



UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA
MATHEUS DE TOLEDO RIBAS PEREIRA

**APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP PARA AUXÍLIO À TOMADA DE
DECISÃO À COMPRA DE UM REATOR DE PLASMA**

Palhoça
2020

MATHEUS DE TOLEDO RIBAS PEREIRA

**APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP PARA AUXÍLIO À TOMADA DE
DECISÃO À COMPRA DE UM REATOR DE PLASMA**

Projeto de Pesquisa para o Trabalho de Conclusão de
Curso apresentado ao Curso de Matemática –
Bacharelado da Universidade do Sul de Santa Catarina,
campus Unisul Virtual, como requisito parcial à obtenção
do título de Bacharelem Matemática.

Orientadora: Prof. Dra. Ana Regina de Aguiar Dutra

Palhoça

2020

MATHEUS DE TOLEDO RIBAS PEREIRA

**APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP PARA AUXÍLIO À TOMADA DE
DECISÃO À COMPRA DE UM REATOR DE PLASMA**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado à obtenção do título de Bacharel em Matemática e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Matemática da Universidade do Sul de Santa Catarina.

Palhoça, 08 de julho de 2020.

Profa. Ana Regina de Aguiar Dutra, Doutora
Universidade do Sul de Santa Catarina

Profa Anelise Leal Vieira Cubas, Doutora
Universidade do Sul de Santa Catarina

Prof. Mario Selhorst, Mestre

Universidade do Sul de Santa Catarina

RESUMO

A geração crescente dos resíduos de diversas naturezas tem desencadeado danos ao meio ambiente nas últimas décadas e há insuficiências das tecnologias atuais em possibilitar tratamentos efetivos. Os reatores de plasma não-térmico (PNT) podem ser utilizados para processos de descontaminação, despoluição e higienização de água, atmosfera, efluentes, poluentes e diversos materiais. Foi aplicado o método AHP, como um método multi-criterial, para auxiliar no processo decisório de compra de um reator PNT, levando em consideração diversos atores, bem como suas opiniões, e criando uma cadeia de hierarquias de critérios e subcritérios. Por meio de revisão da literatura, consulta com especialistas e aplicação do método, conseguiu-se estabelecer uma hierarquia e construir um quadro de importâncias relativas de critérios e subcritérios. Deve-se priorizar de critérios de gastos, como gasto energética, e potabilidade da água após uso do reator; preferência por reatores que utilizem a composição de gás argônio com ar atmosférico.

Palavras-chave: reatores PNT; álgebra linear; pesquisa operacional; matrizes; hierarquização.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo de Hierarquização Proposto - Elaborado pelo autor.....	14
---	-----------

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Escala Fundamental – Saaty (1980).....	22
Tabela 2 – Índice Randômico – Saaty (1980)	23
Tabela 3 – Check de Consistência – Saaty (1980).....	23
Tabela 4 – Matriz de dominância A para os critérios.....	24
Tabela 5 – Matriz de dominância normalizada A' para os critérios.....	24
Tabela 6 – Matriz vetor prioridade W dos critérios.....	25
Tabela 7 - Matriz de dominância A para os subcritérios do critério “Gastos”	26
Tabela 8 - Matriz de dominância normalizada A' para os subcritérios do critério “Gastos”	26
Tabela 9 - Matriz vetor prioridade W para os subcritérios do critério “Gastos”	26
Tabela 10 - Matriz de dominância A para os subcritérios do critério “Potabilidade da água”	27
Tabela 11 - Matriz de dominância normalizada A' para os subcritérios do critério “Potabilidade da água”	27
Tabela 12 - Matriz vetor prioridade W para os subcritérios do critério “Potabilidade da água”	27
Tabela 13 - Matriz de dominância A para os subcritérios do critério “Gás usado”	28
Tabela 14 - Matriz de dominância normalizada A' para os subcritérios do critério “Gás usado”	28
Tabela 15 - Matriz vetor prioridade W para os subcritérios do critério “Gás usado”	28
Tabela 16 – Árvore de prioridades relativas.....	30

SUMÁRIO

1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	7
1.1	TEMA E DELIMITAÇÃO DO TEMA	7
1.2	PROBLEMATIZAÇÃO	7
1.3	JUSTIFICATIVAS	9
1.4	OBJETIVOS	10
1.4.1	Objetivo Geral	10
1.4.2	Objetivos Específicos	10
2	FUNDAMENTAÇÃO TÉORICA	11
2.1	PLASMA	11
2.2	MÉTODO MATEMÁTICO PARA TOMADA DE DECISÃO	12
3	DELIMITAÇÃO METODOLÓGICA (OU APLICAÇÃO: SELEÇÃO DO MELHOR REATOR DE PLASMA PARA O LABORATÓRIO DA UNISUL)	15
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA	15
3.2	CRITÉRIOS PARA A ESTRUTURAÇÃO DO MODELO	16
3.2.1	Critério: Gastos	17
3.2.2	Critério: Potabilidade da água	18
3.2.3	Critério: Gás usado	20
3.2.4	Critério: Geometria	21
3.3	O MÉTODO <i>ANALYTIC HIERARCHY PROCESS</i> (AHP) GENERALIZADO	21
4	RESULTADOS: CÁLCULOS DAS MATRIZES E IMPORTÂNCIAS RELATIVAS	24
4.1	MATRIZES E DOMINÂNCIA DE CRITÉRIOS	24
4.2	MATRIZES E DOMINÂNCIA DE SUBCRITÉRIOS DO CRITÉRIO “GASTOS”	25
4.3	MATRIZES E DOMINÂNCIA DE SUBCRITÉRIOS DO CRITÉRIO “POTABILIDADE DA ÁGUA”	26
4.4	MATRIZES E DOMINÂNCIA DE SUBCRITÉRIOS DO CRITÉRIO “GÁS USADO” ...	28
4.5	SÍNTESE DOS RESULTADOS	30
5	CONCLUSÃO	31
5.1	DISCUSSÃO E CONCLUSÃO	31
5.2	RECOMENDAÇÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	33
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34
	ANEXOS	36
	ANEXO A – FORMULÁRIO DE CRITÉRIOS E SUBCRITÉRIOS	37

1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1 TEMA E DELIMITAÇÃO DO TEMA

O Método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) como suporte para tomada de decisão na compra de um reator de plasma a ser empregado no Laboratório de Plasma da Unisul.

1.2 PROBLEMATIZAÇÃO

As pesquisas e o uso das tecnologias de plasma têm aumentado significativamente nas últimas décadas, especialmente com a crescente preocupação ambiental, uma vez que tais tecnologias são mais ambientalmente adequadas do que tecnologias que se usam de combustíveis fósseis, por exemplo. A utilização de plasma não-térmico possui diversas vantagens ambientais como i) não dependem de insumos para seu funcionamento, como combustíveis ou produtos químicos, dependendo apenas de disponibilidade de energia elétrica e ar atmosférico, tornando-o acessível nos diversos contextos; ii) os subprodutos de sua utilização são mais estáveis e menos nocivos do ponto de vista ambiental como, por exemplo, na decomposição de herbicidas presente em águas (GIARDINA et al, 2019) e em resíduos de tintas da indústria têxtil (KASIH et al, 2017) e iii) essa tecnologia pode ser usada na despoluição atmosférica e descontaminação de diversos materiais (FACÓ, 2004).

O reator de plasma pode ser muito útil em tratamento de resíduos, podendo inclusive gerar energia no processo, como na descontaminação de água e efluentes, na esterilização de alimentos, diversos equipamentos, como EPI e objetos cirúrgicos. Tal processo se vale das propriedades do plasma, que é um estado da matéria próximo ao gás, mas com forte ionização - íons positivos e elétrons livres (CREMA, 2019), podendo ser chamado de gás ionizado.

A Descarga de Barreira Dielétrica (DBD) é muito utilizada no contexto dos reatores de plasma não térmicos (PNT), uma vez que não há contato direto com altas voltagens e também é segura para ser usada em materiais condutores, além de ser uma descarga mais fácil de ser produzida (TANAKARAN e MATRA, 2019). Tanakaran e Matra (2019) realizaram um estudo

para a descontaminação de água residuais domésticas aplicando diferentes voltagens – 0 (controle), 10 e 15 kV – e com diferentes tempos de exposição – 10, 20 e 30 minutos. Analisando diversos fatores de qualidade da água, puderam observar uma significativa melhora em todos os indicadores, especialmente para o tratamento com maior voltagem.

Outra interessante aplicação do PNT para o tratamento de água pode ser encontrada em Krishnan et al (2020), mas nesse estudo com descargas do tipo corona, caracterizado por pulsos curtos de alta tensão, na descontaminação da água com resíduos da indústria farmacêutica: uma enorme preocupação no local de estudo, a Índia, que possui apenas 25% do seu sistema de água tratado. Este estudo obteve resultados importantes, uma vez que conseguiu decompor tais resíduos orgânicos completamente, sem significativos acréscimos de nitritos, nitratos ou acidificação da água tratada.

Giardina et al (2019) utilizam o PNT, com descarga do tipo DBD, para a degradação de dois herbicidas que são comumente combinados em plantações de milho: o s-metolachlor e a mesotrione, um “coquetel” de herbicidas que, ao serem usados juntos, são muito mais poluentes para o solo do que separado, aumenta a toxicidade de ambos e o tempo de duração dos compostos nocivos no solo. Nesse estudo, também se obteve um enorme sucesso na decomposição desses compostos, inclusive quebrando-os completamente após 5h de tratamento. O tempo e taxa de degradação variou para cada um dos herbicidas, mas ambos foram mineralizados completamente quando expostos a tempos suficiente de tratamento.

Resultados similares foram obtidos no tratamento de águas residuais contaminadas com resíduos de tintas advindas da indústria têxtil: um tratamento de 60 a 90 minutos de PNT foi capaz de degradar toda coloração presente na água (KASIH et al, 2017)

Dessa forma, é possível notar que resultados obtidos nos estudos envolvendo tratamento de resíduos – águas e outros materiais – com o PNT são promissores e abrem campo enorme de estudos para que essa tecnologia possa ser aplicada nas mais diversas áreas e em larga escala, de forma acessível e prática, resolvendo questões ambientais sérias que ameaçam a qualidade da vida dos seres vivos no planeta.

Atualmente, com o rápido avanço dessa tecnologia, há diversos reatores com diferentes tecnologias à disposição no mercado e, nesse contexto, necessita-se de um método que possa se valer dos multicritérios para a melhor tomada de decisão acerca da escolha do reator mais adequado para o Laboratório de Plasma da Unisul. O método mais apropriado para a tomada de decisão aqui encontrado foi o AHP (*AnalyticHierarchyProcess*).

Seria esse método capaz de auxiliar no processo de tomada de uma decisão, coerente e o mais objetiva possível, à compra de um reator a plasma ao Laboratório de Plasma da Unisul?

1.3 JUSTIFICATIVAS

Como dito acima, é necessário um método matemático que possa auxiliar na tomada de decisão em relação à compra desta tecnologia ambiental, no caso, um reator de plasma, uma vez que deve ser levada em consideração uma série de critérios na escolha.

O método AHP é muito utilizado na Pesquisa Operacional, uma vez que consegue ser multicriterial e, ao mesmo tempo, organizar, de forma objetiva e em hierarquias, com base em entrevistas aos atores envolvidos na tomada de decisão, os diversos critérios e subcritérios.

A motivação deste trabalho surge da possibilidade de aplicar um método matemático para a tomada de decisão que abarque tanto a subjetividade dos envolvidos quanto dados objetivos, isto é, numéricos e que indiquem concretamente para um suporte em uma decisão em um caso real.

Além disso, há grande preocupação com as questões ambientais e climáticas que estão se agravando nas últimas décadas, especialmente na escala de produção do lixo no mundo, tanto a nível doméstico, pela crescente população mundial, como a nível industrial, com o crescimento do consumismo e da obsolescência programada, bem como a rápida crescente tecnológica que, apesar de inúmeras vantagens inclusive a nível ambiental, traz também um descarte massivo de aparelhos e produtos de tecnologia consideradas atrasadas.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

Empregar o método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) como suporte para a tomada de decisão na compra de um reator de plasma a ser empregado no Laboratório de Plasma da Unisul.

1.4.2 Objetivos Específicos

- a) Identificar os critérios e subcritérios que envolvem a tomada de decisão para a compra de reatores para um Laboratório de Plasmada Unisul;
- b) Definir o grau de importância dos critérios e subcritérios;
- c) Determinar, a partir de um método matemático, qual reator de plasma a ser comprado para o Laboratório de Plasma da Unisul.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PLASMA

Segundo Fridman (2008 apud CREMA, 2019), o plasma é o quarto estado da matéria e trata-se de um estado de ganho de energia a partir do estado gasoso, configurando-se como um estado de ionização, no qual encontram-se íons, moléculas excitadas e neutras, fótons e elétrons. Além disso, acredita-se que a enorme maioria da matéria do universo encontra-se no estado de plasma (HEINLIN *et al*, 2010 apud CREMA, 2019)

Ainda segundo Fridman, o plasma pode ser classificado de acordo com seu nível de energia, temperatura e densidade eletrônica, podendo ser classificado como plasma de alta temperatura e os de baixa temperatura, estes, por sua vez, sendo plasma térmico ou plasma frio (não térmico). Este último é o mais utilizado em reatores de plasma, porque possui maior diversidade e variedade, bem como exige condições mais adequadas para o trabalho em laboratório, como, por exemplo, baixas correntes elétricas e com altas tensões para descarga.

Segundo Facó (2004), os reatores de plasma possuem um amplo espectro de uso como tecnologia ambiental como, por exemplo, em processos de purificação de ar e água, geração de ozônio, limpeza e descontaminação de objetos, tratamento de poluentes entre outros – seja com o processo de Streamer, na descarga elétrica do tipo corona ou na descarga de alta tensão. Outro interessante uso para as tecnologias de plasma é a descontaminação da água, aumentando sua potabilidade, como mostrado por Cubas *et al* (2019).

Pode-se encontrar no estudo de Zhang *et al* (2017) uma aplicação de grande relevância dos reatores de plasma não-térmicos (PNT), que é a remediação de solos contaminados. Zhang e seus colaboradores fazem uma revisão de diversos métodos de remediação do solo, como remediação física, bioremediação, remediação química e com o plasma não-térmico e conclui que, além da baixa demanda energética e de não necessitar da adição de reagentes químicos, a remediação com PNT não exige preparações prévias do solo, não depende da permeabilidade deste e também produz uma enorme variedade de íons, tendo uma atuação de amplo espectro sobre o solo.

Outra importante aplicação do PNT é a capacidade de inativação de diversos vírus por conta da criação de espécies reativas de oxigênio (ROS), como oxigênio, peróxido de hidrogênio, ozônio, e espécies reativas de nitrogênio (RNS), como óxido nítrico. Tais

componentes do plasma danificaram as proteínas e ácidos nucleicos de vírus, contribuindo para melhor compreensão da desativação de vírus por meio do PNT (GUO, 2018).

Existem diversos modelos de reatores de plasma que se diferenciam pela sua geometria, isto é, onde estarão dispostos os eletrodos (cátodo e ânodo), a configuração física na qual a descarga do plasma frio ocorrerá, o gás que está utilizado entre outros fatores (FRIDIMAN, 2008 apud CREMA, 2019).

2.2 MÉTODO MATEMÁTICO PARA TOMADA DE DECISÃO

Dentro do contexto da Pesquisa Operacional, há diversos métodos e modelagens matemáticas para auxílio na tomada de decisões, uma vez que na otimização de quaisquer processos, decisões precisam ser tomadas. Para a tomada das melhores decisões possíveis, essa área da matemática pode contribuir com, por exemplo, as simulações, programações lineares, teoria da fila, teoria dos jogos, teoria dos grafos, Análise por Envoltória de Dados (DEA), análises multicritérios e muitas outras técnicas que, aliados ao método científico, podem gerar indicadores que baseiam a tomada de decisões.

As simulações visam construir determinados modelos de situações que possuem elevado grau de incerteza e que não podem lançar mão de modelos analíticos; auxiliam os decisores com modelos de situação real que, a partir da variação de alguns parâmetros, avaliam os possíveis resultados, sendo uma das ferramentas mais flexível da pesquisa operacional (EVANS, OLSON, 2002). Os processos de produção de uma indústria, por exemplo, para identificar problemas na linha de montagem e produção pode se beneficiar desse tipo de análise; as simulações também podem ser aplicadas em sistemas de transporte, estoques, computacionais entre outros.

Por sua vez, as programações lineares são métodos mais analíticos, oriundos de problemas que podem ser representados por meio de equações lineares. Esse método visa solucionar um sistema de equações de forma a buscar o melhor resultado busca, por meio da otimização da função objetivo (LOPES, 2015). Para resolução de problemas de transporte e designação, essa técnica é de extrema capacidade, uma vez que podemos medir numericamente os fatores, como área disponível, velocidade, pesos, volumes etc.

Já a Teoria dos Jogos é uma das técnicas mais amplas, sendo um ramo da matemática aplicada, que tem seu contexto de aplicação em diversas disciplinas, como a economia, estratégias nucleares e de guerra, comportamento animal, até mesmo na filosofia e jornalismo.

No contexto atual, a teoria dos jogos vem sendo aplicada no estudo de cibernética e inteligência artificial, dentro da ciência da computação. Trata-se de um métodos de análise de estratégias no qual os jogadores (partes do sistema), escolhem diversas ações na tentativa do melhor retorno possível.

No contexto deste estudo, da escolha do melhor reator a plasma para um laboratório, é necessário que diversos critérios e atores sejam levados em consideração para que se possa tomar a melhor e mais coerente decisão possível, desta forma, as análises multicriteriais são as técnicas mais adequadas.

Nesse sentido, diz Nunes (2018) que “na literatura encontram-se inúmeros métodos de Análise Multicritério de Apoio à Decisão (MCDA) e suas aplicações estão estritamente relacionadas com a natureza das informações do problema”. Tais métodos multicriteriais estão divididos em três grandes grupos (VINCKE, 1986 apud NUNES, 2018):

- a) Programação matemática multiobjectivo: visa encontrar uma solução ótima para a função objetivo
- b) Teoria da Utilidade Multi-atributo ou *Multi-attribut eUtility Theory* (MAUT): a teoria tem como princípio o conceito de agregação dos diferentes critérios em única função-utilidade que deve ser otimizada. Esta teoria faz parte de uma corrente chamada de Escola Americana. O *Analytic Hierarchy Process* (AHP) está inclusa nesse grupo, desenvolvido por Thomas L. Saaty durante a década de 1970. O método tem como objetivo organizar os múltiplos critérios em uma hierarquia representada pela preferência dos decisores e no nível inferior da hierarquia encontram-se as alternativas. Entende-se esse método como compensatório.
- c) Métodos de Sobreclassificação (*outranking methods*): Inspirados pela Escola Europeia, os métodos utilizam as relações de sobreclassificação, superação ou *outranking*. Entende-se esse método como não compensatório.

A utilização da compensação de critérios é de grande importância na escolha que almejamos otimizar com esse estudo, uma vez que são muitos os fatores e atores que estão envolvidos dessa decisão. Além disso, os fatores não devem ser superados, no sistema de *outranking*, porque cada um deles precisa estar incluído na decisão final. Dessa forma, como visto acima, o único método que utiliza a compensação entre critérios é o AHP, isto é, o método em que

a compensação questiona se as vantagens de um atributo podem ser ou não trocadas pelas desvantagens de outro. No caso em que o tomador de decisão deve optar por

determinado critério em detrimento de outro, é necessário estabelecer uma relação de trade-off ou compensação (CAMPOS, 2011 apud NUNES, 2018)

Então, o método escolhido no auxílio da tomada de decisão no caso concreto em tela, conforme os diversos fatores envolvidos, e de forma a otimizar o máximo possível a decisão de acordo com esses critérios e as diversas alternativas de escolha foi o AHP. Todo o método possui seu desenvolvimento matemático guiado pela Álgebra Linear.

Há muitos usos do AHP tanto no contexto nacional e internacional, especialmente em grandes tomadas de decisões, aquelas que envolvem impactos grandes e em processos complexos, isto é, em que há inúmeros fatores a serem considerados, especialmente fatores humanos.

Uma interessante aplicação pode ser encontrada em Zhou et al (2020), em que o método foi usado no contexto da avaliação e escolha de diversas tecnologias de tratamento do esgoto municipal em cidades da China. Neste país, o esgoto municipal é um subproduto do sistema nacional de tratamento e tem crescido na ordem de 4,6% ao ano, trazendo enorme preocupação sobre o destino desses resíduos sólidos e líquidos. O interessante desse estudo é que ele utiliza o método AHP associado com outro método, a partir do resultado obtido para a análise de cada critério por meio do AHP, esses dados são entradas para outro modelo: o método VIKOR.

Arefin (2020) faz um uso diferente deste método na busca de zonas potenciais de água subterrânea, em Dhaka City, no Bangladesh. Também faz um uso associado desse método com outros, mas aqui o método é usado para, na hierarquização e atribuição de pesos dos critérios, construir uma matriz que indique locais com maior possibilidade de disponibilidade de água, uma vez que os dados usados para alimentar o AHP nesse caso vêm de outros modelos geológicos e hidrológicos.

No contexto nacional, Marchezetti, Kavisky e Braga (2011) realizaram um estudo para Região Metropolitana de Curitiba para avaliar, entre sete critérios elencados, como seria a hierarquização das tecnologias para tratamento dos resíduos sólidos dessa região. Foram avaliadas sete alternativas: gaseificação, pirólise incineração, plasma, compostagem, reciclagem e digestão anaeróbica. Nesse artigo, também pode-se encontrar um bom detalhamento do método.

3 DELIMITAÇÃO METODOLÓGICA (OU APLICAÇÃO: SELEÇÃO DO MELHOR REATOR DE PLASMA PARA O LABORATÓRIO DA UNISUL)

Neste capítulo, foi avaliado, estudado e elaborado indicadores para a melhor decisão possível na compra de um reator a plasma não-térmico para o laboratório da Universidade do Sul de Santa Catarina (Unisul). Devido ao significativo investimento necessário, devemos aplicar um método capaz de auxiliar de forma mais precisa possível.

No primeiro momento, estudou-se os diversos modelos de reatores a plasma, analisando suas diferenças e semelhanças, a fim de entender melhor sobre sua aplicabilidade nas diversas áreas da ciência, como explicitado anteriormente.

Em seguida, pesquisadores vinculadas ao laboratório foram consultadas a fim de elencar os critérios e sub-critérios que deviam ser levados em consideração na avaliação das opções e alternativas dos reatores de plasma disponíveis para compra.

No terceiro passo, foi utilizado o ferramental do método AHP clássico, desenvolvido por Saaty (1980), que será pormenorizado no capítulo a seguir, com as atribuições das notas da escala de Saaty e recursos da Álgebra Linear para o tratamento desses dados.

Por último, apresentou-se a matriz de resultados a fim de embasar a melhor decisão por parte dos responsáveis pela compra do reator a plasma não-térmico para o laboratório da UNISUL.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

Em relação à profundidade desta pesquisa, trata-se de uma pesquisa explicativa, uma vez que houve a tentativa de entender a maior parte das variáveis envolvidas em um processo de tratamento com o reator de plasma não-térmico, bem como o porquê da relevância de cada um dos critérios e sub-critérios envolvidos. Também intencionou-se construir a árvore de importâncias relativas como orientação para a tomada de decisão.

Quanto à abordagem, classifica-se como qualitativa, uma vez que as pesquisas quantitativas se preocupam com os dados estatísticos e a objetividade e, por outro lado, a pesquisa qualitativa se envolve com as opiniões dos pesquisados. No caso concreto dessa

pesquisa, realizou-se uma tentativa de, a partir das subjetividades de especialistas, transformar tais opiniões em valores numéricos para a utilização de técnicas matemáticas para o trabalho dos dados, realizando, dessa forma, uma parte qualitativa e quantitativa, simultaneamente.

Em relação à coleta de dados, enquadra-se em pesquisa bibliográfica e levantamento, uma vez que os critérios e sub-critérios foram extraídos da literatura acerca das tecnologias de plasma e também por meio de entrevistas com especialistas, estes também forneceram suas opiniões para que as matrizes de dominância fossem trabalhadas.

3.2 CRITÉRIOS PARA A ESTRUTURAÇÃO DO MODELO

Após a realização das leituras e estudos de artigos científicos com diversas aplicações dos reatores de plasma não-térmico, e somada as discussões com pesquisadoras e docentes responsáveis pelo Laboratório de Plasma da Unisul e outros especialistas, foram elencados os seguintes critérios: 1. Gastos, 2. Potabilidade da água, 3. Tipo de gás utilizado, 4. Geometria, com seus respectivos sub-critérios.

Organizando-os conforme a metodologia de Saaty (1980), a Figura 1 demonstra a estrutura de hierarquização dessa análise multicriterial.

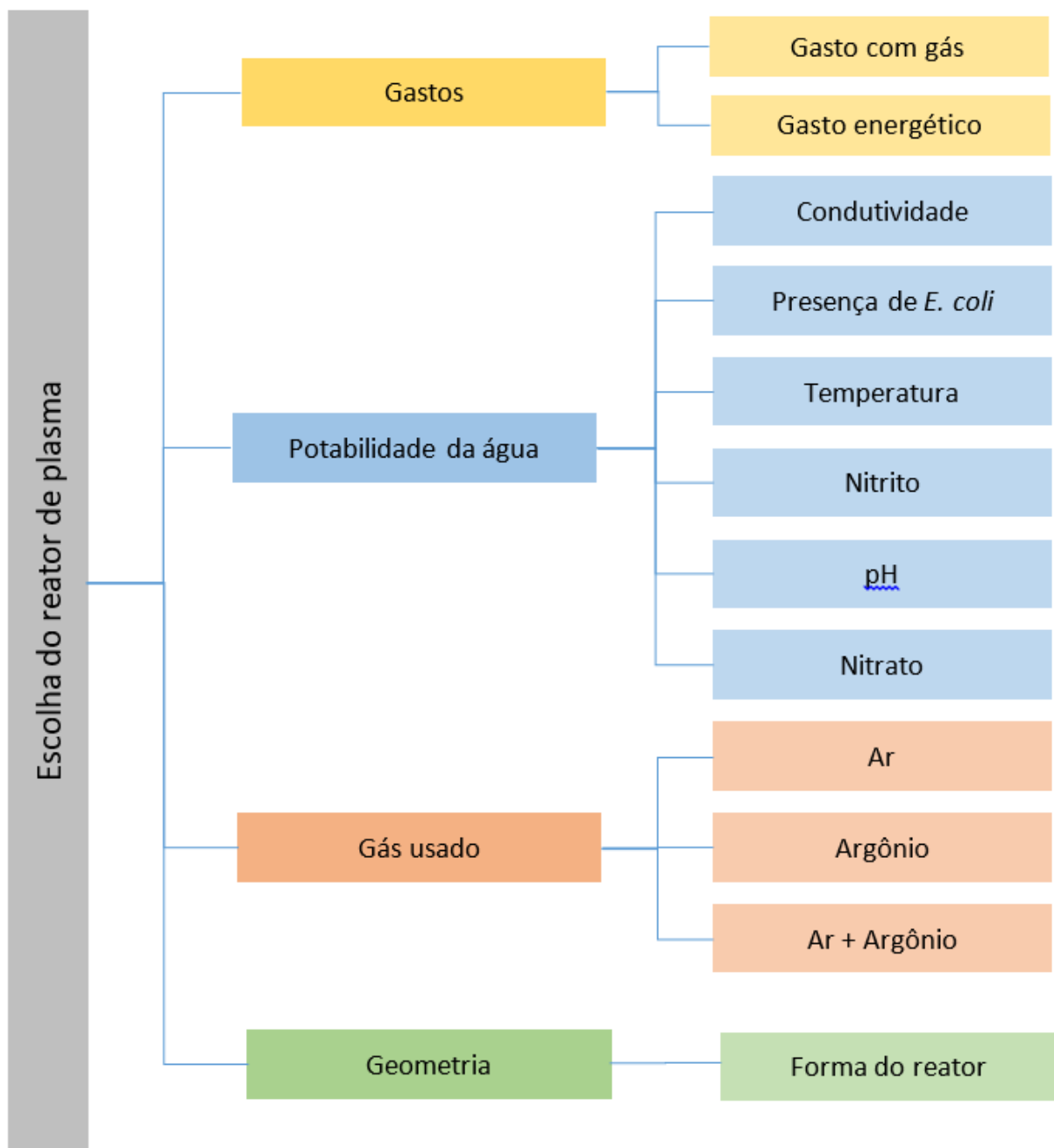


Figura 1 - Modelo de Hierarquização Proposto - Elaborado pelo autor

3.2.1 Critério: Gastos

Este critério diz respeito aos gastos que o reator dispensará em termos de insumos, sendo dividido em dois subcritérios: gasto com gás e gasto com energia.

3.1.1.1. Subcritério: Gasto com gás

A quantidade de gás gasto em cada reator também deve ser levada em consideração na escolha, uma vez que em um prazo maior, pequenas diferenças nessa variável podem acarretar grandes custos para a universidade.

3.1.1.2. Subcritério: Gasto energético

Este subcritério é muito relevante na hora de comprar um reator a plasma, uma vez que, ao pensarmos no contexto ambiental, é de extrema importância pensarmos na quantidade de energia gasta nos processos, tanto pelo ponto de vista econômico da universidade, mas também pela possibilidade de se pensar na aplicabilidade em larga escala.

3.2.2 Critério: Potabilidade da água

Este critério pode ser utilizado para medir, indiretamente, a eficiência de um reator de plasma, uma vez que cada subcritério diz acerca de características que estamos buscando em uma quantidade de água que recebe uma descarga do reator de plasma no intuito de descontaminá-la.

3.1.2.1. Subcritério: Condutividade

Essa característica da água é importante de ser analisada por se tratar da capacidade de condução da corrente elétrica, e estar diretamente associada às concentrações de sais na água. Destarte, com esse indicador, é possível auferir indiretamente a quantidade de poluentes dissolvidos na água, e, em altos valores de concentração e condutividade, a água pode ter características corrosivas.

3.1.2.2. Subcritério: Presença de *E. coli*

Este critério nos diz diretamente da qualidade da água, uma vez que a presença e concentração de bactérias coliformes, dentre elas, a *E. coli* é a mais usada como indicador de potabilidade da água (FUNASA, 2004), já que sua concentração tem relação direta com a contaminação fecal da água e sua medição é mais fácil do que outras bactérias.

Dessa forma, quanto menor for a concentração de *E. coli* em água após a descarga de um reator de plasma, tão maior é a eficiência do mesmo.

3.1.2.3. Subcritério: Temperatura

Esta variável deve ser levada em consideração também, porque ela se relaciona diretamente com a solubilidade e ionização de algumas substâncias coagulantes, o pH, fluoretação e desinfecção, entre outros (FUNASA, 2004).

3.1.2.4. Subcritério: Nitrato

Outra característica importante da potabilidade da água é a concentração de nitratos, que não deve exceder 10mg/L (FUNASA, 2004). Tal critério diz respeito ao que é conhecido como dureza da água, que mede a concentração de íons de cálcio e magnésio que, geralmente, se apresentam na forma de nitratos de cálcio e magnésio.

3.1.2.5. Subcritério: pH

A mediação de pH também é importante, porque ao fazer um tratamento de descontaminação da água, por exemplo, é importante que essa água tratada não seja nem tão ácida e nem básica, isto é, seu pH deve estar o mais próximo de 7,0 possível, sendo aceitável sua variação entre 6,0 e 9,0 (FUNASA, 2004).

É mister que o uso de reatores de plasma em água gera o íon hidrônio H_3O^+ , que quanto maior sua concentração tão maior será a acidez da água, então é importante que haja atenção para este ponto, uma vez que pelo equilíbrio dinâmico da água o pH deverá se normalizar com o passar do tempo.

3.1.2.6. Subcritério: Nitrito

Assim como no caso dos nitratos, a concentração de nitrito também possui um valor máximo permitido que é de 1 mg/L (FUNASA, 2004), acima dessa concentração, a água não pode ser mais considerada potável, apresentando riscos à saúde humana.

3.2.3 Critério: Gás usado

Diferentes tipos de reatores de plasma não-térmico utilizam diferentes tipos de gases, como ar, O₂, Argônio, N₂ entre outros. Para nossa escolha, serão considerados apenas 3 tipos: apenas ar, Argônio e a combinação de ar + Argônio.

3.1.3.1. Subcritério: Ar

O uso do ar atmosférico em reatores de plasma é amplo, uma vez que sua disponibilidade é maior, e sua composição é variada, com compostos hidrogenados, oxigenados e nitrogenados. Dessa forma, as reações e espécies reativas geradas são mais diversas.

3.1.3.2. Subcritério: Argônio

A utilização desse gás produz íons de Ar⁺ e não geram compostos tão reativos como na utilização do ar atmosférico (FARIAS, 2017). Dessa forma, esse gás permite reações mais controladas e menos oxidativas.

3.1.3.3. Subcritério: Ar + Argônio

A combinação de Argônio com Ar - que possui gás nitrogênio (N₂) e gás oxigênio (O₂) – apresenta uma capacidade de oxidação, ao mesmo tempo que o processo utilizando essa combinação gera ROS e RNS, que possuem forte característica reativa e oxidativa (FARIAS, 2017).

3.2.4 Critério: Geometria

3.1.4.1. Subcritério: Forma do reator

Essa variável é significativa para a compra de um reator de plasma para um laboratório, uma vez que ele deverá ser armazenado e também ao ser utilizado deve ter seu manuseio possível pela equipe laboratorial. Nesse subcritério também se encontra o tamanho de cada reator.

Para a coleta de dados, houve a coleta de dados por meio do *googleform* (Anexo A) para cinco especialistas, no qual, após o levantamento de todos os critérios e subcritérios, e dadas as orientações para cada participante elencar, em uma escala de 1 a 9, de acordo com o método de Saaty (1980, p. 163), a prevalência dos critérios uns em relação aos outros, par a par – para hierarquização desses critérios e subcritérios e posterior análise matemática.

3.3 O MÉTODO *ANALYTIC HIERARCHY PROCESS* (AHP) GENERALIZADO

O método AHP foi desenvolvido por Saaty (1980) e

busca tratar a complexidade com a decomposição e divisão do problema em fatores, que podem ainda ser decompostos em novos fatores até ao nível mais baixo, claros e dimensionáveis e estabelecendo relações para depois sintetizar (NUNES, 2019).

Os critérios e subcritérios a serem avaliados já estão devidamente hierarquizados como mostra a Figura 1. A partir dessa hierarquia, proceder-se-á com a construção de matrizes quadradas de comparação para julgamento, par a par, de cada elemento, com notas de importância relativa conforme a escala construída por Saaty, conforme Tabela 1 abaixo.

Serão construídas 4 matrizes: 1. Matriz com os critérios; 2. Matriz com os subcritérios de Gastos; 3. Matriz com os subcritérios de Potabilidade da água e, por fim, 4. Matriz com os subcritérios de Gás usado.

A partir dessas matrizes, será calculado o autovetor (Vetor Prioridade W) associado ao maior autovalor de cada uma delas que, normalizado para a soma igualar-se a 1, representará a

prioridade relativa de cada critério e ou subcritério. Esse autovalor também será usado para avaliar a consistência dos julgamentos.

Tabela 1 – Escala Fundamental – Saaty (1980)

Índice	Definição	Descrição
1	Igual importância	Os dois elementos contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância fraca	A experiência do avaliador diz que um elemento possui importância pouco maior que o outro para objetivo
5	Importância forte	A experiência do avaliador diz que um elemento possui importância maior que o outro para o objetivo
7	Importância muito forte	A experiência do avaliador diz que um elemento possui importância relativamente maior que o outro para o objetivo
9	Importância extrema	A experiência do avaliador diz com alto grau de certeza que um elemento possui importância maior que o outro para o objetivo
2, 4, 6, 8	Valores intermediários	Utilizados na necessidade de um índice intermediário de importância

Após a obtenção desses valores, serão calculados os índices de consistência (IC) de cada matriz a fim de garantirmos uma coerência nos julgamentos, conforme a equação:

$$IC = |(\lambda_{\max} - N)| / (N-1) \quad (1)$$

Em que $\lambda_{\max}$ é o autovalor máximo e N é a ordem da matriz quadrada A, em que os cálculos foram realizados para encontrar o Vetor Prioridade (W). Uma aproximação satisfatória que Saaty (1980) sugere para o cálculo do $\lambda_{\max}$ é:

Toma-se a matriz **A** obtida através da multiplicação da matriz de dominância e o vetor de prioridades e divide-se seus elementos por seu valor correspondente no vetor de prioridades. Soma-se todos os elementos desse vetor e divide-se pela ordem da matriz, obtendo uma média. Este é o $\lambda_{\max}$. (NUNES, 2019).

A avaliação do IC depende da ordem da matriz de dominância, uma vez que quanto maior a matriz, menos as possíveis inconsistências alteram de forma relevante o resultado final de julgamento. Para que se possa ter como base, Saaty (1980) desenvolveu a Razão de Consistência (RC) cuja equação é:

$$RC = IC / R_N \quad (2)$$

Em que R_N pode ser obtido pela Tabela 2. E, a avaliação final, é feita quando o RC apresenta um valor menor que o proposto na Tabela 3, de acordo com a ordem de cada matriz de dominância.

Tabela 2 – Índice Randômico – Saaty (1980)

N	R_N
2	0,00
3	0,58
4	0,90
5	1,12
6	1,24
7	1,32
8	1,41
9	1,45
10	1,51

Tabela 3 – Check de Consistência – Saaty (1980)

N	(<) RC
≤ 2	0%
3	5%
4	9%
≥ 5	10%

4 RESULTADOS: CÁLCULOS DAS MATRIZES E IMPORTÂNCIAS RELATIVAS

4.1 MATRIZES E DOMINÂNCIA DE CRITÉRIOS

Neste capítulo, a partir dos dados obtidos por meio do formulário (Anexo 1), foi possível construir 4 matrizes de dominância A para os critérios e cada subcritério.

É importante ressaltar que a construção dos elementos segue sempre:

$$a_{ii} = 1 \text{ e } a_{ij} = 1/a_{ji}$$

Tabela 4 – Matriz de dominância A para os critérios

Critérios	Gastos	Potabilidade da água	Gás usado	Geometria
Gastos	1,00	3,00	3,00	6,00
Potabilidade da água	0,33	1,00	2,00	4,00
Gás usado	0,33	0,50	1,00	6,00
Geometria	0,17	0,25	0,17	1,00
Soma	1,83	4,75	6,17	17,00

Normalizando essa matriz, fazendo a divisão de cada célula pela soma de sua respectiva coluna, temos a matriz de dominância normalizada (A'). Por exemplo, na primeira linha e segunda coluna, fizemos: $3 / 4,75 = 0,6316$ e assim por diante em todas as colunas.

Tabela 5 – Matriz de dominância normalizada A' para os critérios

Critérios	Gastos	Potabilidade da água	Gás usado	Geometria
Gastos	0,5455	0,6316	0,4865	0,3529
Potabilidade da água	0,1818	0,2105	0,3243	0,2353
Gás usado	0,1818	0,1053	0,1622	0,3529
Geometria	0,0909	0,0526	0,0270	0,0588

Em seguida, calculamos a matriz vetor prioridade W que mostrará a importância relativa de cada critério, realizando a média de cada linha. Para a linha gastos, por exemplo, realizamos: $(0,5455 + 0,6316 + 0,4865 + 0,3529)/4 = 0,5041$.

Tabela 6 – Matriz vetor prioridade W dos critérios

Crítérios	Vetor Prioridade (W)
Gastos	0,5041
Potabilidade da água	0,2380
Gás usado	0,2005
Geometria	0,0573

Agora, é importante calcular a razão de consistências dos dados gerados por meio da equação (2) e (1). Primeiramente, calculando o $\lambda_{\max}$:

$$\begin{pmatrix} 1 & 3 & 3 & 6 \\ 0,33 & 1 & 2 & 4 \\ 0,33 & 0,5 & 1 & 6 \\ 0,17 & 0,25 & 0,17 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0,5041 \\ 0,2380 \\ 0,2005 \\ 0,0573 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2,1638 \\ 1,0365 \\ 0,8317 \\ 0,2343 \end{pmatrix} / \begin{pmatrix} 0,5041 \\ 0,2380 \\ 0,2005 \\ 0,0573 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4,2923 \\ 4,3553 \\ 4,1470 \\ 4,0854 \end{pmatrix},$$

$$\text{Então } \lambda_{\max} = (4,2923 + 4,3553 + 4,1470 + 4,0854)/4 = 4,2200$$

$$\text{Então, IC} = |(4,2200 - 4)| / (4-1) = 0,0733, \text{ então:}$$

$$\text{RC} = \text{IC} / \text{IR} = 0,0733/0,9 = 0,08144 = 8,14\%$$

4.2 MATRIZES E DOMINÂNCIA DE SUBCRITÉRIOS DO CRITÉRIO “GASTOS”

Da mesma forma como procedemos no tópico anterior, faremos agora com os dados obtidos da importância relativa dos subcritérios. Por meio das notas atribuídas pelos especialistas nas entrevistas, obtivemos a nota 3 para gasto energético em relação a gasto com gás e, dessa forma, a nota para gasto com gás e gasto energético é: $1 / 3 = 0,33$.

Tabela 7 - Matriz de dominância A para os subcritérios do critério “Gastos”

Subcritérios	Gasto com gás	Gasto energético
Gasto com gás	1,00	0,33
Gasto energético	3,00	1,00

Tabela 8 - Matriz de dominância normalizada A' para os subcritérios do critério “Gastos”

Subcritérios	Gasto com gás	Gasto energético
Gasto com gás	0,25	0,25
Gasto energético	0,75	0,75

Tabela 9 - Matriz vetor prioridade W para os subcritérios do critério “Gastos”

Subcritérios	Vetor Prioridade (W)
Gasto com gás	0,25
Gasto energético	0,75

Calculando o $\lambda_{\max}$:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0,33 \\ 3 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0,25 \\ 0,75 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,50 \\ 1,50 \end{pmatrix} / \begin{pmatrix} 0,25 \\ 0,75 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix}, \text{ então } \lambda_{\max} = 2$$

Então, IC = $| (2 - 2) | / (2 - 1) = 0$, então:

$$RC = IC / IR = 0,0 / IR = 0 = 0\%.$$

4.3 MATRIZES E DOMINÂNCIA DE SUBCRITÉRIOS DO CRITÉRIO “POTABILIDADE DA ÁGUA”

Da mesma forma que realizamos anteriormente, faremos agora com os dados obtidos da importância relativa dos subcritérios no critério “Potabilidade da água”:

Tabela 10 - Matriz de dominância A para os subcritérios do critério “Potabilidade da água”

Subcritérios	Condutividade	Presença de <i>E. coli</i>	Temperatura	Nitrito	pH	Nitrato
Condutividade	1,00	0,19	1,00	0,31	0,29	0,29
Presença de <i>E. coli</i>	5,40	1,00	5,00	4,00	3,40	2,40
Temperatura	1,00	0,20	1,00	0,27	0,20	0,27
Nitrito	3,25	0,25	3,75	1,00	0,33	0,50
pH	3,50	0,29	5,00	3,00	1,00	2,75
Nitrato	3,50	0,42	4,80	2,00	0,36	1,00

Tabela 11 - Matriz de dominância normalizada A' para os subcritérios do critério “Potabilidade da água”

Subcritérios	Condutividade	Presença de <i>E. coli</i>	Temperatura	Nitrito	pH	Nitrato
Condutividade	0,0567	0,0789	0,0487	0,0291	0,0512	0,0397
Presença de <i>E. coli</i>	0,3059	0,4263	0,2433	0,3783	0,6090	0,3332
Temperatura	0,0567	0,0853	0,0487	0,0252	0,0358	0,0370
Nitrito	0,1841	0,1066	0,1825	0,0946	0,0597	0,0694
pH	0,1983	0,1254	0,2433	0,2837	0,1791	0,3818
Nitrato	0,1983	0,1776	0,2336	0,1891	0,0651	0,1388

Tabela 12 - Matriz vetor prioridade W para os subcritérios do critério “Potabilidade da água”

Subcritérios	Vetor Prioridade (W)
Condutividade	0,0507
Presença de <i>E. coli</i>	0,3827
Temperatura	0,0481
Nitrito	0,1161
pH	0,2353
Nitrato	0,1671

Calculando o $\lambda_{\max}$:

$$\begin{pmatrix} 1,00 & 0,19 & 1,00 & 0,31 & 0,29 & 0,29 \\ 5,40 & 1,00 & 5,00 & 4,00 & 3,40 & 2,40 \\ 1,00 & 0,20 & 1,00 & 0,27 & 0,20 & 0,27 \\ 3,25 & 0,25 & 3,75 & 1,00 & 0,33 & 0,50 \\ 3,50 & 0,29 & 5,00 & 3,00 & 1,00 & 2,75 \\ 3,50 & 0,42 & 4,80 & 2,00 & 0,36 & 1,00 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0,0507 \\ 0,3827 \\ 0,0481 \\ 0,1161 \\ 0,2353 \\ 0,1671 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,3204 \\ 2,5625 \\ 0,2979 \\ 0,7190 \\ 1,5738 \\ 1,0528 \end{pmatrix} / \begin{pmatrix} 0,0507 \\ 0,3827 \\ 0,0481 \\ 0,1161 \\ 0,2353 \\ 0,1671 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6,3190 \\ 6,6964 \\ 6,1931 \\ 6,1901 \\ 6,6892 \\ 6,3002 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_{\max} = (6,3190+6,6964+6,1931+6,1901.6,6892.6,3002)/6 = 6,3980$$

$$\text{Então, IC} = |(6,3980 - 6)| / (6-1) = 0,0796$$

$$\text{RC} = \text{IC} / \text{IR} = 0,0796/1,24 = 0,0642 = 6,42\%$$

4.4 MATRIZES E DOMINÂNCIA DE SUBCRITÉRIOS DO CRITÉRIO “GÁS USADO”

Agora, procederemos os cálculos com os dados obtidos da importância relativa dos subcritérios no critério “Gás usado”:

Tabela 13 - Matriz de dominância A para os subcritérios do critério “Gás usado”

Subcritérios	Ar	Argônio	Ar + Argônio
Ar	1,00	3,20	0,50
Argônio	0,31	1,00	0,31
Ar + Argônio	2,00	3,20	1,00

Tabela 14 - Matriz de dominância normalizada A' para os subcritérios do critério “Gás usado”

Subcritérios	Ar	Argônio	Ar + Argônio
Ar	0,3021	0,4324	0,2762
Argônio	0,0936	0,1351	0,1712
Ar + Argônio	0,6042	0,4324	0,5524

Tabela 15 - Matriz vetor prioridade W para os subcritérios do critério “Gás usado”

Subcritérios	Vetor Prioridade (W)
Ar	0,3369
Argônio	0,1333
Ar + Argônio	0,5296

Calculando o o $\lambda_{\max}$:

$$\begin{pmatrix} 1 & 3,20 & 0,50 \\ 0,31 & 1,00 & 0,31 \\ 2,00 & 3,20 & 1,00 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0,3369 \\ 0,1333 \\ 0,5296 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,0280 \\ 0,4019 \\ 1,6033 \end{pmatrix} / \begin{pmatrix} 0,3369 \\ 0,1333 \\ 0,5296 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3,0513 \\ 3,0150 \\ 3,0274 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_{\max} = (3,0513 + 3,0150 + 3,0274)/3 = 3,0312$$

$$\text{Então, IC} = |(3,0312 - 3)| / (3-1) = 0,0156$$

$$\text{RC} = \text{IC} / \text{IR} = 0,0156/0,58 = 0,02689 = 2,69\%$$

4.5 SÍNTESE DOS RESULTADOS

Tabela 16 – Árvore de prioridades relativas – Elaborado pelo autor

Escolha de um reator de plasma não-térmico para o laboratório da Universidade do Sul de Santa Catarina (Unisul)	Gastos	50,41%	Gasto com gás	25%
			Gasto energético	75%
	Potabilidade da água	23,80%	Condutividade	5,07%
			Presença de <i>E. coli</i>	38,27%
			Temperatura	4,81%
			Nitrito	11,61%
			pH	23,53%
			Nitrato	16,71%
	Gás usado	20,05%	Ar	33,69%
			Argônio	13,33%
			Ar + Argônio	52,96%
	Geometria	5,73%	Forma do reator	100%

5 CONCLUSÃO

5.1 DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

Inicialmente, é importante analisar a consistência dos dados obtidos por meio do método AHP, isto é, deve-se comparar cada Razão de Consistência (RC) de cada uma das quatro matrizes de dominância com os valores apresentados na Tabela 3.

Em relação à análise dos critérios, obteve-se um RC de 8,14%, que é menor do que o RC de 9% presente na Tabela 3, dessa forma, pode-se afirmar que os dados são consistentes.

Em relação aos subcritérios do critério “Gastos”, obteve-se um RC de 0%, que é justamente o valor permitido para matrizes quadradas 2x2. Já relativo aos subcritérios do critério “Potabilidade da água”, tivemos um RC de 6,42%, também dentro da faixa inferior de 10% sugerido pelo criador do método AHP. E, por fim, nos subcritérios do critério “Gás usado” calculamos um RC de 2,69%, também inferior aos 5% permitido para este tamanho de matriz.

Dessa forma, todos os dados obtidos apresentam significativa consistência e podem ser interpretados à luz do exposto nas seções anteriores.

Quanto às importâncias relativas propriamente ditas, pudemos observar que os critérios tiveram o seguinte resultado: o critério gastos apresentou maior importância, no valor de 50,41%, seguido da potabilidade da água com 23,80%, em seguida por gás usado com 20,05% e, por fim, com geometria com 5,73%.

Tais dados sugerem, conforme Árvore de prioridades (Tabela 16), que, ao escolher um reator para compra no caso em tela, devem-se priorizar os gastos desse reator e a potabilidade da água, isto é, capacidade de tornar uma quantidade de água exposta à descarga potável que, juntos, somam quase 75% da importância na compra de um reator.

Ao analisarmos os subcritérios dentro dos critérios “Gastos”, “Potabilidade da água” e “Gás usado” obtivemos as seguintes importâncias relativas, respectivamente:

Para o critério “Gastos”, o subcritério gasto energético possui 75% de importância relativa frente ao gasto com gás com seus 25%.

No critério “Potabilidade da água”, temos o subcritério Presença de *E. coli* com 38,27% de importância, seguido de pH com 23,53% e de nitratos e nitritos com, respectivamente,

16,71% e 11,61%. Por fim, os critérios condutividade e temperatura obtiveram a menor importância relativa de 5,07% e 4,81%, respectivamente.

Desses dados, podemos depreender que a condutividade e a temperatura da água após a descarga de um reato de plasma não são fatores relevantes para a escolha da compra de um reator, sendo os mais importantes, sem dúvida, a quantidade de *E. coli* após a descarga, bem como o pH desta água, somando aproximadamente 62% da importância na escolha, dentro desse critério.

No critério “Gás usado”, temos o subcritério Ar + Argônio com 52,93% de importância, seguido de Ar com 33,67% e, por fim, Argônio com 13,40% de importância. Esses valores fazem total sentido, uma vez que o ideal seria um reator que pudesse trabalhar com ambos os gases, tornando mais prático e flexível seu uso. Em seguida, apenas a utilização do Ar é mais importante que o Argônio, uma vez que o Ar apresenta grande disponibilidade.

Em relação ao procedimento metodológico, é importante ressaltar que alguns especialistas apresentaram dificuldade na compreensão do formulário e, por se tratar de um método que visa levar também em consideração as subjetividades envolvidas, tentamos incluir tais imprecisões que, mesmo incluídas, não alteraram a consistência e coerência dos dados, conforme indicadores anteriores.

De fato, houve um problema nesse trabalho em relação à coleta de dados, uma vez que o formulário do Google talvez não fosse o meio mais adequado para a obtenção das notas relativas aos critérios, tendo em vista que o método e o julgamento par a par não são óbvios para alguém que nunca teve contato com esse modelo da Pesquisa Operacional. Entendeu-se que o mais adequado seria por meio de entrevistas com cada um dos especialistas a partir das quais, pudessem-se obter dados mais precisos.

Tal estudo apresenta indicativos de quais são os critérios mais importantes a serem levados em consideração pelos tomadores de decisão envolvidos na compra de um reator de plasma não-térmico para um laboratório de uma universidade privada. Apesar das limitações desse trabalho, a modelagem matemática por meio do AHP foi possível e obteve resultados satisfatórios.

5.2 RECOMENDAÇÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Como dito anteriormente, a coleta de dados foi um ponto que apresentou dificuldade na elaboração desse trabalho, dessa forma, recomenda-se para trabalhos futuros que a coleta de dados seja feita por meio de entrevistas, uma vez que para avaliação por meio de pesos, uma explicação individual com uma condução a partir de alguém que já conheça o método e a escala de Saaty poderia apresentar dados mais satisfatórios. Inclusive, por tentar inserir as diversas subjetividades, uma entrevista poderia auxiliar na compreensão do pesquisador e também do entrevistado sobre o método.

Outra recomendação é a utilização do método AHP também a partir de alternativas concretas de reatores de PNT, com seus modelos, características, preços e etc, uma vez que os resultados seriam ainda mais concreto e poderiam indicar um modelo mais coerente com a avaliação dos especialistas envolvidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AREFIN, Riad. **Groundwater potential zone identification using an analytic hierarchy process in Dhaka City, Bangladesh.** Environmental Earth Sciences. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12665-020-09024-0>>

CREMA, Anna Paula Safenraider. **Degradação de contaminantes emergentes aplicando plasma não térmico e sistema híbrido.** 2019. 146p. Tese (Doutorado em Química) – Programa de Pós-graduação em Química, Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.

CUBAS, Anelise Leal Vieira et al. **Effect of chemical species generated by different geometries of air and argon non-thermal plasma reactors on bacteria inactivation in water.** Separation and Purification Technology, ISSN: 1383-5866, Volume 222, Setembro/2019, p. 68-74. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.03.057>>

EVANS, James R, OLSON, David L. **Introduction to simulation and risk analysis.** 2. Ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002.

FACÓ, João Lauro Dorneles. **Modelos de otimização para destruição de resíduos tóxicos por sistemas de plasma térmico.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLÓGICA EM RESÍDUOS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, 2004, São Paulo. p. 2784-2793. Disponível em: <<https://www.ipen.br/biblioteca/cd/ictr/2004/ARQUIVOS%20PDF/13/13-010.pdf>>.

FARIAS, Carlos Eduardo. **Estudo da degradação de compostos em plasma de radiofrequência de argônio e oxigênio.** Curitiba, 2017, 240 p. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

FUNDAÇÃO NACIONAL DA SAÚDE - FUNASA: **Manual prático de análise de água.** 1. ed. e atual. 146 p. Brasília, 2004.

GIARDINA, A.; TAMPIERI, F.; BIONDO, O.; MAROTTA, E.; PARADISI, C. **Air non-thermal plasma treatment of the herbicides mesotrione and metolachlor in water.** Chemical Engineering Journal, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.04.098>>

Guo Li, XuRuobing, Gou Lu, Liu Zhichao, ZhaoYiming, Liu Dingxin, Zhang Lei, Chen Hailan, Kong Michael G. 2018. **Mechanism of Virus Inactivation by Cold Atmospheric-Pressure Plasma and Plasma-Activated Water.** Appl Environ Microbiol 84: e00726-18.10.1128/AEM.00726-18. Disponível em: <<https://aem.asm.org/content/aem/84/17/e00726-18.full.pdf>>

KASIH, T. P.; KHARISMA, A.; PERDANA, M. K.; MURPHIYANTO, R. D. J. **Development of non-thermal plasma jet and its potential application for color degradation of organic pollutant in wastewater treatment.** In: International Conference on Eco Engineering Development 2017. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/109/1/012004>>

KRISHNAN, N. A.; KOLB, J.; AZZAM, R.; KALTENBORN, U.; SARATHI, R. **Degradation of Organic Pollutants in Drinking Water by Non-thermal Plasma**. In: Lecture Notes in Electrical Engineering, ISSN: 1876-1119, Volume 580, 2018, p. 235-246. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-981-32-9119-5_20>

LOPES, Ana Lúcia M.; GALVÃO, Ana Lúcia Meira da V.; FOGAÇA, Moacir. **Pesquisa operacional: livro didático**. 204p. Palhoça: UnisulVirtual, 2015.

MARCHEZETTI, Ana Lúcia; KAVISKY, Eloy; BRAGA, Maria Cristina Borga. **Aplicação do método AHP para a hierarquização das alternativas de tratamento de resíduos sólidos domiciliares**. Ambiente Construído, ISSN: 1678-8621, Volume 11, Junho/2011, p. 173-187, Porto Alegre.

NUNES, Guilherme Silva; Leal, José Eugênio (Orientador). **Aplicação do Método AHP para Auxílio à Tomada de Decisão de Localidade para Instalação de Operação de Apoio Logístico Offshore**. Rio de Janeiro, 2017, 74p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

SAATY, T. L. 1980. **The Analytic Hierarchy Process**. New York: Ed. McGraw-Hill.

TANAKARAN, Y.; MATRA, K. **Wastewater treatment by dielectric barrier discharge plasma**. Journal of Physics: Conference Series 1285 (2019). Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1285/1/012015>>

ZHANG, H; MA, D; QIU, R; TANG, Y; C. DU. **Non-thermal plasma technology for organic contaminated soil remediation: A review**. ChemicalEngineeringJournal, v. 313, p. 157–170, 2017

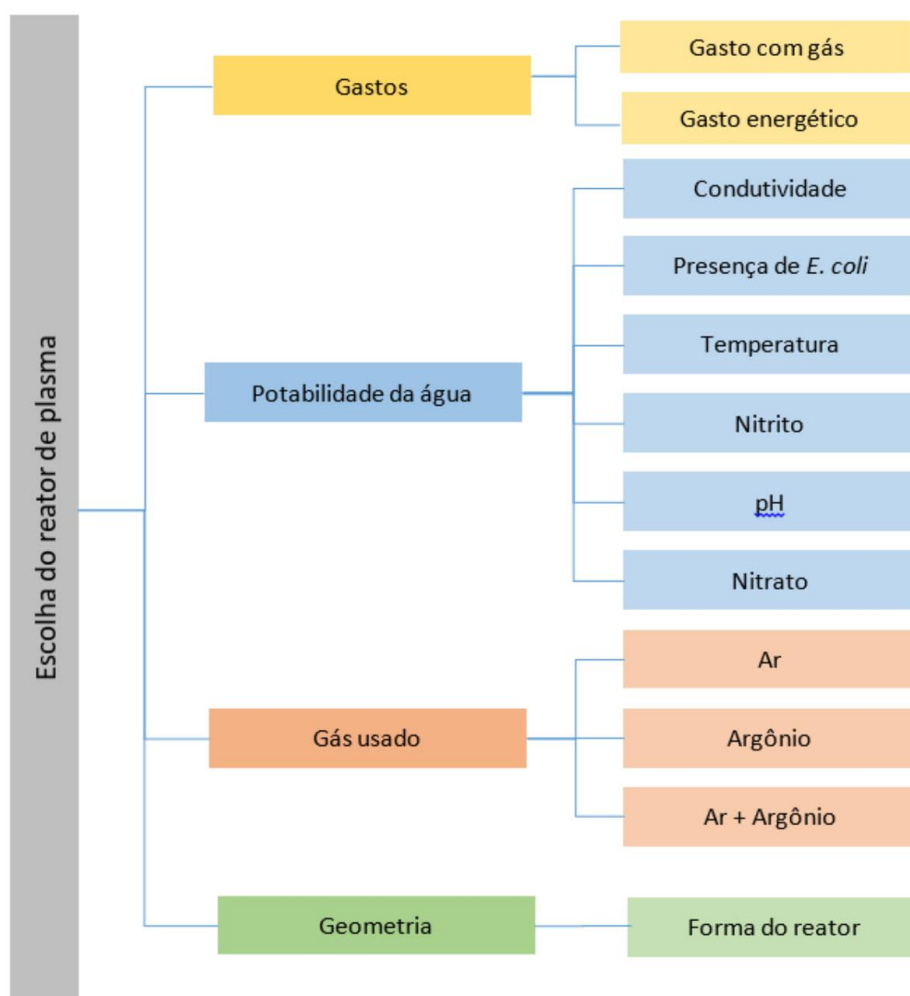
ZHUOU, Guangli; GU, Yifan; YUAN, Haoran; GONG, Yu; WU, Yufeng. **Selectingsustainable technologies for disposal of municipal sewage sludge using a multi-criterion decision-making method: A case study from China**. Resources, Conservation & Recycling, v 161. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104881>>

ANEXOS

ANEXO A – Formulário de critérios e subcritérios

Pesquisa sobre fatores relevantes na compra de um reator de plasma não-térmico

Esquema de critérios e sub critérios



Notas para hierarquização

Tabela 1 – Escala Fundamental – Saaty (1980)

Índice	Definição	Descrição
1	Igual importância	Os dois elementos contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância fraca	A experiência do avaliador diz que um elemento possui importância pouco maior que o outro para o objetivo
5	Importância forte	A experiência do avaliador diz que um elemento possui importância maior que o outro para o objetivo
7	Importância muito forte	A experiência do avaliador diz que um elemento possui importância relativamente maior que o outro para o objetivo
9	Importância extrema	A experiência do avaliador diz com alto grau de certeza que um elemento possui importância maior que o outro para o objetivo
2, 4, 6, 8	Valores intermediários	Utilizados na necessidade de um índice intermediário de importância

Hierarquização dos critérios

Nessa seção, deve-se julgar qual a importância do critério no cabeçalho em relação aos demais

O critério "Gastos" é quão mais importante que cada critério abaixo (apenas marcar caso seja igual ou mais importante):

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Potabilidade da água	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Gás usado	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Geometria	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

◀ ▶

O subcritério "Presença de E. coli" é quão mais importante que cada subcritério abaixo (apenas marcar caso seja igual ou mais importante):

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Condutividade	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Temperatura	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Nitrito	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
pH	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Nitrato	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐



O subcritério "Temperatura" é quão mais importante que cada subcritério abaixo (apenas marcar caso seja igual ou mais importante):

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Condutividade	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Presença de E. coli	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Nitrito	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
pH	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Nitrato	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐



O subcritério "Nitrito" é quão mais importante que cada subcritério abaixo (apenas marcar caso seja igual ou mais importante):

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Condutividade	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Presença de E. coli	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Temperatura	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
pH	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Nitrato	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐



O subcritério "pH" é quão mais importante que cada subcritério abaixo (apenas marcar caso seja igual ou mais importante):

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Condutividade	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Presença de E. coli	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Temperatura	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Nitrito	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Nitrato	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐



O subcritério "Argônio" é quão mais importante que cada subcritério abaixo (apenas marcar caso seja igual ou mais importante):

[illegible]

O subcritério "Ar + Argônio" é quão mais importante que cada subcritério abaixo (apenas marcar caso seja igual ou mais importante):

[illegible]