

Matheus Pinheiro Massaut

**APLICAÇÃO DE CAMPO MAGNÉTICO NA COAGULAÇÃO
DE ÁGUA DE MANANCIAL SUPERFICIAL, DESTINADA
AO CONSUMO HUMANO**

Dissertação submetida ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia
Ambiental da Universidade Federal de
Santa Catarina para a obtenção do
Grau de Mestre em Engenharia
Ambiental

Orientador:

Prof. Dr. Ramon Lucas Dalsasso

Florianópolis

2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Massaut, Matheus Pinheiro
APLICAÇÃO DE CAMPO MAGNÉTICO NA COAGULAÇÃO DE
ÁGUA DE MANANCIAL SUPERFICIAL, DESTINADA AO CONSUMO
HUMANO / Matheus Pinheiro Massaut ; orientador,
Ramon Lucas Dalsasso, 2019.
124 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós
Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis,
2019.

Inclui referências.

1. Engenharia Ambiental. 2. Tratamento Magnético
da Água. 3. Coagulação. 4. Campo Magnético. 5.
Tratamento de Águas. I. Dalsasso, Ramon Lucas. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. III. Título.



**“APLICAÇÃO DE CAMPO MAGNÉTICO NA COAGULAÇÃO DE ÁGUA DE
MANANCIAL SUPERFICIAL, DESTINADA AO CONSUMO HUMANO”**

MATHEUS PINHEIRO MASSAUT

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA AMBIENTAL

na Área de Engenharia Ambiental.

Aprovado por:

Prof. Dr. Ramon Lucas Dalsasso
(Orientador)

Prof.ª Dr.ª Maria Eliza Nagel Hassemer

Prof. Dr. Maurício Luiz Sens

Prof.ª Dr.ª Thyara Campos Martins Nonato

Prof.ª Dr.ª Maria Eliza Nagel Hassemer
(Coordenadora)

A memória da minha
amada vó Maria.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço ao meu orientador, professor Ramon Lucas Dalsasso, pela parceria, amizade e companheirismo estabelecidos durante a pesquisa. Sempre presente e atencioso, auxiliando-me a evoluir, aprender e crescer. Obrigado pela orientação, contribuição e ajuda.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de mestrado.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental – UFSC pelos conhecimentos e lições ensinadas.

Aos membros da banca, pelas contribuições e conhecimentos transmitidos.

Agradeço infinitamente à minha família, onde sempre encontrei apoio, força e amor, além de serem minha fonte de inspiração e coragem para enfrentar todas as dificuldades que me deparei nesta caminhada.

Ao meu esposo e companheiro, Moa, pelo amor, carinho, cuidado, zelo, atenção e por estar sempre ao meu lado em todos os momentos.

Aos meus pais, Angela e Jader, que desde sempre não medem esforços para me auxiliar na busca pelas minhas felicidades e conquistas.

Às minhas irmãs, Janine e Jéssica, pelo companheirismo, atenção e amor. Esta conquista também é por vocês.

Às minhas afilhadas, Alice e Isabela, pequenas princesas que Deus me presentou para abrilhantar minha vida.

A todos os meus amigos e colegas, que direta ou indiretamente me ajudaram de alguma forma.

E, por fim, à Deus pela força, energia, luz e amor.

RESUMO

No âmbito do tratamento de águas, busca-se sempre pelo avanço do conhecimento de novos métodos que não requerem a extensão de plantas existentes, construção de reatores e que não gerem despesas excessivas. Esta pesquisa apresenta um estudo sobre a aplicação de campo magnético no tratamento de águas para consumo humano, analisando o comportamento dos parâmetros: turbidez, cor aparente e pH. O sistema de tratamento elaborado na pesquisa possui as características de filtração direta. Um gerador de campo magnético foi construído e instalado para magnetizar a água antes e após a aplicação de coagulante. Foi evidenciado a capacidade do campo magnético em potencializar a coagulação e auxiliar na remoção de turbidez e cor aparente. Em determinados ensaios, com exposição de campo magnético de 12 mT, e redução de 60 % da concentração ideal de coagulante, alcançou-se uma média de turbidez da água filtrada igual a 0,43 NTU. A maior remoção de turbidez alcançada foi de 97,47 %, com auxílio de um campo magnético de 24 mT. A magnetização não aumentou a depleção do pH das águas após a aplicação de coagulante. O melhor ponto de aplicação de coagulante foi após a magnetização das águas. Contudo, devido aos custos de energia elétrica para geração do campo magnético, a tecnologia mostrou-se mais cara quando comparado a opção de utilizar apenas coagulante.

PALAVRAS-CHAVE: tratamento magnético da água; coagulação; tratamento de águas.

ABSTRACT

In the area of water treatment, we always seek to advance our knowledge of new methods that do not require the extension of existing plants, construction of reactors and do not generate excessive expenses. This research presents a study on the application of magnetic field in the treatment of waters for human consumption, analyzing the behavior of the parameters: turbidity, apparent color and pH. The treatment system developed in the research has the characteristics of direct filtration. A magnetic field generator was constructed and installed to magnetize the water before and after coagulant application. It was evidenced the ability of the magnetic field to potentiate the coagulation and to aid in the removal of turbidity and apparent color. In certain tests, with magnetic field exposure of 12 mT, and 60% reduction of the ideal coagulant concentration, a mean turbidity of filtered water of 0.43 NTU was reached. The highest turbidity removal achieved was 97.47%, with the aid of a magnetic field of 24 mT. The magnetization did not increase the pH depletion of the waters after the application of coagulant. The best point of application of coagulant was after the magnetization of the waters. However, due to the electric energy costs for generating the magnetic field, the technology was more expensive when compared to the option to use only coagulant..

KEY WORDS: magnetic treatment of water; coagulation; water treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Moléculas sob influência de campo magnético.	35
Figura 2.	Solenóide.	37
Figura 3.	Força de Lorentz.	37
Figura 4.	Esquema do sistema piloto do pesquisador Wang.	39
Figura 5.	Localização do Laboratório de Águas da Lagos do Peri. .	43
Figura 6.	Esquema do sistema piloto.	46
Figura 7.	Sistema de bobinas.	50
Figura 8.	Esquema dos disjuntores.	50
Figura 9.	Equipamento de jar teste.	51
Figura 10.	Resultados dos ensaios de jar test.	57
Figura 11.	Turbidez da água filtrada em função do tempo de filtração – Configuração A (coagulante aplicado após o campo magnético).	59
Figura 12.	Turbidez da água filtrada em função do tempo de filtração – Configuração B (coagulante aplicado antes do campo magnético). ...	61
Figura 13.	Turbidez da água filtrada em função do campo magnético exposto – Configuração 0 (sem aplicação de coagulante).	64
Figura 14.	Turbidez da água filtrada em função do campo magnético exposto – Configuração A (coagulante aplicado após o campo magnético).	66
Figura 15.	Turbidez da água filtrada em função do campo magnético exposto – Configuração B (coagulante aplicado antes do campo magnético).	68
Figura 16.	Cor aparente da água filtrada em função do campo magnético exposto – Configuração 0 (sem aplicação de coagulante). ..	70
Figura 17.	Cor aparente da água filtrada em função do campo magnético exposto – Configuração A (coagulante aplicado após o campo magnético).	71
Figura 18.	Cor aparente da água filtrada em função do campo magnético exposto – Configuração B (coagulante aplicado antes do campo magnético).	72
Figura 19.	Valores observados de pH da água bruta e filtrada – Configuração 0 (sem aplicação de coagulante).	73
Figura 20.	Valores observados de pH da água bruta e filtrada – Configuração A (coagulante aplicado após o campo magnético).	74

Figura 21. Valores observados de pH da água bruta e filtrada – Configuração B (coagulante aplicado antes do campo magnético).	75
Figura 22. Gráfico da análise de variância – Configuração 0 (sem aplicação de coagulante) – comparação dos ensaios com exposição de 0 x 8 mT.	82
Figura 23. Gráfico da análise de variância – Configuração 0 (sem aplicação de coagulante) – comparação dos ensaios com exposição de 0 x 12 mT.	82
Figura 24. Gráfico da análise de variância – Configuração 0 (sem aplicação de coagulante) – comparação dos ensaios com exposição de 0 x 24 mT.	83
Figura 25. Gráfico da análise de variância – Configuração A (coagulante aplicado após o campo magnético) – 9,6 mgPAC.L ⁻¹ – comparação dos ensaios com exposição de 0 x 24 mT.	83
Figura 26. Gráfico da análise de variância – Configuração A (coagulante aplicado após o campo magnético) – 14,4 mgPAC.L ⁻¹ – comparação dos ensaios com exposição de 0 x 8 mT.	84
Figura 27. Gráfico da análise de variância – Configuração A (coagulante aplicado após o campo magnético) – 14,4 mgPAC.L ⁻¹ – comparação dos ensaios com exposição de 0 x 12 mT.	84
Figura 28. Gráfico da análise de variância – Configuração A (coagulante aplicado após o campo magnético) – 14,4 mgPAC.L ⁻¹ – comparação dos ensaios com exposição de 0 x 24 mT.	85
Figura 29. Gráfico da análise de variância – Configuração B (coagulante aplicado antes do campo magnético) – 4,8 mgPAC.L ⁻¹ – comparação dos ensaios com exposição de 0 x 8 mT.	85
Figura 30. Gráfico da análise de variância – Configuração B (coagulante aplicado antes do campo magnético) – 4,8 mgPAC.L ⁻¹ – comparação dos ensaios com exposição de 0 x 24 mT.	86
Figura 31. Gráfico da análise de variância – Configuração B (coagulante aplicado antes do campo magnético) – 9,6 mgPAC.L ⁻¹ – comparação dos ensaios com exposição de 0 x 12 mT.	86
Figura 32. Gráfico da análise de variância – Configuração B (coagulante aplicado antes do campo magnético) – 14,4 mgPAC.L ⁻¹ – comparação dos ensaios com exposição de 0 x 12 mT.	87

Figura 33. Gráfico da análise de variância – Configuração B (coagulante aplicado antes do campo magnético) – 14,4 mgPAC.L ⁻¹ – comparação dos ensaios com exposição de 0 x 24 mT.	87
Figura 34. Acompanhamento dos valores de turbidez da água filtrada dos 3 até aos 9 minutos de ensaio.....	89
Figura 35. Acompanhamento dos valores de turbidez da água filtrada dos 12 até aos 15 minutos de ensaio.....	89
Figura 36. Acompanhamento dos valores de turbidez da água filtrada dos 15 até aos 18 minutos de ensaio.....	90
Figura 37. Acompanhamento dos valores de turbidez da água filtrada dos 24 até aos 27 minutos de ensaio.....	90
Figura 38. Gráfico da análise de variação sobre a depleção do pH – Configuração 0 (sem aplicação de coagulante).	91
Figura 39. Gráfico da análise de variação sobre a depleção do pH – Configuração A (coagulante aplicado após o campo magnético).	92
Figura 40. Gráfico da análise de variação sobre a depleção do pH – Configuração B (coagulante aplicado antes do campo magnético).	92
Figura 41. Gráfico da análise de variância sobre o ponto de aplicação coagulante.	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Produtos químicos utilizados no tratamento de águas.....	29
Tabela 2.	Suscetibilidade magnética a 20 °C.	36
Tabela 3.	Caracterização das águas da Lagoa do Peri.....	45
Tabela 4.	Dimensionamento do filtro.	47
Tabela 5.	Dados para controle da vazão.....	48
Tabela 6.	Características gerais do dispositivo.	49
Tabela 7.	Apresentação dos resultados.	53
Tabela 8.	Turbidez da água filtrada em função do tempo de filtração – Configuração A (coagulante aplicado após o campo magnético).	60
Tabela 9.	Turbidez da água filtrada em função do tempo de filtração – Configuração B (coagulante aplicado antes do campo magnético)....	62
Tabela 10.	Melhores percentuais de remoção de turbidez para cada concentração de coagulante – Configuração A (coagulante aplicado após o campo magnético).....	65
Tabela 11.	Melhores percentuais de remoção de turbidez para cada concentração de coagulante – Configuração B (coagulante aplicado antes do campo magnético).....	67
Tabela 12.....		67
Tabela 13.	Teste de normalidade e t-Student – Configuração 0 (sem aplicação de coagulante).	76
Tabela 14.	Teste de normalidade e t-Student – Configuração A (coagulante aplicado após o campo magnético) – 4,8 mgPAC.L ⁻¹	76
Tabela 15.	Teste de normalidade e t-Student – Configuração A (coagulante aplicado após o campo magnético) – 9,6 mgPAC.L ⁻¹	77
Tabela 16.	Teste de normalidade e t-Student – Configuração A (coagulante aplicado após o campo magnético) – 14,4 mgPAC.L ⁻¹	77
Tabela 17.	Teste de normalidade e t-Student – Configuração A (coagulante aplicado após o campo magnético) – 19,2 mgPAC.L ⁻¹	77
Tabela 18.	Teste de normalidade e t-Student – Configuração A (coagulante aplicado após o campo magnético) – 24,0 mgPAC.L ⁻¹	78
Tabela 19.	Teste de normalidade e t-Student – Configuração B (coagulante aplicado antes do campo magnético) – 4,8 mgPAC.L ⁻¹	78
Tabela 20.	Teste de normalidade e t-Student – Configuração B (coagulante aplicado antes do campo magnético) – 9,6 mgPAC.L ⁻¹	78
Tabela 21.	Teste de normalidade e t-Student – Configuração B (coagulante aplicado antes do campo magnético) – 14,4 mgPAC.L ⁻¹	79

Tabela 22.	Teste de normalidade e t-Student – Configuração B (coagulante aplicado antes do campo magnético) – 19,2 mgPAC.L ⁻¹ ...	79
Tabela 23.	Teste de normalidade e t-Student – Configuração B (coagulante aplicado antes do campo magnético) – 24,0 mgPAC.L ⁻¹ ...	79
Tabela 24.	t-Student – Configurações A e B.....	93
Tabela 25.	Custos do tratamento apenas com coagulante.	94
Tabela 26.	Custos do tratamento com redução de coagulante.	95
Tabela 27.	Tempo para magnetizar 1 m ³	95
Tabela 28.	Custo de energia elétrica em cada bobina.	95
Tabela 29.	Comparação de custos de tratamento.	96
Tabela 30.	Resultados dos ensaios de jar test.....	109
Tabela 31.	Resultados dos ensaios da Configuração 0 (sem aplicação de coagulante).	

110

Tabela 32.	Resultados dos ensaios da Configuração A (coagulante aplicado após o campo magnético) - 4,8 mgPAC.L ⁻¹	111
Tabela 33.	Resultados dos ensaios da Configuração A (coagulante aplicado após o campo magnético) - 9,6 mgPAC.L ⁻¹	112
Tabela 34.	Resultados dos ensaios da Configuração A (coagulante aplicado após o campo magnético) - 14,4 mgPAC.L ⁻¹	113
Tabela 35.	Resultados dos ensaios da Configuração A (coagulante aplicado após o campo magnético) - 19,2 mgPAC.L ⁻¹	114
Tabela 36.	Resultados dos ensaios da Configuração A (coagulante aplicado após o campo magnético) – 24,0 mgPAC.L ⁻¹	115
Tabela 37.	Resultados dos ensaios da Configuração B (coagulante aplicado antes do campo magnético) - 4,8 mgPAC.L ⁻¹	116
Tabela 38.	Resultados dos ensaios da Configuração B (coagulante aplicado antes do campo magnético) - 9,6 mgPAC.L ⁻¹	117
Tabela 39.	Resultados dos ensaios da Configuração B (coagulante aplicado antes do campo magnético) - 14,4 mgPAC.L ⁻¹	118
Tabela 40.	Resultados dos ensaios da Configuração B (coagulante aplicado antes do campo magnético) - 19,2 mgPAC.L ⁻¹	119
Tabela 41.	Resultados dos ensaios da Configuração B (coagulante aplicado antes do campo magnético) - 24,0 mgPAC.L ⁻¹	120

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AWWA - American Water Works Association

CASAN - Companhia Catarinense de Águas e Saneamento

CM – Campo Magnético

ETAs – Estação de Tratamento de Água

FDD – Filtração Direta Descendente

FLAs – Filtros de Laboratório de Areia

OMS – Organização Mundial da Saúde

LALP – Laboratório de Águas da Lagoa do Peri

PAC – Policloreto de Alumínio

STD – Sólidos Totais Dissolvidos

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	19
1.1	OBJETIVOS.....	23
1.1.1	Objetivo Geral	23
1.1.2	Objetivos Específicos	23
1.2	HIPÓTESES	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1	TRATAMENTO DE ÁGUA.....	25
2.1.1	Filtração.....	25
2.1.2	Filtração Direta Descendente.....	26
2.1.3	Coagulação	27
2.2	PRODUTOS QUÍMICOS UTILIZADOS NO TRATAMENTO DE ÁGUAS	29
2.2.1	Alumínio.....	29
2.2.2	Cloro	31
2.2.3	Flúor	33
2.3	MAGNETISMO	34
2.3.1	Gradiente magnético.....	36
2.3.2	Força de Lorentz.....	37
2.3.3	Memória magnética	38
2.4	TRATAMENTO MAGNÉTICO DA ÁGUA	38
2.4.1	Outras aplicações do magnetismo no tratamento de águas.....	40
3	METODOLOGIA.....	43
3.1	LOCAL DOS EXPERIMENTOS	43
3.1.1	Lagoa do Peri e a caracterização das águas do manancial.....	43
3.2	SISTEMA PILOTO.....	44
3.2.1	Filtro	47
3.2.2	Gerador de campo magnético	48
3.3	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	49
3.3.1	Etapa 1 – determinação da concentração de coagulante.....	50
3.3.2	Etapa 2 – ensaios no sistema piloto	52
3.3.3	Apresentação dos resultados.....	53
3.3.4	Análise estatística	53
3.4	AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE ECONÔMICA.....	55
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	57
4.1	ENSAIOS ETAPA 1	57

4.1.1	Determinação da concentração ótima de coagulante – ensaios de jar test	57
4.2	ENSAIOS ETAPA 2	58
4.2.1	Acompanhamento do ensaio	58
4.2.2	Turbidez	63
4.2.3	Atendimento às Portaria 2914/2011 e de Consolidação nº 05/2017 do Ministério da Saúde.....	69
4.2.4	Cor Aparente	69
4.2.5	pH	73
4.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA	75
4.3.1	Teste de Normalidade e t-Student	75
4.3.2	Análise de Variância	80
4.3.3	Análise estatística do acompanhamento da turbidez	88
4.3.4	Verificação da depleção do pH	91
4.3.5	Análise estatística para o ponto de aplicação de coagulante	93
4.4	AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE ECONÔMICA	94
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	97
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
7	APÊNDICE	109

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Um dos objetivos do milênio, almejado pela cúpula da Organização Mundial de Saúde (OMS), é a disponibilidade de água para consumo humano em quantidade e qualidade equivalente. Esse desafio é maior em países em ascensão, regiões naturalmente áridas e polos agroindustriais emergentes, onde a demanda por água é fundamental para a produtividade e desenvolvimento econômico (MOLINA et al, 2016).

A tecnologia de tratamento a ser adotada, depende da qualidade da água bruta, dos critérios de qualidade para consumo humano, e das características da comunidade a ser beneficiada. Do ponto de vista tecnológico, água de qualquer qualidade pode ser, em princípio, transformada em água potável (DI BERNARDO et al., 1999).

Praticamente toda água que se encontra na natureza, principalmente em corpos de água superficiais, demanda tratamento para ser utilizada no abastecimento público. Isso se deve à diminuição da qualidade das águas, reflexo das diversas atividades antropogênicas da era contemporânea. Além dos poluentes tradicionais, contaminantes emergentes, tais como pesticidas, fármacos, disruptores endócrinos e seus metabólitos, cosméticos e nanopartículas surgem como novos desafios para os sistemas convencionais de produção de água potável (HESPANHOL, 2015; BENOTTI et al, 2009). Com isso, a baixa qualidade da água bruta impacta diretamente em maior consumo de produtos químicos e geração de resíduos ao final do processo de tratamento (OLIVEIRA, 2010).

Possíveis impactos ambientais provenientes do uso de coagulantes a base de sais inorgânicos são constantemente discutidos. Os resíduos primeiramente são formados nos decantadores das estações de tratamento de água como resultado dos processos de coagulação e floculação e juntamente com a água de lavagem dos filtros (TEIXEIRA; MELO; SILVA, 2005; GUIMARÃES; PÁDUA, 2005). Esses resíduos, ricos em hidróxidos metálicos não biodegradáveis, apresentam grande potencial de poluição e contaminação ao meio ambiente (SCALIZE; DI BERNARDO, 2010). Desta forma, uma das maiores preocupações existentes com respeito à operação de estações de tratamento de água (ETAs) tem sido a necessidade de compatibilização da melhoria do processo de coagulação e a minimização da formação de resíduos oriundos da precipitação de sais metálicos na forma de hidróxidos de alumínio ou ferro.

Outra preocupação é o residual de alumínio na água tratada para consumo humano, Walton (2013), aponta para os malefícios da exposição humana a este metal, correlacionando-o com doenças neurodegenerativas, como, por exemplo, o Alzheimer.

Frente a problemática exposta, busca-se meios que aumentem a segurança e a eficiência do tratamento e a qualidade das águas relacionando o avanço tecnológico e econômico e diminuindo o consumo de produtos químicos. Com esse objetivo, uma alternativa que tem sido avaliada é a aplicação de campos magnéticos para assistirem os processos do tratamento de água de forma potencialmente eficaz (ZAIDI, et al. 2014). O magnetismo pode afetar as propriedades físicas dos contaminantes na água de forma a potencializar sua manipulação e eliminação mais facilmente.

Segundo Zaidi et al. (2014), a aplicação de campo magnético no tratamento das águas tem a capacidade de melhorar o desempenho físico em termos de separação sólido-líquido, principalmente através da coagulação das partículas coloidais. Uma das vantagens da implementação de campos magnéticos em sistemas de tratamento de águas é que se trata de uma tecnologia verde. Segundo Zularisame e Johan (2007), no caso do uso de ímãs permanentes, não há necessidade de reposição e compra de materiais frequentemente. No caso do uso de energia elétrica para geração de campo magnético, é possível utilizar o potencial hidroelétrico presente nos sistemas de abastecimento de água, principalmente nos condutos das adutoras. Segundo Lima (2013), o desenvolvimento e a instalação de uma microcentral hidrelétrica constituído por microturbinas nos condutos é uma forma de aproveitar as altas cargas hidráulicas disponíveis nos sistemas que são frequentemente dissipadas por meio de dispositivos hidráulicos. Ou seja, a geração de campo magnético pode se dar pela utilização de ímãs permanentes, ou pelo reaproveitamento energético no próprio sistema de abastecimento de água. Desta forma, Zaidi et al. (2014), afirma que o emprego e a instalação de dispositivos para geração de campo magnético no sistema de tratamento de água são considerados simples e econômicos.

Por tais razões, este trabalho teve como objetivo principal estudar a aplicação do campo magnético no tratamento de águas para abastecimento público, analisando a capacidade da magnetização em auxiliar a coagulação das águas, substituindo e/ou reduzindo o consumo de produtos químicos coagulantes. O estudo foi realizado em um

sistema em escala piloto, composto por um gerador de campo magnético, unidades de coagulação e filtração.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Estudar a aplicação de campo magnético na coagulação de água de manancial superficial, destinada ao consumo humano.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar a capacidade do campo magnético em auxiliar a remoção de turbidez e cor aparente;
- Analisar a capacidade do campo magnético em suprir a redução de coagulante no tratamento de águas;
- Analisar o melhor ponto de aplicação na coagulação assistida por um campo magnético com diferentes intensidades;
- Analisar a viabilidade econômica da tecnologia.

1.2 HIPÓTESES

Acredita-se que a aplicação de um campo magnético no tratamento de águas poderá potencializar a coagulação, refletindo em melhores condições de remoção de turbidez e cor aparente. Reduzindo o consumo de produtos químicos, melhorando a eficiência da coagulação e filtração e a qualidade final da água.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 TRATAMENTO DE ÁGUA

O tratamento de águas de abastecimento pode ser definido como o conjunto de processos e operações realizados com a finalidade de adequar as características físico-químicas e biológicas da água bruta com padrão organolepticamente agradável e que não ofereça riscos à saúde humana (DI BERNARDO et al, 2003). As tecnologias de tratamento de águas para abastecimento são classificadas como convencionais, etapas tradicionais do processo – coagulação, floculação, decantação e filtração, e não-convencionais, incluindo a filtração direta ascendente e descendente, dupla filtração e a filtração lenta.

2.1.1 Filtração

Segundo a AWWA (1971), a filtração é o processo de passagem de um fluido através de um meio poroso para remoção de matéria em suspensão. No processo de tratamento de água, a matéria a ser removida inclui sedimentos em suspensão, argila, coloides, além de microrganismos, como algas, bactérias e vírus. Além da filtração, de acordo com Ahsan (1995), a floculação da água e a sedimentação podem ocorrer simultaneamente durante o fluxo da água através de um meio granular e dessa combinação resulta o desempenho do meio filtrante nessa etapa.

A eficiência da filtração está relacionada às características da suspensão (tipo, tamanho e massa específica das partículas, resistência das partículas às forças de cisalhamento, temperatura da água, concentração de partículas, potencial Zeta e pH da água), às características do meio filtrante (tipo de material granular, tamanho efetivo, tamanho do maior e menor grão e espessura da camada filtrante) e características hidráulicas (taxa de filtração carga hidráulica disponível e método de controle) (DI BERNARDO; DANTAS, 2005). Os mecanismos responsáveis pela remoção de partículas durante a filtração são complexos e influenciados principalmente pelas características físicas e químicas das partículas, da água e do meio filtrante e do método de operação dos filtros. Comumente, a retenção de impurezas na filtração é considerada o resultado de dois mecanismos distintos, porém, complementares: transporte e aderência.

Segundo Di Bernardo e Dantas (2005), os mecanismos de transporte são responsáveis por conduzir as partículas para as proximidades da superfície dos coletores. Dentre os mecanismos de transporte considerados para explicar a aproximação das partículas aos grãos do meio filtrante, também denominados de coletores, tem-se: impacto inercial, interceptação, sedimentação, difusão e ação hidrodinâmica. Quando próximas à superfície dos grãos do meio filtrante, as partículas são capturadas e aderidas a estes por meio dos mecanismos de aderência. A eficiência da aderência entre as partículas transportadas e os grãos dependerá, principalmente, das propriedades das superfícies de ambos. As partículas podem tanto aderir diretamente às superfícies dos grãos como às partículas previamente retidas. Di Bernardo e Dantas (2005) afirmam que a aderência é atribuída a duas categorias de fenômenos: interação entre as forças elétricas e as de Van der Waals (Interação Combinada) e interação superficial de origem química (Interação Química).

Na filtração ocorrem, além da ação mecânica de coar a água, processos químicos de oxidação, ações biológicas e de ordem bioquímica. O cascalho fino e a areia estão entre os materiais que compõem predominantemente o meio filtrante utilizado, pois são reconhecidos pela sua eficiência e baixo custo. Empregam-se também filtros de antracito e areia e, em alguns casos, filtros de carvão ativado, que potencializam a eliminação de odor, cor, cloro, entre outros (MACINTYRE, 1991).

2.1.2 Filtração Direta Descendente

Segundo Di Bernardo et al. (2003), a filtração direta descendente (FDD) é definida como uma tecnologia de tratamento de água que prescinde da sedimentação ou flotação e pode ser realizada basicamente de duas formas:

1. Filtração direta descendente sem pré-floculação: sistema composto por unidade de mistura rápida e encaminhamento da água coagulada diretamente ao filtro;
2. Filtração direta descendente com pré-floculação: sistema composto por unidades de mistura rápida, de floculação e de filtro.

Na filtração descendente direta sem pré-floculação, a floculação e a retenção de impurezas concorrem num mesmo espaço, ou seja, no

espaço intergranular do meio filtrante, sendo de fundamental importância que a floculação aconteça rapidamente, de modo a permitir a retenção de impurezas desde as primeiras camadas do meio filtrante, aspecto que influenciará a qualidade da água filtrada e a duração da carreira (DI BERNARDO; DANTAS, 2005). Os principais parâmetros que influem no desempenho da filtração direta descendente podem ser agrupados em: qualidade da água bruta, coagulação e produtos químicos, mistura rápida, pré-floculação, meio filtrante e métodos de operação dos filtros.

2.1.3 Coagulação

A água bruta contém em seu interior partículas responsáveis por conferir cor e turbidez às águas. As partículas com diâmetros compreendidos entre 0,01 e 1 μ m são normalmente denominadas por partículas coloidais, dada a sua dimensão e, uma vez que são portadoras de carga elétrica, formam suspensões estáveis e não sedimentam naturalmente por gravidade (ALVES, 2005; BRATBY, 2006). O principal papel da coagulação é a agregação de coloides e adsorção de matéria orgânica dissolvida a esses agregados.

É no processo de coagulação que se assegura a desestabilização dessas partículas através da adição de agentes químicos, recorrendo a energia gravitacional ou mecânica. Nesta fase ocorre a mistura rápida, onde se introduz uma agitação rápida para dispersar o coagulante químico na água e assegurar a desestabilização dos coloides. Os gradientes de velocidade médios de mistura rápida podem variar desde 500 s⁻¹, ou menos, a valores superiores a 7.000 s⁻¹ e o tempo de mistura rápida observado nas ETAs é da ordem de 1 segundo a mais de 3 minutos (DI BERNARDO et al, 2003).

Conforme Di Bernardo e Dantas (2005), os mecanismos envolvidos na coagulação dependem fundamentalmente das características das águas, avaliadas em termos de pH, alcalinidade, cor, turbidez, temperatura, mobilidade eletroforética, força iônica, sólidos totais dissolvidos, distribuição de tamanhos das partículas em estado coloidal e em suspensão. Libânio (2008) explica que a coagulação é obtida pela conjugação de ações físicas e reações químicas, entre o coagulante – usualmente um sal de alumínio ou de ferro – a água e as impurezas presentes, provocando a desestabilização das partículas coloidais e suspensas consistindo essencialmente na coagulação.

Richter (2003) enfatizou que ocorrem duas fases intercaladas compreendendo o processo de coagulação. Numa se tem a coagulação, propriamente dita, onde a adição de coagulantes químicos tem a finalidade de reduzir as forças que mantêm separadas as partículas em suspensão e, num segundo momento da fase de coagulação, a floculação, onde é promovida a colisão entre as partículas previamente desestabilizadas na coagulação, por efeito de transporte fluido, dando origem a partículas maiores, visíveis a olho nu, que são os flocos.

De um modo geral a coagulação ocorre por meio da ação de quatro mecanismos distintos: compressão da camada difusa, adsorção neutralização de cargas, varredura e adsorção-formação de pontes compreende a coagulação. Existem algumas espécies químicas capazes de serem adsorvidas na superfície das partículas coloidais e, se estas possuírem carga contrária à da superfície dos coloides, poderá haver uma desestabilização dos mesmos. Tal mecanismo é muito importante quando o tratamento é realizado por meio das tecnologias de filtração direta, pois não há a necessidade da produção de flocos para posterior sedimentação e sim de partículas desestabilizadas, que serão removidas no meio filtrante (DI BERNARDO et al., 2002; DI BERNARDO, 1993). Os mecanismos de adsorção-neutralização de cargas e adsorção-formação de pontes estão presentes nas tecnologias de tratamento por filtração direta (DI BERNARDO et al., 2003).

De acordo com Di Bernardo e Dantas (2005), em função da concentração de coagulante, do valor do pH da mistura e da concentração de alguns tipos de íons da água, a formação de precipitados ocorrerá. As partículas coloidais presentes comportam-se como núcleos de condensação para esses precipitados, que, desta forma, são removidas por sedimentação. Na coagulação com sais de alumínio ou ferro, podem ser formadas, entre outras, as seguintes espécies de precipitados gelatinosos: $\text{Al}(\text{OH})_3$ (p) e $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (p).

Sulfato de alumínio, cloreto férrico e sulfato férrico têm características ácidas que causam alterações no valor do pH após a adição do coagulante. O nível de variação depende da alcalinidade, que é uma medida do tamponamento do pH de uma solução. Este tamponamento é dominado pelas espécies de carbonos inorgânicos dissolvidos (carbonatos e bicarbonatos). Uma água com alta alcalinidade será efetivamente tamponada e exibirá um limitado decaimento dos valores de pH após a adição do coagulante, enquanto uma fonte com baixa alcalinidade terá os seus valores de pH sensivelmente alterados (BUDD et al., 2004).

2.2 PRODUTOS QUÍMICOS UTILIZADOS NO TRATAMENTO DE ÁGUAS

Os produtos químicos utilizados para o tratamento de água nos sistemas de abastecimento de água para consumo humano podem introduzir à água características indesejáveis e/ou prejudiciais à saúde humana. Os principais produtos utilizados no tratamento de águas estão listados na Tabela 1.

Tabela 1. Produtos químicos utilizados no tratamento de águas.

Coagulação/Floculação	Desinfecção	Fluoretação
Sulfato de Alumínio	Cloro	Fluorsilicato de Sódio
Sulfato Ferroso	Hipoclorito de Sódio	Ácido Fluorsilícico
Sulfato Férrico	Hipoclorito de Cálcio	Fluoreto de Sódio
Cloreto Férrico	Dióxido de Cloro	
Policloreto de Alumínio	Sulfato de Amônia	
	Ozônio	

Fonte: Franco et al. (2017); Teixeira et al. (2006)

2.2.1 Alumínio

O alumínio está presente em reduzidas quantidades nos organismos vivos, porém, no ambiente é bastante abundante, uma vez que representa cerca de 8,0 % da crosta terrestre (PEIXOTO, 2001). Quimicamente, o alumínio caracteriza-se por ser altamente reativo, ter elevada afinidade com o hidrogênio na fase líquida e por ter uma forte tendência para formar compostos de óxido de alumínio (Al_2O_3) (MANAHAN, 2000).

O alumínio no meio ambiente está presente por origens naturais ou antropogênicas. Os processos naturais são os principais responsáveis pela sua redistribuição no ambiente, os principais são: especiação química, fluxos hidrológicos, fatores temporais e espaciais relacionados com a interação solo-água e a composição e estrutura geológica do local (IMRAY et al., 1998). A contribuição antropogênica é feita através da deposição de emissões atmosféricas geradas nos processos industriais (KREWSKIAB et al., 2007), por escoamentos advindos das atividades mineiras (HEMAT, 2009), lixiviação e erosão dos solos e pela emissão de efluentes residuais domésticos e industriais (MENDES; OLIVEIRA, 2004).

2.2.1.1 Potenciais causas da presença de alumínio nas águas de abastecimento público

Devido a piora na qualidade da água bruta, o tratamento de águas para consumo humano tem exigido cada vez mais a utilização de produtos químicos, principalmente, coagulantes (PORTELLA et. al, 2003). De acordo com Oliveira et al. (2014), essa é uma das principais preocupações envolvendo o tratamento de águas, uma vez que, utiliza-se quantidades muito grandes de produtos químicos. Os principais coagulantes usados são: sulfato de alumínio, policloreto de alumínio (PAC), sulfato férrico, sulfato ferroso clorado e cloreto férrico (TEIXEIRA et al., 2006).

A presença de alumínio nas águas tratadas é frequentemente referida como alumínio residual e consiste em espécies na forma particulada e dissolvida. Segundo Rosalino (2011), a origem da presença de alumínio na água tratada pode ser devida à superdosagem de coagulantes à base de alumínio no tratamento de água, à presença de elevados teores de alumínio nas origens da água utilizada para abastecimento público, eficiência da mistura rápida, eficiência do processo de filtração, monitoramento inadequado, falta de pessoal especializado e erro humano.

2.2.1.2 Saúde pública e exposição humana

A toxicidade de um elemento resulta de três fatores: grau de suscetibilidade de cada indivíduo, duração da exposição e concentração do tóxico biodisponível – fração absorvida através da corrente sanguínea, onde, posteriormente, ocorre a acumulação no cérebro e outros órgãos (National Environmental Health Forum, 1995). A biodisponibilidade do alumínio depende da sua predisposição para ser absorvido, a qual é fortemente influenciada pela sua solubilidade.

Apesar dos alimentos serem a principal entrada de alumínio no corpo humano, existe uma maior preocupação em relação àquele que está contido nas águas de consumo público. Esta preocupação reside no fato do alumínio estar presente na água em formas mais biodisponíveis e por isso facilitar a sua absorção pelo organismo (WHO, 2003; HEALTH CANADA, 1998). Estima-se que a contribuição da água para consumo varia entre 3 e 8 % do consumo total diário de alumínio.

No homem, o consumo via oral de concentrações não superiores a $7,2 \text{ mg.d}^{-1}$ são toleradas sem qualquer manifestação causal de curto

prazo (Institut de Veille Sanitarie, 2003). No entanto, o consumo de grandes quantidades de alumínio pode gerar um variado leque de efeitos nocivos, como ulceração de lábios, anemia microcítica, osteomalecia, intolerância à glicose devida a uremia e parada cardíaca (DE BASTOS, 2007).

O primeiro estudo que demonstrou a neurotoxicidade do alumínio foi conduzido por Siem e Döllken e data de mais de 100 anos (FLATEN, 2001). A encefalopatia é uma das principais manifestações observadas que indicam a neurotoxicidade do alumínio uma vez que prova que este elemento é capaz de se acumular no cérebro e induzir degeneração neurofibrilar e morte neuronal (RONDEAU et al., 2000).

2.2.2 Cloro

O cloro foi preparado pela primeira vez em 1774, por Carl Wilhelm Scheele (1742-1786), fazendo reagir ácido clorídrico com dióxido de manganês (PEIXOTO, 2003). Scheele considerava-o como sendo uma substância composta. Quase 40 anos depois, em 1810, Humphry Davy (1778-1829) mostrou que ele não podia ser decomposto e que o próprio ácido clorídrico era, na verdade, um composto de hidrogênio e cloro. Reconhecendo-o como um novo elemento, deu a ele o nome de cloro. Nas condições ambientes, ele é um gás amarelo esverdeado, tóxico, de forte cheiro, poderoso irritante dos olhos e do sistema respiratório.

Estima-se que seu teor na crosta terrestre é de 0,13 g/kg (PEIXOTO, 2003). O cloro livre já foi encontrado em gases vulcânicos, onde é mais comum sob a forma de HCl. O íon cloreto, Cl^- , é o principal íon negativo encontrado nos oceanos (cerca de 19 g/kg). É também encontrado em mares interiores, como o Mar Cáspio e o Mar Morto e, também, no grande Lago Salgado de Utah, EUA. O íon cloreto está presente nos fluidos dos corpos dos animais superiores, inclusive dos seres humanos. Como ácido clorídrico, ele está presente no suco gástrico, onde o pH pode chegar a ser entre 1 e 2.

2.2.2.1 Processos de Desinfecção

Os processos de desinfecção têm como objetivo a destruição ou inativação de organismos patogênicos, capazes de produzir doenças, ou de outros organismos indesejáveis. A sobrevivência desses organismos

na água depende, não só da temperatura, mas também de outros fatores ecológicos, fisiológicos e morfológicos, tais como: pH, turbidez, oxigênio, nutrientes, competição com outros organismos, resistência a substâncias tóxicas, habilidade na formação de esporos (RICHTER; NETTO, 2003).

A morte de organismos pela ação de um desinfetante, fixando-se os outros fatores, é proporcional à concentração do desinfetante e ao tempo de reação. Deste modo, pode-se utilizar altas concentrações e pouco tempo, ou baixas concentrações e um tempo elevado. Os desinfetantes químicos necessitam ser uniformemente dispersos na água, para garantir uma concentração uniforme; portanto, a agitação favorece a desinfecção. As características necessárias para um bom desinfetante podem ser resumidas em (RICHTER; NETTO, 2003):

- Capacidade de destruir, em um tempo razoável, os organismos patogênicos a serem eliminados, na quantidade em que se apresentam e nas condições encontradas na água;
- O desinfetante não deve ser tóxico para o homem e para os animais domésticos e, nas dosagens usuais, não deve causar à água cheiro e gosto que prejudiquem o seu consumo;
- Seu custo de utilização deve ser razoável, além de apresentar facilidade e segurança no transporte, armazenamento, manuseio e aplicação;
- A concentração na água tratada deve ser fácil e rapidamente determinável;
- Deve produzir concentração residuais resistentes na água, de maneira a constituir uma barreira sanitária contra eventual recontaminação antes do uso.

2.2.2.2 Formação de Trihalometanos

Os trihalometanos são compostos que se formam durante o processo de tratamento das águas destinadas ao consumo humano, sendo subprodutos da desinfecção. A reação dá-se entre o cloro utilizado para a desinfecção e a matéria orgânica presente na água bruta que vai sofrer o processo de tratamento. As substâncias que se formam são variadas sendo as principais o clorofórmio, o bromodichlorometano, o dibromoclorometano e o bromofórmio.

Estudos realizados no Canadá considerando a cloração de água bruta (SANTOS, 1989) indicaram uma associação entre a concentração

de cloro e o câncer de estômago, e entre a quantidade de carbono orgânico (COT, indicador de THM) e o câncer do intestino grosso em homens. Também houve associações positivas entre o clorofórmio na água tratada e o risco de morte por câncer de cólon (homens e mulheres), câncer de estômago, entre dosagem de cloro e câncer retal (homens e mulheres) e câncer de tórax. Para mulheres também houve associação entre dosagem de cloro ou água clorada sujeita a contaminação por substâncias orgânicas e câncer do cólon e cérebro.

2.2.3 Flúor

O flúor é um gás amarelo-pálido e no estado líquido tem cor amarelo-canário, deriva do fato de ele ser encontrado no mineral fluorespato, que é basicamente o fluoreto de cálcio (CaF_2) (PEIXOTO, 1998). Durante muito tempo, a alta reatividade do flúor e a estabilidade de seus compostos impediram a sua obtenção, ou seja, a descoberta do elemento flúor. O flúor é extremamente reativo, especialmente quando em contato com um material orgânico.

2.2.3.1 Fluoretação da água de consumo humano

A fluoretação da água para consumo humano é uma medida preventiva de comprovada eficácia, que reduz a prevalência de cárie dental entre 50% e 65% em populações sob exposição contínua desde o nascimento, por um período de aproximadamente dez anos de ingestão da concentração ótima (BRASIL, 2012). O método é econômico e apresenta um baixo custo "per capita". O serviço de saúde pública dos Estados Unidos calcula que, para cada dólar despendido na fluoretação da água, 36 dólares são economizados no tratamento da cárie (BRASIL, 2012). O benefício atinge toda população sem distinção de ordem econômica, social ou educacional. Durante toda a vida do indivíduo os fluoretos provocam efeitos benéficos à saúde e protegem os dentes contra a cárie.

2.2.3.2 Toxicidade do Flúor

Embora haja consenso da relação existente entre o uso do flúor e a redução de cárie dentária, pode-se afirmar que o flúor é uma substância tóxica quando ingerido em altas concentrações (BRASIL, 2012). Os efeitos desencadeiam distúrbios gástricos reversíveis e

redução temporária da capacidade urinária, fluorose dentária ou esquelética e, eventualmente, até mesmo a morte, uma vez que, estão diretamente relacionados à concentração, tempo de ingestão e idade (WHITFORD, 1996).

A quantidade de ingestão diária de flúor, normalmente aceita como ideal para o controle da cárie e segura para a prevenção de fluorose, é de 0,05 a 0,07 mg de F/kg massa corporal (RAMIRES E BUZALAF, 2005) embora ainda sejam necessários mais estudos para se determinar precisamente essa dose.

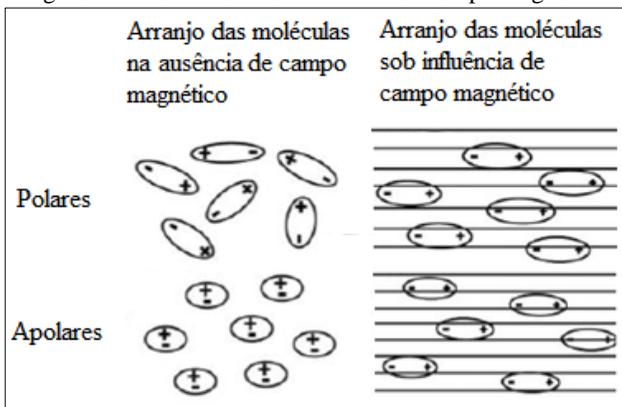
A concentração de flúor no sangue de uma pessoa em jejum que faz ingestão de água fluoretada é cerca de 0,019 mg F/L. Em regiões com altas concentrações de flúor na água de abastecimento, são observadas importantes variações na concentração plasmática de flúor dos habitantes. A concentração de flúor no plasma e nos fluidos intersticiais deve ser similar e varia entre 0,01 a 0,05 mg F/L (RAMIRES E BUZALAF, 2005).

2.3 MAGNETISMO

Os fenômenos magnéticos foram observados, inicialmente, há pelo menos cerca de 2500 anos, em fragmentos de minério de ferro imantados nas proximidades da antiga cidade de Magnésia, atualmente chamada de Manisa no oeste da Turquia (YOUNG e FREEDMAN, 2009). Por sua vez, as aplicações de campo magnético são conhecidas há séculos e os conceitos de indução magnética foram introduzidos por Michael Faraday em 1830 (COLIC e MORSE, 1999). Embora as aplicações de campo magnético fossem perseguidas para provar as teorias de Faraday, era escassa a atenção de pesquisadores em aplicar na indústria este conhecimento (SHEPARD et al., 1995).

O efeito do campo magnético está intimamente associado à existência de carga elétrica em movimento: uma carga que se desloca é capaz de produzir um campo magnético, e uma carga que se mova na região de um campo magnético terá seu deslocamento afetado por ele (SOARES, 2013). Segundo Zaidi et al. (2014), na ausência de campo magnético, as moléculas polares e apolares são posicionadas aleatoriamente. Porém, a pesquisadora esclarece que estes cenários se alteram quando as moléculas estão sob influência de um campo magnético. A Figura 1 ilustra este fenômeno.

Figura 1. Moléculas sob influência de campo magnético.



Fonte: adaptado de Zaidi et al. (2014).

Descreve-se um material, partícula ou molécula magnetizada pela sua magnetização M , que é definida como o momento de dipolo magnético resultante por unidade de volume do material (TIPLER e MOSCA, 2009). A magnetização M pode ser expressa como (Equação 1):

$$M = X_v \times H \quad \text{Equação 1}$$

sendo:

H é igual ao campo magnético aplicado [$A.m^{-1}$]; M é a magnetização de uma partícula depois da exposição a H [$A.m^{-1}$]; X_v é a suscetibilidade magnética do material.

A suscetibilidade magnética é uma característica intrínseca do material e está relacionada ao número de elétrons desemparelhados por unidade de massa (TIPLER e MOSCA, 2009). Se a suscetibilidade magnética é quase zero, o material responde muito pouco ao campo magnético externo. Para materiais paramagnéticos, a suscetibilidade magnética é um número positivo e pequeno que depende da temperatura. Para materiais diamagnéticos ela é uma constante pequena e negativa, independente da temperatura, já materiais ferromagnéticos têm valores muito grandes e positivos (FARIA e LIMA, 2005; TIPLER e MOSCA, 2009; ZAIDI et al., 2014). Nos materiais denominados ferromagnéticos e paramagnéticos, este alinhamento eletrônico ocorre no mesmo sentido do campo externo aplicado, já nos materiais diamagnéticos, como a água, o alinhamento ocorre no sentido oposto ao

campo aplicado (COSTA, 2006). A Tabela 2 apresenta a suscetibilidade magnética de vários materiais paramagnéticos, diamagnéticos e ferromagnéticos.

Tabela 2. Suscetibilidade magnética a 20 °C.

Material	X_v
Alumínio	$2,3 \times 10^{-5}$
Cobre	$-0,98 \times 10^{-5}$
Ouro	$-3,6 \times 10^{-5}$
Sódio	$-0,24 \times 10^{-5}$
Água	$-0,91 \times 10^{-5}$
Hidrogênio	$-9,9 \times 10^{-9}$
Oxigênio	2090×10^{-9}
Níquel	$\sim 6 \times 10^2$
Ferro puro	$\sim 2 \times 10^5$

Fonte: TIPLER e MOSCA, 2009.

Zaidi et al. (2014) afirma que para compreender os mecanismos magnéticos é necessário conhecer, além da magnetização, outros três fatores: gradiente magnético, força de Lorentz e memória magnética.

2.3.1 Gradiente magnético

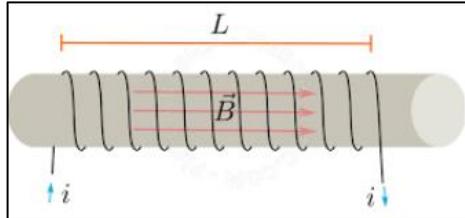
Oshitani et al. (1999) afirma que a eficácia de uma aplicação magnética em qualquer processo depende, não apenas da energia magnética em si, mas também da concentração desta força ao longo do dispositivo magnético. Sendo que, o parâmetro mais crítico é a taxa de mudança da força do campo magnético através da distância, esta relação é chamada de gradiente magnético (Equação 2).

$$G = \frac{\Delta H}{\Delta x} \tag{Equação 2}$$

Quando o campo magnético é uniforme, ou seja, ele não sofre variação ao longo do dispositivo magnético, por exemplo, no interior de solenoides ou bobinas (Figura 2), o gradiente magnético é igual a zero (OSHITANI et al., 1999). Portanto, as partículas são magnetizadas e alinhadas de acordo com o campo magnético exposto. Contudo, neste caso, as partículas não são expostas a uma força magnética que assegure

a sua separação da solução, e sim, são criadas condições para promover a sua agregação (ZAIDI et al., 2014).

Figura 2. Solenoide.

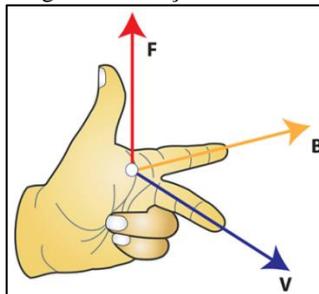


Fonte: autor.

2.3.2 Força de Lorentz

Outro fator significativo que influencia nas aplicações magnéticas é a força de Lorentz. Esta força afeta partículas carregadas movendo-se através de um campo magnético. A força aumenta linearmente de acordo com a carga e velocidade da partícula, como também, de acordo com a componente do vetor da força do campo magnético atuante (BAKER e JUDD, 1996). Conforme ilustrado na Figura 3, quando as partículas carregadas fluem na direção perpendicular à direção do campo magnético num mesmo plano, produzem uma força, denominada de força de Lorentz, que também é perpendicular à direção na qual as partículas carregadas fluem (SPIEGEL, 1998). A força de Lorentz atua no plano Z. As partículas desequilibradas se movem também na direção desta força, proporcionando colisões e consequentemente, este movimento faz com que as partículas se agreguem (VICK, 1991).

Figura 3. Força de Lorentz.



Fonte: adaptado de Youg e Freedman (2009).

2.3.3 Memória magnética

A memória magnética pode ser definida como um período em que as partículas podem sustentar as suas propriedades de magnetização depois de serem expostas a campos magnéticos de certa intensidade (ZAIDI et al. 2014). Fenômenos de memória magnética foram relatados por Higashitani et al. (1992) que variaram entre 10 minutos e Higashitani et al. (1993) que relatou ter observado os efeitos por até 150 horas. Em outra pesquisa, Higashitani et al. (1995) descobriu que a memória pode ser observada ao longo de 6 dias após a exposição de uma solução de CaCO_3 . Ao explicar a memória magnética, Lychagin (1974) postulou que quando um campo magnético afeta moléculas de água, ele muda a sua energia cinética, sendo que estas ocorrências alteram o impulso das moléculas, e assim, causam agregação de partículas.

2.4 TRATAMENTO MAGNÉTICO DA ÁGUA

A tecnologia magnética é uma técnica de tratamento físico que tem sido relatada por afetar a coagulação de várias partículas em suspensão, como ferro, látex de poliestireno e outras partículas (HIGASHITANI et al., 1992). Segundo Wang et al. (1994), a coagulação ocorre quando as interações de curto alcance de London-Van der Waals e as de longo alcance (forças magnéticas) superam a repulsão da camada elétrica de estabilização.

As primeiras evidências de possíveis aplicações magnéticas no tratamento das águas foram obtidas há algumas décadas por cientistas russos (CHHATWANI, 2011). Quando a água passava pelas tubulações de uma caldeira ou máquinas de motores, os depósitos minerais da água aderiam as paredes dos tubos. Ao longo do tempo, a passagem tornou-se mais estreita e a entrega de água era reduzida. Ao estudar esse problema, os cientistas perceberam que os depósitos minerais não aderiam aos lados dos tubos que transportavam água magnetizada. A partir destas descobertas, as aplicações de campo magnético começaram a serem estudadas.

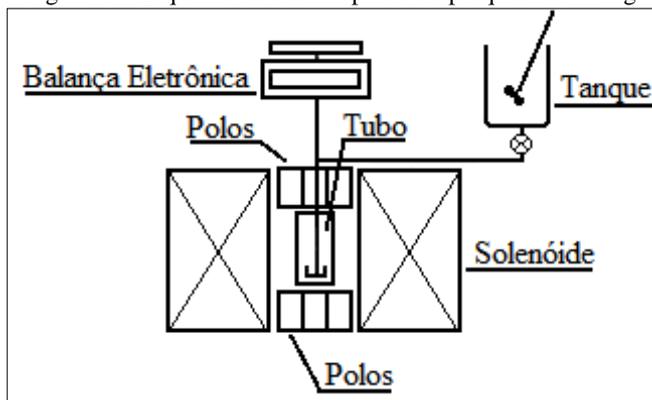
Higashitani (1996) investigou os efeitos do campo magnético sobre a estabilidade das partículas coloidais nanomagnéticas e sugeriu que o campo magnético afeta a estabilidade coloidal alterando a estrutura das moléculas de água e das partículas presentes no meio. Okada et al. (1991) em estudo que também investigava a ação da

magnetização na coagulação, porém, de plaquetas, afirmou que as partículas foram alinhadas perpendicularmente à direção do campo aplicado, resultando assim no aumento da coagulação

Kochmarsky (1996) estudou o efeito da influência do campo magnético sobre um subsistema íon-coloidal de soluções aquosas. Segundo o autor, a energia da interação do dipolo magnético das partículas coloidais do tipo magnetita foi suficiente para a sua floculação e concentração em áreas de elevado gradiente de campo magnético.

O aumento da coagulação também foi investigado por Wang et al. (1994), que estudaram a coagulação de partículas minerais com propriedades magnéticas fracas. Segundo os autores, através do alinhamento das partículas foi possível demonstrar o aumento na taxa de agregação tratando uma solução estática. A Figura 4 ilustra de forma esquemática o sistema piloto construído pelos pesquisadores.

Figura 4. Esquema do sistema piloto do pesquisador Wang.



Fonte: adaptado de Wang et al. (1994).

Gabrielli et al. (2001) constataram que o tratamento magnético de águas se mostrou eficiente na prevenção da incrustação. Em seus experimentos foi estabelecida uma relação empírica da variação da concentração de cálcio ionizado em função do comprimento do dispositivo e da velocidade de fluxo da água. No entanto, a eficácia do tratamento magnético dependeu do material usado para construir a tubulação onde a água flui através do dispositivo. Segundo os autores, isso pode ser um indicativo do fenômeno eletro-cinético nas proximidades da parede do tubo para gerar núcleos de carbonato de

cálcio e até mesmo promover o crescimento de partículas de cristais no interior do líquido.

Do ponto de vista das alterações químicas sofridas pela água, tem-se na literatura, assim como também observou Barboza (2002) achados envolvendo o aumento da solubilidade de sais, com o abrandamento de águas duras (WANG et al, 1997); (DONALDSON; GRIMES, 1988), (BARRET; PARSONS, 1988), (BENEJAD; ABDOSALEHI, 2009), modificações do ponto de fusão de soluções aquosas (FUJIWARA; NISHIMOTO, 1992), bem como de água deionizada (ALEKSANDROV et al., 2000).

Outros achados relacionados a água submetida a campo magnético incluem alterações de entalpia de solução (ZHAO *et al*, 1995), aumento da absorção e adsorção da água em sólidos (OZEKI et al, 1996), aumento na condutividade elétrica (PORTO, 2004); (ZHOU *et al*, 2000), aumento do potencial de hidrogênio (pH), dependendo da quantidade de minerais na água (COEY; CASS, 2000) ou manutenção dos valores observados (SILVA, 2015); (AL MUFARREJ *et al*, 2005), bem como aumento na quantidade de oxigênio dissolvido (BALIEIRO *et al*, 2013); (INSUA *et al*, 2009); (COEY; CASS, 2000). Há também relatos experimentais acerca das alterações na tensão superficial da água submetida a campos magnéticos (CAI; YANG; ZHU, 2009); (AMIRI; DADKHAH, 2006).

Entretanto, as evidências fornecidas por Higashitani et al. (1992) dos efeitos de um campo magnético sobre a ocorrência de coagulação discorda das observações acima exemplificadas. A taxa de coagulação foi reduzida em 10 % quando um campo magnético de 400 mT foi exposto por 10 minutos. O aumento do efeito não foi registrado, mesmo quando a intensidade magnética foi aumentada.

2.4.1 Outras aplicações do magnetismo no tratamento de águas

O magnetismo é uma propriedade física única que facilita aplicações, tais como: a purificação de água, afetando as propriedades físicas dos contaminantes (ZAIDI et al. 2014). Em combinação com outros processos, pode melhorar a eficiência da tecnologia de tratamento (AMBASHTA; SILLANPAA, 2010).

Nos últimos anos, o tratamento magnético da água vem sendo estudado principalmente para o combate da incrustação (SCHALY, 2015). Porém, recentemente, a aplicação de campo magnético

juntamente com nanopartículas de propriedades magnéticas vem despertando atenção.

Hatamie et al. (2016), avaliou um material formado por nanopartículas com propriedades magnéticas como um novo coagulante. Os pesquisadores apontaram as vantagens da tecnologia em separar os sólidos da solução, bem como a facilidade de remover o material com aplicação de um campo magnético externo. Os resultados evidenciaram a capacidade de remover turbidez das águas e remoção de coliformes totais em até, respectivamente, 94,5 % e 98,8 %. Porém, os resultados não foram conclusivos quanto aos parâmetros dureza e alcalinidade.

Santos et al. (2015) estudaram a eficácia da coagulação/floculação utilizando um coagulante natural derivado da moringa. O coagulante foi funcionalizado com nanopartículas magnéticas de óxido de ferro, para obtenção de flocos que fossem atraídos por um campo magnético externo, permitindo uma ágil decantação e separação do líquido clarificado. Os pesquisadores afirmaram que a tecnologia foi capaz de reduzir os valores de cor aparente e turbidez, reduzindo o tempo de sedimentação. A remoção de turbidez e cor aparente máxima obtida com a exposição de campo magnético foi igual a, respectivamente, 91 % e 82,5 %. Enquanto que a remoção de turbidez e cor aparente máxima alcançada nos ensaios sem a exposição de campo magnético foi igual a, respectivamente, 89 % e 81 %.

Franco Jr et al. (2016), buscaram associar o tratamento de água residuária empregando cloreto de alumínio com a presença de um campo magnético disposto em duas configurações, além de uma configuração sem campo magnético. Os experimentos foram feitos com objetivo de analisar a remoção ou acompanhar os seguintes parâmetros: turbidez, pH, condutividade, demanda química de oxigênio, sólidos totais e oxigênio dissolvido. A pesquisa foi feita a partir de três reatores, sendo dois com exposição de campo magnético a partir de um ímã (sendo um ímã disposto no fundo do reator e outro na lateral) e um reator sem a exposição de campo magnético. Os autores comprovaram que a turbidez do sistema foi reduzida com o uso do coagulante, bem como com a aplicação do campo magnético em quaisquer das duas configurações do reator. A turbidez final do reator com campo magnético disposto no fundo foi igual a aproximadamente 15 NTU, enquanto que o reator sem campo magnético, 35 NTU. Entretanto, não foi recomendado um período muito longo, aproximadamente 24 horas, de decantação, pois, foi verificado o retorno das partículas para o seio da

solução. De forma geral, todos os parâmetros obtiveram eficiência melhor nos cenários onde foi exposto o campo magnético.

3 METODOLOGIA

3.1 LOCAL DOS EXPERIMENTOS

As investigações experimentais foram conduzidas no Laboratório de Águas da Lagoa do Peri (LALP), localizado junto à Estação de Tratamento de Águas da Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN) e, é administrado e mantido pela Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. No LALP, são realizadas pesquisas envolvendo processos e operações que permitem o conhecimento e emprego de tecnologias, através de diversos sistemas piloto de tratamento de água. Na Figura 5 é possível observar a localização do Laboratório de Águas da Lagoa do Peri.

Figura 5. Localização do Laboratório de Águas da Lagoas do Peri.



Fonte: autor.

3.1.1 Lagoa do Peri e a caracterização das águas do manancial

A bacia hidrográfica da Lagoa do Peri localiza-se no sul da Ilha de Santa Catarina, na área do Parque da Lagoa do Peri. Possui uma área de drenagem de aproximadamente 20,3 km² e destaca-se por ser o maior manancial de água potável da Ilha, portanto, sua utilização apresenta-se naturalmente como opção de abastecimento. O manancial, utilizado pela CASAN, é responsável por abastecer o sul e a costa leste da cidade de Florianópolis (OLÍMPIO, 1996). A Lagoa é alimentada pelos rios Cachoeira Grande e Ribeirão Grande. A mesma mantém contato

permanente com o mar, através de um canal de despejo. Atualmente, a Lagoa é utilizada tanto para fornecimento de água para consumo humano, quanto para atividades de esporte e lazer.

Diversos trabalhos foram desenvolvidos na Lagoa do Peri, sendo, assim, torna-se possível obter uma prévia caracterização das águas do manancial (DI BERNARDO et al., 2003; MONDARDO, 2004; MELO FILHO, 2006; MARNOTO, 2008; MARNOTO et al., 2008; MONDARDO et al., 2008; MONDARDO, 2009). A Tabela 3 apresenta a caracterização das águas da Lagoa do Peri ao longo dos anos de estudo. Durante o período, os valores máximos observados de turbidez e cor aparente foram iguais a, respectivamente, 10,4 NTU e 120 uH. Em contrapartida, os valores mínimos foram, respectivamente, 1,20 NTU e 13 uH.

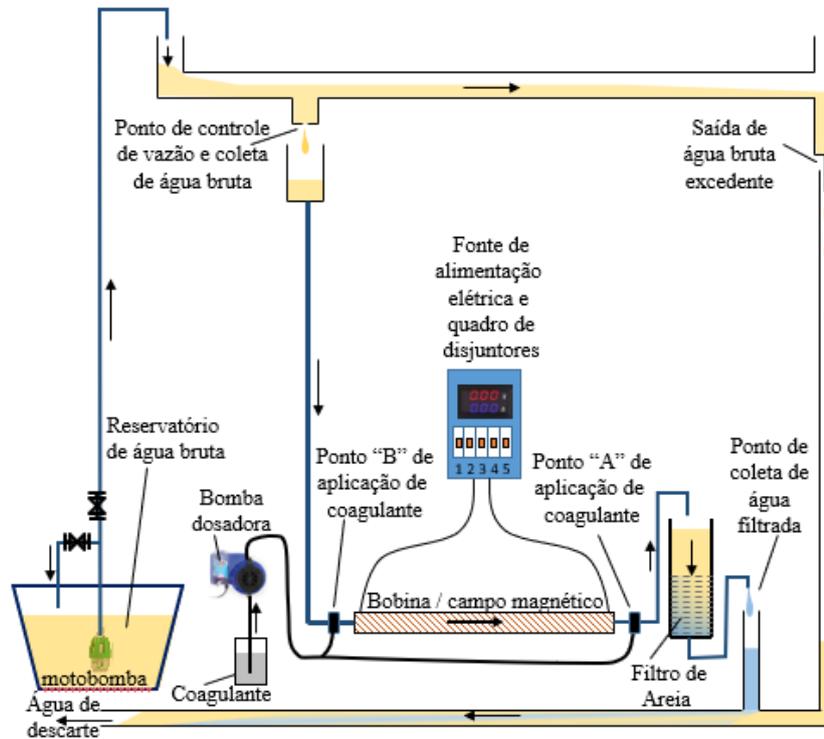
3.2 SISTEMA PILOTO

A Figura 6 apresenta o esquema do sistema piloto. Dentre as partes constituintes mais importantes do sistema estão: reservatório de água bruta, bomba d'água submersível, bomba dosadora de coagulante, gerador de campo magnético e o filtro. Primeiramente, o reservatório de água bruta é abastecimento permanentemente por uma instalação hidráulica que realiza a captação diretamente da Lagoa do Peri. No mesmo foi instalado uma bomba d'água submersa vibratória para alimentação do sistema piloto. Ocorreu a coleta de água bruta para o controle dos parâmetros: turbidez, cor aparente e pH. Após a passagem pelo ponto de controle da vazão e coleta de água bruta, a água chega ao primeiro ponto de aplicação de coagulante, posteriormente, à tubulação de aço galvanizado, logo em seguida, ao segundo ponto de aplicação de coagulante, e, por fim, é direcionada para o filtro. Observa-se que os dois pontos de aplicação de coagulante não operaram conjuntamente, sendo que, cada ponto de aplicação se refere a uma determinada configuração testada, ou seja, quando o ponto de aplicação A foi utilizado, não se utilizou o ponto de aplicação B, assim como o contrário.

Tabela 3. Caracterização das águas da Lagoa do Peri.

Parâmetros	dez/2000 – fev/2003 Di Bernardo (2003)		jun/2001 Mondardo (2004)		abr/2005 Melo Filho (2006)		fev-mar/2006 Melo Filho (2006)		abr – mai/2008 Mondardo et al. (2008)		jun – jul/2008 Marnoto et al. (2008)	
	V _{MÍ} _N	V _{MÁX}	V _{MÍ} _N	V _{MÁ} _X	V _{MÍ} _N	V _{MÁ} _X	V _{MÍ} _N	V _{MÁ} _X	V _{MÍ} _N	V _{MÁ} _X	V _{MÍ} _N	V _{MÁX}
Turbidez (NTU)	3,2	8,7	2,28	10,4	4,82	7,10	4,98	6,42	0,59	7,61	1,20	7,61
Cor Ap. (uH)	45	112	25	120	59	91	75	86	13	89	15	95
Cor Ver. (uH)	5	10	3	14	6	8	6	7	6	33	4	41
pH	6,3	8,5	6,2	8,3	6,7	6,9	6,5	6,9	6,7	7,7	6,44	7,75
Temperatura (°C)	23	31	18	31	*	*	*	*	20	26	15,1	26,0
STD (mg.L ⁻¹)	*	*	22	38	38	40	32	38	28	50	*	*
Cond.E. (uS.cm ⁻¹)	53	80	47	80	76	80	64	76	56	72	*	*
COT (mg.L ⁻¹)	5,5	7,5	4,5	7,1	7,0	9,8	7,5	9,6	*	*	*	*
Clorof.a. (ug.L ⁻¹)	3,76	54,68	2,7	41,4	27,9	36,6	24,2	37,2	*	*	*	*
Cianobac.(cel.L ⁻¹)	*	*	4 mil	30 mil	11 mil	15 mil	10 mil	11 mil	*	*	*	*

Figura 6. Esquema do sistema piloto.



3.2.1 Filtro

Durante a pesquisa realizou-se os ensaios utilizando um filtro de escoamento descendente. O mesmo possuía 1,20 m de altura e 60 cm de espessura de camada filtrante. O filtro foi confeccionado em tubo cilíndrico de PVC com 5 mm de espessura e 200 mm de diâmetro, tendo volume total de 37,70 L. A granulometria do meio filtrante foi a recomendação para os filtros de laboratório de areia (DI BERNARDO, 2003). A Tabela 4 reúne os dados adotados e determinados para o dimensionamento. O fundo do filtro foi constituído por uma peça hidráulica, CAP de 200 mm, com uma abertura central de 20 mm, sendo que uma tela de poliéster com 54 fios, separava o meio filtrante da água.

Tabela 4. Dimensionamento do filtro.

Taxa de Filtração	54	$\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$
Área da seção do filtro	0,03	m^2
Vazão de trabalho	70	$\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$
Espessura da camada filtrante	60	cm
Tempo de detenção hidráulica	10	min
Granulometria da areia	0,42 – 0,85 (0,5)	mm

3.2.1.1 Limpeza do filtro

A limpeza do filtro era realizada no final de cada ensaio. Foi instalado um sistema de retrolavagem alimentado por água tratada proveniente da estação através de uma mangueira que injetava água no fundo do filtro. Para este sistema considerou-se o recomendado por Di Bernardo et al. (2003), velocidade ascensional de $0,70 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, com duração de 20 minutos.

3.2.1.2 Coagulação

Para aplicação de coagulante no sistema piloto foi utilizado uma bomba dosadora, marca Exatta, modelo EX1201. O coagulante empregado na pesquisa foi o policloreto de alumínio (PAC), 10,5% de Al_2O_3 . Como mencionado anteriormente, aplicado em dois pontos no sistema piloto. A mistura rápida ocorreu no interior de uma peça hidráulica, tê de 20 mm de diâmetro e 54 mm de comprimento, onde o mesmo sofreu, anteriormente à instalação, um preenchimento para que fosse reduzida a sua seção transversal para 8 mm de diâmetro. Portanto,

considerando a vazão de trabalho e as dimensões da peça, a mistura rápida ocorreu num intervalo de tempo de aproximadamente 1s.

3.2.1.3 Controle de vazão

Para realizar o efetivo controle da vazão, considerou-se primeiramente, que o escoamento seria por descarga com orifício e carga constante. Através da Equação 3 foi feito o dimensionamento da abertura necessária que a peça hidráulica utilizada, plug de 20 mm, deveria ter.

$$Q = C_d \cdot S \cdot \sqrt{2gh} \quad \text{Equação 3}$$

Para o cálculo, considerou-se as seguintes informações (Tabela 5):

Tabela 5. Dados para controle da vazão.

Vazão (L.h ⁻¹)	70,0
Cd	0,83
Gravidade (m.s ⁻²)	9,81
h (cm)	6,0

E, assim, chegou-se a abertura de 4,90 mm², com diâmetro de 2,5 mm.

3.2.2 Gerador de campo magnético

O campo magnético para os ensaios foi gerado por um sistema de bobinas. Construiu-se uma bobina de 1,5 m e dividiu-se em três seções de 0,5 m cada. Fez-se esta divisão para que fosse possível gerar três intensidades diferentes de campo magnético. Utilizou-se como suporte uma tubulação de aço galvanizado com diâmetro externo igual a 48,5 mm e interno, 41,5 mm. A escolha por este material foi em função da recomendação de Gabrielli et al. (2001). Segundo o pesquisador, entre os materiais que analisou - PVC, aço e cobre - o aço é o que apresenta a menor interferência na exposição do campo magnético ao fluido. Em torno da tubulação, passou-se fio de cobre do tipo esmaltado, 14 AWG, e, também foi utilizado uma fonte elétrica de 12V e 12 A. A Tabela 6 apresenta as características gerais do dispositivo.

Tabela 6. Características gerais do dispositivo.

Características	Bobina		
	1	2	3
Comprimento (m)	0,50	1,00	1,50
Número de espiras	1176	2353	3529
Resistência (Ω)	1,50	3,00	4,50
Corrente elétrica (A)	8	4	3
Potência elétrica (W)	96	48	36
Campo magnético (mT)	24	12	8
Tempo de contato (s)	35	70	105

Observa-se que a bobina 1 equivale a apenas uma parte das seções que foram divididas. A bobina 2 equivale a duas seções. E por fim, a bobina 3, é equivalente a bobina inteira. As Figuras 7 e 8 apresentam, respectivamente, o sistema de bobinas construído e o esquema de ligação dos disjuntores.

Para esta pesquisa os valores de campo magnético foram escolhidos em função das intensidades que Gabrielli et al. (2001) evidenciou o efeito da magnetização na coagulação de partículas, de 0 a 160 mT, e também em função de limitações técnico-construtivas.

3.3 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

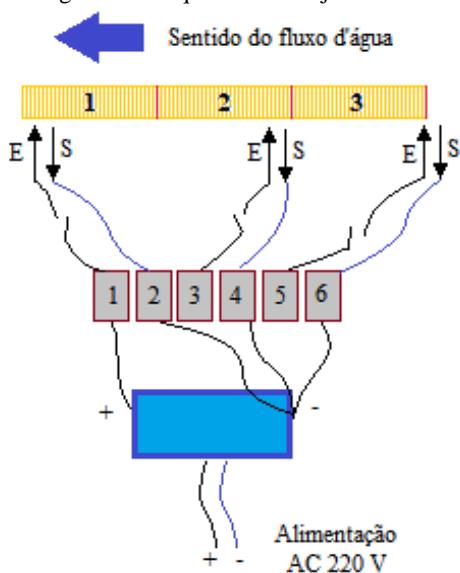
Para organizar o plano de atividades experimentais, as ações foram divididas em duas etapas:

- Etapa 1: determinação da concentração ótima de coagulante;
- Etapa 2: ensaios no sistema piloto.

Figura 7. Sistema de bobinas.



Figura 8. Esquema dos disjuntores.



Fonte: autor.

3.3.1 Etapa 1 – determinação da concentração de coagulante

Com o objetivo de determinar a concentração ótima de coagulante, realizou-se ensaios de jarreste. Foi acoplado ao equipamento filtros de laboratório de areia (FLAs). O equipamento utilizado é da marca Nova Ética, modelo LDB 310. A extração de amostras se dá por sistema de basculamento simultâneo, com gradientes de velocidade variando entre 10 e 2000 s^{-1} (20 a 600 rpm), onde a rotação é controlada por tacômetro digital e paletas retangulares com sistema de haste livre, que permite isolar um jarro sem interromper os demais. A Figura 9 apresenta o equipamento durante uma bateria de ensaio.

Figura 9. Equipamento de jarteste.



Fonte: autor.

O coagulante utilizado nos ensaios foi o policloreto de alumínio, PAC, com 10,5 % de Al_2O_3 . Ao todo, foram realizados ensaios considerando o intervalo de concentração de coagulante entre 10 e 30 mgPAC.L^{-1} . Os FLAs possuem granulometria da areia variando entre 0,42 – 0,85 mm e diâmetro efetivo igual a 0,50 mm. A altura da camada de areia é de 15 cm, com carga hidráulica de filtração constante, igual a 11 cm. Esses parâmetros foram adotados a partir dos estudos realizados por Dalsasso (2005), levando-se em consideração a turbidez da água bruta e a dosagem de coagulante.

Baseado nos estudos de Dalsasso (2005) e Melo Filho (2006) com filtração direta e com a água bruta proveniente do mesmo manancial, empregaram-se, então, as condições propostas pelos autores, após a ratificação por cálculos:

- Gradiente de velocidade de mistura rápida (G_{MR}) de 1200 s^{-1} (~ 400 rpm);
- Tempo de mistura rápida (T_{MR}) de 30 s;
- Gradiente de velocidade (G) após a mistura rápida de 150 s^{-1} (~45 rpm);
- Taxa de filtração no FLA de aproximadamente $100 \text{ m}^3.(\text{m}^2.\text{d})^{-1}$.

Através do dispositivo para coleta de amostras, drenou-se diretamente a água de cada jarro para o FLA correspondente. Os primeiros 100 mL de água filtrada foram desprezados, coletando-se em seguida, no mínimo, 100 mL para análise.

3.3.2 Etapa 2 – ensaios no sistema piloto

Os ensaios foram organizados combinando-se todas as variáveis possíveis (intervalo de concentração de coagulante e intensidade de campo magnético), levando-se em conta as configurações possíveis no sistema piloto. Idealizou-se examinar três configurações distintas, sendo que a diferença entre elas é, basicamente, o que ocorre antes da água ser encaminhada para o filtro:

- Configuração 0: tratamento da água sem coagulante, tendo apenas o efeito da magnetização como auxílio;
- Configuração A: tratamento da água com coagulante, neste caso, primeiramente, a água recebe a magnetização e, posteriormente, a aplicação de coagulante;
- Configuração B: tratamento da água com coagulante, neste caso, primeiramente, a água recebe a aplicação de coagulante e, posteriormente, a magnetização.

Fixou-se o valor da concentração ótima de coagulante encontrado nos ensaios de jarreste, nomeando-o de “100 %”, e escolheu-se utilizar também nos ensaios experimentais um intervalo de valores a partir da concentração ótima. Em todas as situações foram testadas as seguintes concentrações de coagulante: 100%, 80%, 60%, 40%, 20% e 0%. Esta escolha se deu com o objetivo de analisar a capacidade da magnetização em compensar a redução na aplicação de coagulante. Em todas as situações foram testadas as seguintes intensidades de campo magnético: 0, 8, 12 e 24 mT.

Todos os ensaios foram repetidos três vezes, constituindo, assim, dados em triplicata. Foram observados os valores de Turbidez, pH e Cor Aparente da água bruta e tratada. A coleta de água bruta ocorreu no ponto de controle do sistema, já a água tratada foi coletada na saída do filtro. Coletou-se, sempre, aproximadamente 150 mL para a realização das análises de qualidade. A coleta de água tratada ocorreu após 30 minutos do início dos ensaios.

3.3.2.1 Metodologia das análises de qualidade da água

Nas etapas 1 e 2, foi analisada a qualidade da água bruta e filtrada com relação à turbidez e o comportamento do pH. Na Etapa 3, foi analisada a qualidade da água bruta e filtrada com relação à turbidez, cor aparente e comportamento do pH. Com relação à turbidez, cor aparente e pH realizou-se as análises através dos métodos analíticos nefelométrico, colorimétrico e potenciométrico, respectivamente, segundo procedimentos recomendados pelo Standard Methods (APHA, 2017). Para análise da remoção de turbidez utilizou-se o Turbidímetro da marca HACH, modelo 2100P. A cor aparente foi verificada através do kit para análise de cor por disco colorimétrico da marca HACH, modelo CO-1. Enquanto que, o pH foi medido no pHmetro da marca Alfakit, modelo AT355.

3.3.3 Apresentação dos resultados

A apresentação dos resultados foi realizada na seguinte sequência (Tabela 7):

Tabela 7. Apresentação dos resultados.

Etapa 1	Diagrama de coagulação	
Etapa 2	Acompanhamento da turbidez por 30 minutos	Configuração A
		Configuração B
	Turbidez e Cor Aparente Gráficos de Distribuição	Configuração 0
		Configuração A
		Configuração B
pH Box-Plot	Geral	

3.3.4 Análise estatística

3.3.4.1 Teste de Normalidade

A normalidade das variáveis é exigida para aplicação de diversos métodos de inferência estatísticas, por isso, foi o primeiro teste aplicado (BERTHOUEX; BROWN, 2002).

Para o presente estudo, foi aplicado o teste de Shapiro-Wilk. É definido o nível de significância do teste, que é a probabilidade de se rejeitar incorretamente a hipótese nula (H_0) quando ela é verdadeira. Para o estudo, foi adotado um nível de significância de 5% (α).

O teste de Shapiro-Wilk fornece o parâmetro de valor de prova (*p-value*), que é interpretado como o grau de concordância entre os dados e a hipótese nula (H_0), sendo H_0 correspondente à distribuição Normal (SHAPIRO; WILK, 1965). A regra de decisão adotada para mostrar se a distribuição é Normal ou não é rejeitar H_0 :

i: se $p\text{-value} \leq \alpha$, rejeita-se H_0 , isto é, o conjunto de dados não possui distribuição Normal;

ii: se $p\text{-value} \geq \alpha$, não se rejeita H_0 , ou seja, é possível que o conjunto de dados possua distribuição Normal.

3.3.4.2 Teste t de Student

Para analisar as diferenças significativas entre as médias das variáveis, utilizou-se o teste t de Student, que tem por finalidade rejeitar ou não uma hipótese nula, através de conceitos estatísticos (BERTHOUEX; BROWN, 2002). Utilizou-se o teste para analisar as médias da remoção de turbidez comparando os ensaios sem aplicação de campo magnético e com aplicação de campo magnético. Para o teste ser aplicado, a variável quantitativa, ou seja, os resultados obtidos em remoção de turbidez, deve possuir Distribuição Normal para todas as categorias da variável qualitativa, ou seja, cada ensaio específico.

Para se proceder a interpretação do teste há três requisitos básicos:

- Hipótese;
- Nível de significância;
- Valor-p.

As hipóteses são:

- H_0 : Não há relação entre as variáveis, logo se aceita que as médias são semelhantes;
- H_1 : Há relação entre as variáveis, portanto suas médias são diferentes.

Para se decidir estatisticamente entre as duas hipóteses (H_0 e H_1), é comparado a probabilidade de significância *p-value* e o nível de significância (α) adotado. Na maioria das pesquisas, o nível de

significância adotado é entre 1 % e 5 %. Para o trabalho em questão, foi adotado o valor de 5 %.

3.3.4.3 Análise de Variância

O último teste estatístico realizado foi o teste de análise de variância. O teste foi utilizado para confirmar as diferenças entre os ensaios com e sem campo magnético e qual o ponto de aplicação de coagulante resultou nos melhores resultados. Analisou-se, primeiramente, os ensaios em que o teste t-Student apontou diferenças significativas. Foi aplicado um nível de significância de 5 % e, utilizou-se a seguinte regra para decidir qual a hipótese correta:

- H_0 : $p\text{-value} \geq \alpha$, ou seja, não há diferença entre as médias das variáveis; ou,
- H_1 : $p\text{-value} \leq \alpha$, isto é, há diferença entre as médias.

3.4 AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE ECONÔMICA

A avaliação da viabilidade econômica foi feita levando-se em conta os custos na etapa de coagulação. Nesta etapa, o custo está relacionado com a quantidade de coagulante utilizada para a redução da turbidez. Considerou-se para a estimativa os custos de tratamento para as seguintes possibilidades:

- Tratamento com concentração ótima de coagulante;
- Tratamento com concentrações reduzidas de coagulante e auxílio do campo magnético.

O preço considerado para o coagulante e de energia elétrica foi de, respectivamente, R\$ 3,20 por quilograma (RÔLA et al., 2015) e R\$ 0,48 kWh (BRASIL, 2016). Calculou-se os custos para tratamento de água no sistema piloto considerando um volume de 1 m³.

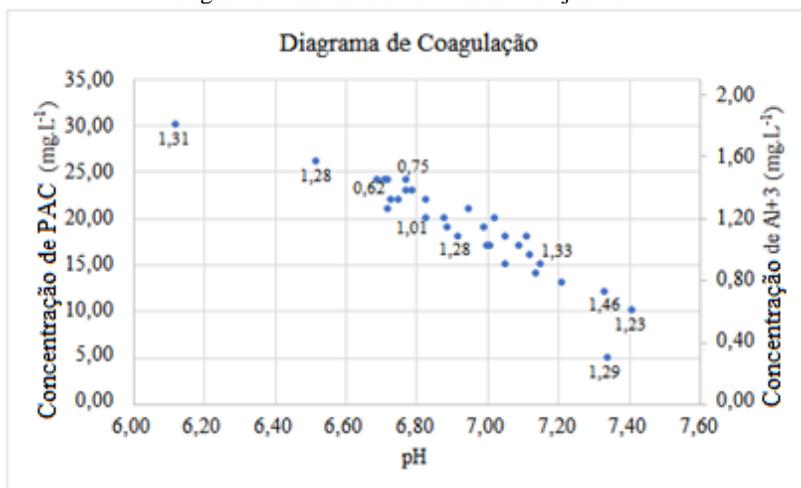
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ENSAIOS ETAPA 1

4.1.1 Determinação da concentração ótima de coagulante – ensaios de jar test

Os resultados obtidos nos ensaios de jar test encontram-se na Figura 10 e na Tabela 29 presente no Apêndice.

Figura 10. Resultados dos ensaios de jar test.



A partir dos resultados obtidos é possível concluir que os ensaios que apresentaram os valores mais baixos de turbidez foram aqueles cujas concentrações de coagulante e pH de coagulação estão entre, respectivamente, 20 - 25 mg.L⁻¹ e 6,60 - 6,80. Di Bernardo et al. (2003) em pesquisa com as águas da Lagoa do Peri, escolheram trabalhar com a concentração de 22,0 mg.L⁻¹. Tendo em vista os resultados obtidos experimentalmente e as contribuições dos pesquisadores, escolheu-se adotar a concentração de 24 mg.L⁻¹ como a ideal para remoção de turbidez. Assim, fixou-se como 100 % a concentração de 24,0 mg.L⁻¹. Desta forma, os valores de 80 %, 60 %, 40 % e 20 % utilizados nos ensaios de filtração do sistema piloto, foram, respectivamente 19,2 - 14,4 - 9,6 e 4,8 mg.L⁻¹.

4.2 ENSAIOS ETAPA 2

As Tabelas, 30 até 40, com a apresentação dos dados obtidos nas análises de qualidade da água nos ensaios relativos às Configurações 0, A e B estão presentes no Apêndice.

4.2.1 Acompanhamento do ensaio

As Figuras 11 e 12 e as Tabelas 8 e 9 se referem aos ensaios das Configurações A e B, respectivamente, onde foi feito a aplicação de $24,0 \text{ mgPAC.L}^{-1}$. Fez-se o controle dos valores de turbidez da água filtrada a partir dos 3 minutos após o início dos ensaios até os 30 minutos finais em intervalos de 3 minutos. A partir da Figura 11 é possível observar que, dados 3 minutos do início do ensaio, os valores mais baixos de turbidez ocorreram quando não havia campo magnético. Após 15 e até os 30 minutos os valores mais baixos de turbidez são observados quando se aplica campo magnético de 8 mT. A respeito da Figura 12, nota-se que a partir de 3 minutos do início do ensaio os valores mais baixos ocorreram quando foi aplicado campo magnético de 8 mT, aos 6 minutos, quando não houve exposição de campo magnético, e a partir dos 9 minutos, os valores mais baixos de turbidez ocorreram com o campo magnético de 24 mT. Desta forma, sugere-se que a magnetização das águas não poderia auxiliar a recuperação da qualidade da água tratada no filtro, visto que foi observado no início dos ensaios valores mais baixos de turbidez quando não se expos campo magnético. No entanto, foi realizado teste estatístico para aferir sobre as diferenças entre os ensaios com e sem campo magnético, presente na seção 4.4.3. Com base nestes resultados, adotou-se para os demais ensaios o tempo de 30 minutos para realizar a coleta das amostras de água tratada.

Figura 11. Turbidez da água filtrada em função do tempo de filtração – Configuração A (coagulante aplicado após o campo magnético).

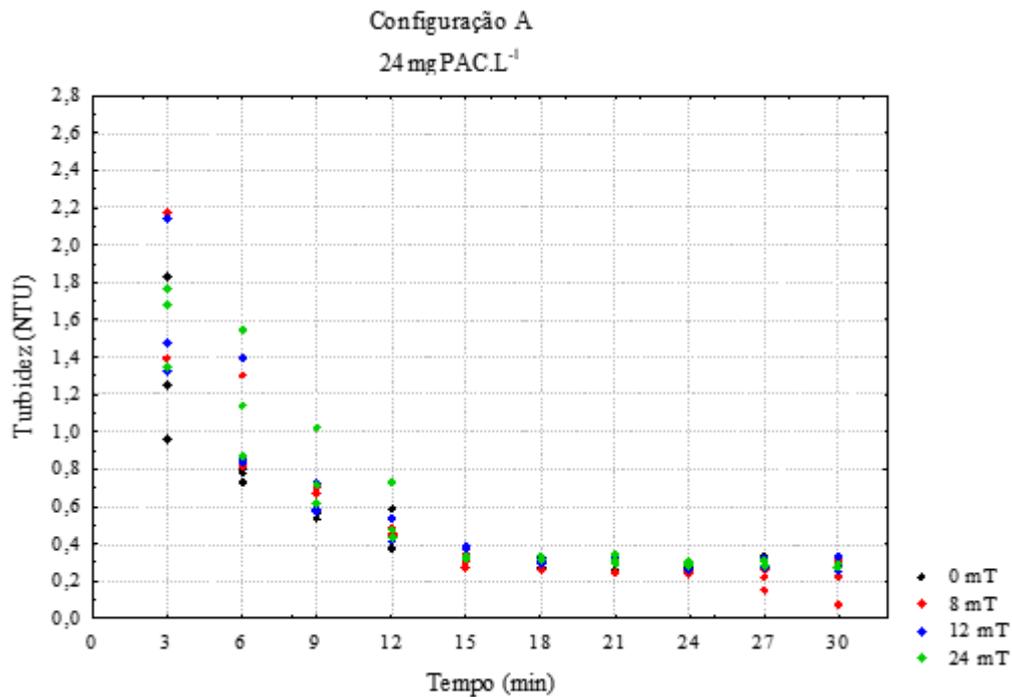


Tabela 8. Turbidez da água filtrada em função do tempo de filtração – Configuração A (coagulante aplicado após o campo magnético).

Configuração A				[PAC]				24,0 mgPAC.L ⁻¹			
Campo Magnético (mT)	Turbidez (NTU)										
	Água Bruta	Água Filtrada									
	3 min	6 min	9 min	12 min	15 min	18 min	21 min	24 min	27 min	30 min	
0	5,86	1,26	0,78	0,57	0,46	0,34	0,31	0,33	0,28	0,34	0,34
	6,90	1,84	0,80	0,70	0,59	0,33	0,31	0,27	0,28	0,33	0,25
	8,39	0,96	0,73	0,54	0,38	0,31	0,28	0,32	0,27	0,29	0,31
8	5,30	1,40	0,84	0,70	0,45	0,31	0,30	0,24	0,25	0,16	0,08
	6,02	1,48	0,82	0,67	0,49	0,27	0,27	0,25	0,26	0,23	0,22
	7,14	2,18	1,31	0,70	0,46	0,35	0,31	0,31	0,29	0,27	0,31
12	5,75	1,33	0,84	0,58	0,42	0,33	0,30	0,30	0,27	0,27	0,26
	7,67	1,48	0,85	0,59	0,48	0,37	0,32	0,31	0,28	0,30	0,28
	7,32	2,14	1,40	0,73	0,54	0,39	0,31	0,32	0,30	0,33	0,34
24	6,62	1,35	0,88	0,62	0,44	0,34	0,34	0,32	0,30	0,32	0,30
	7,34	1,68	1,55	1,03	0,73	0,34	0,34	0,29	0,29	0,29	0,27
	7,87	1,77	1,15	0,72	0,48	0,33	0,32	0,35	0,29	0,30	0,30

Figura 12. Turbidez da água filtrada em função do tempo de filtração – Configuração B (coagulante aplicado antes do campo magnético).

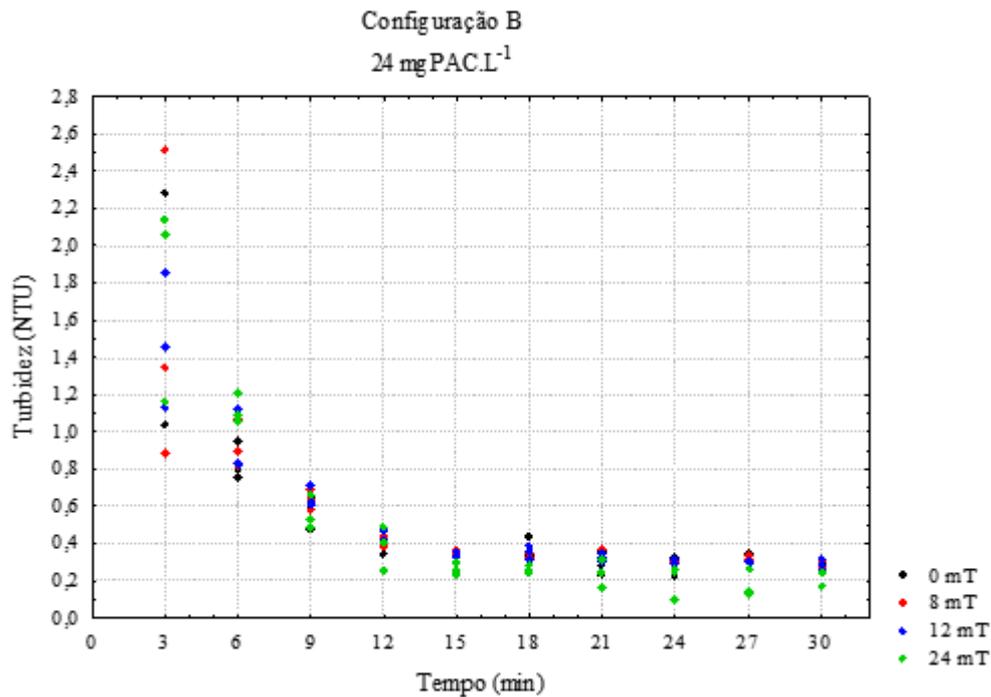


Tabela 9. Turbidez da água filtrada em função do tempo de filtração – Configuração B (coagulante aplicado antes do campo magnético).

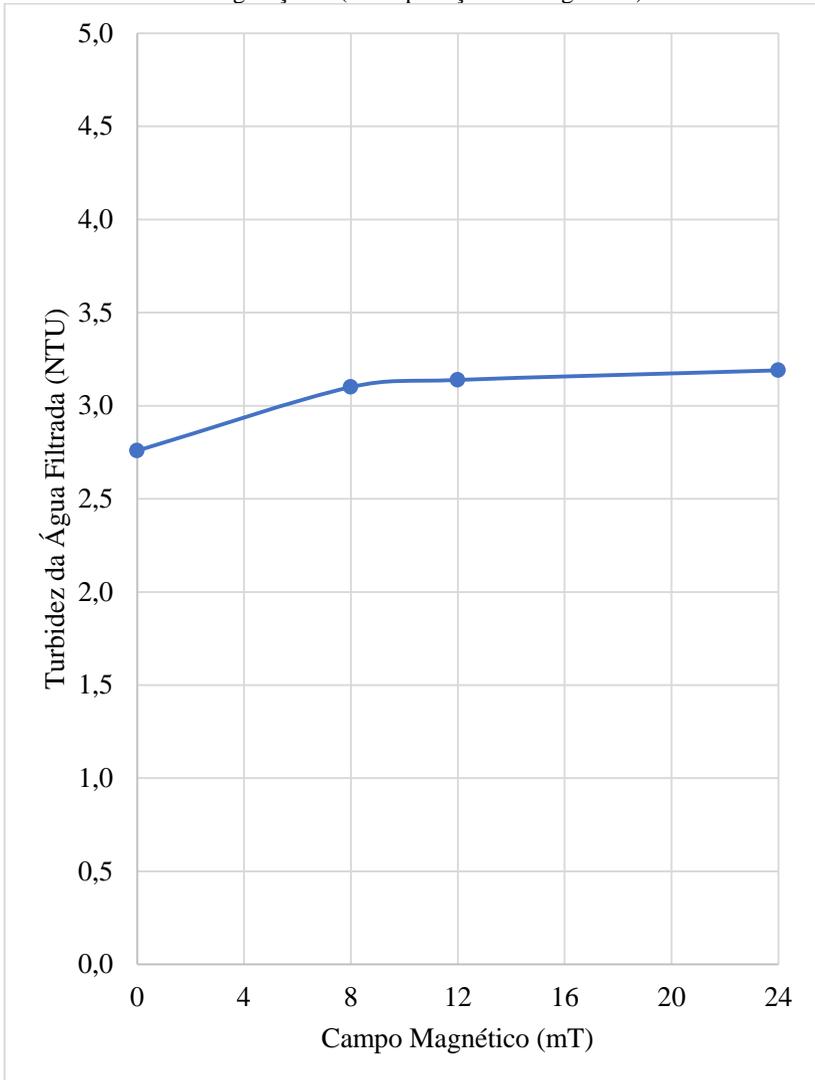
Configuração B				[PAC]				24,0 mgPAC.L ⁻¹			
Campo Magnético (mT)	Turbidez (NTU)										
	Água Bruta	Água Filtrada									
	3 min	6 min	9 min	12 min	15 min	18 min	21 min	24 min	27 min	30 min	
0	6,34	1,35	0,95	0,60	0,43	0,33	0,34	0,36	0,33	0,32	0,30
	6,34	1,04	0,80	0,48	0,35	0,30	0,29	0,29	0,27	0,30	0,28
	9,84	2,29	0,76	0,66	0,42	0,36	0,44	0,24	0,22	0,35	0,31
8	6,34	1,35	0,90	0,69	0,44	0,35	0,33	0,31	0,31	0,34	0,31
	6,34	0,89	0,82	0,64	0,42	0,37	0,35	0,37	0,32	0,30	0,32
	9,84	2,52	1,07	0,58	0,39	0,35	0,33	0,32	0,32	0,32	0,28
12	6,34	1,14	0,83	0,63	0,47	0,33	0,39	0,31	0,32	0,31	0,29
	8,96	1,46	0,84	0,62	0,42	0,36	0,32	0,35	0,32	0,30	0,32
	9,77	1,85	1,12	0,71	0,49	0,34	0,36	0,33	0,30	0,31	0,26
24	8,96	1,17	1,09	0,54	0,49	0,30	0,26	0,25	0,25	0,27	0,25
	8,96	2,14	1,21	0,66	0,41	0,26	0,25	0,32	0,27	0,15	0,25
	8,96	2,06	1,07	0,49	0,26	0,24	0,29	0,17	0,10	0,13	0,18

4.2.2 Turbidez

4.2.2.1 Configuração 0

Os resultados obtidos nos ensaios com a Configuração 0 não demonstram com clareza que a ação do campo magnético auxilia no tratamento das águas. A partir da Figura 13 é possível observar que as médias da turbidez da água tratada nos ensaios com campo magnético de 8, 12 e 24 mT, respectivamente, 3,10 – 3,14 e 3,19 NTU, foram superiores à média da turbidez da água tratada sem campo magnético, 2,76 NTU. Estes resultados não estão de acordo com a portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011), bem como, a Portaria de Consolidação nº 05/2017 (BRASIL, 2017), pois deveriam estar abaixo de 0,5 NTU em 95 % das amostras de água analisadas após a saída do filtro. Assim, apenas o tratamento com campo magnético substituindo por completo o papel do coagulante químico não é suficiente para o tratamento de águas para consumo humano.

Figura 13. Turbidez da água filtrada em função do campo magnético exposto – Configuração 0 (sem aplicação de coagulante).



4.2.2.2 Configuração A

Com relação aos dados obtidos nos ensaios com a Configuração A os resultados apontam para o potencial do campo magnético de melhorar o tratamento de águas. A Figura 14 apresenta graficamente os resultados. Observa-se que todos os ensaios quando foram expostos ao campo magnético de 8 mT apresentaram uma melhoria em seus resultados, atingindo valores de turbidez inferiores aos ensaios sem campo magnético. Também é possível observar que quando foi exposto o campo magnético de 24 mT, os ensaios em que foram dosados 9,6 – 14,4 – 19,2 e 24,0 mgPAC.L⁻¹ apresentaram turbidez inferior aos ensaios sem campo magnético.

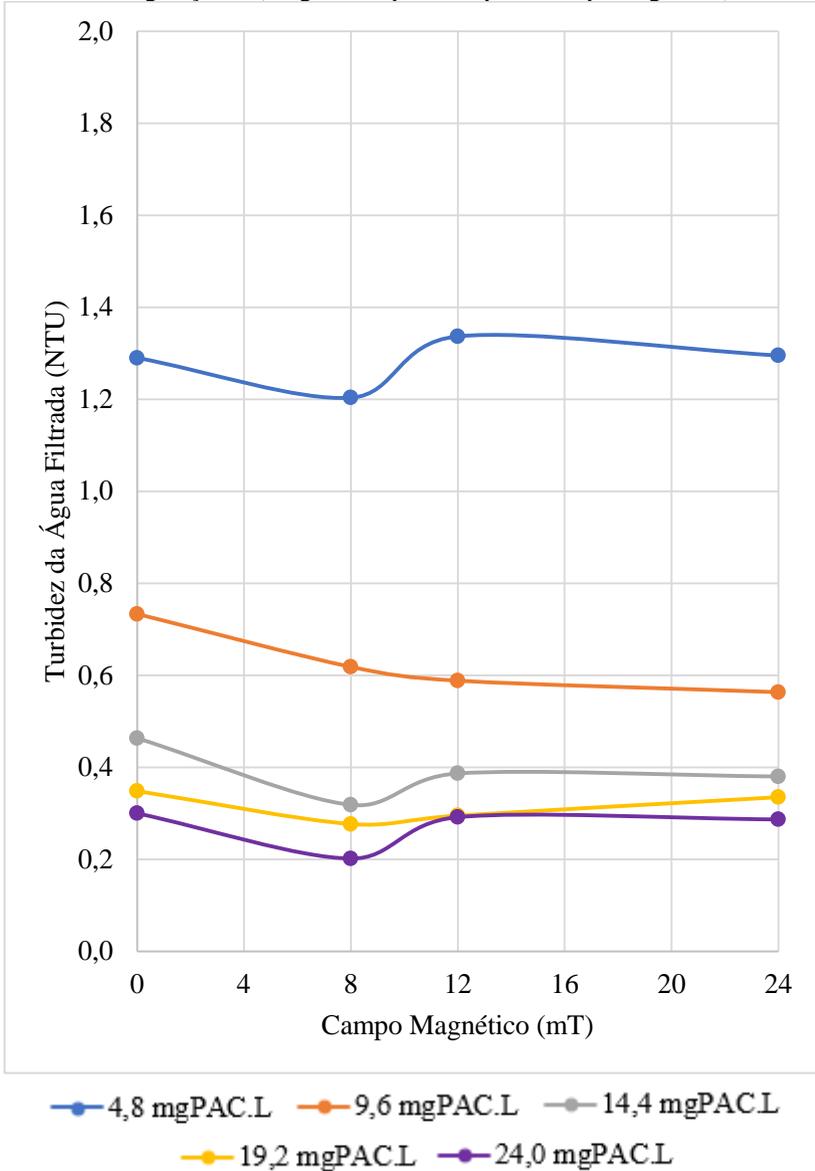
Levando-se em consideração os valores de turbidez da água bruta para cada ensaio, a maior média de remoção de turbidez, 96,87 %, foi observada nos ensaios com dosagem de coagulante igual a 24,0 mgPAC.L⁻¹ e exposição de campo magnético de 8 mT. Para os demais ensaios, a melhor média de remoção de turbidez ocorreu com as seguintes configurações, (Tabela 10):

Tabela 10. Melhores percentuais de remoção de turbidez para cada concentração de coagulante – Configuração A (coagulante aplicado após o campo magnético).

[PAC] (mg.L ⁻¹)	Campo Magnético (mT)	Remoção de Turbidez (%)
4,8	8	83,42
9,6	24	91,83
14,4	8	95,65
19,2	12	95,65

Verifica-se que a dosagem de 19,2 mgPAC.L⁻¹ associado à exposição 8 e 12 mT, permitiu o alcance de resultados semelhantes à condição de concentração ótima de coagulante sem campo magnético. Desta forma, evidencia-se a capacidade do campo magnético em suprir a redução do uso de pelo menos 20 % de coagulante.

Figura 14. Turbidez da água filtrada em função do campo magnético exposto – Configuração A (coagulante aplicado após o campo magnético).



4.2.2.3 Configuração B

Os resultados alcançados nos ensaios com a Configuração B, novamente, evidenciaram a capacidade do campo magnético em auxiliar a remoção de turbidez. A Figura 15 apresenta o gráfico com os dados obtidos. Observa-se que os ensaios em que foram dosados 4,8 – 9,6 – 14,4 e 24,0 mgPAC.L⁻¹, quando exposto campo magnético de 8 mT, apresentaram uma melhora, atingindo valores de turbidez da água tratada inferiores aos ensaios sem campo magnético. Da mesma forma, os ensaios em que foram dosados 4,8 – 14,4 – 19,2 e 24,0 mgPAC.L⁻¹, quando exposto campo magnético de 24 mT, também apresentaram valores de turbidez da água tratada inferiores aos ensaios sem campo magnético.

Analisando-se a turbidez da água bruta para cada ensaio, a maior média de remoção de turbidez, 97,47 %, foi observada nos ensaios com dosagem de coagulante igual a 24,0 mgPAC.L⁻¹ e exposição de campo magnético de 24 mT. Para os demais ensaios, a melhor média de remoção de turbidez ocorreu com as seguintes configurações, (Tabela 11):

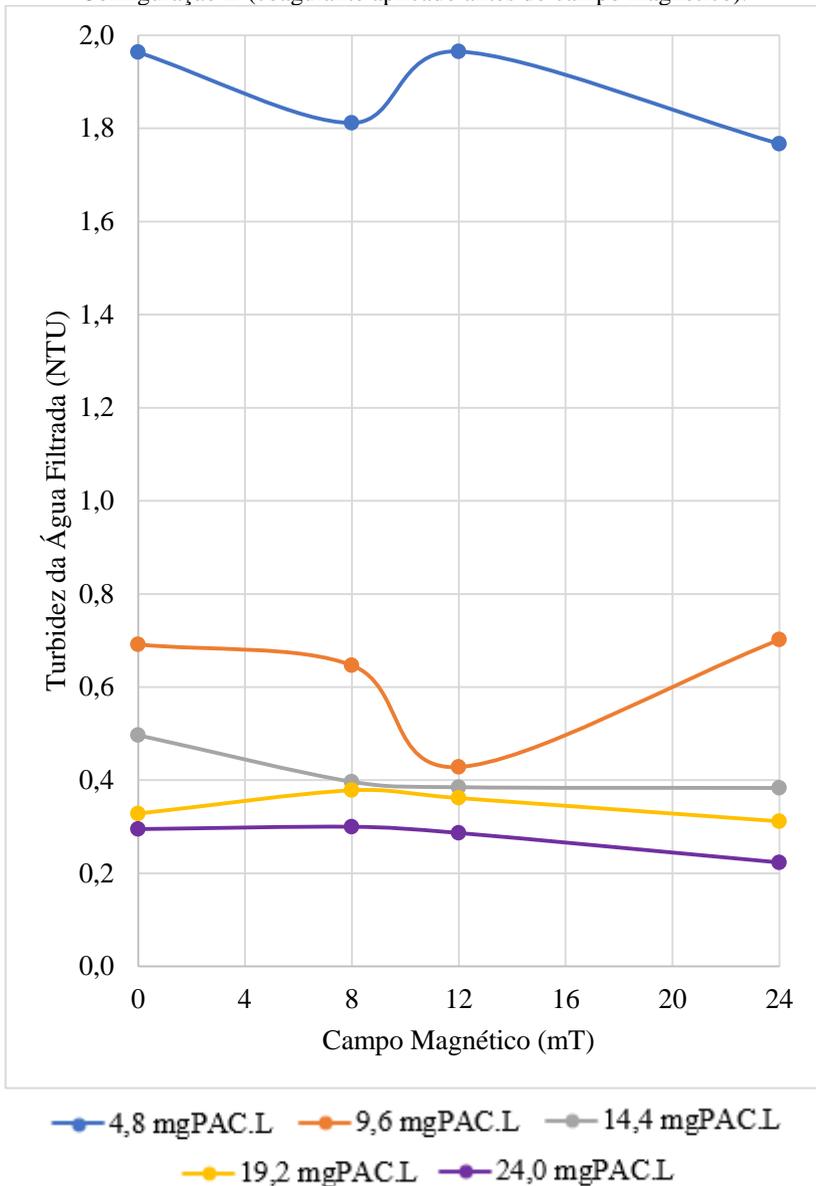
Tabela 11. Melhores percentuais de remoção de turbidez para cada concentração de coagulante – Configuração B (coagulante aplicado antes do campo magnético).

Tabela 12.

[PAC] (mg.L ⁻¹)	Campo Magnético (mT)	Remoção de Turbidez (%)
4,8	24	81,51
9,6	12	94,62
14,4	24	95,04
19,2	24	96,97

Os dados apontam para a ratificação do que foi obtido na Configuração A, que o campo magnético possui o potencial de aumentar a eficiência do tratamento dado o efeito da magnetização das partículas. Salienta-se o ensaio com dosagem de coagulante igual a 9,6 mgPAC.L⁻¹, que somado a exposição de 12 mT, permitiu o alcance de baixos valores de turbidez, demonstrando a capacidade do campo magnético suprir, nestas condições, até 60 % de redução de coagulante químico.

Figura 15. Turbidez da água filtrada em função do campo magnético exposto – Configuração B (coagulante aplicado antes do campo magnético).



As melhores marcas de remoção de turbidez alcançadas nas Configurações A e B, foram, respectivamente, de 96,87 e 97,47 %. Estes valores são superiores ao alcançado por Hatamie et al. (2016), 94,50 % de remoção de turbidez, onde foi empregado um coagulante formado por nanopartículas com propriedades magnéticas auxiliado por um campo magnético externo. E é também superior ao alcançado por Santos et al. (2015), 91 % de remoção de turbidez, que utilizou coagulante derivado da moringa sob efeito de campo magnético externo.

4.2.3 Atendimento às Portaria 2914/2011 e de Consolidação nº 05/2017 do Ministério da Saúde

O atendimento à Portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde (BRASIL 2011), bem como, à Portaria de Consolidação nº 05/2017 (BRASIL, 2017), não foi verificado nos ensaios em que a concentração de coagulante aplicada foi igual a $4,8 \text{ mgPAC.L}^{-1}$, nas Configurações A e B, inclusive quando se expos campo magnético. No entanto, observou-se nas Configurações A e B, nos ensaios em que foram aplicados a partir de $14,4 \text{ mgPAC.L}^{-1}$, a partir de 8 mT, alcançou-se o padrão exigindo, caracterizando uma redução de 40 % de coagulante quando auxiliado pelo campo magnético. De forma mais pontual, na Configuração B, nos ensaios em que foi aplicado $9,6 \text{ mgPAC.L}^{-1}$, com auxílio de 12 mT, também foi possível alcançar o padrão exigido pelo Ministério da Saúde, possibilitando, assim, uma redução de 60 % de coagulante.

4.2.4 Cor Aparente

As Figuras 16, 17 e 18 apresentam os resultados obtidos em Cor Aparente nas Configurações 0, A e B, respectivamente. Com relação à Figura 16, nota-se que houve redução da cor aparente a partir da exposição de campo magnético de 8 mT, apresentando em 12 e 24 mT os valores mais baixos, 10 uH. A respeito da Figura 17, é possível verificar que apenas nos ensaios em que foram aplicados 9,6 e 19,2 mgPAC.L^{-1} , houve redução de cor aparente a medida em que se aumentou a intensidade de campo magnético. Os valores mais baixos, 5 uH, foram verificados nas intensidades de 12 e 24 mT. E, por fim, com relação à Figura 18, verifica-se que nos ensaios em que foram aplicados 9,6 – 19,2 e 24,0 mgPAC.L^{-1} , houve redução de cor aparente a medida em que aumentou a intensidade de campo magnético. Nestes casos, os

valores mais baixos também foram observados quando se expos os campos magnéticos de 12 e 24 mT.

Figura 16. Cor aparente da água filtrada em função do campo magnético exposto – Configuração 0 (sem aplicação de coagulante).

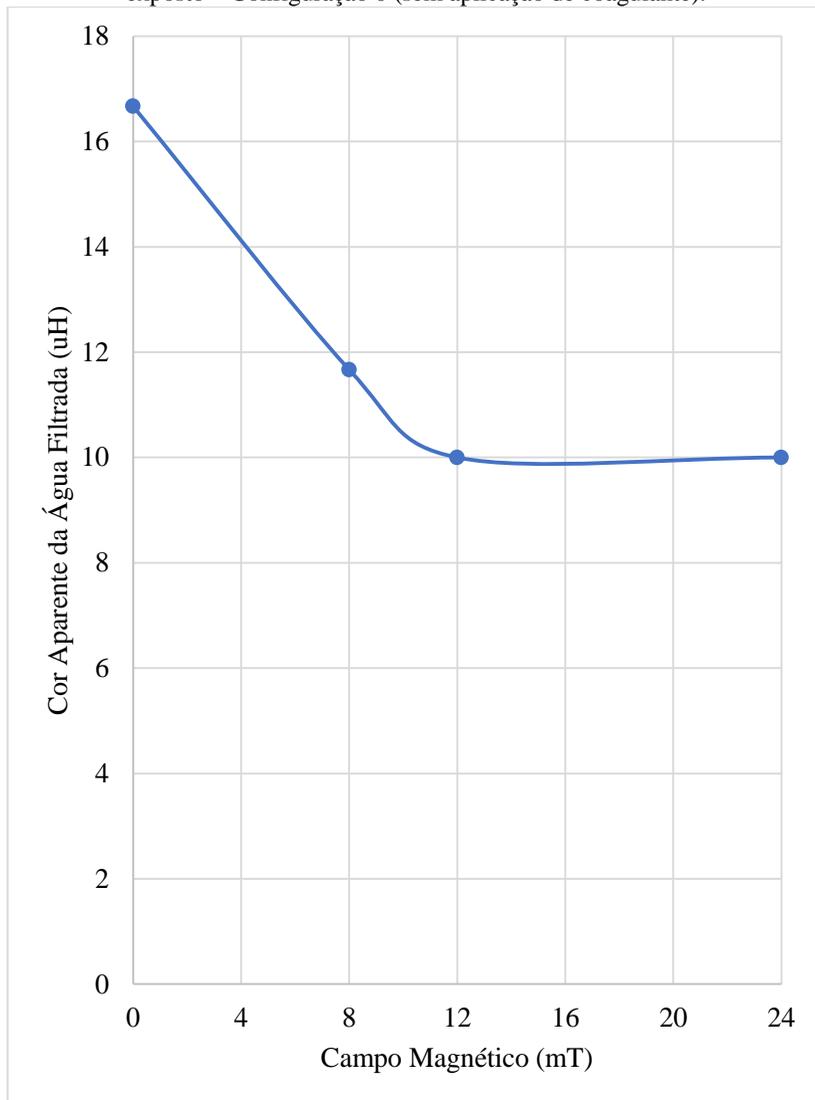


Figura 17. Cor aparente da água filtrada em função do campo magnético exposto – Configuração A (coagulante aplicado após o campo magnético).

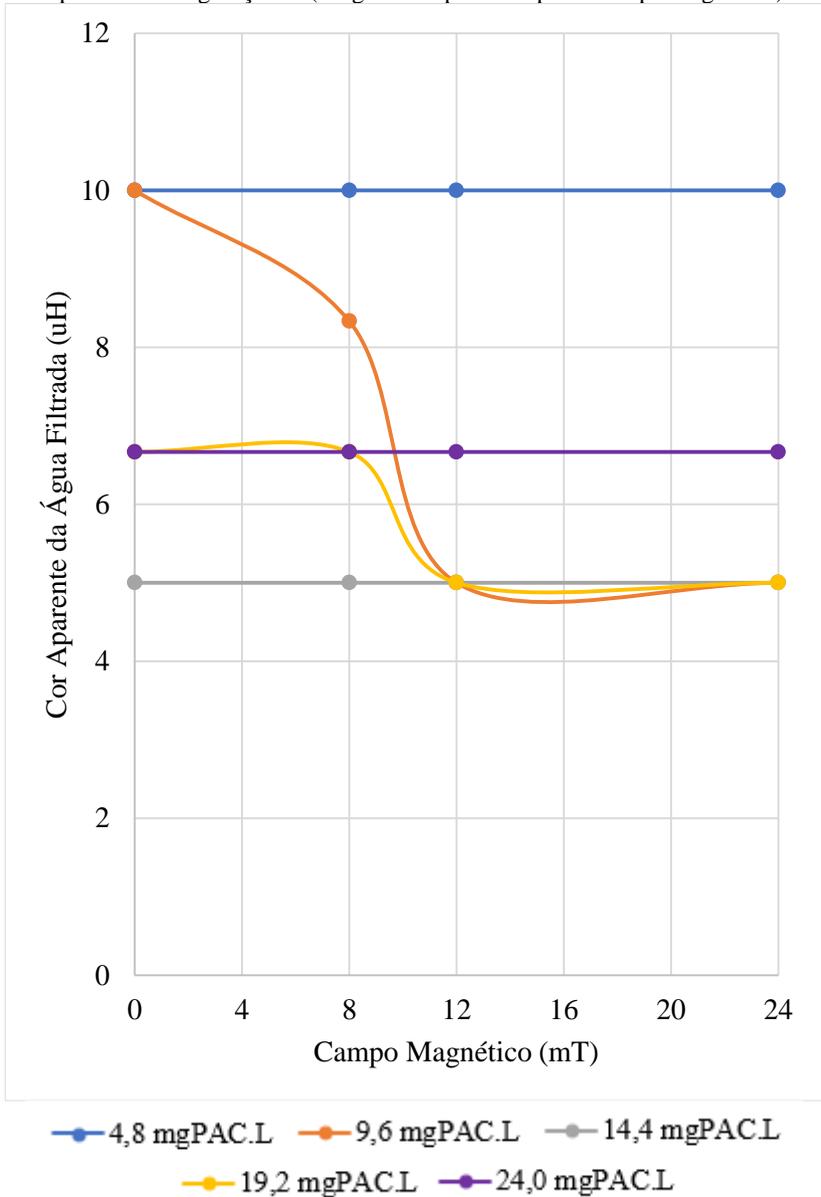
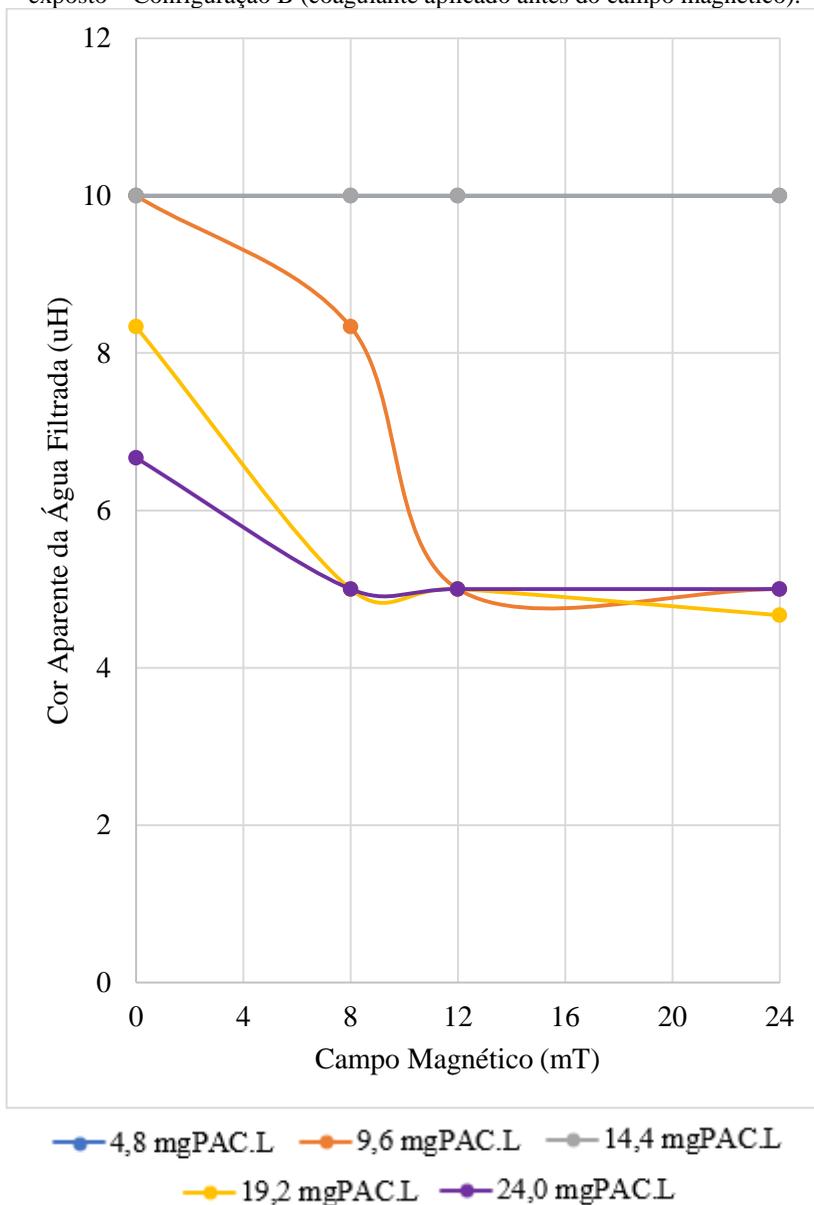


Figura 18. Cor aparente da água filtrada em função do campo magnético exposto – Configuração B (coagulante aplicado antes do campo magnético).



4.2.5 pH

As Figuras 19, 20 e 21 apresentam, os resultados obtidos de pH da água bruta e tratada para as Configurações 0, A e B, respectivamente. Os resultados sugerem que a depleção do pH da água filtrada não aumentou com a exposição de campo magnético, visto que há uma certa constância no decaimento do pH após o tratamento. Contudo, a depleção do pH será verificada na análise de variância na seção de análise estatística, para obter-se uma resposta confiável se o campo magnético possui influência na depleção. Nos gráficos das Configurações A e B não se fez a distinção dos ensaios com diferentes concentrações de coagulante, visto que o objetivo é verificar se o campo magnético interfere na depleção do pH e não a concentração de coagulante.

Figura 19. Valores observados de pH da água bruta e filtrada – Configuração 0 (sem aplicação de coagulante).

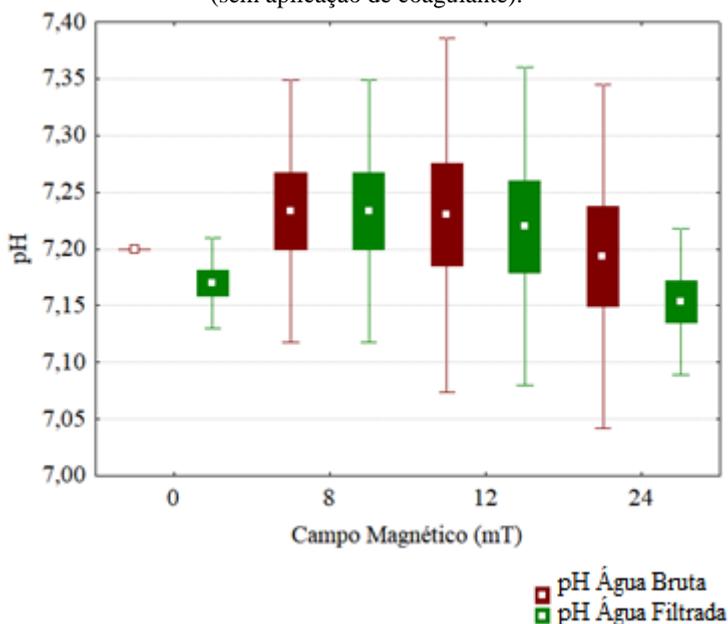


Figura 20. Valores observados de pH da água bruta e filtrada – Configuração A (coagulante aplicado após o campo magnético).

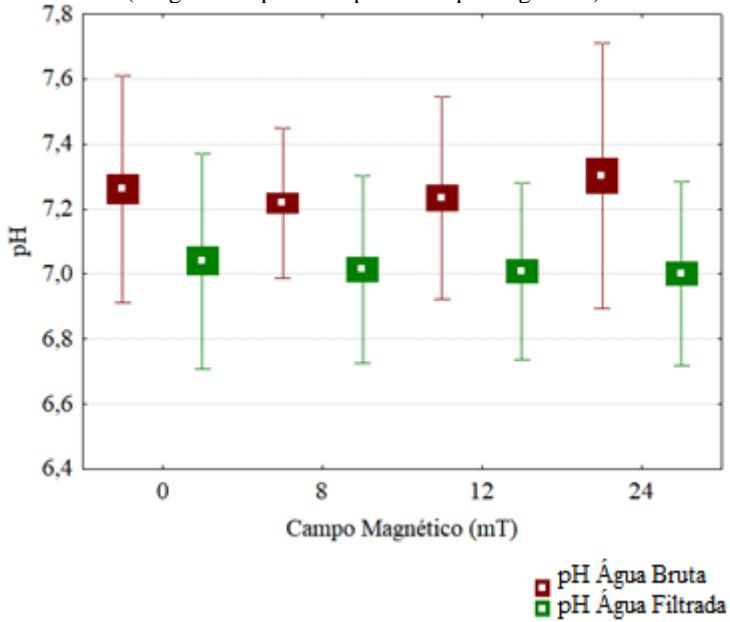
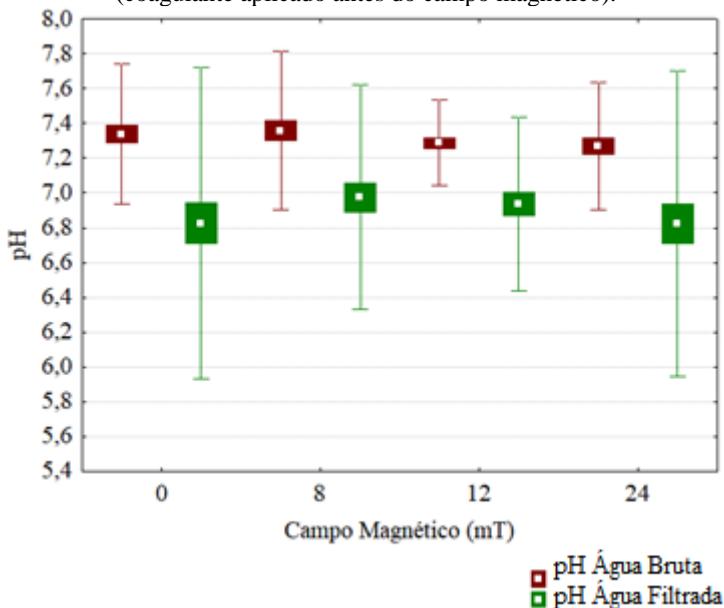


Figura 21. Valores observados de pH da água bruta e filtrada – Configuração B (coagulante aplicado antes do campo magnético).



4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

4.3.1 Teste de Normalidade e t-Student

A distribuição normal de uma série de dados é pré-requisito para aplicação de alguns testes. Por esse motivo, o primeiro teste de análise estatística aplicado foi o de Shapiro-Wilk, que verifica a existência de normalidade. As Tabelas enumeradas de 12 até 22 apresentam, no lado esquerdo, os valores de p-value, caso sejam menores que o nível de significância adotado (0,05), rejeita-se a hipótese que os dados possuem distribuição normal, assim como, se for maior que o nível de significância adotado, considera-se que os dados possuem distribuição normal. Após a verificação da normalidade dos dados, realizou-se o teste t-Student. Os resultados do teste também se encontram nas Tabelas 12 até 22, porém, no lado direito. Neste caso, nos testes em que o p-value é maior que o nível de significância adotado (0,05), considera-se que não há relação entre as variáveis, logo se aceita que as médias da turbidez da água tratada com e sem campo magnético são semelhantes.

Assim como, nos testes em que o p-value é menor que o nível de significância adotado, considera-se que existe relação entre as médias da turbidez da água tratada com e sem campo magnético, logo há diferença significativa entre suas médias.

Tabela 13. Teste de normalidade e t-Student – Configuração 0 (sem aplicação de coagulante).

Configuração 0					
Teste de Normalidade		t-Student			
		Grupo	Média	Desvio Padrão	p
Variável	p-Shapiro	0 mT	1,96	0,09	0,0000
		8 mT	3,10	0,22	
0 mT	0,2238	0 mT	1,96	0,09	0,0000
8 mT	0,1759	12 mT	3,14	0,11	
12 mT	0,0793	0 mT	1,96	0,09	0,0015
24 mT	0,2653	24 mT	3,19	0,42	

Tabela 14. Teste de normalidade e t-Student – Configuração A (coagulante aplicado após o campo magnético) – 4,8 mgPAC.L⁻¹.

Configuração A		4,8 mgPAC.L ⁻¹			
Teste de Normalidade		t-Student			
		Grupo	Média	Desvio Padrão	p
Variável	p-Shapiro	0 mT	1,29	0,20	0,5006
		8 mT	1,20	0,12	
0 mT	0,5776	0 mT	1,29	0,20	0,7002
8 mT	0,7929	12 mT	1,34	0,11	
12 mT	0,0960	0 mT	1,29	0,20	0,9375
24 mT	0,0729	24 mT	1,30	0,15	

Tabela 15. Teste de normalidade e t-Student – Configuração A (coagulante aplicado após o campo magnético) – 9,6 mgPAC.L⁻¹.

Configuração A		9,6 mgPAC.L ⁻¹			
Teste de Normalidade		t-Student			
		Grupo	Média	Desvio Padrão	p
Variável	p-Shapiro	0 mT	0,73	0,05	0,1214
		8 mT	0,59	0,11	
0 mT	0,2446	0 mT	0,73	0,04	0,0930
8 mT	0,0964	12 mT	0,59	0,16	
12 mT	0,1024	0 mT	0,73	0,05	0,0018
24 mT	0,6499	24 mT	0,48	0,03	

Tabela 16. Teste de normalidade e t-Student – Configuração A (coagulante aplicado após o campo magnético) – 14,4 mgPAC.L⁻¹.

Configuração A		14,4 mgPAC.L ⁻¹			
Teste de Normalidade		t-Student			
		Grupo	Média	Desvio Padrão	p
Variável	p-Shapiro	0 mT	0,46	0,04	0,0407
		8 mT	0,32	0,14	
0 mT	0,4255	0 mT	0,46	0,04	0,0181
8 mT	0,2257	12 mT	0,39	0,01	
12 mT	0,4150	0 mT	0,46	0,04	0,0451
24 mT	0,2942	24 mT	0,38	0,05	

Tabela 17. Teste de normalidade e t-Student – Configuração A (coagulante aplicado após o campo magnético) – 19,2 mgPAC.L⁻¹.

Configuração A		19,2 mgPAC.L ⁻¹			
Teste de Normalidade		t-Student			
		Grupos	Média	Desvio Padrão	p
Variável	p-Shapiro	0 mT	0,35	0,04	0,0502
		8 mT	0,28	0,03	
0 mT	0,1402	0 mT	0,35	0,04	0,1350
8 mT	0,8883	12 mT	0,31	0,02	
12 mT	0,3582	0 mT	0,35	0,04	0,2844
24 mT	0,3227	24 mT	0,33	0,02	

Tabela 18. Teste de normalidade e t-Student – Configuração A (coagulante aplicado após o campo magnético) – 24,0 mgPAC.L⁻¹.

Configuração A		24,0 mgPAC.L ⁻¹			
Teste de Normalidade		t-Student			
		Grupos	Média	Desvio Padrão	p
Variável	p-Shapiro	0 mT	0,30	0,05	0,1265
		8 mT	0,20	0,11	
0 mT	0,4095	0 mT	0,30	0,05	0,7750
8 mT	0,7224	12 mT	0,29	0,04	
12 mT	0,1720	0 mT	0,29	0,05	0,6897
24 mT	0,1032	24 mT	0,28	0,02	

Tabela 19. Teste de normalidade e t-Student – Configuração B (coagulante aplicado antes do campo magnético) – 4,8 mgPAC.L⁻¹.

Configuração B		4,8 mgPAC.L ⁻¹			
Teste de Normalidade		t-Student			
		Grupos	Média	Desvio Padrão	p
Variável	p-Shapiro	0 mT	1,96	0,09	0,0253
		8 mT	1,81	0,15	
0 mT	0,2238	0 mT	1,96	0,09	0,9811
8 mT	0,2651	12 mT	1,97	0,23	
12 mT	0,7538	0 mT	1,96	0,09	0,0299
24 mT	0,2723	24 mT	1,77	0,17	

Tabela 20. Teste de normalidade e t-Student – Configuração B (coagulante aplicado antes do campo magnético) – 9,6 mgPAC.L⁻¹.

Configuração B		9,6 mgPAC.L ⁻¹			
Teste de Normalidade		t-Student			
		Grupos	Média	Desvio Padrão	p
Variável	p-Shapiro	0 mT	0,69	0,06	0,4194
		8 mT	0,65	0,08	
0 mT	0,2896	0 mT	0,69	0,06	0,0039
8 mT	0,8290	12 mT	0,43	0,15	
12 mT	0,3819	0 mT	0,69	0,06	0,7931
24 mT	0,4908	24 mT	0,70	0,05	

Tabela 21. Teste de normalidade e t-Student – Configuração B (coagulante aplicado antes do campo magnético) – 14,4 mgPAC.L⁻¹.

Configuração B		14,4 mgPAC.L ⁻¹			
Teste de Normalidade		t-Student			
		Grupos	Média	Desvio Padrão	p
Variável	p-Shapiro	0 mT	0,50	0,03	0,0559
		8 mT	0,40	0,07	
0 mT	0,8302	0 mT	0,50	0,03	0,0061
8 mT	0,8193	12 mT	0,39	0,05	
12 mT	0,1035	0 mT	0,50	0,03	0,0452
24 mT	0,0956	24 mT	0,38	0,09	

Tabela 22. Teste de normalidade e t-Student – Configuração B (coagulante aplicado antes do campo magnético) – 19,2 mgPAC.L⁻¹.

Configuração B		19,2 mgPAC.L ⁻¹			
Teste de Normalidade		t-Student			
		Grupos	Média	Desvio Padrão	p
Variável	p-Shapiro	0 mT	0,33	0,07	0,0573
		8 mT	0,38	0,06	
0 mT	0,5179	0 mT	0,33	0,07	0,1354
8 mT	0,4838	12 mT	0,36	0,05	
12 mT	0,0576	0 mT	0,33	0,07	0,6793
24 mT	0,9831	24 mT	0,31	0,03	

Tabela 23. Teste de normalidade e t-Student – Configuração B (coagulante aplicado antes do campo magnético) – 24,0 mgPAC.L⁻¹.

Configuração B		24,0 mgPAC.L ⁻¹			
Teste de Normalidade		t-Student			
		Grupos	Média	Desvio Padrão	p
Variável	p-Shapiro	0 mT	0,30	0,02	0,7524
		8 mT	0,30	0,02	
0 mT	0,2615	0 mT	0,30	0,02	0,6590
8 mT	0,9328	12 mT	0,29	0,03	
12 mT	0,3220	0 mT	0,30	0,02	0,0854
24 mT	0,4802	24 mT	0,22	0,07	

Realizou-se ao todo 33 testes t-Student para verificar a existência de diferenças significativas entre as médias de turbidez da água tratada com e sem campo magnético. Destes, 21 testes resultaram em p-value acima do nível de significância, e, com isto, considera-se que não há diferenças significativas entre as médias. Porém, 12 testes resultaram em p-value abaixo de 0,05, são eles:

- Configuração 0:
 - 0 mT x 8 mT;
 - 0 mT x 12 mT;
 - 0 mT x 24 mT;
- Configuração A:
 - 9,6 mgPAC.L⁻¹:
 - 0 mT x 24 mT;
 - 14,4 mgPAC.L⁻¹:
 - 0 mT x 8 mT;
 - 0 mT x 12 mT;
 - 0 mT x 24 mT;
- Configuração B:
 - 4,8 mgPAC.L⁻¹:
 - 0 mT x 8 mT;
 - 0 mT x 24 mT;
 - 9,6 mgPAC.L⁻¹:
 - 0 mT x 12 mT;
 - 14,4 mgPAC.L⁻¹:
 - 0 mT x 12 mT;
 - 0 mT x 24 mT;

Desta forma, os testes elencados passaram por uma análise de variância a fim de confirmar as diferenças observadas.

4.3.2 Análise de Variância

As Figuras 22, 23 e 24 são referentes aos testes da Configuração 0 que apresentaram diferenças significativas no teste t-Student. Nota-se que o p-value das análises é menor que o nível de significância adotado. Assim, confirma-se que há diferença entre as médias. Considerando que nestes ensaios a turbidez da água filtrada foi menor quando não houve exposição de campo magnético, acredita-se que apenas a exposição de

campo magnético não é suficiente para substituir completamente o coagulante químico.

As Figuras 25, 26, 27 e 28 são referentes aos testes da Configuração A que apresentaram diferenças significativas no teste t-Student. Observa-se que o p-value é menor que o nível de significância em todos os casos, o que, conseqüentemente, leva à hipótese de que há diferença entre as médias. Uma vez que nestes ensaios a turbidez da água filtrada foi menor quando houve exposição de campo magnético, acredita-se que a exposição do campo auxiliou no tratamento das águas potencializando a ação do coagulante.

As Figuras 29, 30, 31, 32 e 33 dizem respeito aos testes da Configuração B que exibiram diferenças significativas no teste t-student. A partir da Figura 29, nota-se que o p-value da análise que comparou os ensaios com e sem campo magnético, daqueles em que foram dosados $4,8 \text{ mgPAC.L}^{-1}$, foi acima do nível de significância, este fato leva à hipótese de que não há diferenças significativas e, assim, não corrobora com o teste t-Student. Os demais testes resultaram em p-value abaixo de 0,05, confirmando a diferença significativa entre os ensaios com e sem campo magnético. E, novamente, acredita-se que, também nestes ensaios, a exposição de campo magnético auxiliou e potencializou a ação do coagulante químico. Portanto, os resultados obtidos corroboram com Zaidi et al. (2014), que afirmam que o tratamento das águas pode ser potencializado com a utilização de campo magnético, assim como, Ambashta e Sillanpaa (2010), que acreditam que a tecnologia pode melhorar a eficiência do tratamento, e, também Hatamie et al. (2016), Santos et al. (2015) e Franco Jr et al. (2016), que obtiveram melhorias na eficiência de remoção de turbidez expondo campo magnético no tratamento de águas.

Figura 22. Gráfico da análise de variância – Configuração 0 (sem aplicação de coagulante) – comparação dos ensaios com exposição de 0 x 8 mT.

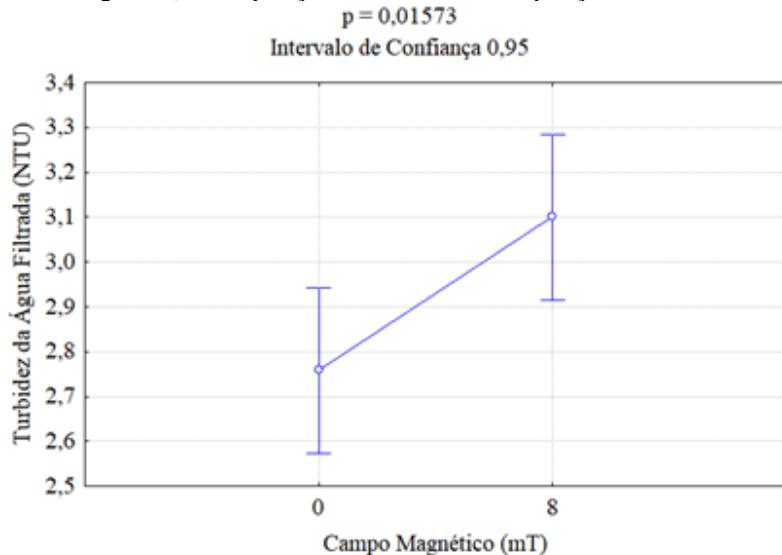


Figura 23. Gráfico da análise de variância – Configuração 0 (sem aplicação de coagulante) – comparação dos ensaios com exposição de 0 x 12 mT.

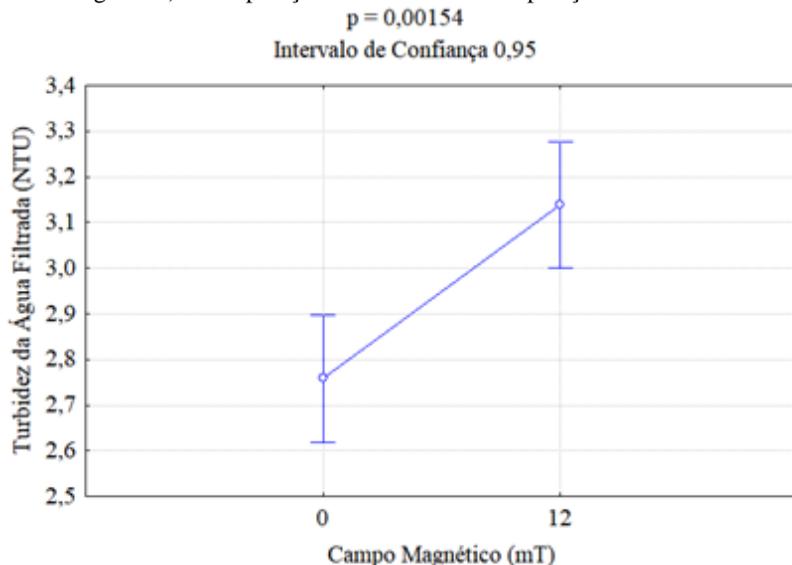


Figura 24. Gráfico da análise de variância – Configuração 0 (sem aplicação de coagulante) – comparação dos ensaios com exposição de 0 x 24 mT.

$p = 0,04383$

Intervalo de Confiança 0,95

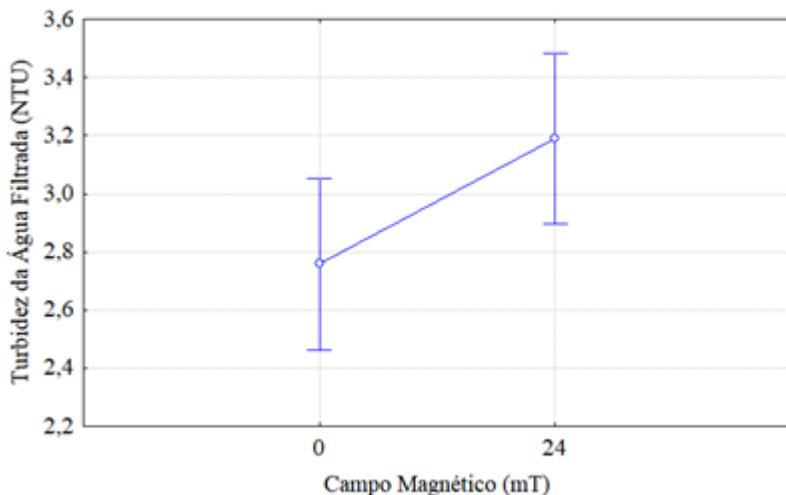


Figura 25. Gráfico da análise de variância – Configuração A (coagulante aplicado após o campo magnético) – 9,6 mgPAC.L⁻¹ – comparação dos ensaios com exposição de 0 x 24 mT.

$p = 0,01470$

Intervalo de Confiança 0,95

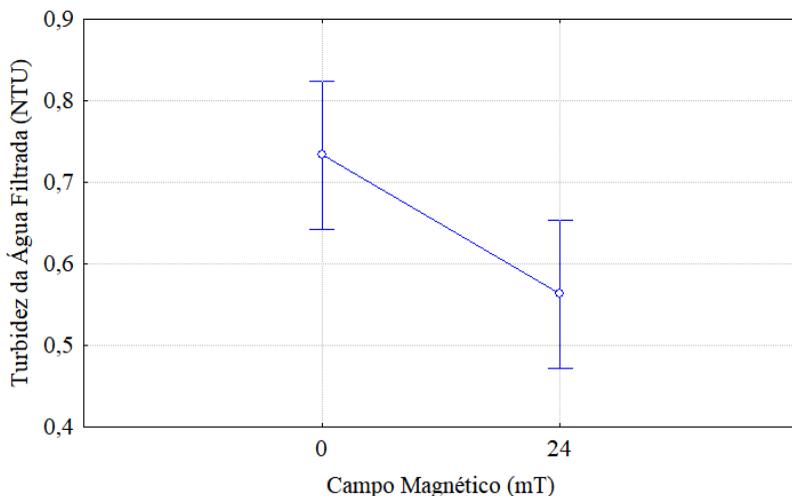


Figura 26. Gráfico da análise de variância – Configuração A (coagulante aplicado após o campo magnético) – 14,4 mgPAC.L⁻¹ – comparação dos ensaios com exposição de 0 x 8 mT.

p = 0,01267

Intervalo de Confiança 0,95

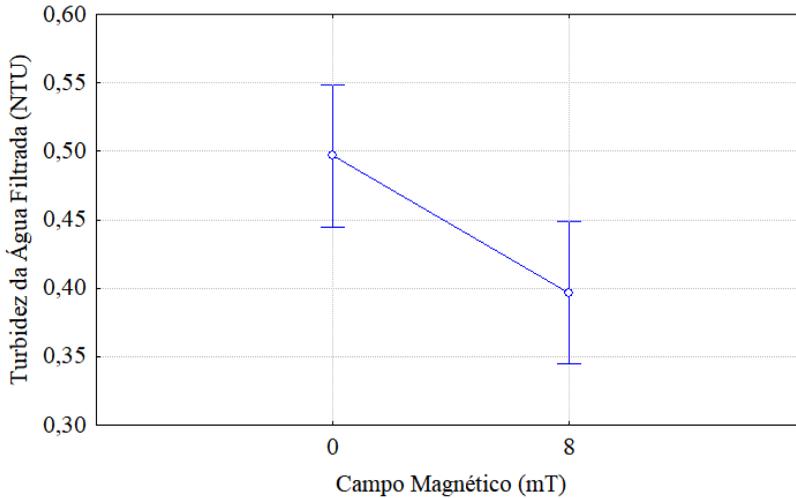


Figura 27. Gráfico da análise de variância – Configuração A (coagulante aplicado após o campo magnético) – 14,4 mgPAC.L⁻¹ – comparação dos ensaios com exposição de 0 x 12 mT.

p = 0,00098

Intervalo de Confiança 0,95

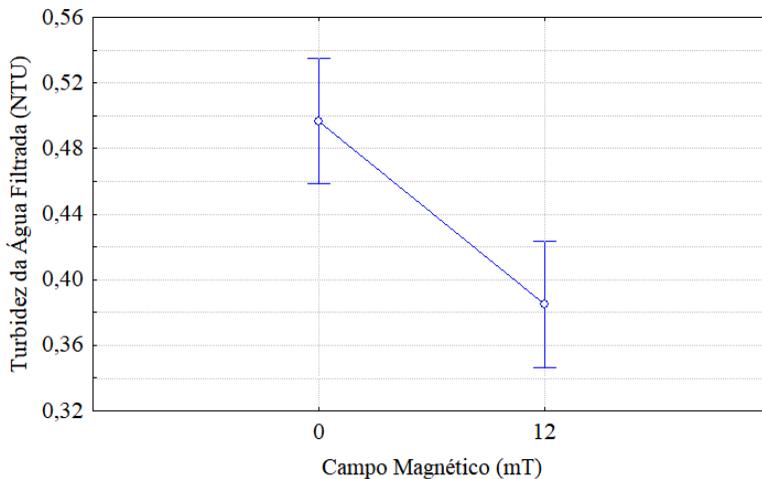


Figura 28. Gráfico da análise de variância – Configuração A (coagulante aplicado após o campo magnético) – 14,4 mgPAC.L⁻¹ – comparação dos ensaios com exposição de 0 x 24 mT.

p = 0,01307

Intervalo de Confiança 0,95

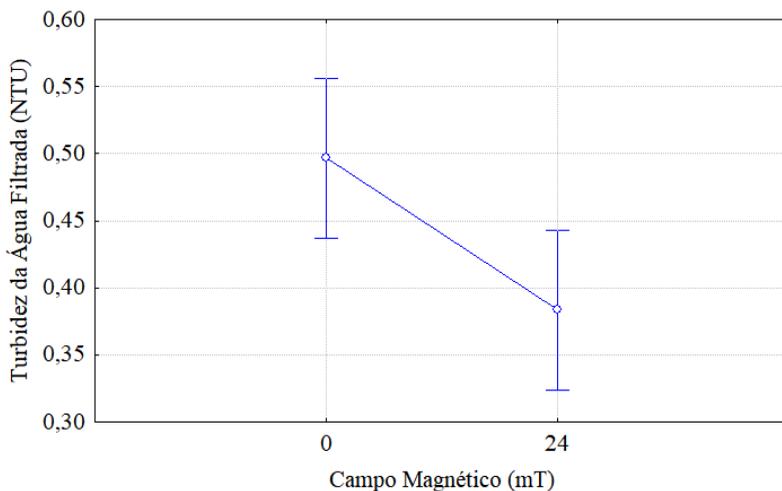


Figura 29. Gráfico da análise de variância – Configuração B (coagulante aplicado antes do campo magnético) – 4,8 mgPAC.L⁻¹ – comparação dos ensaios com exposição de 0 x 8 mT.

p = 0,06428

Intervalo de Confiança 0,95

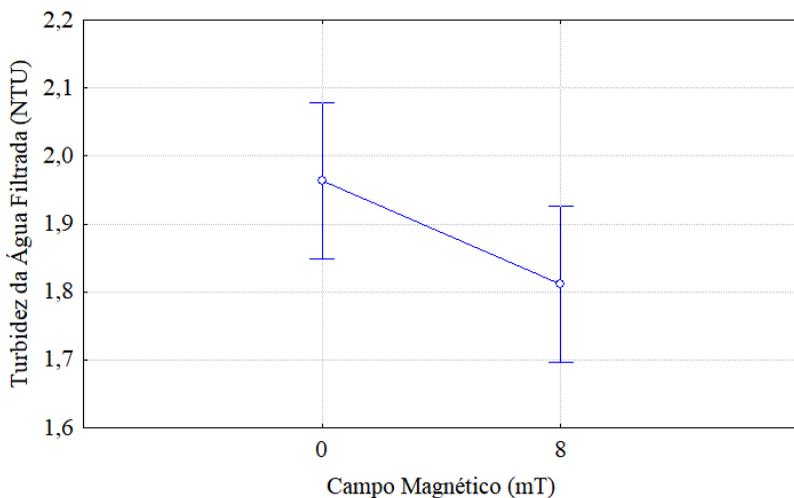


Figura 30. Gráfico da análise de variância – Configuração B (coagulante aplicado antes do campo magnético) – 4,8 mgPAC.L⁻¹ – comparação dos ensaios com exposição de 0 x 24 mT.

$p = 0,02916$

Intervalo de Confiança 0,95

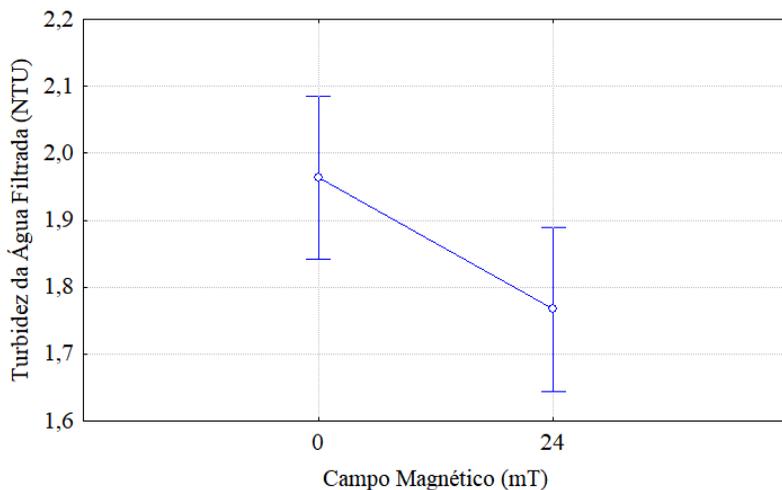


Figura 31. Gráfico da análise de variância – Configuração B (coagulante aplicado antes do campo magnético) – 9,6 mgPAC.L⁻¹ – comparação dos ensaios com exposição de 0 x 12 mT.

$p = 0,00230$

Intervalo de Confiança 0,95

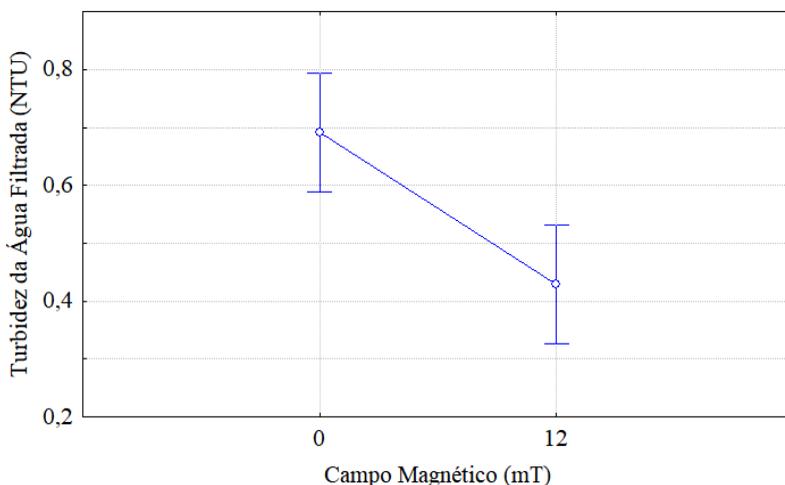


Figura 32. Gráfico da análise de variância – Configuração B (coagulante aplicado antes do campo magnético) – 14,4 mgPAC.L⁻¹ – comparação dos ensaios com exposição de 0 x 12 mT.
p = 0,00098

Intervalo de Confiança 0,95

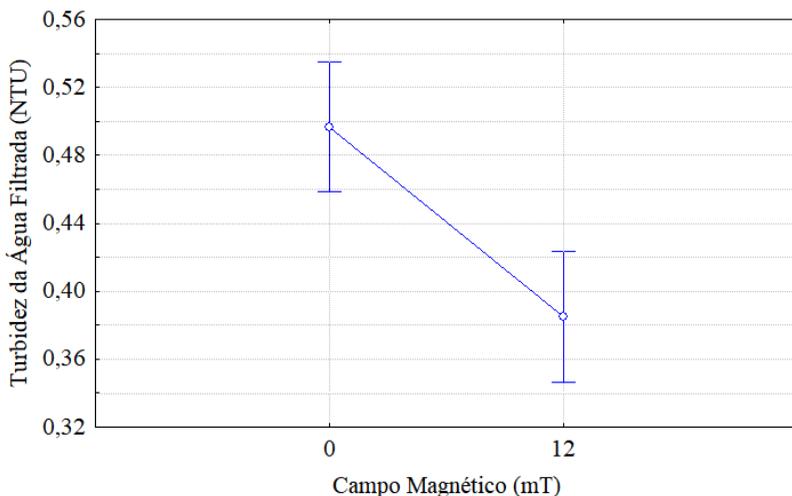
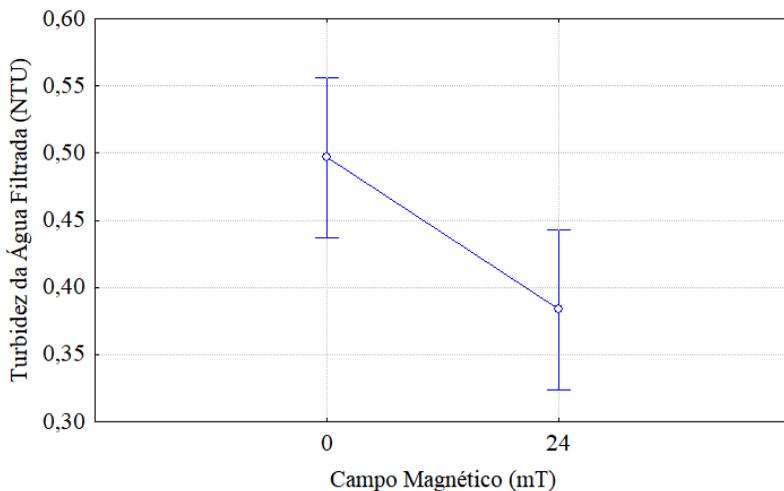


Figura 33. Gráfico da análise de variância – Configuração B (coagulante aplicado antes do campo magnético) – 14,4 mgPAC.L⁻¹ – comparação dos ensaios com exposição de 0 x 24 mT.
p = 0,01307

Intervalo de Confiança 0,95



4.3.3 Análise estatística do acompanhamento da turbidez

A fim de aferir sobre a possibilidade do campo magnético em auxiliar na recuperação da qualidade da água filtrada após a sua lavagem, realizou-se teste estatístico ANOVA para comparar os resultados obtidos nos ensaios com e sem campo magnético durante os primeiros 27 minutos após o início dos ensaios. As Figuras 34, 35, 36 e 37 apresentam a análise para os períodos, 3 a 9, 12 a 15, 18 a 21 e 24 a 27, respectivamente.

Como pode ser visto no primeiro gráfico, na Figura 36, há diferença significativa nos valores de turbidez da água filtrada, porém, são os ensaios sem campo magnético que apresentaram os melhores resultados dos primeiros 3 minutos até aos 9 minutos. A partir dos 12 e até aos 21 minutos, Figura 35 e 36, nota-se que os ensaios com 24 mT apresentaram os menores valores de turbidez, contudo, a diferença entre as médias não foi suficiente para ser considerado significativa, visto que p-value foi superior a 0,05. Após os 24 minutos, Figura 37, é possível notar que os ensaios com campo magnético, principalmente com exposição de 24 mT, tornam-se mais eficientes, apresentando os valores mais baixos de turbidez, confirmados pelo p-value abaixo do nível de significância. Assim, como os ensaios apresentaram diferenças apenas após 24 minutos, não se acredita que a exposição de campo magnético pode contribuir para auxiliar na recuperação mais rápida da qualidade da água filtrada após a lavagem do filtro.

Figura 34. Acompanhamento dos valores de turbidez da água filtrada dos 3 até aos 9 minutos de ensaio.
 $p = 0,01969$

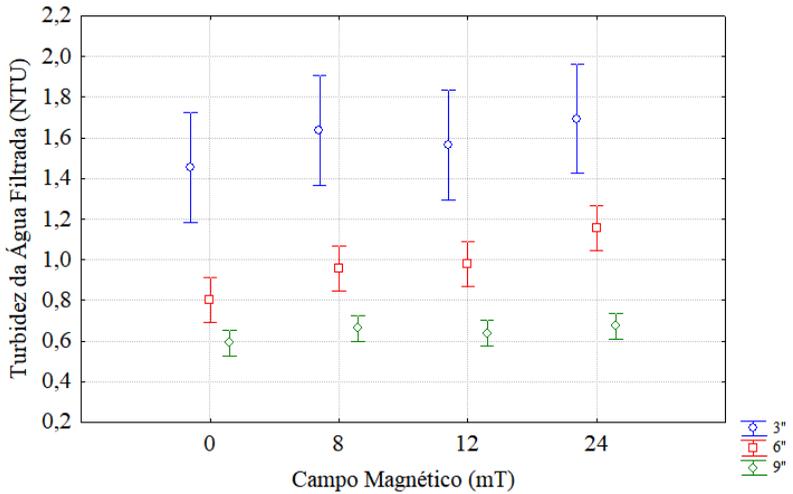


Figura 35. Acompanhamento dos valores de turbidez da água filtrada dos 12 até aos 15 minutos de ensaio.
 $p = 0,18642$

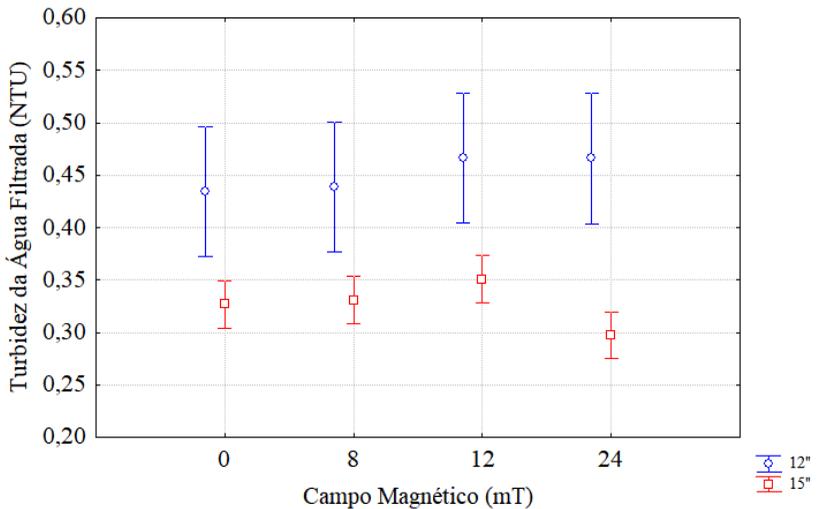


Figura 36. Acompanhamento dos valores de turbidez da água filtrada dos 15 até aos 18 minutos de ensaio.

$p = 0,38307$

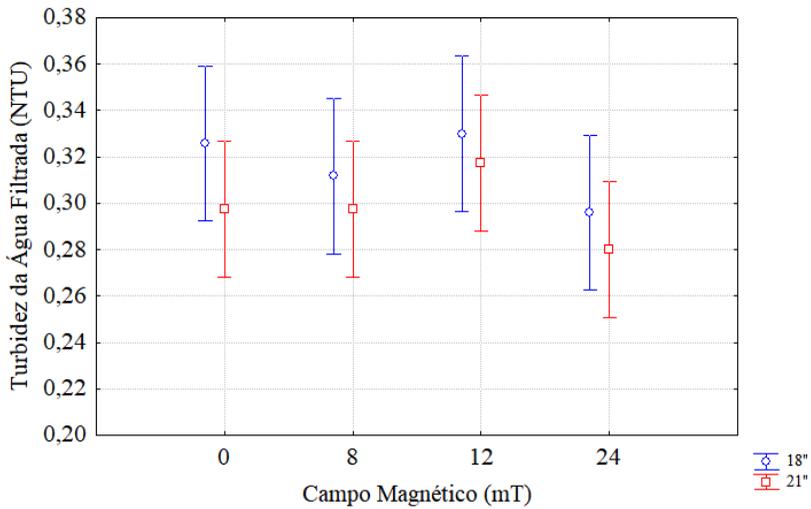
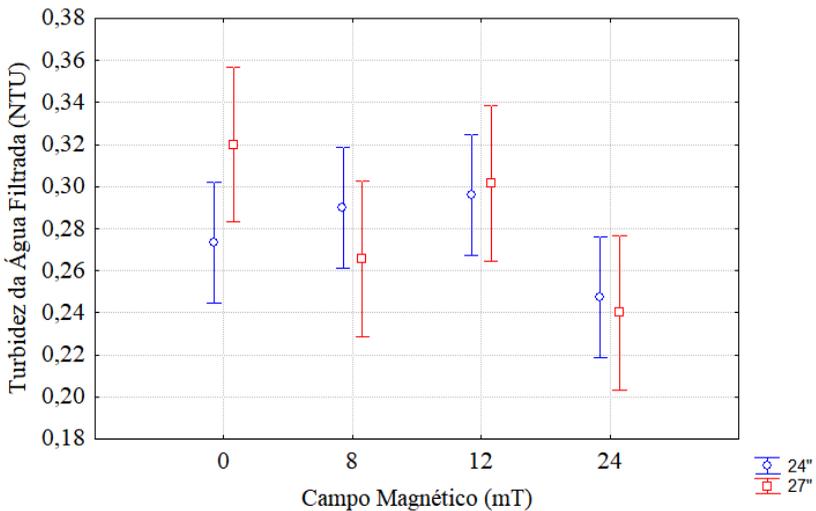


Figura 37. Acompanhamento dos valores de turbidez da água filtrada dos 24 até aos 27 minutos de ensaio.

$p = 0,00614$



4.3.4 Verificação da depleção do pH

Realizou-se a análise de variância a fim de mensurar diferenças significativas na depleção do pH em cada configuração. As Figuras 38, 39 e 40, apresentam os gráficos gerados na análise. A partir dos resultados, todos com p-value acima de 0,05, verifica-se que não há diferenças significativas na depleção do pH, possibilitando a interpretação de que a exposição de campo magnético não influencia na depleção do pH. Desta forma, ratifica-se as conclusões de Silva (2015), que sob efeito do campo magnético, o pH da água pode não sofrer alteração.

Figura 38. Gráfico da análise de variação sobre a depleção do pH – Configuração 0 (sem aplicação de coagulante).

$p = 0,25032$

Intervalo de Confiança 0,95

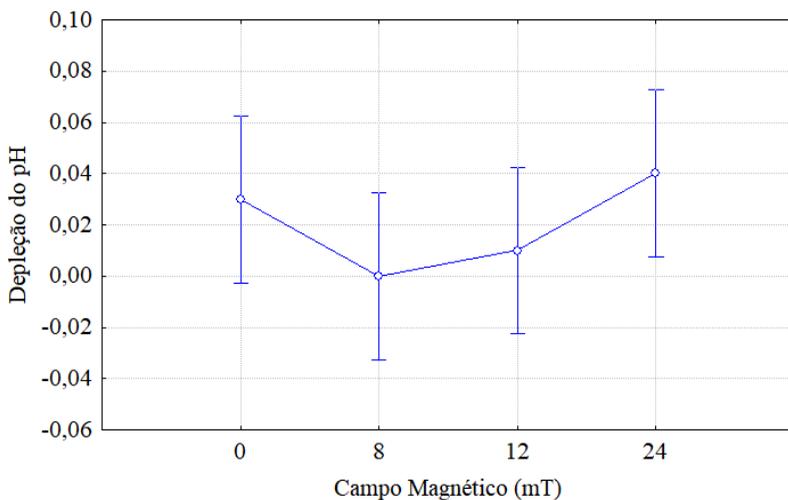


Figura 39. Gráfico da análise de variação sobre a depleção do pH –
Configuração A (coagulante aplicado após o campo magnético).

$p = 0,55345$

Intervalo de Confiança 0,95

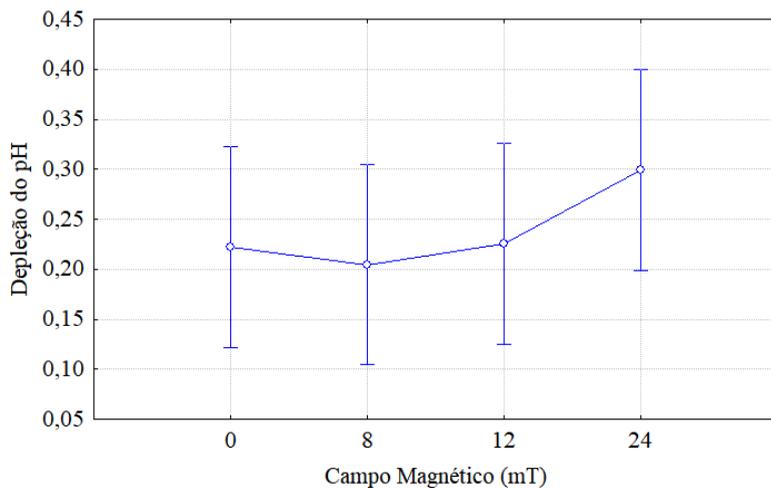
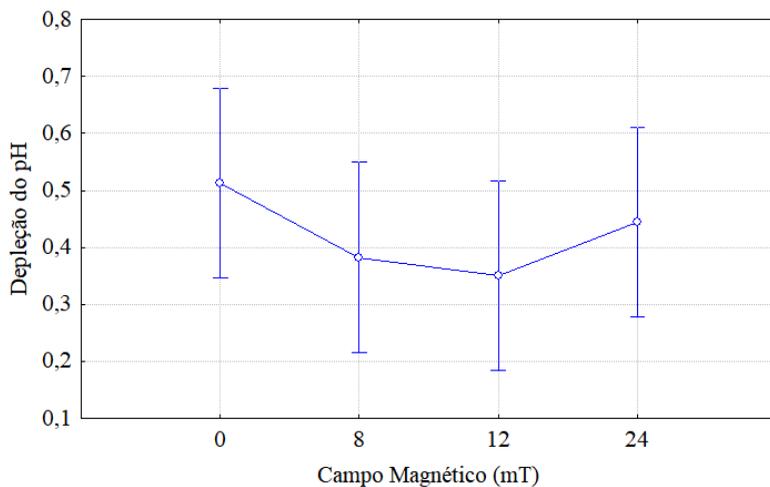


Figura 40. Gráfico da análise de variação sobre a depleção do pH –
Configuração B (coagulante aplicado antes do campo magnético).

$p = 0,52824$

Intervalo de Confiança 0,95



4.3.5 Análise estatística para o ponto de aplicação de coagulante

Por fim, realizou-se uma análise estatística para concluir sobre qual ponto de aplicação obteve os melhores resultados. Primeiramente, foi executado o teste t-Student para verificar se existe uma diferença significativa entre os dados obtidos na Configuração A e B. A Tabela 23 apresenta os resultados do teste.

Tabela 24. t-Student – Configurações A e B.

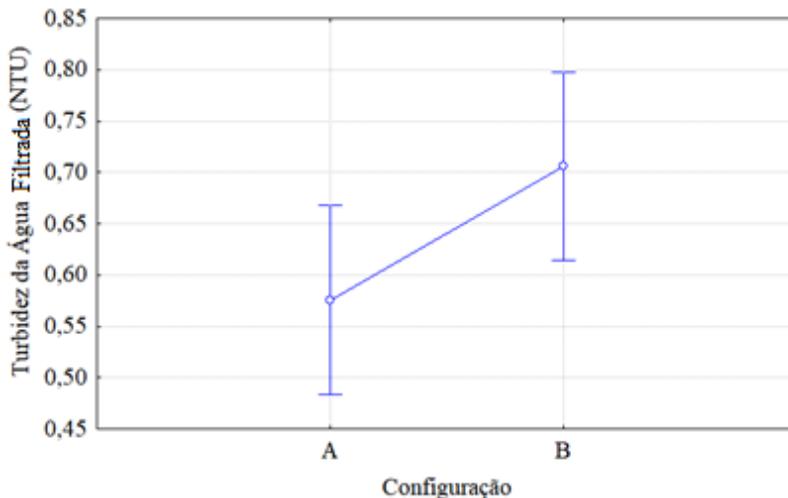
t-Student			
Grupos	Média	Desvio Padrão	p
A	0,57	0,39	0,0000
B	0,71	0,60	

Segundo o teste, há diferença significativa, sendo que a Configuração A obteve os valores mais baixos. Em seguida, realizou-se o teste de análise de variância para confirmar o resultado. A Figura 41 apresenta o gráfico gerado na análise, que confirma a diferença entre os resultados obtidos, uma vez que p-value é inferior a 0,05. Com isto, assegura-se a partir de ferramentas estatísticas que o ponto A de aplicação de coagulante resultou na melhor posição em relação ao campo magnético, ou seja, é mais eficiente a água passar primeiramente pelo campo magnético e depois receber a aplicação de coagulante.

Figura 41. Gráfico da análise de variância sobre o ponto de aplicação coagulante.

$p = 0,04902$

Intervalo de Confiança 0,95



4.4 AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE ECONÔMICA

Para realizar a avaliação da viabilidade econômica, primeiramente, calculou-se o custo do coagulante para 1 m³ de água tratada considerando a concentração ótima de coagulação, 24 mgPAC.L⁻¹. A Tabela 24 apresenta os resultados do cálculo.

Tabela 25. Custos do tratamento apenas com coagulante.

Custo PAC (R\$.kg ⁻¹)	3,20
Concentração (mgPAC.L ⁻¹)	24
Volume de água tratada (m ³)	1
Consumo de coagulante (mg)	24000
Custo (R\$.m ³)	0,08

Em seguida, calculou-se os custos considerando as reduções de coagulante. A Tabela 25 apresenta os resultados do cálculo.

Tabela 26. Custos do tratamento com redução de coagulante.

Concentração (mgPAC.L ⁻¹)	19,2	14,4	9,6	4,8
Consumo de coagulante (mg)	19200	14400	9600	4800
Custo coagulante (R\$.m ³)	0,06	0,05	0,03	0,02

Para determinar os gastos financeiros com a demanda de energia elétrica, determinou-se, primeiramente, o tempo necessário para magnetizar a água considerando a vazão trabalhada no projeto e o tempo de contato no gerador de campo magnético. A Tabela 26 apresenta os resultados da determinação do tempo necessário para magnetizar 1 m³.

Tabela 27. Tempo para magnetizar 1 m³.

Vazão (L.h ⁻¹)	70
Volume (m ³)	1
Tempo (h)	14,3

Visto que o tempo de contato nas bobinas são diferentes – 35, 70 e 105 s para, respectivamente, 24, 12 e 8 mT – e que seus comprimentos diferem na mesma proporção – 0,5; 1,0 e 1,5 m para respectivamente, 24, 12 e 8 mT – e que todas possuem o mesmo diâmetro, o tempo necessário para magnetizar 1 m³ de água é igual para as três bobinas.

Para determinar o custo energético despendido em 14,3 h, considerou-se a potência necessária em cada bobina. A Tabela 27 apresenta os valores determinados.

Tabela 28. Custo de energia elétrica em cada bobina.

Bobina	Potência (W)	Consumo (kWh)	Custo (R\$.m ³)
24 mT	96	1,37	0,60
12 mT	48	0,69	0,30
8 mT	36	0,51	0,23

Por fim, somou-se os custos com geração de campo magnético e com coagulante aplicada em cada um dos melhores ensaios realizados considerando cada intensidade de campo magnético, também fez-se o levantamento dos custos considerando o ensaio com aplicação de 9,6 mgPAC.L⁻¹, na Configuração B, com campo magnético de 12 mT, que foi o ensaio com menor concentração de coagulante e que, com o auxílio do campo magnético, atingiu o padrão de qualidade das Portarias

2914/2011 e de Consolidação nº 05/2017. A Tabela 28 apresenta os resultados.

Tabela 29. Comparação de custos de tratamento.

Campo Magnético (mT)	Configuração	Concentração de PAC (mg.L ⁻¹)	Remoção de Turbidez (%)	Custo (R\$.m ³)
8	A	14,4	95,65	0,28
12	B	9,6	94,62	0,26
12	B	19,2	95,77	0,36
24	B	19,2	96,97	0,66

Desta forma, comparando-se os custos do tratamento apenas com a aplicação de coagulante, R\$ 0,08 m³, com os melhores resultados da associação de redução de coagulante com exposição de campo magnético – 0,28; 0,36 e 0,66 R\$.m³ – torna-se evidente que a segunda opção é mais onerosa. Entretanto, considerando o potencial de geração de energia elétrica presente nos sistemas de abastecimento de água, através do reaproveitamento energético com a geração de energia com microturbinas alimentadas pela carga hidráulica das adutoras (LIMA, 2013), acredita-se na possibilidade de minimização dos custos para a aplicação da tecnologia. Ainda, é possível haver uma configuração que otimize a magnetização e demande menos energia elétrica, diferentemente da implementada nesta pesquisa, além, da utilização de fontes renováveis de energia, como a opção fotovoltaica.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir dos resultados apresentados e da discussão realizada, chegou-se as seguintes conclusões:

- Foi evidenciada a capacidade do campo magnético em potencializar a coagulação quando se observa que a exposição de 8 mT nas Configurações A e B auxiliou na remoção de turbidez;
- A aplicação de campo magnético possui a capacidade de suprir a redução de coagulantes químicos, uma vez que, observou-se que nos ensaios com exposição de 12 mT e redução de 60% da concentração ideal de coagulante, resultados satisfatórios;
- O campo magnético não possui a capacidade de substituir por completo o coagulante químico estudado, visto que na Configuração 0 não foi possível alcançar resultados aceitáveis abaixo de 0,5 NTU;
- A utilização de campo magnético não interfere na depleção do pH da água;
- A magnetização não mostrou potencialidade de recuperação mais rápida da qualidade da água filtrada após a lavagem do filtro;
- O ponto de aplicação do coagulante mais eficiente é após o gerador de campo magnético, ou seja, a água deverá receber primeiro a magnetização e, posteriormente a aplicação de coagulante;
- A aplicação da tecnologia estudada mostra-se, a princípio, com custos mais elevados quando comparado ao cenário de aplicação exclusiva de coagulantes químicos na etapa de coagulação.

Em função do exposto, recomenda-se investigar:

- A possibilidade do campo magnético em auxiliar outras etapas do tratamento de águas;
- Experimentos com taxas de filtração superiores;
- Os resíduos gerados na água de lavagem do filtro;
- O potencial de remoção em outros parâmetros de qualidade de água;

- O efeito no tratamento de águas no uso de outras intensidades de campo magnético e tempo de exposição;
- Outras configurações do sistema de geração de campo magnético, de forma a diminuir os custos com energia elétrica.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHSAN, T. Process Analysis And Optimization Of Direct horizontal-row roughing filtration. IHE Delft Institute for Water Education, 1995.

ALEKSANDROV, V.D.; BARANNIKOV, A.A., DOBRISTA, N.V. **Inorg. Materials** (translation of Neorganicheskie Materialy) 2000, 36, 875.

ALVES, C. **Tratamento de Águas de Abastecimento**. Portugal: Publindústria, Produção de Comunicação, Lda, 2005.

AMBASHTA, R. D.; SILLANPÄÄ, Mika. **Water Purification Using Magnetic Assistance: a review**. Journal Of Hazardous Materials, v. 180, n. 1-3, p. 38-49, 2010.

AMIRI; DADKHAH. **On Reduction in the surface tension of water due to magnetic treatment**. Colloids an surfaces A: PHysicochem. Eng. Aspects 278, 2006. 252-255.

APHA (2017) **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 21st Edition, American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, Washington DC.

AWWA. **Water Quality and Treatment**, 3rd ed., American Water Works Association, McGraw-Hill, New York, 1971. 11 p.

BALIEIRO et al. Efeito do tratamento da água por campo magnético sobre os parâmetros séricos e espessura de gordura subcutânea. Boletim da Indústria animal, N. Odessa, v.70, n.2, p.158-166, 2013.

BAKER, J S.; JUDD, Simon J. **Magnetic Amelioration Of Scale Formation**. Water Research, v. 30, n. 2, p. 247-260, 1996.

BARBOZA, M.A. **Ação de campos magnéticos em alguns sistemas químicos e biológicos**. Dissertação (mestrado). Instituto de química Universidade Estadual de Campinas, 2002.

BARRET, R.A.; PARSONS, S.A. **Water Res.** 1998, 32, 609.

BENEJAD H.; ABDOSALEHI E. **The effect of magnetic field on water hardness reducing**. Thirteenth International Water Technology Conference, IWTC 13 2009, Hurghada, Egypt, pp 117-128.

BENOTTI, Mark J. et al. **Pharmaceuticals and Endocrine Disrupting Compounds in U.S. Drinking Water**. Environmental Science & Technology, [s.l.], v. 43, n. 3, p.597-603, fev. 2009. American Chemical Society (ACS).

BERTHOUEX, P; BROWN, L. **Statistics for Environmental Engineers**. 2ª Boca Raton London New York Washington, D.c: Lewis Publishers, 2002. 10-13 p.

BRASIL – Ministério da Saúde (2011). “Portaria N° 2914 em 12 de dezembro de 2011.”

BRASIL. Fundação Nacional de Saúde. Manual de fluoretação da água para consumo humano / Fundação Nacional de Saúde. – Brasília: FUNASA, 2012. 72 p.

BRASIL. Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento. Diagnóstico dos serviços de Água e Esgoto - 2014. Brasília: SNIS, 2016.

BRATBY, J. Coagulation and Flocculation in water and wastewater treatment. IWA publishing, 2006.

BUDD, G. C. et al. **Coagulation applications for new treatment goals**. Journal of American Water Works Association. 2004. v. 96, n. 2. p. 102-113.

CAI; YANG; ZHU. **The effects of magnetic field on water molecular hydrogen bonds**. Journal of molecular Structure 938, 2009, pp 15-19.

CHHATWANI, P. (2011). **Amazing uses of magnetised water**. Health and Fitness Article. <http://EzineArticles.com/?expert=PremChhatwani>

COEY, J.; CASS, S. **Magnetic water treatment**. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, v.209, p.71-74, 2000.

COLIC, M; MORSE, D. Effectsof amplitude of the radio frequency electromagnetic radiation on aqueous suspensions and solutions. Journal of colloid and interface science, v. 200, n. 2, p. 265-272, 1998.

DALSASSO, R. L. “Estudo de Diferentes Materiais para Floculação em Meio Granular, Precedendo a Filtração Rápida Descendente no Tratamento de Água para Abastecimento Humano”. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Santa Catarina – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, 2005. 272 p.: il.

DE BASTOS, M. C. **A Neurotoxicidade do Alumínio e Sistemas Neuronais de Fosforilação**. Universidade de Aveiro - Departamento de Biologia. 2007.

DI BERNARDO, L., BRANDÃO, C. C. S., & HELLER, L. PROSAB – Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. **Tratamento de Águas de Abastecimento Por Filtração Em Múltiplas Etapas**, 114, (1999).

DI BERNARDO, L.; DI BERNARDO, A, CENTURIONE FILHO PL. Ensaio de tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água. São Carlos: RIMA; 2002.

DI BERNARDO, L. (Coord.); MENDES, C. G. N.; BRANDÃO, C. C. S.; SENS, M. L. & PÁDUA, V. L. **Tratamento de Água para Abastecimento por Filtração Direta**. Rio de Janeiro, ABES, 498p., 2003.

DI BERNARDO L.; DANTAS, A.D. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2 Ed. São Carlos: RIMA. 2005. 1566 p.

DI BERNARDO, L. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. Rio de Janeiro, ABES. 1993

DI BERNARDO, I.; SCALIZE, P. S. Estudo da disposição de resíduos gerados em estação de tratamento de água em decantador primário de estação de tratamento de esgoto. In: X SIBESA - SIMPÓSIO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2010, Maceió.

FARIA, R. N.; LIMA, L. F. C. P. **Introdução ao magnetismo dos materiais**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2005. 198 p.

FLATTEN, T. Aluminium as a risk factor in Alzheimer's Disease, with emphasis on drinking water. *Brain Research Bulletin*, v. 55, n. 2, p. 187-196, 2001.

FRANCO JR, M; ROCHA, N; MOURA, A. **Efeito do campo magnético no processo de coagulação para tratamento de água contaminada com las**. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, v. 2, n. 2, p. 116-124, 2016.

FUJIWARA, S.; NISHIMOTO, Y. *Anal. Sci.* 1992, 8, 873-875.

GABRIELLI, C.; JAOUHARI, R.; MAURIN, G.; KEDDAM, M. **Magnetic Water Treatment for Scale Prevention**. *Water Research*. Vol 35, No. 13, p. 3249-3259, 2001.

GUIMARÃES, N. C.; PÁDUA, V. L. In: 23º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2005, Campo Grande.

HATAMIE, A., PARHAM, H., ZARGAR, B., HEIDARI, Z. **Evaluating Magnetic nano-ferrofluid as a novel coagulant for surfacewater treatment**. *Journal Of Molecular Liquids*, 219, 694-702, 2016.

Health Canada. (1998). **Aluminum**. Health Canada. 2010.

HESPANHOL, Ivanildo et al. **Reúso potável direto e o desafio dos poluentes emergentes**. *Crise Hídrica, São Paulo*, v. 106, n. 79, p.79-94, jul. 2015. Trimestral.

HIGASHITANI, K., OKUHARA, K., HATADE, S. Effects Of Magnetic Fields Instability Of non-magneticultrafine colloidal particles. *J. Coll. Int. Sci.*, 152: 125–131, 1992.

HIGASHITANI, K., KAGE, A., KATAMURA, S., IMAI, K., AND HATADE, S. **Effects Of Magnetic Field Formation Of CaCO₃ particles**. *J. Coll. Int. Sci.*, 156: 90–95, 1993.

HIGASHITANI, K., ISERI, H., OKUHARA, K., KAGE, A., HATADE, S. **Magnetic effectson zeta potential and diffusivity of non magnetic colloidal particles**. Journal of Colloid and Interface Science, 172(2), 383-388, 1995.

HIGASHITANI, K. **Effects Of Magnetic Field Stability Of non-magnetic colloidal particles**; Proceedings Of The 2nd International Meeting on Anti-Scale Magnetic Treatment: Cranfield University, UK, 1996.

IMRAY, P., MOORE, M. R., CALLAN, P. W., E LOCK, W. **Aluminium: Reportofa International Meeting**. Australia: National Environmental Health Forum, 1998.

INSTITUT DE VEILLE SANITAIRE. Evaluation des risques sanitaires liés à l'exposition da la population française à l'aluminium. Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments. 2003.

INSUA et al. Efecto del agua tratada magnéticamente sobre los procesos biológicos. Revista Eletrônica de Veterinária, v.10, n.4, 2009.

KOCHMARSKY, V. Magnetic treatment of watr; possible mechanisms and conditions for applications. Mag. Electrical Sep., vol. 7, p. 77-107, 1996.

KREWSKI, D., YOKEL, R. A., NIEBOER, E., BORCHELT, D., COHEN, J., HARRY, J., RONDEAU, V. **Human heal thrisk assessment for aluminium, aluminium oxide, andaluminiumhydroxide**. Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B, 10(S1), 1-269, 2007.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 2. Ed. Campinas: Editora Átomo, 2008.

LIMA, G. **Microgeração em Sistemas de Abastecimento de Água**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Itajubá. 86 p. 2013.

LYCHAGIN, N.I. **Changing Properties Of Magnetized Water**. Russ. Phys. J., 17(2): 229–233, 1974.

MACINTYRE, A. **Instalações hidráulicas**. Rio de Janeiro: Guanabara, 1991.

MANAHAN, S. **Environmental science, technology, and chemistry**. Environmental Chemistry Boca Raton: CRC Press LLC, 2000.

MARNOTO, M. J. E. “A Influência da Expansão da Areia Durante a Retrolavagem dos Filtros Lentos sobre a Qualidade da Água para Abastecimento e a Duração das Carreiras”. Dissertação de Mestrado – Instituto Superior de Agronomia – Universidade Técnica de Lisboa – Engenharia do Ambiente – Tecnologia Ambiental, 2008. 86 p.: il.

MARNOTO, M. J. E.; DALSASSO, R. L.; DUARTE, E. A.; SENS, M. L. “**A Influência da Expansão da Areia Durante a Retrolavagem na Qualidade da Água para Abastecimento Produzida por Filtros Lentos**”. XXXI Congresso Interamericano AIDIS. Santiago, Chile, 2008. 7p.

MELO FILHO, L. C. “**Avaliação da Ozonização como pré ou pós-tratamento à Filtração Direta Descendente na Remoção de Cianobactérias e Saxitoxinas**”. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Santa Catarina – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, 2006. 268 p.: il.

MENDES, B., E OLIVEIRA, J. F. **Qualidade da água para consumo humano**. Portugal: LIDEL, Edições Técnicas, Lda, 2004.

MOLINA, N. F.; RODRÍGUEZ, E. J. M.; ARIZA, C. P. Coagulantes naturales en sistemas de flujo continuo, como sustituto del $Al_2(SO_4)_3$ para clarificación de aguas. Producción + Limpia, [s.l.], v. 11, n. 2, p.41-54, 2016.

MONDARDO, R. I. “Influência da Pré-Oxidação na Tratabilidade das Águas via Filtração Direta Descendente em Manancial com Elevadas Concentrações de Microalgas e Cianobactérias”. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, 2004. 147 p.: il.

MONDARDO, R. I. “Avaliação da Filtração em Margem como pré-tratamento à Filtração Direta Descendente na Remoção de Células de Cianobactérias e Saxitoxinas”. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Santa Catarina – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, 2009. 308 p.: il

MONDARDO, R. I.; SENS, M. L.; DALSSASSO, R. L.; SILVA, R. L.; PROENÇA, L. A. O. “**Filtração em Margem: Alternativa como um Pré-Tratamento à Filtração Direta na Remoção de Cianobactérias e Saxitoxinas**”. XXXI Congresso Interamericano AIDIS. Santiago, Chile, 2008. 8p.

NATIONAL ENVIRONMENTAL HEALTH FORUM. **Report of International Meeting**. National Environmental Health Forum. 1995.

OLÍMPIO, J. “**Caracterização e Conservação dos Ecossistemas da Ilha de Santa Catarina**”. Uma Cidade numa Ilha. CECCA. Florianópolis: Editora Insular, 1996.

OSHITANI, J., YAMADA, D., MIYAHARA, M., HIGASHITANI, K. **Magnetic effectonion-exchange kinetics**. Journal Of Colloid And interface science, 210(1), 1-7, 1999.

OZEKI, S. et al. J. **PHys**. Chem.1996, 100, 4250.

PEIXOTO, E. Governo do Estado de São Paulo. **Alumínio**. São Paulo: Química Nova na Escola, 2001. 1 p.

PEIXOTO, E. Governo do Estado de São Paulo. **Cloro**. São Paulo: Química Nova na Escola, 2003. 1 p.

PEIXOTO, E. Governo do Estado de São Paulo. **Flúor**. São Paulo: Química Nova na Escola, 1998. 1 p.

PORTELLA, K.F.; ANDREOLI, C.V.; HOPPEN, C.; SALES, A. BARON, O. **Caraterização físico-química do lodo centrifugado da estação de tratamento de água Passaúna** – Curitiba – Pr. 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária Ambiental. Joinvile, 2003.

PORTO, M. **Alterações de propriedades da água por processos físicos e químicos.** Tese de Doutorado. Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, 2004.

RAMIRES, I.; BUZALAF, M. **Manual: flúor e fluoretação da água de abastecimento público.** Bauru: [s.n.], 2005. 155 p.

RICHTER, C. A.; AZEVEDO NETTO, J. M. **Tratamento de água: tecnologia atualizada.** São Paulo: E. Blücher, 2003.

RONDEAU, V., COMMENGES, D., JACQMIN-GADDA, H., DARTIGUES, F. **Relation between Aluminum Concentrations in Drinking Water and Alzheimer's Disease: An 8-year Follow-up Study.** American Journal of Epidemiology, vol.152, No.1, 59–66, 2000.

RÔLA, A.; CASTRO, G.; SANTANA, H.; SOUZA, J.; SILVA, D. Avaliação da eficiência de coagulantes comerciais para aplicação em sistemas de tratamento de água. Journal of Chemical Engineering and Chemistry – JCEC. Revista de Engenharia Química e Química. 2016. 21p.

ROSALINO, M. **Potenciais Efeitos da presença de alumínio na água de consumo humano.** Dissertação (Licenciatura em Ciências de Engenharia do Ambiente) - Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2011. 85p.

SANTOS, T., NISHI, L., MANTOVANI, D., VIEIRA, A., BERGAMASCO, R., VIEIRA, M. Tratamento de água utilizando coagulante magnético baseado em extrato de sementes de moringa oleífera lam e nanopartículas de óxido de ferro. Blucher Chemical Engineering Proceedings, 2, 818-823, 2015.

SCHALY, R. **Estudo da viabilidade do tratamento eletromagnético para água de resfriamento em indústrias químicas.** Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química. 118 p. 2015.

SHAPIRO, S.S.; WILK, M.B. (1965). **An Analysis of Variance Test for Normality.** Biometrika, v. 52, n. 3/4, p. 591-611, 1965.

SHEPARD, D.P., EDLING, B., REIMERS, R. **Magnetic Water Treatment**. Golf Course Management, 63(3): 55–58, 1995.

SILVA, F. Efeito de campo magnético sobre as características físico-químicas de uma solução de albumina de soro bovino (BSA) e seu desempenho na ultrafiltração. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos. 90 p. 2015.

SOARES, M. C. P. Introdução à magnetoquímica e aos metais de transição. UNICAMP, 2013. 22p.

SPIEGEL, M. **Method And Apparatus for applying magnetic fields to fluids**. U.S. Patent Application n. 08/417,143, 23 jun. 1998.

TEIXEIRA, S. T.; MELO, W. J.; SILVA, E. T. **Aplicação de lodo da estação de tratamento de água em solo degradado**. Brasília, vol.40, n. 1, jan. 2005.

TEIXEIRA, S. R. et. al. Efeito da adição de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades de material cerâmico estrutural. São Paulo, 2006.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. Física para cientistas e engenheiros: eletricidade e magnetismo, óptica. v.2. LTC, 2009. 499 p.

VICK, W.S. Magnetic Fluid Conditioning. In Proceedings Of The 1991 Specialty Conference on Environmental Engineering. American Society of Civil Engineers: Res-ton, VA, 1991.

WALTON, J.R. Aluminum's involvement in the progression of Alzheimer's disease. Journal of Alzheimer's Disease 2013, 35, 7.

WANG, Y., PUGH, R.J., FORSSBERG, E. The influence of interparticle surface forces on the coagulation of weakly magnetic mineral ultrafine in a magneticfield. Colloids Surf. A., 90(2–3): 117–133, 1994.

WANG, Y., BABCHIN, J., CHERNYI, L. T., CHOW, R. S., SAWATZKY, R. P. **Rapid Onset Of Calcium Carbonate**

Crystallization Under the influence of a magnetic field. Water Research, 31(2), 346-350, 1997.

WHITFORD, G. M. **The metabolism and toxicity of fluoride.** 2. Ed. Basel: Karger, 1996.

WHO. **Aluminium in Drinking Water**, 2003. World Health Organization.

YOUNG, H.; FREEDMAN, R., **FISICA IV - Ótica e Física Moderna**, 12a ed. São Paulo, Addison Wesley, 2009;

ZAIDI, N. S., SOHAILI, J., MUDA, K., & SILLANPÄÄ, M. **Magnetic field application and its potential in water and wastewater treatment systems.** Separation & Purification Reviews, 43(3), 206-240, 2014.

ZHAO, Y.; ZHAO, L.; XING, W.; BUXING, H.; HAIKE, Y. **Effect of magnetic field on enthalpy of solution of KCl in water.** J. Therm. Anal. 1995, 45, 13.

ZHOU, K.; ZHOU, Q.; GUIWU, L.; SONG, J. **Monte Carlo simulation of liquid water in a magnetic field.** J. Appl. Phys. 2000;88 (4): 1802-1805.

ZULARISAM, A.W., FADIL. O., JOHAN, S. **Electromagnetic Technology on Sewage Treatment.** Thesis of Philosophy of Doctorate: Universiti Teknologi Malaysia, 2007.

7 APÊNDICE

Tabela 30. Resultados dos ensaios de jar test.

[PAC] mg.L ⁻¹	Turbidez (NTU)	pH	[PAC] mg.L ⁻¹	Turbidez (NTU)	pH
5,00	1,29	7,34	20,00	1,24	7,02
10,00	1,23	7,41	20,00	1,50	6,88
12,00	1,46	7,33	20,00	1,01	6,83
13,00	1,33	7,21	21,00	1,52	6,95
14,00	1,06	7,14	21,00	1,68	6,72
15,00	1,31	7,15	22,00	1,13	6,83
15,00	1,10	7,05	22,00	1,14	6,75
16,00	1,31	7,12	22,00	1,70	6,73
17,00	1,28	7,01	23,00	1,17	6,79
17,00	1,33	7,09	23,00	0,98	6,77
17,00	1,02	7,00	24,00	0,75	6,77
18,00	1,23	7,05	24,00	0,82	6,72
18,00	1,28	6,92	24,00	0,62	6,69
18,00	1,01	7,11	24,00	0,80	6,71
19,00	1,25	6,89	26,00	1,28	6,52
19,00	1,08	6,99	30,00	1,31	6,12

Tabela 31. Resultados dos ensaios da Configuração 0 (sem aplicação de coagulante).

Configuração 0							
Campo Magnético (mT)	pH Inicial	pH Final	Turbidez Água Bruta (NTU)	Turbidez Água Filtrada (NTU)	Remoção de Turbidez (%)	Cor Aparente Água Bruta (uH)	Cor Aparente Água Tratada (uH)
0	7,20	7,19	6,56	2,61	60,27	30	20
	7,20	7,15	8,08	2,95	63,39	40	15
	7,20	7,17	6,13	2,72	55,42	25	15
Média	7,20	7,17	6,92	2,76	59,69	32	17
8	7,20	7,20	9,75	3,20	67,02	35	15
	7,20	7,20	8,46	3,00	64,45	30	10
	7,30	7,30	9,23	3,11	66,29	25	10
Média	7,23	7,23	9,15	3,10	65,92	30	12
12	7,14	7,14	8,57	3,09	63,78	25	10
	7,27	7,25	8,02	3,16	60,47	30	10
	7,28	7,27	7,86	3,17	59,60	25	10
Média	7,23	7,22	8,15	3,14	61,28	27	10
24	7,14	7,13	9,45	2,76	70,92	25	10
	7,16	7,14	8,25	3,43	58,43	25	10
	7,28	7,19	6,55	3,39	48,26	25	10
Média	7,19	7,15	8,08	3,19	59,21	25	10

Tabela 32. Resultados dos ensaios da Configuração A (coagulante aplicado após o campo magnético) - 4,8 mgPAC.L⁻¹.

Configuração A			[PAC]		4,8 mgPAC.L		
Campo Magnético (mT)	pH Inicial	pH Final	Turbidez Água Bruta (NTU)	Turbidez Água Filtrada (NTU)	Remoção de Turbidez (%)	Cor Aparente Água Bruta (uH)	Cor Aparente Água Tratada (uH)
0	7,59	7,35	6,00	1,50	73,72	25	10
	7,11	7,10	9,80	1,09	88,91	25	10
	7,19	7,12	9,52	1,29	85,95	40	10
Média	7,30	7,19	8,44	1,29	82,86	30	10
8	7,28	7,16	6,42	1,07	83,23	25	10
	7,22	7,19	7,81	1,24	84,20	25	10
	7,12	7,02	7,60	1,31	82,83	35	10
Média	7,21	7,12	7,28	1,20	83,42	28	10
12	7,39	7,20	5,15	1,25	75,81	35	10
	7,29	7,15	9,18	1,42	84,50	35	10
	7,29	7,14	8,83	1,35	84,72	35	10
Média	7,32	7,16	7,72	1,34	81,68	35	10
24	7,65	7,22	5,98	1,36	77,12	25	10
	7,30	7,18	7,97	1,11	86,00	25	10
	7,30	7,18	6,96	1,42	79,20	30	10
Média	7,42	7,19	6,97	1,30	80,77	27	10

Tabela 33. Resultados dos ensaios da Configuração A (coagulante aplicado após o campo magnético) - 9,6 mgPAC.L⁻¹.

Campo Magnético (mT)	Configuração		[PAC]				9,6 mgPAC.L	
	pH Inicial	pH Final	Turbidez Água Bruta (NTU)	Turbidez Água Filtrada (NTU)	Remoção de Turbidez (%)	Cor Aparente Água Bruta (uH)	Cor Aparente Água Tratada (uH)	
0	7,17	6,99	6,02	0,74	87,79	30	10	
	7,35	7,20	6,18	0,72	88,41	25	10	
	7,35	7,20	7,01	0,75	89,26	25	10	
Média	7,29	7,13	6,40	0,73	88,49	27	10	
8	7,17	6,95	6,79	0,67	90,11	30	5	
	7,17	7,11	6,76	0,69	89,78	30	10	
	7,09	7,06	7,22	0,50	93,14	25	10	
Média	7,14	7,04	6,92	0,62	91,01	28	8	
12	7,29	7,06	6,35	0,79	87,55	30	5	
	7,16	7,05	5,65	0,47	91,65	30	5	
	7,09	7,05	7,15	0,51	92,84	30	5	
Média	7,18	7,05	6,38	0,59	90,68	30	5	
24	7,29	7,09	6,34	0,74	88,38	30	5	
	7,25	7,12	6,03	0,48	92,04	25	5	
	6,97	6,88	9,65	0,48	95,08	25	5	
Média	7,17	7,03	7,34	0,56	91,83	27	5	

Tabela 34. Resultados dos ensaios da Configuração A (coagulante aplicado após o campo magnético) - 14,4 mgPAC.L⁻¹.

Configuração A			[PAC]		14,4 mgPAC.L		
Campo Magnético (mT)	pH Inicial	pH Final	Turbidez Água Bruta (NTU)	Turbidez Água Filtrada (NTU)	Remoção de Turbidez (%)	Cor Aparente Água Bruta (uH)	Cor Aparente Água Tratada (uH)
0	7,26	7,13	5,57	0,44	92,09	25	5
	7,16	7,03	6,99	0,45	93,35	20	5
	7,28	7,04	7,39	0,50	93,19	20	5
Média	7,23	7,07	6,65	0,46	92,88	22	5
8	7,27	7,12	6,92	0,36	94,64	20	5
	7,16	6,99	6,28	0,15	97,59	20	5
	7,22	6,97	8,52	0,45	94,71	25	5
Média	7,22	7,03	7,24	0,32	95,65	22	5
12	7,25	7,15	7,14	0,39	94,52	20	5
	7,15	6,99	7,35	0,39	94,67	30	5
	7,05	7,01	5,79	0,38	93,43	30	5
Média	7,15	7,05	6,76	0,39	94,21	27	5
24	7,20	7,11	7,54	0,45	94,09	20	5
	7,10	6,91	6,57	0,33	94,97	30	5
	7,05	6,89	6,96	0,37	94,67	30	5
Média	7,12	6,97	7,02	0,38	94,58	27	5

Tabela 35. Resultados dos ensaios da Configuração A (coagulante aplicado após o campo magnético) - 19,2 mgPAC.L⁻¹.

Configuração A			[PAC] 19,2 mgPAC.L				
Campo Magnético (mT)	pH Inicial	pH Final	Turbidez Água Bruta (NTU)	Turbidez Água Filtrada (NTU)	Remoção de Turbidez (%)	Cor Aparente Água Bruta (uH)	Cor Aparente Água Tratada (uH)
0	7,16	6,98	6,51	0,34	94,85	30	5
	7,00	6,68	5,58	0,37	93,34	30	10
	7,25	7,05	8,73	0,34	96,10	25	5
Média	7,14	6,90	6,94	0,35	94,77	28	7
8	7,14	6,99	5,73	0,27	95,39	25	5
	7,12	6,62	5,86	0,27	95,47	35	10
	7,25	7,02	6,12	0,30	95,09	25	5
Média	7,17	6,88	5,90	0,28	95,32	28	7
12	7,16	6,95	7,00	0,33	95,29	30	5
	7,12	6,88	6,90	0,26	96,21	30	5
	7,12	6,71	6,51	0,30	95,47	30	5
Média	7,13	6,85	6,80	0,30	95,65	30	5
24	7,22	7,05	5,49	0,34	93,80	25	5
	7,35	6,80	8,43	0,35	95,78	35	10
	7,28	6,81	7,25	0,32	95,55	30	10
Média	7,28	6,89	7,06	0,34	95,04	30	8

Tabela 36. Resultados dos ensaios da Configuração A (coagulante aplicado após o campo magnético) – 24,0 mgPAC.L⁻¹.

Configuração A			[PAC]		24,0 mgPAC.L		
Campo Magnético (mT)	pH Inicial	pH Final	Turbidez Água Bruta (NTU)	Turbidez Água Filtrada (NTU)	Remoção de Turbidez (%)	Cor Aparente Água Bruta (uH)	Cor Aparente Água Tratada (uH)
0	7,31	7,04	5,86	0,34	94,19	30	5
	7,65	6,78	6,90	0,25	96,38	35	10
	7,11	6,92	8,39	0,31	96,19	20	5
Média	7,36	6,91	7,05	0,30	95,58	28	7
8	7,22	7,06	5,30	0,08	98,60	20	5
	7,57	6,82	6,02	0,22	96,34	25	10
	7,29	7,14	7,14	0,31	95,66	30	5
Média	7,36	7,01	6,15	0,20	96,87	25	7
12	7,30	7,05	5,75	0,26	95,56	20	5
	7,68	6,96	7,67	0,28	96,34	25	10
	7,18	6,79	7,32	0,34	95,31	30	5
Média	7,39	6,93	6,91	0,29	95,74	25	7
24	7,30	6,88	6,62	0,30	95,54	20	5
	7,69	6,98	7,34	0,27	96,29	30	10
	7,58	6,94	7,87	0,30	96,23	30	5
Média	7,52	6,93	7,27	0,29	96,02	27	7

Tabela 37. Resultados dos ensaios da Configuração B (coagulante aplicado antes do campo magnético) - 4,8 mgPAC.L⁻¹.

Configuração B			[PAC] 4,8 mgPAC.L				
Campo Magnético (mT)	pH Inicial	pH Final	Turbidez Água Bruta (NTU)	Turbidez Água Filtrada (NTU)	Remoção de Turbidez (%)	Cor Aparente Água Bruta (uH)	Cor Aparente Água Tratada (uH)
0	7,39	7,30	6,82	2,06	69,83	30	10
	7,29	7,14	12,85	1,94	84,91	30	10
	7,75	7,19	9,26	1,90	79,52	30	10
Média	7,48	7,21	9,64	1,96	78,08	30	10
8	7,66	7,61	8,71	2,00	76,69	30	10
	7,29	7,20	7,96	1,68	78,77	25	10
	7,82	7,21	8,85	1,76	80,11	30	10
Média	7,59	7,34	8,51	1,81	78,52	28	10
12	7,46	7,09	12,90	2,22	82,73	30	10
	7,29	7,18	10,90	1,96	82,03	25	10
	7,46	7,15	8,34	1,72	79,30	30	10
Média	7,40	7,14	10,71	1,97	81,35	28	10
24	7,46	7,21	9,26	1,81	80,43	30	10
	7,54	7,34	10,78	1,90	82,35	30	10
	7,46	7,03	8,73	1,59	81,74	30	10
Média	7,49	7,19	9,59	1,77	81,51	30	10

Tabela 38. Resultados dos ensaios da Configuração B (coagulante aplicado antes do campo magnético) - 9,6 mgPAC.L⁻¹.

Configuração B			[PAC]	9,6 mgPAC.L			
Campo Magnético (mT)	pH Inicial	pH Final	Turbidez Água Bruta (NTU)	Turbidez Água Filtrada (NTU)	Remoção de Turbidez (%)	Cor Aparente Água Bruta (uH)	Cor Aparente Água Tratada (uH)
0	7,17	6,99	7,28	0,65	91,02	30	10
	7,35	7,20	7,28	0,72	90,16	25	10
	7,35	7,20	6,47	0,71	89,04	25	10
Média	7,29	7,13	7,01	0,69	90,08	27	10
8	7,17	6,95	7,28	0,74	89,91	30	5
	7,09	7,06	8,10	0,57	92,96	25	10
	7,17	7,11	7,62	0,64	91,66	30	10
Média	7,14	7,04	7,66	0,65	91,51	28	8
12	7,29	7,06	7,78	0,27	96,59	30	5
	7,09	7,05	8,67	0,43	95,10	30	5
	7,16	7,05	7,62	0,60	92,17	30	5
Média	7,18	7,05	8,02	0,43	94,62	30	5
24	7,29	7,09	8,48	0,72	91,55	30	5
	6,97	6,88	7,48	0,75	89,96	25	5
	7,25	7,12	7,62	0,64	91,60	25	5
Média	7,17	7,03	7,86	0,70	91,03	27	5

Tabela 39. Resultados dos ensaios da Configuração B (coagulante aplicado antes do campo magnético) - 14,4 mgPAC.L⁻¹.

Configuração B			[PAC] 14,4 mgPAC.L				
Campo Magnético (mT)	pH Inicial	pH Final	Turbidez Água Bruta (NTU)	Turbidez Água Filtrada (NTU)	Remoção de Turbidez (%)	Cor Aparente Água Bruta (uH)	Cor Aparente Água Tratada (uH)
0	7,26	7,13	5,57	0,44	92,09	25	5
	7,16	7,03	6,99	0,45	93,35	20	5
	7,28	7,04	7,39	0,50	93,19	20	5
Média	7,23	7,07	6,65	0,46	92,88	22	5
8	7,27	7,12	6,92	0,36	94,64	20	5
	7,16	6,99	6,28	0,15	97,59	20	5
	7,22	6,97	8,52	0,45	94,71	25	5
Média	7,22	7,03	7,24	0,32	95,65	22	5
12	7,25	7,15	7,14	0,39	94,52	20	5
	7,15	6,99	7,35	0,39	94,67	30	5
	7,05	7,01	5,79	0,38	93,43	30	5
Média	7,15	7,05	6,76	0,39	94,21	27	5
24	7,20	7,11	7,54	0,45	94,09	20	5
	7,10	6,91	6,57	0,33	94,97	30	5
	7,05	6,89	6,96	0,37	94,67	30	5
Média	7,12	6,97	7,02	0,38	94,58	27	5

Tabela 40. Resultados dos ensaios da Configuração B (coagulante aplicado antes do campo magnético) - 19,2 mgPAC.L⁻¹.

Configuração B			[PAC]	19,2 mgPAC.L			
Campo Magnético (mT)	pH Inicial	pH Final	Turbidez Água Bruta (NTU)	Turbidez Água Filtrada (NTU)	Remoção de Turbidez (%)	Cor Aparente Água Bruta (uH)	Cor Aparente Água Tratada (uH)
0	7,52	7,02	7,21	0,29	95,98	25	5
	7,29	6,93	7,21	0,30	95,90	25	10
	7,52	7,08	8,39	0,40	95,23	25	10
Média	7,44	7,01	7,60	0,33	95,71	25	8
8	7,52	7,15	7,21	0,32	95,56	25	5
	7,29	6,94	7,21	0,37	94,86	25	5
	7,52	7,11	8,39	0,45	94,70	25	5
Média	7,44	7,07	7,60	0,38	95,04	25	5
12	7,31	6,96	8,41	0,33	96,07	30	5
	7,29	6,88	8,94	0,34	96,24	25	5
	7,31	6,95	8,39	0,42	94,99	25	5
Média	7,30	6,93	8,58	0,36	95,77	27	5
24	7,31	6,96	11,16	0,31	97,22	25	5
	6,95	6,77	10,02	0,34	96,60	30	5
	7,31	6,94	9,84	0,29	97,10	25	5
Média	7,19	6,89	10,34	0,31	96,97	27	5

Tabela 41. Resultados dos ensaios da Configuração B (coagulante aplicado antes do campo magnético) - 24,0 mgPAC.L⁻¹.

Configuração B			[PAC] 24,0 mgPAC.L				
Campo Magnético (mT)	pH Inicial	pH Final	Turbidez Água Bruta (NTU)	Turbidez Água Filtrada (NTU)	Remoção de Turbidez (%)	Cor Aparente Água Bruta (uH)	Cor Aparente Água Tratada (uH)
0	7,49	6,43	6,34	0,30	95,35	30	5
	6,95	5,62	6,34	0,28	95,58	30	5
	7,49	6,64	9,84	0,31	96,85	30	10
Média	7,31	6,23	7,51	0,30	95,93	30	7
8	7,49	7,25	6,34	0,31	95,19	30	5
	6,95	6,74	6,34	0,32	95,03	30	5
	7,49	6,43	9,84	0,28	97,15	30	5
Média	7,31	6,81	7,51	0,30	95,79	30	5
12	7,49	6,71	6,34	0,29	95,51	30	5
	7,12	6,19	8,96	0,32	96,45	30	5
	7,12	6,69	9,77	0,26	97,34	30	5
Média	7,24	6,53	8,36	0,29	96,43	30	5
24	7,12	5,99	8,96	0,25	97,20	30	5
	7,12	6,12	8,96	0,25	97,24	30	5
	7,12	5,95	8,96	0,18	97,96	30	5
Média	7,12	6,02	8,96	0,22	97,47	30	5