária seja alcançada (VALLERO, 2008).

Diversas são as tecnologias que podem ser aplicadas para o tratamento de poluentes atmosféricos gerados pelo processo de fabricação de asfalto, tais como: lavador de gases (*spray dryer, Venturi, Scrubber*), filtro de mangas, câmara de sedimentação gravitacional e precipitador eletrostático (BERNUCCI et al., 2006). Dessa forma, a etapa de seleção da melhor tecnologia a ser aplicada no tratamento de efluentes gasosos provenientes da fabricação de asfalto do tipo CBUQ é fundamental para garantia de um bom controle ambiental, operacional e proteção à saúde humana da população que vive no entorno de um empreendimento que pratica tal atividade.

Existem muitos métodos de tomada de decisão que podem ser utilizados para auxiliar na determinação da melhor tecnologia a ser aplicada para o tratamento de poluentes atmosféricos gerados por meio da produção de asfalto, dentre eles o Método AHP - *Analytic Hierarchy Process*, que, segundo Costa (2002), foi proposto por Tomas Lorie Saaty no início da década de 1970 e consiste em selecionar/escolher alternativas em determinado processo que englobe diferentes critérios e, quando necessário, subcritérios avaliativos.

Chan et al. (2004) sugerem que esse método é intuitivo e relativamente fácil para a formulação e análise de decisões. Marchezetti, Kaviski e Braga (2011) aplicaram o método AHP para a hierarquização das alternativas de tratamento de resíduos sólidos domiciliares na Região Metropolitana de Curitiba, bem como Knupp (2013), que utilizou o método para determinar o desempenho de um sistema composto por um filtro anaeróbio e um *wetland* horizontal na produção de água para reuso predial a partir de água cinza. Ambos os trabalhos permitiram atestar a viabilidade do método AHP para hierarquização em processos complexos.

No presente trabalho, procurou-se elencar algumas tecnologias de tratamento de emissões atmosféricas passíveis de serem aplicadas na produção de Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) e, por meio da utilização do Método de Análise Hierárquica (AHP), buscou-se determinar o tratamento tecnológico mais viável.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MÉTODO AHP

O método AHP está fundamentado em três elementos básicos: determinação de hierarquias, definição de prioridades (Quadro 1) e análise de consistência lógica.

Quadro 1 – Escala de prioridades (Escala Fundamental de Saaty).

Intensidade de Importância	Definição	Explicação
1	Importância semelhante	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância baixa	A experiência e o julgamento favorecem de maneira leve determinada atividade em relação a outra.
5	Importância alta	A experiência e o julgamento favorecem de maneira forte uma atividade em relação à outra.
7	Importância muito alta	Uma atividade é bem mais favorecida em relação à outra, e sua dominação de importância é demonstrada na prática.
9	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação à outra com o mais alto grau de certeza.
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre os valores adjacentes	Quando é necessária uma condição de compromisso entre duas definições.
Recíprocos dos valores maiores que zero	Se a atividade i recebe uma das designações diferentes maiores que zero, quando comparada com a atividade de j, então j tem o valor recíproco quando comparada com i	Designação razoável
Racionais	Razões resultantes da escala	Se a consistência necessitar ser forçada para obter n valores numéricos para completar a matriz.

Fonte: Adaptado de Saaty (1991).

A escala de prioridades, de acordo com Gomes (2009), é o conjunto numérico que não varia sob a mudança de similaridade, multiplicada por uma constante positiva. No momento em que a razão de determinados dois números é formada, a constante é cancelada.

Segundo Knupp (2013), a matriz "n x n" é utilizada como ferramenta na aplicação do método AHP, principalmente para o julgamento paritário em cada nível hierárquico. Para tanto, é preciso que haja $n \frac{(n-1)}{2}$ julgamentos – onde n é o número de linhas e colunas. A matriz A é constituída por A_{ij} e recíproca, onde $a_{j,i} = 1/a_{i,j}$.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & \dots & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & \dots & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & \dots & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

Conforme Passos (2010), Gomes (2009) e Knupp (2013), a escala de razão relativa é derivada da matriz de julgamentos recíproca da comparação das alternativas (julgamentos paritários), que resultam de:

$$A \times V = \lambda_{\text{máx}} \times V$$

Onde:

A - matriz de julgamentos

$\lambda_{\text{máx}}$ - maior autovalor da matriz

V - autovetor.

Segundo Saaty (1991), se faz necessário, após a verificação do autovetor "V", examinar o Índice de Consistência (IC) e a Razão de Consistência (RC). Isto é motivado devido à possibilidade de incertezas na matriz de julgamentos, eventualmente provocada pelo tomador de decisões.

$$IC = \frac{(\lambda_{\text{máx}} - n)}{n - 1}$$

Onde:

$\lambda_{\text{máx}}$ - maior autovalor da matriz

n - ordem da matriz.

$$RC = \frac{IC}{\text{Índice Randômico IR para } n}$$

Onde:

IC - Índice de Consistência

IR - Índice Randômico obtido em função da ordem da matriz

O Quadro 2 apresenta os valores do índice randômico em função da ordem da matriz.

Quadro 2 – Índice Randômico Médio do AHP.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
IR	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51

Fonte: Adaptado de Saaty(1991).

Se a razão de consistência (RC) for menor do que o valor de 0,1, é considerado aceitável. Entretanto, se o RC for maior do que 0,1, é recomendável que o julgamento da matriz seja revisado.

2.2 APLICAÇÃO DO MÉTODO

A aplicação do método AHP para seleção da tecnologia mais adequada para o tratamento de poluentes atmosféricos gerados por uma usina de fabricação de asfalto do tipo CBUQ consistiu na execução das fases apresentadas a seguir.

2.2.1 Primeira Fase – Determinação de Hierarquias

Para aplicação do método AHP, foram elencados os parâmetros considerados relevantes para o levantamento das tecnologias, conforme apresentado na árvore hierárquica (Figura 1). Além disso, foram destacadas as principais alternativas tecnológicas disponíveis para o controle de emissões atmosféricas geradas na produção de CBUQ.

Assim, tanto os sistemas de controle e tratamento de efluentes gasosos quanto os parâmetros a serem julgados (critérios e subcritérios) foram selecionados de acordo com a Seção 11.1 do AP-42 (*Hot Mix Asphalt Plants*) da Agência de Proteção Ambiental dos EUA (US EPA, 2000).

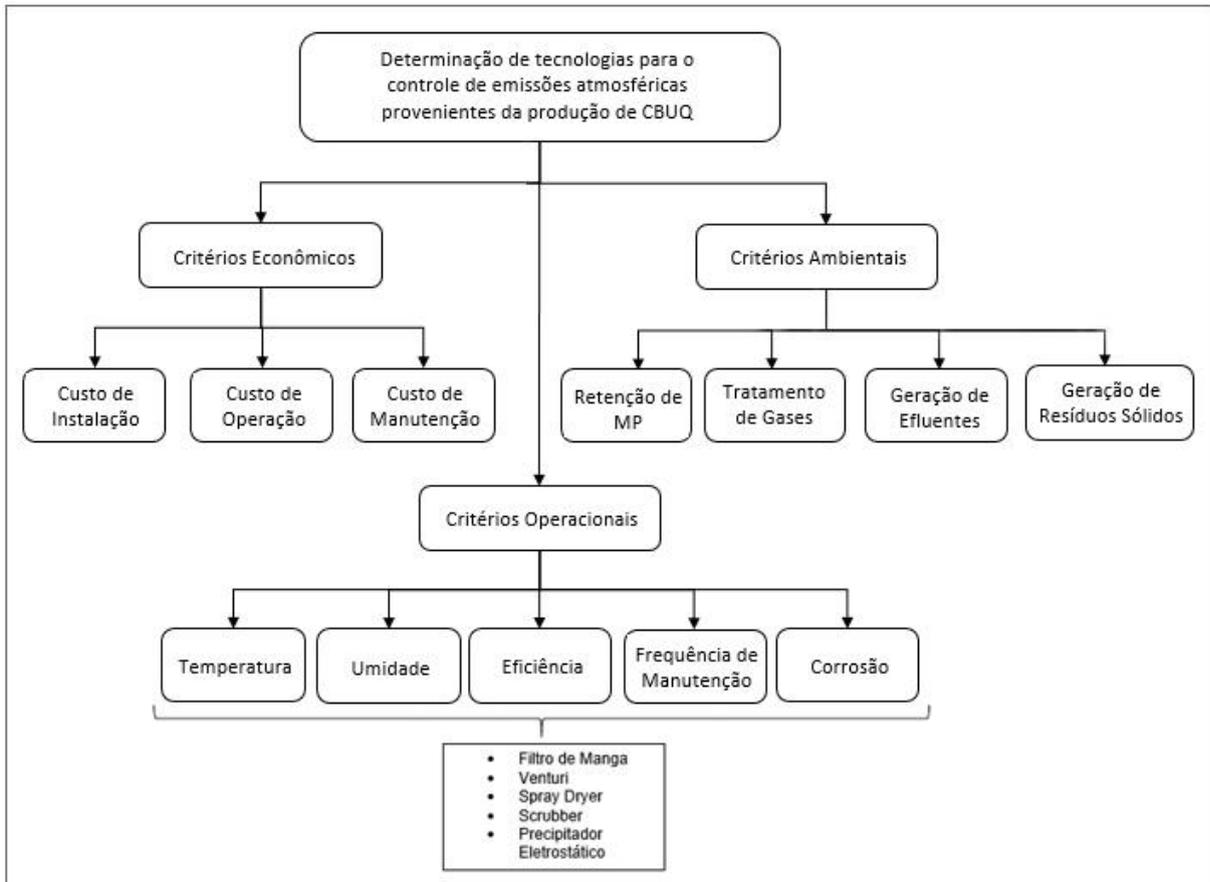


Figura 1– Representação esquemática da árvore hierárquica para seleção da melhor tecnologia de tratamento de efluentes atmosféricos.

Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

2.2.2 Segunda Fase – Levantamento Bibliográfico e Julgamento dos Critérios e Subcritérios

Após determinação da árvore hierárquica, considerando critérios e subcritérios a serem analisados, foi realizado um levantamento bibliográfico referente aos parâmetros considerados, objetivando a realização de julgamentos da forma mais fidedigna possível.

As informações obtidas foram compiladas num único quadro (Quadro 3) de forma que pudessem ser visualizadas com mais clareza para que, posteriormente, o julgamento dos critérios e subcritérios fosse facilitado.

Quadro 3 – Identificação de tecnologias para o controle de emissões atmosféricas.

Tecnologias	Critérios Econômicos		Critérios Operacionais		Critérios Ambientais	
Filtro de Manga	Custo de Instalação	Moderado a Alto	Temperatura	Entre 100°C e 800°C	Retenção de Material Particulado	Sim
			Umidade	Até 20%	Tratamento de Gases	Não
	Custo Operacional	Moderado	Eficiência	Até 99%	Geração de Efluentes Líquidos	Não
			Frequência de manutenção	Baixa/ Moderada	Geração de Resíduos Sólidos	Sim
Custo de Manutenção	Alto	Corrosão do Equipamento	Baixa			
Venturi	Custo de Instalação	Moderado	Temperatura	650 °C	Retenção de Material Particulado	Sim
			Umidade	NA	Tratamento de Gases	Sim

Tecnologias	Critérios Econômicos		Critérios Operacionais		Critérios Ambientais	
	<i>Custo Operacional</i>	Alto	<i>Eficiência</i>	Até 99%	<i>Geração de Efluentes Líquidos</i>	Sim
			<i>Frequência de manutenção</i>	Moderada	<i>Geração de Resíduos Sólidos</i>	Não
<i>Custo de Manutenção</i>	Baixo	<i>Corrosão do Equipamento</i>	Moderada/Alta			
Spray Dryer	<i>Custo de Instalação</i>	Moderado	<i>Temperatura</i>	371°C a 650°C	<i>Retenção de Material Particulado</i>	Sim
			<i>Umidade</i>	NA	<i>Tratamento de Gases</i>	Sim
	<i>Custo Operacional</i>	Moderado	<i>Eficiência</i>	Até 90%	<i>Geração de Efluentes Líquidos</i>	Sim
			<i>Frequência de manutenção</i>	Moderada	<i>Geração de Resíduos Sólidos</i>	Não
	<i>Custo de Manutenção</i>	Moderado/ Alto	<i>Corrosão do Equipamento</i>	Moderada/Alta		
Scrubber	<i>Custo de Instalação</i>	Moderado	<i>Temperatura</i>	Até 650 °C	<i>Retenção de Material Particulado</i>	Sim
			<i>Umidade</i>	NA	<i>Tratamento de Gases</i>	Sim
	<i>Custo Operacional</i>	Moderado	<i>Eficiência</i>	90-95%	<i>Geração de Efluentes Líquidos</i>	Sim
			<i>Frequência de manutenção</i>	Moderada	<i>Geração de Resíduos Sólidos</i>	Não
	<i>Custo de Manutenção</i>	Moderado	<i>Corrosão do Equipamento</i>	Moderada/Alta		
Precipitador Eletrostático	<i>Custo de Instalação</i>	Moderado/ Alto	<i>Temperatura</i>	Até 650 °C	<i>Retenção de Material Particulado</i>	Sim
			<i>Umidade</i>	A eficiência é maior quando as partículas estão úmidas	<i>Tratamento de Gases</i>	Não
	<i>Custo Operacional</i>	Baixo a Moderado	<i>Eficiência</i>	Até 99,9%	<i>Geração de Efluentes Líquidos</i>	Não
			<i>Frequência de manutenção</i>	Baixa	<i>Geração de Resíduos Sólidos</i>	Sim
<i>Custo de Manutenção</i>	Moderado/ Alto	<i>Corrosão do Equipamento</i>	Baixa			

Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

2.2.3 Terceira Fase – Aplicação do Método AHP

Nesta etapa, foi utilizado o programa computacional *Assistat – Assistência Estatística* (Versão 7.7), desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Agrícola, da Universidade Federal da Paraíba (SILVA; AZEVEDO, 2002).

Para cada um dos critérios e subcritérios selecionados, foram adotados pesos de importância de acordo com o Quadro 1, cujos valores aplicados foram baseados nas informações apresentadas no Quadro 3 e na experiência dos julgadores. Dessa forma, as matrizes de julgamento foram construídas no *software Assistat*, comparando os pares (julgamento paritário) entre critérios, subcritérios e tecnologias de tratamento de emissões atmosféricas.

Após os julgamentos, foram geradas matrizes utilizadas para determinar a hierarquização de critérios quanto a sua importância. Assim, os dados foram agrupados em uma tabela para efetuar o cálculo de prioridade global por meio do somatório do produto dos critérios pelos subcritérios e vetores prioridade de cada tecnologia para efetuar a tomada de decisões

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a inserção dos julgamentos no *software Assistat* (Versão 7.7), as matrizes foram geradas, seguidas de seus Vetores Prioridades, Lambda Máximo ($\lambda_{\text{máx}}$), Índice de Consistência (IC), Razão de Consistência (RC) e Índice Randômico (IR). Para a apresentação dos resultados, foi adotado o máximo de quatro casas decimais.

A tabela 1 foi gerada por meio do julgamento paritário entre os critérios gerais estabelecidos como parte da análise efetuada para a determinação da tecnologia de controle de emissões atmosféricas provenientes da produção de CBUQ. Verificou-se que o maior valor do vetor prioridade pertence ao critério econômico, com um valor de 0,6433.

Tabela 1 – Matriz de comparação dos Critérios Gerais em relação ao objetivo.

Critérios	Econômicos	Operacionais	Ambientais	Vetor Prioridade
Econômicos	1	3	7	0,6433
Operacionais	0,3333	1	5	0,2828
Ambientais	0,1428	0,2000	1	0,0700

$\lambda_{\text{máx}}$: 3,0655; RC: 0,0564; IC: 0,0327; IR: 0,58.

Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

A tabela 2 refere-se à comparação entre os subcritérios econômicos, ou seja, custo de instalação, operação e manutenção. A partir do julgamento entre os subcritérios, observa-se que o custo de instalação (0,6877) é um parâmetro considerado como importante para a seleção da tecnologia de controle de emissões atmosféricas a ser implementada.

Tabela 2 – Matriz de comparação dos Subcritérios Econômicos em relação ao objetivo.

Subcritérios Econômicos	Custo de Instalação	Custo de Operação	Custo de Manutenção	Vetor Prioridade
Custo de Instalação	1	4	7	0,6877
Custo de Operação	0,2500	1	4	0,2344
Custo de Manutenção	0,1428	0,2500	1	0,0778

$\lambda_{\text{máx}}$: 3,0774; RC: 0,0668; IC: 0,0387; IR: 0,58.

Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

As tabelas 3, 4 e 5 apresentam os julgamentos das tecnologias frente a cada subcritério econômico.

Tabela 3 – Matriz de comparação das Tecnologias em relação ao Custo de Instalação.

Tecnologias	Filtro de Manga	Venturi	Spray Dryer	Scrubber	Precipitador Eletrostático	Vetor Prioridade
Filtro de Manga	1	1/3	3	3	1/2	0,0793
Venturi	3	1	1	1	5	0,2804
Spray Dryer	3	1	1	1	5	0,2804
Scrubber	3	1	1	1	5	0,2804
Precipitador Eletrostático	2	0,2000	0,2000	0,2000	1	0,0794

$\lambda_{\text{máx}}$: 5,1891; RC: 0,0422; IC: 0,0472; IR: 1,12.

Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

Tabela 4 – Matriz de comparação das Tecnologias em relação ao Custo de Operação.

Tecnologias	Filtro de Manga	Venturi	Spray Dryer	Scrubber	Precipitador Eletrostático	Vetor Prioridade
Filtro de Manga	1	4	1	1	1/3	0,1769
Venturi	0,2500	1	1/4	1/4	1/6	0,0509
Spray Dryer	1	4	1	1	1/2	0,1903
Scrubber	1	4	1	1	1/2	0,1903

Precipitador Eletrostático	3	6	2	2	1	0,3915
-----------------------------------	---	---	---	---	---	--------

$\lambda_{\text{máx}}$: 5,0393; RC: 0,0087; IC: 0,0098; IR: 1,12.

Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

Tabela 5 – Matriz de comparação das Tecnologias em relação ao Custo de Manutenção.

Tecnologias	Filtro de Manga	Venturi	Spray Dryer	Scrubber	Precipitador Eletrostático	Vetor Prioridade
Filtro de Manga	1	1/5	1/2	2	2	0,1348
Venturi	5	1	5	4	5	0,5193
Spray Dryer	2	0,2000	1	2	1	0,1513
Scrubber	0,5000	0,2500	0,5000	1	2	0,1080
Precipitador Eletrostático	0,5000	0,2000	1	0,5000	1	0,0864

$\lambda_{\text{máx}}$: 5,3173; RC: 0,0708; IC: 7,9325E-02; IR: 1,12.

Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

A partir do julgamento dos critérios econômicos, observou-se que os lavadores de gases (*spray dryer*, *Venturi* e *Scrubber*) apresentam o melhor custo de instalação, o precipitador eletrostático com menor custo de operação, e o *Venturi* com menor custo de manutenção.

A Tabela 6 consiste no julgamento paritário entre os subcritérios operacionais.

Tabela 6 – Matriz de comparação dos Subcritérios Operacionais em relação ao objetivo.

Subcritérios Operacionais	Temperatura	Umidade	Eficiência	Frequência de Manutenção	Corrosão	Vetor Prioridade
Temperatura	1	2	1	1	1/2	0,1905
Umidade	1	1	1	1	1/2	0,1438
Eficiência	1	1	1	4	1	0,2619
Frequência de Manutenção	1	1	1	1	1	0,1517
Corrosão	3	1	0,5000	1	1	0,2519

$\lambda_{\text{máx}}$: 5,3807; RC: 0,0849; IC: 9,5177E-02; IR: 1,12.

Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

A partir desta matriz (Tabela 6), observou-se que o maior valor do vetor prioridade pertence ao subcritério Eficiência (0,2619). Este resultado pode ser explicado fundamentado no fato de que a eficiência de operação é o maior peso em relação ao funcionamento ótimo dos sistemas em geral.

As tabelas 7, 8, 9, 10 e 11 referem-se ao julgamento paritário das tecnologias elencadas frente a cada subcritério operacional.

Tabela 7 – Matriz de comparação das Tecnologias em relação ao Subcritério Temperatura.

Tecnologias	Filtro de Manga	Venturi	Spray Dryer	Scrubber	Precipitador Eletrostático	Vetor Prioridade
Filtro de Manga	1	4	4	4	4	0,5000
Venturi	0,2500	1	1	1	1	0,1250
Spray Dryer	0,2500	1	1	1	1	0,1250
Scrubber	0,2500	1	1	1	1	0,1250
Precipitador Eletrostático	0,2500	1	1	1	1	0,1250

$\lambda_{\text{máx}}$: 5; RC: 0; IC: 0; IR: 1,12.

Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

Tabela 8 – Matriz de comparação das Tecnologias em relação ao Subcritério Umidade.

Tecnologias	Filtro de Manga	Venturi	Spray Dryer	Scrubber	Precipitador Eletrostático	Vetor Prioridade
Filtro de Manga	1	1/7	1/7	1/7	1/3	0,0382
Venturi	7	1	1	1	4	0,2928
Spray Dryer	7	1	1	1	4	0,2928
Scrubber	7	1	1	1	4	0,2928
Precipitador Eletrostático	3	0,2500	0,2500	0,2500	1	0,0832

$\lambda_{\text{máx}}$: 5,0355; RC: 0,0079; IC: 0,0088; IR: 1,12.

Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

Tabela 9 – Matriz de comparação das Tecnologias em relação ao Subcritério Eficiência.

Tecnologias	Filtro de Manga	Venturi	Spray Dryer	Scrubber	Precipitador Eletrostático	Vetor Prioridade
Filtro de Manga	1	1	3	3	1/2	0,2422
Venturi	1	1	3	3	2	0,3114
Spray Dryer	0,3333	0,3333	1	1/2	1/3	0,0779
Scrubber	0,3333	0,3333	2	1	1/2	0,1128
Precipitador Eletrostático	2	0,5000	3	2	1	0,2555

$\lambda_{\text{máx}}$: 5,2139; RC: 0,0477; IC: 0,0534; IR: 1,12.

Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

Tabela 10 – Matriz de comparação das Tecnologias em relação ao Subcritério Frequência de Manutenção.

Tecnologias	Filtro de Manga	Venturi	Spray Dryer	Scrubber	Precipitador Eletrostático	Vetor Prioridade
Filtro de Manga	1	5	5	5	1/3	0,3087
Venturi	0,2000	1	1	1	1/5	0,0755
Spray Dryer	0,2000	1	1	1	1/5	0,0755
Scrubber	0,2000	1	1	1	1/5	0,0755
Precipitador Eletrostático	3	5	5	5	1	0,4646

$\lambda_{\text{máx}}$: 5,1493; RC: 0,0333; IC: 0,0373; IR: 1,12.

Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

Tabela 11 – Matriz de comparação das Tecnologias em relação ao Subcritério Corrosão.

Tecnologias	Filtro de Manga	Venturi	Spray Dryer	Scrubber	Precipitador Eletrostático	Vetor Prioridade
Filtro de Manga	1	5	5	5	1	0,3846
Venturi	0,2000	1	1	1	1/5	0,0769
Spray Dryer	0,2000	1	1	1	1/5	0,0769
Scrubber	0,2000	1	1	1	1/5	0,0769
Precipitador Eletrostático	1	5	5	5	1	0,3846

$\lambda_{\text{máx}}$: 5; RC: 0; IC: 0; IR: 1,12.

Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

O filtro de manga apresentou o maior peso (0,5000) em relação ao critério temperatura (Tabela 7), por ser o sistema que pode operar com a maior faixa de temperatura. Para a umidade (Tabela 8), os três lavadores de gases apresentaram os maiores valores (0,2928), uma vez que não importa se as partículas e gases apresentem características de alta umidade. Sobre a eficiência (Tabela 9), o *Venturi* apresentou o maior peso (0,3114) e o precipitador eletrostático se destacou no quesito frequência de manutenção (Tabela 10), já que esta não é realizada com alta frequência. Por fim, as tecnologias filtro de manga e precipitador eletrostático indicaram as máximas grandezas (0,3846) para corrosão (Tabela 11), indicando coerência, por não utilizarem líquidos no tratamento dos poluentes.

Na tabela 12, os subcritérios ambientais foram julgados em relação ao objetivo. Verificou-se, após o julgamento, que os critérios retenção de poluente e tratamento de gases são importantes para a seleção das tecnologias.

Tabela 12 – Matriz de comparação dos Subcritérios Ambientais em relação ao objetivo.

Subcritérios Ambientais	Retenção de MP	Tratamento de Gases	Geração de Efluentes	Geração de Resíduos Sólidos	Vetor Prioridade
Retenção de MP	1	1	4	4	0,4000
Tratamento de Gases	1	1	4	4	0,4000
Geração de Efluentes	0,2500	0,2500	1	1	0,1000
Geração de Resíduos Sólidos	0,2500	0,2500	1	1	0,1000

$\lambda_{\text{máx}}$: 4; RC: 0; IC: 0; IR: 0,9.

Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

As tabelas 13, 14, 15 e 16 referem-se ao julgamento paritário das tecnologias frente a cada subcritério ambiental.

Tabela 13 – Matriz de comparação das Tecnologias em relação ao Subcritério Ambiental Retenção de Material Particulado.

Tecnologias	Filtro de Manga	Venturi	Spray Dryer	Scrubber	Precipitador Eletrostático	Vetor Prioridade
Filtro de Manga	1	1/5	1/5	1/5	1/5	0,0588
Venturi	5	1	1	1	5	0,2941
Spray Dryer	5	1	1	1	5	0,2941
Scrubber	5	1	1	1	5	0,2941
Precipitador Eletrostático	1	0,2000	0,2000	0,2000	1	0,0588

$\lambda_{\text{máx}}$: 5; RC: 0; IC: 0; IR: 1,12.

Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

Tabela 14 – Matriz de comparação das Tecnologias em relação ao Subcritério Ambiental Tratamento de Gases.

Tecnologias	Filtro de Manga	Venturi	Spray Dryer	Scrubber	Precipitador Eletrostático	Vetor Prioridade
Filtro de Manga	1	1/5	1/5	1/5	1	0,0588
Venturi	4	1	1	1	5	0,2941
Spray Dryer	4	1	1	1	5	0,2941
Scrubber	4	1	1	1	5	0,2941
Precipitador Eletrostático	4	1	1	1	1	0,0588

$\lambda_{\text{máx}}$: 5; RC: 0; IC: 0; IR: 1,12.

Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

Tabela 15 – Matriz de comparação das Tecnologias em relação ao Subcritério Efluentes Líquidos.

Tecnologias	Filtro de Manga	Venturi	Spray Dryer	Scrubber	Precipitador Eletrostático	Vetor Prioridade
Filtro de Manga	1	5	5	5	1	0,3846
Venturi	0,3333	1	1	1	1/5	0,0769
Spray Dryer	0,3333	1	1	1	1/5	0,0769
Scrubber	0,3333	1	1	1	1/5	0,0769
Precipitador Eletrostático	1	3	3	3	1	0,3846

$\lambda_{\text{máx}}$: 5; RC: 0; IC: 0; IR: 1,12.

Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

Tabela 16 – Matriz de comparação das Tecnologias em relação ao Subcritério Resíduos Sólidos.

Tecnologias	Filtro de Manga	Venturi	Spray Dryer	Scrubber	Precipitador Eletrostático	Vetor Prioridade
-------------	-----------------	---------	-------------	----------	----------------------------	------------------

Filtro de Manga	1	1/5	1/5	1/5	1	0,0588
Venturi	5	1	1	1	5	0,2941
Spray Dryer	5	1	1	1	5	0,2941
Scrubber	5	1	1	1	5	0,2941
Precipitador Eletrostático	1	0,2000	0,2000	0,2000	1	0,0588

$\lambda_{\text{máx}}$: 5; RC: 0; IC: 0; IR: 1,12.

Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

Com exceção do filtro de manga e precipitador eletrostático, que não tratam efluentes gasosos, todas as outras tecnologias apresentaram pesos máximos iguais (0,2941) para o subcritério retenção de material particulado e para tratamento de gases (Tabelas 13 e 14). Em contrapartida, o filtro de manga e precipitador eletrostático ostentaram os valores máximos de 0,3846 (Tabela 15) em relação à geração de efluentes líquidos e os mínimos (0,0588) para o critério geração de resíduos sólidos (Tabela 16), no qual os lavadores apresentaram os valores máximos (0,2941) devido a não geração deste tipo de resíduo.

As informações obtidas nas matrizes foram agrupadas na Tabela 17, para a efetuação do cálculo da prioridade global, sendo o somatório dos produtos dos critérios pelos subcritérios e autovalores de cada tecnologia.

Tabela 17 – Dados agrupados e Prioridade Global.

Critérios	Subcritérios	Tecnologias				
		Filtro de Manga	Venturi	Spray Dryer	Scrubber	Precipitador Eletrostático
Econômicos (0,6433)	<i>Custo de Instalação (0,6877)</i>	0,0793	0,2804	0,2804	0,2804	0,0794
	<i>Custo de Operação (0,2344)</i>	0,1769	0,0509	0,1903	0,1903	0,3915
	<i>Custo de Manutenção (0,0778)</i>	0,1348	0,5193	0,1513	0,1080	0,0864
Operacionais (0,2828)	<i>Temperatura (0,1905)</i>	0,5000	0,1250	0,1250	0,1250	0,1250
	<i>Umidade (0,1438)</i>	0,0382	0,2928	0,2928	0,2928	0,0832
	<i>Eficiência (0,2619)</i>	0,2422	0,3114	0,0779	0,1128	0,2555
	<i>Frequência de Manutenção (0,1517)</i>	0,3087	0,0755	0,0755	0,0755	0,4646
	<i>Corrosão (0,2519)</i>	0,3846	0,0769	0,0769	0,0769	0,3846
Ambientais (0,0700)	<i>Retenção de MP (0,7142)</i>	0,0588	0,2941	0,2941	0,2941	0,0588
	<i>Tratamento de Gases (0,4000)</i>	0,5888	0,2941	0,2941	0,2941	0,0588
	<i>Efluentes Líquidos (0,1428)</i>	0,3846	0,0769	0,0769	0,0769	0,3846
	<i>Resíduos Sólidos (0,1428)</i>	0,0588	0,2941	0,2941	0,2941	0,0588
Prioridade Global		0,1619	0,2272	0,2125	0,2129	0,1812

Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

A partir das relações construídas, observou-se o maior valor para o lavador de gases tipo *Venturi* (0,2272), cerca de 23% frente aos resultados obtidos: filtro de manga (16%), *spray dryer* e *Scrubber* (ambos 21%) e precipitador eletrostático (18%).

Como já explanado, o *Venturi* possui alta eficiência (até 99%) para a remoção de gases e partículas sólidas. Além disso, possui baixo custo de manutenção. Dessa forma, observa-se uma vantagem absoluta frente às outras tecnologias em relação a esses parâmetros. Em relação aos subcritérios custo de instalação, umidade, retenção de material particulado,

tratamento de gases e geração de resíduos sólidos, o lavador de gases do tipo Venturi, *Spray Dryer* e *Scrubber*, apresentam os maiores pesos do vetor prioridade.

Com isso, observa-se que a tecnologia com maior prioridade global, o *Venturi*, apresenta vantagem em 7 dos 12 parâmetros discutidos. Portanto, os lavadores do tipo *Spray Dryer* e *Scrubber* dividem o segundo lugar no ranking do cálculo da prioridade global, uma vez que possuem os maiores pesos em 5 dos 12 critérios observados.

O precipitador eletrostático ocupa a terceira posição com cerca de 18% de importância. O resultado se sustenta pelo fato de que esta tecnologia apenas possui representatividade absoluta quanto ao custo de operação e frequência de manutenção, além de dividir os maiores pesos de importância quanto à corrosão do equipamento e geração de efluentes líquidos. Ou seja, possui 4 pesos consideráveis frente aos 12 discutidos.

Com cerca de 16% do peso de prioridades, o filtro de manga se apresenta como a tecnologia menos adequada para a aplicação de controle de poluentes atmosféricos da produção de CBUQ. Assim, só apresenta importância maior em 3 dos 12 parâmetros selecionados, sendo a temperatura, corrosão do equipamento e geração de efluentes líquidos.

Por fim, segundo os julgamentos paritários executados, a tecnologia mais indicada para o tratamento de poluentes atmosféricos oriundos da produção de CBUQ é o lavador de gases do tipo *Venturi*. Entretanto, é necessário destacar que foram selecionadas apenas 5 dentre várias opções disponíveis de sistemas de tratamento de gases (Tabela 18). Ainda, é importante pontuar que não foram feitos julgamentos de tecnologias associadas para a aplicação na planta de produção de asfalto.

Tabela 18 – Tecnologias de controle e tratamento de poluentes atmosféricos aplicáveis na planta de produção de CBUQ

	Coletor Gravitacional
Tecnologias de controle de emissões atmosféricas	Ciclone
	Filtro de Manga
	Lavador <i>Venturi</i>
	Lavador <i>Scrubber</i>
	<i>Spray Dryer</i>
	Precipitador Eletrostático

Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

Apesar de a Norma 031/2006 do Departamento Nacional de Infraestruturas de Transporte (DNIT, 2006) sugerir o uso de ciclones seguido de filtro de mangas para o controle da poluição atmosférica, os ciclones não foram inseridos nesta pesquisa em consequência de sua baixa eficiência para partículas menores que 5µm, seu alto desgaste por abrasão e possibilidade de entupimento por partículas com característica adesiva, que possam ser liberadas em função da utilização de materiais agregados de pedra e do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP). Além disso, esses equipamentos não são capazes de tratar os efluentes gasosos liberados na produção do CBUQ.

4. CONCLUSÃO

Com os resultados apresentados anteriormente, a aplicação do método AHP se mostrou uma ferramenta viável para a determinação da melhor tecnologia de tratamento de poluentes atmosféricos provenientes da produção de asfalto do tipo CBUQ. O lavador do tipo *Venturi*, considerando seu uso unitário, isto é, sem associação com outro equipamento de controle, apresentou-se como a tecnologia mais aplicável, com a prioridade global de 23% de importância.

Apesar de não existir legislação brasileira específica para o tratamento de emissões atmosféricas provenientes da produção de CBUQ, verifica-se a necessidade de instalação de equipamentos que retenham gases gerados na usinagem desse produto, uma vez que, segundo a US EPA (2000), gases tóxicos são emitidos durante a fabricação de asfalto.

Desse modo, visando o estímulo de práticas que possam contribuir para a proteção e conservação do meio ambiente e melhoria da qualidade de vida, sugere-se a realização de julgamentos, a partir da aplicação do método AHP, com tecnologias associadas objetivando o tratamento conjunto de substâncias gasosas e de materiais particulados.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Norma DNIT 031/2006 - ES. **Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 26 jun. 2006. Disponível em: <http://www.dtt.ufpr.br/Pavimentacao/Notas/DNIT031_2006_ES.pdf>. Acesso em: 15 maio. 2017.

BRASIL. Resolução CONAMA Nº 003 de 22 de Junho de 1990. **Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 22 ago. 1990. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=100>>. Acesso em: 12 mai. 2017.

CETESB. **Qualidade do Ar no Estado de São Paulo**. Governo do Estado de São Paulo – Secretaria do Meio Ambiente, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. São Paulo, SP, 2011).

COSTA, H. G. **Introdução ao método de análise hierárquica: análise multicritério no auxílio à decisão**. Niterói, RJ, 2002.

GOMES, K. G. A. **Um método multicritério para localização de unidades celulares de intendência da FAB**. v., 150 f.: il.; 29,7 cm. Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia de Produção, 2009.

KNUPP, A. M. **Desempenho de um sistema composto por um filtro anaeróbio e um “wetland” horizontal na produção de água para reuso predial a partir de água cinza clara**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, 2013.

MARCHEZETTI, A. L.; KAVISKI, E.; BRAGA, M. C. B. **Aplicação do método AHP para a hierarquização das alternativas de tratamento de resíduos sólidos domiciliares**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 11, n. 2, p. 173-187, abr./jun. 2011.

MARINS, C. S.; SOUZA, D. O.; BARROS, M. S. **O uso do Método de Análise Hierárquica (AHP) na tomada de decisões gerenciais - um estudo de caso**. XLI SBPO - Pesquisa Operacional na Gestão do Conhecimento. Rio de Janeiro, 2009.

PASSOS, A. C. **Definição de um índice de qualidade para distribuidoras de energia elétrica utilizando o apoio multicritério à decisão e análise de séries temporais**. 101f.: il. (color.); 30 cm. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2010.

SAATY, T. L. **Método de Análise Hierárquica**. São Paulo: ed. McGraw-Hill, Makron, 1991.

SILVA, F. A. S.; AZEVEDO, C. A. V. **Versão do programa computacional ASSISTAT para o sistema operacional Windows.** Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v.4, n.1, p.71-78, 2002.

THEODORE, L. **Air Pollution Control Equipment Calculations.** Canada, 2008.

US – EPA. **Emission Factor Documentation For AP-42 Section 11.1, Hot Mix Asphalt Production.** U. S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, December 2000.

VALLERO, D. **Fundamentals of Air Pollution.** 4.ed. USA, 2008.

