



**SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL  
FACULDADE DE TECNOLOGIA SENAI – CIMATEC**

**João Lucas  
Leon Ferreira  
Nicholas Ono  
Otaviano Freitas  
Victor Valença**

**Theoprax Termoverde:  
“Análise e Combate à Incrustações em Sistema de Resfriamento de Biogás”**

Salvador  
2019

**JOÃO LUCAS  
LEON FERREIRA  
NICHOLAS ONO  
OTAVIANO FREITAS  
VICTOR VALENÇA**

**Theoprax Termoverde:  
“Análise e Combate à Incrustações em Sistema de Resfriamento de  
Biogás”**

Trabalho apresentado ao **SENAI Cimatec**, como exigência para conclusão do curso de Engenharia de Controle e Automação, Engenharia Civil e Engenharia de Produção.

Profº Orientador: M.Sc. Moisés Ferreira.

Salvador  
2019

# SUMÁRIO

<b>1.0. CONTEXTO INFORMACIONAL</b>	8
1.1. APRESENTAÇÃO DA EMPRESA	8
1.2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA	8
1.3. CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA	12
<b>2.0. REVISÃO CONCEITUAL</b>	15
2.1. QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	15
2.2. DUREZA DA ÁGUA	16
2.3. ORIGEM DAS INCRUSTAÇÕES	17
2.4. TÉCNICAS PARA CARACTERIZAÇÃO DE ESTRUTURAS CRISTALINAS	18
2.4.1. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) / Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS)	18
2.4.2. Difração de Raios-X (DRX) e Lei de Bragg	20
2.5. TECNOLOGIAS PARA O TRATAMENTO DE AGUA E INCRUSTAÇÕES	23
2.5.1. Abrandamento	24
2.5.2. Eletroforese	25
2.6. VIABILIDADE TÉCNICA - ECONÔMICA	28
2.6.2. Valor Presente Líquido (VPL)	30
2.6.3. Payback	31
2.6.4. Retorno sobre o Investimento (ROI)	32
<b>3.0. MATERIAIS E MÉTODOS</b>	33
3.1. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	33
3.2. CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS	37
3.2.1. MEV e EDS	37
3.2.2. ENSAIO DRX	39
3.3. VIABILIDADE TÉCNICO – ECONÔMICO DO PROJETO	41
3.3.1. Vulcan S250	41
3.3.2. Abrandadores por Troca Iônica	42
<b>4.0. RESULTADOS</b>	42
4.1. ANÁLISE DE QUALIDADE DA ÁGUA	42
4.2. MEV e EDS	45

4.3	DRX	50
4.4	CUSTO VULCAN S250	55
4.5	CUSTO ABRANDADORES POR TROCA IÔNICA	56
4.6	CUSTO MANUTENÇÃO E HORA MÁQUINA PARADA	57
4.7	RESULTADOS DOS INDICADORES	57
5.0.	<b>CONCLUSÕES</b>	59
6.0.	<b>ANEXOS</b>	60
6.1.	REFINAMENTO DE RIETVELD	60
6.2.	ESCOPO DO SERVIÇO DE MANUTENÇÃO	63
		64
		65
7.0.	<b>REFERÊNCIAS</b>	65

## LISTA DE FIGURAS

**Figura 01:** Imagem aérea da usina termelétrica Termoverde Salvador.

**Figura 02:** Esquema representativo do sistema de resfriamento.

**Figura 03:** Corte transversal chiller. A solução de brometo de lítio é liberada no topo e percorre toda a altura do equipamento até atingir a rede de água gelada.

**Figura 04:** Tubos de cobre sem incrustação.

**Figura 05:** Tubos de cobre com incrustação.

**Figura 06:** Material incrustado na entrada no trocador de calor.

**Figura 07:** Amostra coletada do sistema.

**Figura 08:** Representação do Fenômeno da difração de raios-X nos cristais.

**Figura 09:** Separação dos cristais contidos na água dura.

**Figura 10:** Vulcan instalado em tubulação de torre de resfriamento.

**Figura 11:** Indicadores utilizados.

**Figura 12:** Payback.

**Figura 13:** ROI.

**Figura 14:** Amostra 01, bacia da torre de resfriamento.

**Figura 15:** Amostra 02, entrada do trocador de calor.

**Figura 16:** Amostra 03, joelho de 90°.

**Figura 17:** Amostra 04, entrada do trocador de calor.

**Figura 18:** Moagem das amostras com utilização do almofariz.

**Figura 19:** Peneiramento das amostras na abertura #325 mesh.

**Figura 20:** Fitas condutivas de carbono coladas sobre as amostras.

**Figura 21:** Amostras posicionadas para deposição dos íons de ouro.

**Figura 22:** Processo de metalização em andamento.

**Figura 23:** Especificação do microscópio eletrônico de varredura.

**Figura 24:** Preparação das amostras para realização do ensaio de DRX.

**Figura 25:** tubo emissor de raios-X à esquerda, amostra posicionada no centro e receptor de raios-X à direita.

**Figura 26:** Imagem gerada pelo MEV para a amostra 01.

**Figura 27:** Imagem gerada pelo MEV para a amostra 02.

**Figura 28:** Imagem gerada pelo MEV para a amostra 03.

**Figura 29:** Imagem gerada pelo MEV para a amostra 04.

**Figura 30:** Difratoograma gerado para a amostra 01.

**Figura 31:** Difratoograma gerado para a amostra 02

**Figura 32:** Difratoograma gerado para a amostra 03.

**Figura 33:** Difratoograma gerado para a amostra 04.

**Figura 34:** Escopo do serviço de Manutenção do chiller.

## LISTA DE TABELAS

**Tabela 01:** Modelos e especificações Vulcan.

**Tabela 02:** Tipos de indicadores financeiros.

**Tabela 03:** Resultados do ensaio de qualidade da água.

**Tabela 04:** Parâmetros exigidos para a água de reposição bacia da torre.

**Tabela 05:** Concentrações atômicas identificadas no ensaio EDS para amostra 01.

**Tabela 06:** Concentrações atômicas identificadas no ensaio EDS para amostra 02.

**Tabela 07:** Concentrações atômicas identificadas no ensaio EDS para amostra 03.

**Tabela 08:** Concentrações atômicas identificadas no ensaio EDS para amostra 04.

**Tabela 09:** Fases cristalinas identificadas e concentrações calculadas pelo método de Rietveld.

**Tabela 10:** Fases cristalinas identificadas e concentrações calculadas pelo método de Rietveld.

**Tabela 11:** Fases cristalinas identificadas e concentrações calculadas pelo método de Rietveld.

**Tabela 12:** Fases cristalinas identificadas e concentrações calculadas pelo método de Rietveld.

**Tabela 13:** Custo de aquisição Vulcan S250.

**Tabela 14:** Custo de aquisição Vulcan S250

**Tabela 15:** Custo de Manutenção e hora máquina parada.

**Tabela 16:** Resultado dos indicadores

## 1.0. CONTEXTO INFORMACIONAL

### 1.1. APRESENTAÇÃO DA EMPRESA

Os resíduos sólidos, coletados nas cidades de Salvador, Lauro de Freitas e Simões Filho são descartados no AMC (Aterro Metropolitano Centro), localizado no Km 6,5 da rodovia BA-526. O gás gerado pela decomposição da matéria orgânica presente nos resíduos é captado e reaproveitado para geração de energia elétrica. A Termoverde Salvador Ltda é a empresa responsável pela operação e manutenção da usina termelétrica existente no aterro. O gás é denominado “biogás” devido sua produção ocorrer com a decomposição realizada por bactérias no interior do maciço do aterro.

**Figura 01:** Imagem aérea da usina termelétrica Termoverde Salvador



Fonte: Grupo Solví.

### 1.2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O biogás gerado no aterro é succionado a partir de dois sopradores, que aplicam uma pressão negativa em uma rede confeccionada em PEAD (polietileno de alta densidade). A utilização do PEAD se deve principalmente pela boa resistência do material e modificações constantes no layout da malha, que acompanha o avanço do frente de descarte de resíduos. Os tubos da malha são conectados aos drenos verticais

instalados no maciço. O gás captado é inicialmente tratado, e posteriormente direcionado para o processo de queima nos moto-geradores.

No início do tratamento o gás passa por dois equipamentos condensadores, onde boa parte do material particulado é retirada e eliminada. Posteriormente, o fluido é direcionado para os trocadores de calor, onde ocorre o resfriamento do gás por condução térmica a partir de duas redes de água diferentes: rede de água gelada (circuito fechado de água gelada) e rede de água condensada. A água da rede condensada é proveniente de uma torre de resfriamento, que possui uma grande bacia aberta para a atmosfera em sua base. A bacia da torre é alimentada por uma rede de água captada em um poço subterrâneo. Inicialmente, essa água passa por tratamento com hipoclorito de sódio e filtro de areia. Então, a água é bombeada para um reservatório elevado e direcionada para a Termoverde por gravidade, sendo utilizada também para o consumo humano.

A bacia é alimentada continuamente, e seu nível é controlado por uma válvula do tipo boia. A água armazenada na bacia é bombeada através de um moto bomba, e é direcionada para o processo de resfriamento do sistema percorrendo por tubulações de aço carbono. A rede se ramifica em dois caminhos, um passando dentro de um chiller (resfriador de água) e outro para o trocador de calor (resfriador de gás). O processo de chiller pode ser dividido em três estágios, descritos a seguir:

- **Reação água quente x solução contendo brometo de lítio:** No primeiro estágio ocorre reação entre uma rede de água quente (circuito fechado) e uma solução contendo brometo de lítio. A rede de água quente em aço carbono é alterada no interior do chiller para micro tubos de cobre, com diâmetros internos de 17,90 mm e 14,80 mm. A troca é realizada por condução térmica a partir do contato com o cobre. Ao ser aquecida pela água quente presente no interior dos tubos de cobre, a solução de brometo adquire a propriedade de absorver calor. A reação causa a mudança de estado físico da solução, do líquido para o gasoso.

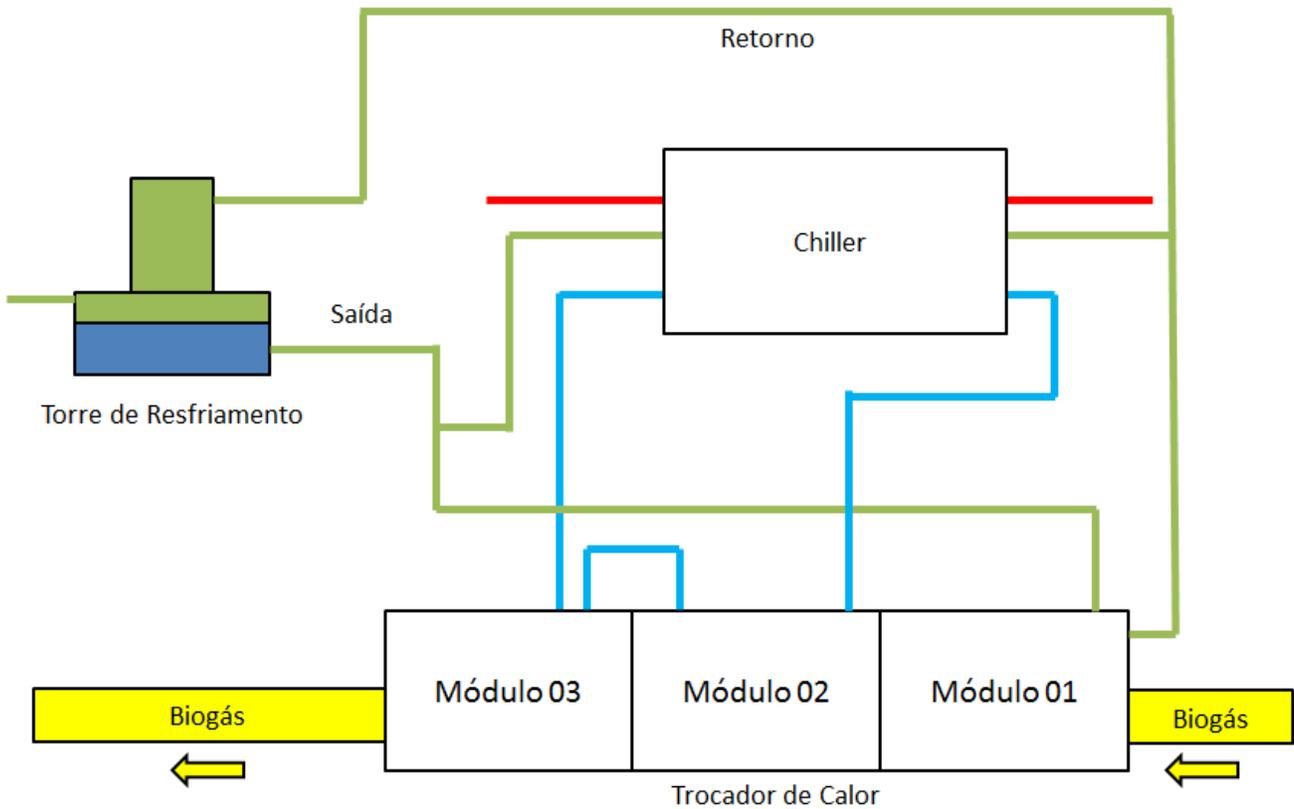
- **Reação solução contendo brometo de lítio x água condensada:** No segundo estágio, a solução de brometo de lítio previamente aquecida é resfriada pela rede de água proveniente da torre de resfriamento. Essa água parte da torre a temperatura ambiente. Como mencionado anteriormente, a água percorre uma tubulação de aço carbono até chegar ao chiller. Assim como no 1º estágio, a tubulação é alterada em micro tubos de cobre para possibilitar a condução térmica. A rede de água condensada absorve cerca de 5º C da solução de brometo na reação de troca. Então, a solução de brometo é condensada e banha uma terceira rede também em micro tubos de cobre presente na parte inferior do chiller.
- **Reação solução contendo brometo de lítio x água gelada:** No terceiro estágio a solução de brometo banha uma rede de água gelada, principal responsável pelo resfriamento do biogás. Essa rede parte do chiller em direção aos trocadores de calor para o resfriamento do biogás, e então retorna ao chiller para ser resfriada. Ao molhar as tubulações que contém a água gelada (em cobre, assim como nos estágios 1 e 2), a solução de brometo de lítio absorve calor da água, causando seu resfriamento.

O segundo caminho da rede de água da torre é direcionado ao trocador de calor, onde ocorre o resfriamento do biogás. O trocador é constituído de três módulos posicionados um após o outro. A rede de água condensada atua no primeiro módulo do trocador, sendo responsável pelo pré-resfriamento do biogás. Nos módulos subsequentes o gás é resfriado pela rede de água gelada, mencionada no 3º estágio do chiller. A reação no primeiro módulo tem o objetivo de aumentar a eficiência do processo de resfriamento como um todo.

Após as interações no chiller e trocador de calor, a rede de água condensada é novamente unificada e retorna à torre de resfriamento. A água chega pela parte superior da torre, em uma saída aberta à atmosfera. A água retorna com uma temperatura mais elevada, sendo necessário o seu resfriamento para dar continuidade ao processo. O contato com ar atmosférico em conjunto com a ação de um ventilador

reduzem a temperatura da água, que então chega novamente ao interior da bacia da torre. Parte desta água é perdida por evaporação, sendo, portanto, necessário o abastecimento contínuo da bacia pela rede de água captada do poço.

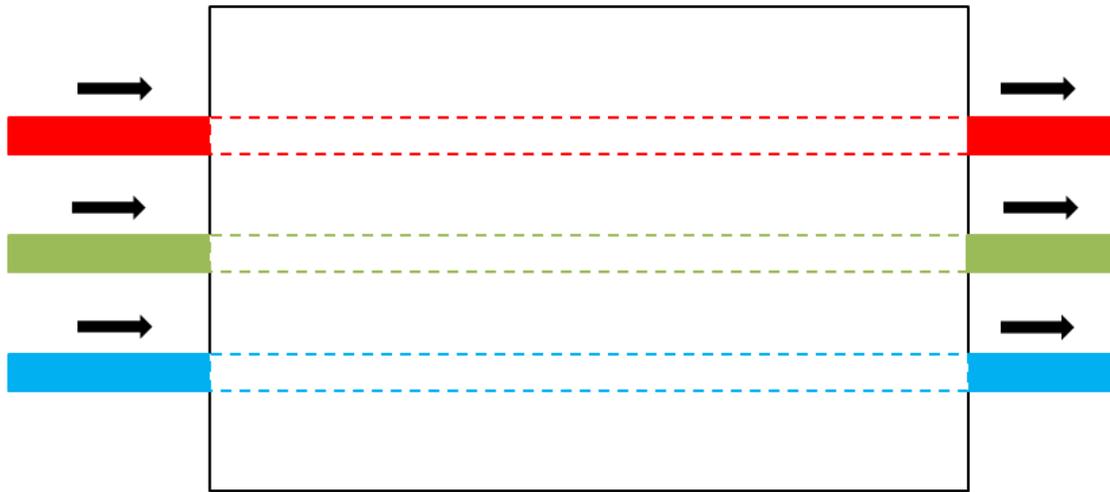
**Figura 02:** Esquema representativo do sistema de resfriamento



LEGENDA

- Rede de água da torre
- Rede de água quente
- Rede de água gelada

**Figura 03:** Corte transversal chiller. A solução de brometo de lítio é liberada no topo e percorre toda a altura do equipamento até atingir a rede de água gelada.



#### LEGENDA

-  Rede de água da torre
-  Rede de água quente
-  Rede de água gelada

### 1.3. CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

Como dito anteriormente, a bacia da torre de resfriamento é continuamente alimentada pela água captada do poço devido às perdas de água por evaporação. A água subterrânea possui sais dissolvidos, que acabam se cristalizando e incrustando nas paredes das tubulações. O abastecimento contínuo implica no aumento da concentração de sais no sistema e, conseqüentemente, intensificação as incrustações.

Os sais cristalizados representam barreiras para as trocas de calor, comprometendo a eficiência do processo, além de reduzir o diâmetro nas tubulações. Tudo isso impacta o processo de queima, pois o gás chega aos moto-geradores com um maior teor de umidade e, conseqüentemente, pode diminuir a produção de energia elétrica.

O projeto tem o objetivo de caracterizar os compostos presentes nas incrustações para definir as soluções técnicas mais adequadas ao combate dessa manifestação patológica.

**Figura 04:** Tubos de cobre sem incrustação.



Fonte: Termoverde Salvador.

**Figura 05:** Tubos de cobre com incrustação.



Fonte: Termoverde Salvador.

**Figura 06:** Material incrustado na entrada no trocador de calor.



Fonte: Própria.

**Figura 07:** Amostra coletada do sistema.



Fonte: Própria.

## **2.0. REVISÃO CONCEITUAL**

### **2.1. QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS**

Com degradações cada vez mais constantes dos corpos hídricos superficiais, as águas subterrâneas apresentam-se como uma alternativa interessante para suprir as necessidades humanas. De acordo com Cavazzana (2011), boa parte dessas águas é proveniente da percolação de águas da chuva no solo até que atingem rochas com capacidade de armazená-las, denominadas de aquíferos. As águas que compõem os aquíferos não necessitam de tratamentos complexos por serem naturalmente filtradas e depuradas por mecanismos físico-químicos. Por estarem no subsolo, os aquíferos também são menos suscetíveis à contaminação por infiltração de esgotos, líquidos lixiviados, combustíveis, dentre outros.

A formação das rochas que compõem os aquíferos se dá por processos físico-químicos, como resfriamento de magma, metamorfismo de rochas existentes ou acúmulo de

sedimentos devido à ação de agentes externos como ação da água e dos ventos. Esses processos dão origem a vários minerais, que se unem e acabam formando às rochas. Alguns dos elementos formadores de rocha são: oxigênio, silício, alumínio, ferro, cálcio, magnésio, entre outros. A presença de minerais compostos por esses elementos varia de acordo com as características do solo e processos físico-químicos que ocorreram em cada região. Dentre os minerais mais abundantes na crosta terrestre, pode-se citar as variações de compostos constituídos de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) e óxidos de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

O carbonato de cálcio apresenta-se em três formações minerais distintas: a calcita, aragonita e a vaterita. A calcita é o mineral mais comum entre os três, sendo o componente principal de rochas sedimentares de calcário. O óxido de silício está presente em variações minerais da sílica, sendo o quartzo mineral mais comum entre estas variações. Os óxidos de ferro podem ser encontrados em diversos minerais na crosta terrestre, como a magnetita, composta por óxido de ferro II ( $\text{FeO}$ ) e óxido de ferro III ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

As águas armazenadas em rochas compostas por esses minerais carregam essas substâncias consigo. O alto teor desses componentes na água e a falta de conhecimentos apurados na área da hidrogeologia podem acarretar o surgimento de patologias nas redes de captação das águas subterrâneas, como o surgimento de incrustações e corrosão das tubulações.

## **2.2. DUREZA DA ÁGUA**

De acordo com o Manual Prático de Análise de Água (FUNASA, 2013), a dureza é uma característica físico-química da água determinada pela concentração de íons de cálcio e magnésio, expressos em carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Estes íons são encontrados principalmente em rochas sedimentares, compostas de minerais como a calcita, rica em carbonato de cálcio.

A dureza pode ser classificada como permanente ou temporária. A dureza temporária é relacionada à presença de bicarbonatos de cálcio e magnésio, caracterizada pela resistência da água ao sabão e o surgimento de incrustações. A dureza permanente é característica da

presença de sulfatos, cloretos e nitratos de cálcio e magnésio. Assim como a temporária, possui resistência à ação dos sabões, mas não forma incrustações devido à solubilidade dos sais presentes. A dureza total da água é calculada em mg/L de CaCO<sub>3</sub>, sendo 500 mg/L o valor máximo admitido para água conforme determinado pela Portaria MS nº 2.914/2011.

### 2.3. ORIGEM DAS INCRUSTAÇÕES

As incrustações presentes nas tubulações são compostas principalmente por sais dissolvidos na água que, após ultrapassarem seu limite de solubilidade, se aglomeram e cristalizam nas paredes dos tubos. Segundo Trovati (2004), a solubilidade dessas substâncias é influenciada basicamente pela temperatura, concentração e pH. A evaporação da água gera um aumento na concentração dos sais dissolvidos, que podem se precipitar e aderir nas paredes das tubulações, formando as incrustações (principalmente nos pontos de troca térmica). O aumento da precipitação e a aglomeração dessas substâncias faz com que as incrustações se tornem cada vez maiores. Os principais compostos causadores das incrustações são: óxidos de cálcio e magnésio, que caracterizam a dureza da água; variações de sílica solúvel e silicatos; óxidos de ferro.

Os cristais incrustados nas paredes dos tubos trazem uma série de consequências negativas aos sistemas, destacando-se: perda de eficiência nas trocas de calor; obstrução nas tubulações, podendo causar uma perda de vazão; aceleração dos processos corrosivos nas tubulações. A remoção dessas incrustações exige processos como limpezas químicas ou limpezas mecânicas de alta intensidade, representando um alto custo de manutenção para os sistemas atingidos.

As incrustações também são responsáveis pela aceleração de processos corrosivos nas tubulações. A oxidação trata-se de uma reação de oxido-redução, onde ocorre a transferência de elétrons entre os compostos. O composto que transfere elétrons é denominado cátodo, sofrendo oxidação na reação. O composto que recebe elétrons é denominado ânodo, sofrendo redução. Para ocorrência destas reações, é necessária a existência de uma diferença de potencial no meio. A água possui propriedades que favorecem a ocorrência do processo corrosivo, como a boa condutividade elétrica, pH próximo do neutro e a presença de oxigênio.

Segundo Trovati (2004), dentre os tipos de corrosão, o “Pittings” é um dos mais nocivos aos sistemas, tratando-se de uma corrosão localizada e com grande capacidade de penetração. Esse tipo de corrosão normalmente ocorre em pontos com diferenças de potencial bastante evidentes, como é o caso das incrustações.

## 2.4. TÉCNICAS PARA CARACTERIZAÇÃO DE ESTRUTURAS CRISTALINAS

Existem diversas técnicas para caracterização de cristais, sendo realizadas análises qualitativas (identificação das fases cristalinas presentes em um determinado material) e quantitativas (determinação das proporções das fases encontradas em um determinado material). A seguir serão abordadas algumas técnicas baseadas no espalhamento de elétrons e radiação eletromagnética (raios-X) utilizadas nessas análises

### 2.4.1. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) / Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS)

O princípio de funcionamento do microscópio eletrônico de varredura consiste na emissão de um feixe de elétrons de pequeno diâmetro, chamado de feixe primário, que incide sobre a superfície do material na câmara da amostra. O feixe é produzido por um canhão eletrônico, geralmente composto por três elementos: filamento de tungstênio, cátodo e ânodo. De acordo com Dedavid, Gomes e Machado (2007), uma corrente elétrica percorre o filamento metálico, o que causa um aumento de temperatura e, conseqüentemente, emissão de elétrons. Os elétrons emitidos são acelerados pela diferença de potencial entre o cátodo e ânodo, variando de 1 a 50 kV, e são posteriormente direcionados para a superfície da amostra.

O feixe de elétrons produzido é controlado para percorrer a superfície do material de forma sequencial, e ilumina áreas de aproximadamente 10 nm de diâmetro. A focalização dos elétrons emitidos é realizada com auxílio de um sistema de lentes eletromagnéticas, diafragmas e bobinas, alimentados por um gerador de varredura.

A colisão do feixe com a superfície da amostra provoca a emissão de sinais sob a forma de elétrons e fótons. Estes sinais são captados e amplificados, gerando então a imagem. Os

principais sinais responsáveis pela geração da imagem são emitidos a partir dos elétrons secundários e/ou dos elétrons retroespalhados.

Segundo Mansur (2012), os elétrons secundários são produtos das colisões inelásticas entre o feixe de elétrons da fonte emissora e a superfície do material. Estes sinais são de baixa energia (<50 eV) e são responsáveis pela formação de imagens de alta resolução (3 – 5 nm). Os elétrons da amostra recebem energia transferida do feixe primário e, tratando-se de elétrons presentes em camadas mais externas, podem ser removidos do átomo. O contraste das imagens está relacionado principalmente à topografia do material da amostra.

Os elétrons retroespalhados são oriundos do feixe primário, após colisões aproximadamente elásticas com os átomos da amostra. Sua energia varia de 50 eV até o valor presente nos elétrons primários. O contraste das imagens destes elétrons resulta da variação no número atômico dos elementos presentes na amostra. Elementos de número atômico elevado resultam em um maior volume de interação, devido à maior quantidade de elétrons presente. Esse maior volume de interações dos elementos de maior número atômico gera pontos mais brilhantes na amostra.

A técnica da espectroscopia por energia dispersiva (EDS) é frequentemente utilizada em conjunto com o MEV, correspondendo a um detector de raios-X acoplado ao microscópio eletrônico de varredura. A radiação característica, gerada pela interação entre os elétrons do feixe primário e os elétrons da amostra, é detectada através da medida de sua energia. Como resultado, são identificados os elementos presentes na amostra e suas concentrações.

De acordo com Mansur (2012), os detectores identificam os elementos a partir da energia dos fótons emitidos pela amostra, traçando um gráfico em que o eixo X representa as energias dos fótons recebidos (kV) e o eixo Y as contagens de fótons. A relação entre a energia emitida pelos fótons com a frequência eletromagnética é expressa pela fórmula  $E=h\nu$ , sendo E a energia do fóton,  $\nu$  a frequência eletromagnética e h a constante de Planck. A análise dos resultados é auxiliada por um banco de dados contendo as faixas de energia e intensidades atreladas a cada elemento da tabela periódica. Pela energia de cada espectro é possível determinar os elementos correspondentes àquela determinada faixa energética.

Existem vários métodos para determinar a proporção dos elementos que compõem a amostra. O mais simples se chama “sem padrões”, fazendo uma análise semiquantitativa do material. É necessária a realização de cálculos complexos para quantificações mais precisas dos elementos presentes na amostra. A análise semiquantitativa consiste em medir as superfícies dos picos (contagens) presentes no gráfico gerado pelo detector.

Um dos fatores mais preponderantes para a confiabilidade das análises é a tensão de aceleração do feixe de elétrons. Os elétrons do feixe não conseguem ejetar elétrons de energia superior à tensão de aceleração aplicada. O fóton mais energético detectado terá no máximo uma energia idêntica a do feixe primário de elétrons. Fótons mais energéticos não serão identificados pelo detector. A determinação dos quantitativos também sofre influência da tensão de aceleração. É necessário que a tensão de aceleração seja no mínimo 2,5 vezes superior à energia de um fóton, para determinar sua quantidade. Portanto, a atenção quanto à tensão de aceleração é muito importante para a confiabilidade da quantificação. Esse ajuste é feito automaticamente pelo software vinculado ao detector.

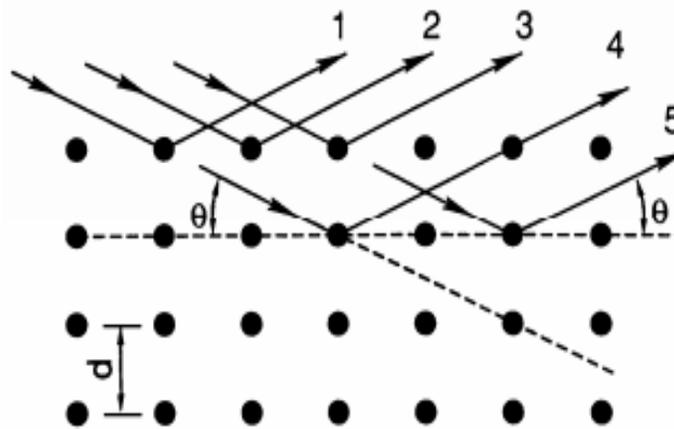
#### 2.4.2. Difração de Raios-X (DRX) e Lei de Bragg

Conforme explicado por Martins (2011), a difração de raios-X é uma técnica largamente utilizada na caracterização de estruturas cristalinas devido ao comprimento de onda dessa radiação eletromagnética. Para que a difração seja eficaz na demonstração de um fenômeno ondulatório, é necessário que as distâncias entre os objetos analisados sejam da ordem do comprimento de onda da radiação incidente. O comprimento de onda dos raios-X é da ordem de 0,1 nm, que corresponde à distância interatômica em cristais sólidos, por exemplo. No caso das estruturas cristalinas, os objetos analisados são os átomos que compõem o cristal, funcionando como centros espalhadores de Raios-X.

Ao incidir sobre os átomos, a radiação eletromagnética provoca oscilações nos elétrons atingidos e reemissão da energia na forma de fótons correspondentes à faixa dos raios -X. As condições para que ocorra o fenômeno da difração em cristais são manifestadas na Lei de Bragg pela fórmula  $n\lambda = 2d \sin\theta$ , sendo “ $\lambda$ ” o comprimento de onda da radiação incidente, “ $n$ ” um número inteiro, “ $d$ ” a distância entre os planos cristalinos e “ $\theta$ ” o ângulo de incidência dos raios-X.

A intensidade do fenômeno da difração está atrelada à densidade de elétrons da estrutura cristalina. Ademais, o número de átomos e elétrons varia em cada plano cristalino, fazendo com que as intensidades de difração também variem de um plano para outro.

**Figura 08:** Representação do Fenômeno da difração de raios-X nos cristais.



Fonte: Dr. Henrique Kahn.

A radiação emitida através dos tubos de raios-X não é monocromática (não possui um único comprimento de onda), denotando o espectro contínuo e o espectro característico do alvo metálico.

- **Espectro Contínuo:** Ao se aproximar do núcleo dos átomos do cátodo, o elétron é desacelerado abruptamente devido à força de atração entre eles e tem sua trajetória alterada. Uma parcela de energia cinética é convertida em radiação eletromagnética na ordem dos raios-X. Essa radiação é chamada de bremsstrahlung, e caracteriza o espectro contínuo dos raios-X.
- **Espectro Característico:** Além dos raios-X originários do espectro contínuo, a aceleração de elétrons em direção ânodo resulta também na emissão raios-X conhecidos como característicos. Os elétrons do cátodo podem colidir com os elétrons do alvo metálico, causando excitação nos átomos do ânodo devido ao deslocamento de elétrons das camadas mais internas para camadas de maior energia. Isso forma vacâncias nas camadas mais internas, fazendo com que os

elétrons presentes nas camadas superiores saltem para ocupar estes espaços vazios. Este salto dos elétrons superiores gera a emissão de fótons na faixa dos raios-X característicos do material componente do ânodo.

De acordo com Kahn [2006], para que se consiga observar a difração de raios-X de maneira eficaz é necessário que a radiação seja monocromática, possuindo um único comprimento de onda. A alternativa mais utilizada é o filtro monocromador, podendo ser posicionado entre a amostra e o detector de raios-X ou entre o feixe incidente e a amostra. Com isso, apenas a radiação característica do tipo  $K\alpha$  será recebida pelo detector.

Os equipamentos utilizados nos ensaios de difração são conhecidos como difratômetros. O difratômetro é composto basicamente pela fonte emissora de radiação (tubo de raios-X), goniômetro (que rotaciona a amostra com metade da velocidade angular do feixe difratado), porta amostra e detector de raios-X. O goniômetro pode ser horizontal ( $\theta - 2\theta$ ) ou vertical ( $\theta-2\theta$  ou  $\theta-\theta$ ). Também podem ser encontradas outras organizações mais sofisticadas.

O difratograma de um determinado composto cristalino pode ser considerado como uma impressão digital daquele composto. Cada fase cristalina apresenta um padrão específico de difração devido à densidade de elétrons e distâncias entre os planos existentes na estrutura analisada.

Existem bancos de dados contendo milhares de cartões de difração, correspondentes às diversas fases cristalinas conhecidas. Alguns são privados, como o ICSD (Inorganic Crystal Structure Database), e outros são públicos, como o COD (Crystallography Open Database). Esses cartões apresentam o difratograma do cristal para um determinado comprimento de onda, além de parâmetros da célula unitária, volume celular, peso molecular, distâncias entre planos cristalinos, etc.

Dentre as estratégias para corroborar a identificação de fases cristalinas, é sugerido que se tenha uma ideia da possível composição da amostra a ser analisada. Alguns outros ensaios podem auxiliar nesse sentido, como a Eflorescência de Raios-X (FRX) e a Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS).

Existem diversos métodos para análise quantitativa de um cristal, e a grande maioria realiza comparações com os cartões de referência. Um método bastante utilizado e reconhecidamente preciso para essa aplicação é o refinamento de Rietveld, bastante utilizado em alguns softwares de análise cristalina. Um novo difratograma é calculado e então comparado com o padrão da amostra. A depender do software alguns índices de referência orientam a quantificação, para garantir análises confiáveis. O resultado final é a proporção de cada fase cristalina presente na amostra.

## **2.5. TECNOLOGIAS PARA O TRATAMENTO DE AGUA E INCRUSTAÇÕES**

Com base na problemática descrita no presente trabalho, a necessidade de prover algum serviço que solucione de forma preventiva, ou até mesmo corretiva, se torna fundamental para que os processos possam ser seguidos com fidelidade em seus resultados e gere um maior valor agregado. Tais valores podem ser quantificados através do lucro com base no melhor funcionamento dos aparelhos, assim como a diminuição de despesas com manutenções que pausam o processo produtivo da empresa.

No setor industrial foi observado que existem diversos tipos de tratamento de água, onde grande parte dos métodos utilizados necessita da construção de subsistemas específicos para viabilizar os resultados esperados, para tal projeto, a redução da dureza da água. A dureza da água é caracterizada por altas concentrações de compostos de cálcio e magnésio que por sua vez iniciam o processo de incrustação nas paredes das tubulações onde existe a troca de calor.

As incrustações como produtos da dureza da água, também trazem consequências negativas para os sistemas, uma vez que diminuem a capacidade de transferência de calor, diminuindo significativamente a eficiência do processo.

A implantação de métodos que solucionariam parte da questão abordada como o abrandamento, por exemplo, foram descartados uma vez que possuem elevados custos de instalação, além da necessidade de constantes intervenções técnicas para que esse sistema continue operando eficientemente (regeneração dos filtros, dentre outros).

Contudo, após pesquisas, métodos mais novos foram encontrados com grande valor agregado, uma vez que podem ser considerados possíveis dentro das premissas do projeto e das análises de viabilidade da implantação dos diferentes sistemas de tratamento de água, fatores como: downtime, viabilidade técnica, e facilidade de instalação foram levados em consideração. Dessa forma, a técnica de eletroforese foi considerada a mais adequada para aplicação, através do produto denominado: Vulcan da Aquasolo, visto que a mesma se mostra eficiente apesar de minimamente invasiva, implicando em uma rápida instalação sem a necessidade de pausas nos processos para manutenções, diminuindo assim seus riscos e custos operacionais elevados.

### 2.5.1 Abrandamento

O abrandamento é uma técnica utilizada para redução da dureza da água, através da retirada dos íons detem como principal objetivo a redução do teor de dureza da água, para que isso ocorra esta técnica possibilita o processo de retirada de cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) e magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) contidos na água dura. Sendo assim, existem duas formas para a realização do abrandamento, as quais são: troca iônica e precipitação química.

- **Precipitação Química:** O abrandamento por precipitação química consiste na adição de cal e carbonato de sódio. A adição de Cal gera um aumento do pH da água, o que aumenta a sua alcalinidade. Já o carbonato de sódio é o responsável por gerar a alcalinidade para que a reação ocorra, através da formação dos íons necessários. Desta forma, a reação desses agentes químicos criará precipitados de cálcio e magnésio, indicando que houve redução da dureza da água.
- **Troca Iônica:** O abrandamento por troca iônica consiste na utilização de um sistema composto por resinas catiônicas, onde o fluxo de água com alto teor de dureza deverá atravessar essas resinas, permitindo ao final desse processo que os íons de cálcio e magnésio sejam capturados, havendo apenas a liberação de sódio, sendo esse último solúvel em água.

Devido à facilidade de instalação e eficiência na remoção dos íons de cálcio e magnésio, a técnica por troca iônica pode ser mais vantajosa. O método por precipitação demanda

ainda substituição constante dos agentes químicos e coleta dos precipitados de cálcio e magnésio gerados.

As resinas utilizadas no sistema por troca iônica saturam naturalmente ao longo do tempo, diminuindo a eficiência na remoção dos íons de cálcio e magnésio presentes na água. A manutenção do sistema é realizada com a aplicação de cloreto de sódio, regenerando a resina e recuperando a eficiência na redução da dureza. A aplicação do cloreto de sódio pode ser facilmente automatizada, respeitando a periodicidade determinada pelo fabricante do equipamento, sem a necessidade de treinamentos complexos para os colaboradores da empresa.

### 2.5.2 Eletroforese

O princípio de funcionamento do Vulcan baseia-se no conceito da eletroforese, onde os íons de cálcio e magnésio contidos na água dura sofrem influência de um campo elétrico que implicará na separação desses cristais impedindo que os mesmos venham a incrustar na parede da tubulação onde foi instalado o aparelho. A Figura 09 demonstra quimicamente a separação dos cristais contidos na água dura.

**Figura 09:** Separação dos cristais contidos na água dura.



Fonte: Vulcan-Descaler

Conforme observado na Figura 09, o Vulcan é o equipamento adotado responsável por proporcionar o efeito da eletroforese, e como demonstrada na equação química o mesmo faz com que o efeito da reação que separa os íons seja maior do que a capacidade do composto responsável pela incrustação se formar, desta forma, propiciando a constante redução desse material da tubulação.

Sendo assim, quando analisado de forma teórica, este aparelho deverá propiciar um ambiente dentro da tubulação no qual o material incrustado se transforme em cristais mais

simples de carbonato de cálcio, podendo assim ser levado embora naturalmente com o fluxo da água, o que por sua vez impossibilitaria os mesmos de aderir uns aos outros (Dr.Jünke,2018).

Portanto, para que a condição mencionada seja estabelecida é necessário que haja um aumento significativo de ácido carbônico, o qual será responsável por permitir o processo de dissolução do material incrustado, ocasionando na separação desses cristais. Além disso, quando o material incrustado é dissolvido, moléculas de ácido carbônico também são liberadas, o que contribui ainda mais para o processo de dissolução, sendo este último o motivo que demonstra a eficácia do tratamento envolvendo a eletroforese.

Desta forma, o tratamento é físico, pelo efeito da frequência de ressonância do campo elétrico criado a partir dos impulsos gerados e transmitidos às fitas de cobre instaladas em volta do tubo (acquasolo,2019).

Este efeito dura cerca 2 dias, na água fria, e cerca de 4 dias, na água quente com temperatura máxima de 90°C, e até 2 km ao longo de um duto, o que está dentro das especificações do projeto. Após esses limites de tempo e distância, os fragmentos tendem a se reorganizar e retornar à configuração original do cristal.

#### *2.5.2.1. Informações do Equipamento*

O Vulcan já está presente em mais de 35 países e se sobressai pois não tem contato direto com a água e é instalado sobre a tubulação que a conduz, conforme Figura 10. O correto dimensionamento do modelo de Vulcan é baseado na vazão que passa pelo tubo e no seu diâmetro. A Acquasolo, empresa responsável, fornecerá todo o suporte necessário para o melhor posicionamento do aparelho no seu sistema hidráulico, de modo a obter o máximo resultado.

Este método não necessita manutenção, utilização de produtos químicos e têm baixo consumo de energia, cerca de 3 W. É oportuno mencionar também que o Vulcan age na manutenção da eficiência energética dos sistemas de bombeamento, mantendo ao longo dos anos a integridade dos diâmetros das tubulações e eliminando das paredes internas a rugosidade causada pelas incrustações. Estas duas ações impedem perdas de carga

adicionais no sistema, que normalmente redundam-se em menores volumes aduzidos ou mais tempo de bombeamento.

Para a escolha do modelo correto deve se considerar dois fatores: diâmetro do tubo e vazão, uma vez que o Vulcan funciona em qualquer tipo de tubulação: aço, cobre, ferro, pvc e outros plásticos. A Tabela 1 demonstra os diferentes modelos do equipamento Vulcan.

**Figura 10:** Vulcan instalado em tubulação de torre de resfriamento.



Fonte: Vulcan-Scaler

A bomba Koreana instalada no início do processo, antes da tubulação de resfriamento, opera com vazão máxima de 209.7m<sup>3</sup>/dia na saída da água condensada e diâmetro menor que 250 mm, logo o modelo S250 da Vulcan atende os requisitos necessários, assim como a temperatura da água que flui pelo duto e pelo índice de dureza, ferro, dentre outros.

**Tabela 01:** Modelos e especificações Vulcan.

<b>MODELO</b>	<b>S25</b>	<b>S100</b>	<b>250</b>	<b>S500</b>
Vazão máxima (m <sup>3</sup> /h)	25	100	250	500
Diâmetro máximo (pol)	4”	6”	10”	20”
Potência (W)	2,5	2,5	2,75	3,25

## 2.6. VIABILIDADE TÉCNICA - ECONÔMICA

O processo de inovação é um processo chave do negócio de uma empresa, associado com a renovação e a evolução do negócio, renovando o que a empresa oferece e como ela cria e entrega àquela oferta. As novas tecnologias desempenham um papel fundamental para a sobrevivência das empresas no atual ambiente competitivo, as empresas que não inovam ficam obsoletas e perdem espaço para aquelas que incentivam a cultura inovadora e investem em Pesquisa & Desenvolvimento & Inovação (P&D&I).

No atual contexto concorrencial as organizações que desejarem incrementar o valor de seus produtos e/ou serviços procuram substituir a cultura do consumo padronizado e em massa por uma que privilegie estratégias de diferenciação e/ou enfoque de mercado (MARQUES; NIGRO e FARIA, 2011). Em países desenvolvidos, as empresas aumentam tanto a variedade quanto a frequência de introdução de novos produtos, proporcionando ganhos em produtividade e permitindo com que tais empresas saiam de suas crises ou prosperem graças à inovação de produtos (TAKAHASHI; TAKAHASHI, 2007). A atividade de inserção de novos produtos é arriscada, haja visto que tanto pode representar um sucesso, aferindo os lucros esperados, como um fracasso, representando um prejuízo em relação ao investimento dos recursos envolvidos.

A viabilidade técnica - tecnológica está relacionada com a possibilidade da tecnologia ser teoricamente empregada com sucesso com o parecer dos alunos em um ambiente real de trabalho. É fundamental realizar o estudo da viabilidade técnica, pois com ele se obtém conhecimento sobre os recursos e competências necessárias para o emprego da tecnologia, além de evitar gastos desnecessários caso o projeto não possa ser desenvolvido com as

atuais restrições da empresa em questão. Os aspectos necessários à avaliação da viabilidade técnica são: estágio de desenvolvimento da tecnologia, competências técnicas, plataforma, *scale up*, complexidade e outros.

Mesmo nos casos em que a tecnologia já esteja empregada em uma outra empresa é importante se analisar os aspectos listados, pois com essas análises irá se obter uma quantidade de informações sobre a tecnologia que permite descobrir etapas do desenvolvimento que eventualmente possam ter sido ignoradas pelos autores do relatório ou que precisam ser revistas. Essa análise permite também demonstrar a qualidade do projeto através da avaliação das competências técnicas dos desenvolvedores do produto

A viabilidade econômica de um projeto tem por princípio, analisar e estimar as perspectivas de desempenho de produtos e/ou serviços, relacionados a este projeto. Este tipo de análise acontece em várias etapas, mas principalmente, quando se define que tipo de projeto será desenvolvido, e por tanto, no início do seu escopo.

A questão orçamentária deve orientar os gestores do projeto, no que diz respeito a estimativas de custos de investimentos a serem praticados no andamento do plano de concepção, seja de produto ou serviço e quando necessário, corrigido no decorrer no desenvolvimento deste.

Há uma gama de metodologias que são utilizadas para realização análises financeiras (COOPER; EDGETT; KLEINSCHMIDT, 2001, p.174; CHIEN, 2002, p.361; BITMAN, 2005, p.775). Esses métodos envolvem os tradicionais usados na avaliação de viabilidade econômico-financeira, como por exemplo, os que calculam indicadores baseados em fluxos de caixa descontados. Além das metodologias tradicionais, há softwares de simulação de cálculos probabilísticos e de riscos, que são utilizados para complemento da análise tradicional.

Os principais indicadores financeiros utilizados para análise de viabilidade econômica são, por exemplo o custo-alvo, as previsões de retorno do investimento e a análise de suas características, o Retorno Sobre Investimento – ROI, Valor Presente Líquido – VPL, a Taxa Interna de Retorno – TIR, Método do payback e o Fluxo de Caixa. Para o trabalho presente, será focado nas análises de ROI, VPL e Payback.

**Tabela 02:** Tipos de indicadores financeiros.

<b>Valor Presente Líquido</b>	Reflete a riqueza em valores monetários do investimento, medida pela diferença entre o valor presente das entradas de caixa e o valor presente das saídas de caixa, a uma determinada taxa, frequentemente chamada de taxa de desconto, custo de oportunidade ou custo do capital
<b>Payback</b>	Corresponde ao período no qual os resultados líquidos acumulados da operação do empreendimento equivalem ao investimento. Período de recuperação descontado: período no qual os resultados líquidos da operação do empreendimento, descontados a uma determinada taxa, equivalem financeiramente ao investimento.
<b>Retorno sobre Investimento</b>	Mede o desempenho da empresa na utilização dos seus investimentos
<b>Taxa Interna de Retorno</b>	Corresponde a taxa de desconto que iguala o valor presente líquido (VPL) de uma oportunidade de investimento a R\$ 0,00 porque o valor presente das entradas de caixa se iguala ao investimento inicial.

### 2.6.2 Valor Presente Líquido (VPL)

Consiste em trazer as entradas e saídas de capital para a data zero do investimento, descontada a taxa de juros (“i”), denominada “Taxa Mínima de Atratividade” (TMA). Reflete a riqueza em valores monetários do investimento, medida pela diferença entre o valor presente das entradas de caixa e o valor presente das saídas de caixa, a uma determinada taxa de desconto (REBELATTO, 2004).

O Valor Presente Líquido de investimento pode apresentar os seguintes resultados:

- Se maior do que zero: significa que o investimento é economicamente atrativo, pois o valor presente das entradas de caixa é maior do que o valor presente das saídas de caixa.
- Se igual a zero: o investimento é indiferente, pois o valor presente das entradas de caixa é igual ao valor presente das saídas de caixa.

- Se menor do que zero: indica que o investimento não é economicamente atrativo porque o valor presente das entradas de caixa é menor do que o valor presente das saídas de caixa.

Em muitos cenários, os investimentos sempre são feitos para aqueles com maior Valor Presente Líquido. No entanto, pede-se não utilizar somente este indicador para avaliação uma aplicação financeira de um projeto, pois, se o valor for positivo e baixo para um projeto de longa duração, pode acontecer que durante muito tempo o fluxo de caixa fique negativo para recuperar o investimento. Além disso, em projetos com incertezas, não é conhecido se esses valores poderão ser garantidos ou não. Assim, sempre o mais prudente para utilizar-se é uma combinação de indicadores para uma tomada de decisão.

**Figura 11:** Indicadores utilizados.

VPL = Valor Presente Líquido

FCX = Fluxo de caixa de cada período (1 até n)

I<sub>0</sub> = Investimento Inicial

$$VPL = \frac{FCX_1}{(1+i)^1} + \frac{FCX_2}{(1+i)^2} + \frac{FCX_n}{(1+i)^n} - I_0$$

### 2.6.3 Payback

Com o Payback, a empresa consegue verificar a recuperação do investimento, no tempo de vida esperado do ativo, nos riscos associados e em sua posição financeira, e desta forma verificar a viabilidade do projeto. Informa o prazo necessário para que o valor atual dos reembolsos (retorno de capital) se iguale ao valor investido no ativo ou projeto (REBELATTO, 2004). Ou seja, quanto tempo um investimento demora a ser ressarcido. O cálculo do payback desconsidera os juros, ou seja, o valor do dinheiro no tempo sem taxa de juros (BRUNI; FAMÁ; SIQUEIRA, 1998; MARQUEZAN; BRONDONI, 2006).

- Se período de payback < período máximo aceitável de recuperação = **Payback positivo**
- Se Período de payback > período máximo aceitável de recuperação = **Payback negativo**

Este método não considera o valor do dinheiro no tempo, podendo acontecer que o Payback no final do ciclo de vida do projeto, não tendo um ganho maior.

**Figura 12:** Payback.

$$PB = \frac{\textit{investimento inicial}}{\textit{resultado do fl. de cx. com o ganho do investimento}}$$

#### 2.6.4 Retorno sobre o Investimento (ROI)

Contabiliza a eficácia dos lucros gerados com os investimentos de projetos. Também é conhecido como indicador de lucratividade que mostra os retornos da empresa advindos de suas vendas (GITMAN, 2007). Por fim, é mensurado o desempenho dos recursos de investimentos realizados. Somente será analisada a segunda equação, já que à analisar de uma implementação de melhoria, onde irá ser substituído o investimento com o produto.

**Figura 13:** ROI.

$$ROI = \frac{\textit{Margem de lucro líquido}}{\textit{Ativo total}}$$

$$ROI = \frac{\textit{Receita} - (\textit{Custo} + \textit{Despesa})}{\textit{Investimento com o produto}}$$

### **3.0. MATERIAIS E MÉTODOS**

Para definir a solução técnica adequada ao problema no sistema de resfriamento da usina, foram realizadas visitas *in loco* com o intuito coletar amostras do material incrustado nas tubulações para realização dos ensaios de MEV, EDS e DRX. Foi coletado um total de quatro amostras em pontos diferentes da tubulação: bacia da torre de resfriamento (coletada pela empresa), entrada do trocador de calor, joelho de 90° próximo ao trocador e entrada do chiller. A realização dos ensaios foi possível graças às parcerias firmadas com laboratório de construção civil do SENAI CIMATEC e o laboratório de caracterização de materiais do Instituto Federal da Bahia (IFBA).

A equipe de projeto teve acesso ainda ao laudo técnico de qualidade da água referente a abril de 2019.

#### **3.1. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS**

Antes de realizar os ensaios de caracterização (MEV, EDS e DRX), as amostras foram levadas ao laboratório de construção civil do SENAI CIMATEC para secagem e peneiramento. Todas as amostras passaram ao menos 24 horas na estufa, retirando-se toda a umidade. Os ensaios de microscopia e DRX exigem que os grãos do material passem, no mínimo, pela peneira de 200 mesh (abertura de 2,83 mm). Para este trabalho, foi utilizada uma peneira de 325 mesh (abertura de 1,68 mm), atendendo à exigência. Inicialmente todas as amostras foram moídas com utilização de almofarizes e, então, realizado o peneiramento.

**Figura 14:** Amostra 01, bacia da torre de resfriamento.



Fonte: Própria.

**Figura 15:** Amostra 02, entrada do trocador de calor.



Fonte: Própria.

**Figura 16:** Amostra 03, joelho de 90°.



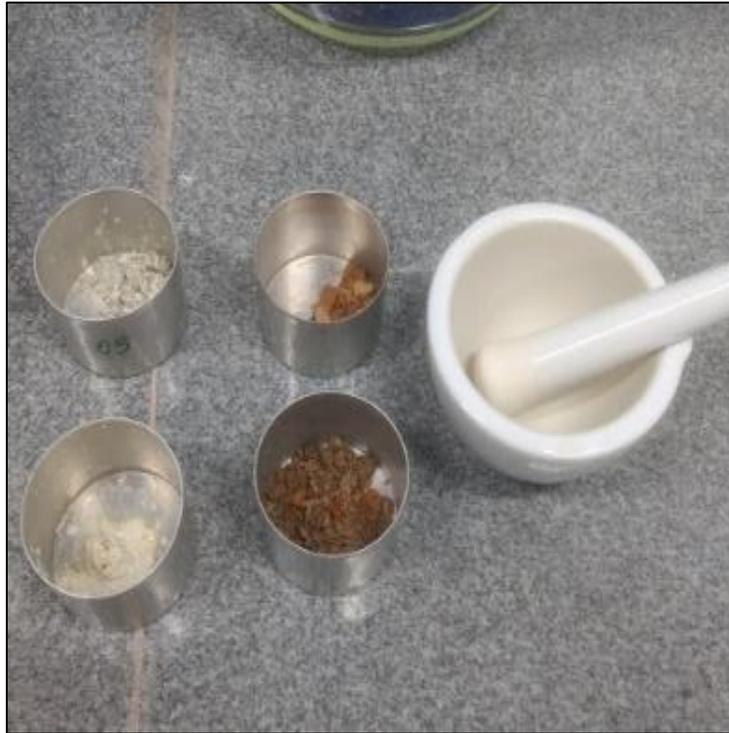
Fonte: Própria.

**Figura 17:** Amostra 04, entrada do trocador de calor.



Fonte: Própria.

**Figura 18:** Moagem das amostras com utilização do almofariz.



Fonte: Própria.

**Figura 19:** Peneiramento das amostras na abertura #325 mesh.



Fonte: Própria.

## 3.2 CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS

Após a preparação, as amostras foram levadas ao laboratório de caracterização de materiais do IFBA para realização dos ensaios técnicos.

### 3.2.1. MEV e EDS

O ensaio de microscopia eletrônica exige que as amostras sejam boas condutoras de elétrons. Para isso, foram coladas fitas condutivas de carbono sobre as amostras e realizado o processo de metalização (deposição de íons de ouro sobre a superfície do material). Para a metalização, foi utilizado o equipamento de especificação 150R ES, do fabricante Quorum.

**Figura 20:** Fitas condutivas de carbono coladas sobre as amostras.



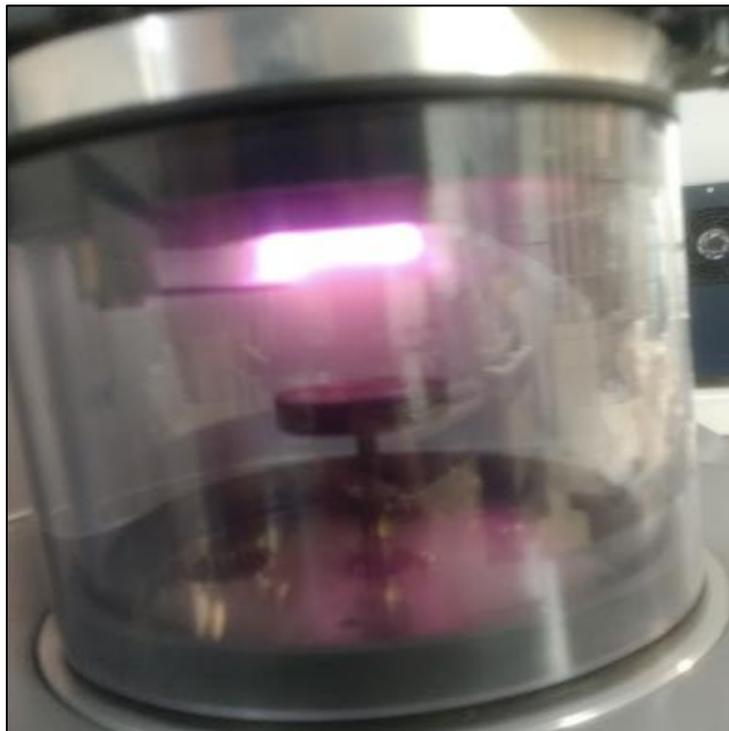
Fonte: Própria.

**Figura 21:** Amostras posicionadas para deposição dos íons de ouro.



Fonte: Própria.

**Figura 22:** Processo de deposição dos íons de ouro sobre as amostras.



Fonte: Própria.

Posteriormente, os materiais foram posicionados na câmara de amostra do microscópio eletrônico de varredura, para realização dos ensaios do MEV e EDS. O aparelho utilizado no ensaio foi fabricado pela Tescan, modelo VEGA3, com detector de EDS acoplado.

**Figura 23:** Especificação do microscópio eletrônico de varredura.



Fonte: Própria.

### 3.2.2 ENSAIO DRX

Para o ensaio de difração de raios-X, utilizou-se o equipamento XRD-7000 do fabricante Shimadzu. As condições de ensaio foram: ânodo (alvo) do tubo de raio-X feito de cobre; diferença de potencial dentro do tubo de 40 Kv; corrente de 30 mA para aquecimento do cátodo; alcance de varredura de 10-80 (Theta-2Theta); velocidade de 2 graus por minuto. Os materiais foram postos sobre o porta-amostras e posteriormente posicionados no equipamento para varredura com raios-X.

**Figura 24:** Preparação das amostras para realização do ensaio de DRX.



Fonte: Própria.

**Figura 25:** Tubo emissor de raios-X à esquerda, amostra posicionada no centro e receptor de raios-X à direita.



Fonte: Própria.

### 3.3 VIABILIDADE TÉCNICO – ECONÔMICO DO PROJETO

O Estudo de viabilidade desenvolvido pelos estudantes na empresa Termoverde é uma forma de tomada de decisão para apoiar os setores responsáveis que têm intenção de verificar a possibilidade de aquisição e instalação de um produto específico. Neste documento são coletadas informações relevantes de duas dimensões: Técnica e Econômica.

A elaboração deste relatório tem como foco a diminuição das incertezas relacionadas às indefinições de uma futura proposta a partir do levantamento de informações. O objetivo desse estudo de Viabilidade Técnico e Econômico é propor um método para análise e avaliação de exequibilidade do projeto, referente à aquisição e instalação de um sistema eletrônico anti-incrustação para uma tubulação específica. Este trabalho irá propor um modelo no qual serão analisados aspectos (conjunto de fatores) que interferem na viabilidade técnica e econômica de uma tecnologia desenvolvida como alternativa ecológica para tratamento de águas calcárias.

Para coleta das informações técnico-comercial das soluções verificadas no mercado, foram recebidos os dados técnicos, que se referem ao escopo da solução e a parte orçamentária, que dizem respeito ao custo de implementação direta ou de aquisição da solução.

#### 3.3.1 Vulcan S250

Para análise da proposta de sistema eletrônico anti-corrosivo, foi obtido o retorno de mercado da empresa Acquasolo, que se situa em Minas Gerais e é a empresa responsável por distribuir o equipamento Vulcan, no cenário nacional. Para os dados orçamentario, foi necessário que algumas perguntas fossem respondidas para equipe Acquasolo:

1. Vazão de entrada no sistema (Motobomba da saída da torre de resfriamento);
2. Dureza da água e se possível teor de sílica e de ferro;
3. Incrustações são do tipo de carbonato e bicarbonato de cálcio e magnésio?;
4. Temperatura da água no interior do chiller e dos módulos;

### 3.3.2 Abrandadores por Troca Iônica

Para investimento e aplicação da solução pela técnica de abrandamento por troca iônica, foi consultado a empresa Ecohouse, que deu dois tipos de tratamento baseado em trocas iônicas:

- Somente abrandamento (resina catiônica) para remover dureza e íons de ferro e manganês principalmente;
- Desmineralização, onde utiliza-se dois equipamentos em série, sendo o primeiro um abrandador e o segundo um equipamento semelhante, mas com Resina aniônica.

## 4.0. RESULTADOS

### 4.1 ANÁLISE DE QUALIDADE DA ÁGUA

A água de abastecimento da torre passa inicialmente por um tratamento que consiste na utilização de hipoclorito de sódio para desinfecção da água, e areia para filtragem. A água é então bombeada para um reservatório elevado e direcionada para a usina por ação da gravidade.

Essa água é coletada e analisada por uma empresa terceirizada para avaliação dos parâmetros de qualidade. Foi fornecido à equipe de projeto o laudo técnico referente a abril de 2019 com os resultados analíticos de ensaio da água.

Além dos parâmetros de potabilidade, as águas devem atender a outros para evitar o surgimento de manifestações patológicas no sistema de resfriamento. A seguir, as Tabelas 03 e 04 apresentam os resultados do laudo técnico e os requisitos exigidos para o sistema de água da torre de resfriamento, respectivamente. “Make-up” refere-se à água de reposição, proveniente do reservatório elevado.

**Tabela 03:** Resultados do ensaio de qualidade da água (continua).

<b>PARÂMETROS</b>	<b>UNIDADE</b>	<b>LQ/FAIXA</b>	<b>RESULTADOS ANALÍTICOS</b>	<b>PRC Nº5/2017 – VMP</b>	<b>DATA DO ENSAIO</b>
Alumínio	mg/L	0,001	0,0189	0,2	25/03/2019
Bário	mg/L	0,001	0,0350	0,7	25/03/2019
Bicarbonato (CaCO <sub>3</sub> )	mg/L	5	98,2	---	04/04/2019
Cálcio	mg/L	0,005	21,5	---	25/03/2019
Carbonato (CaCO <sub>3</sub> )	mg/L	0	0	---	04/04/2019
Cor Verdadeira	CU	5	<5	---	22/03/2019
Cádmio	mg/L	0,001	<0,001	0,005	25/03/2019
Cobre	mg/L	0,001	<0,001	2	25/03/2019
Chumbo	mg/L	0,001	<0,001	0,01	25/03/2019
Cloreto	mg/L	1	29,7	250	04/04/2019
Cromo	mg/L	0,001	<0,001	0,05	25/03/2019
Dureza Total	mg/L	5	73,2	500	25/03/2019
Ferro	mg/L	0,01	0,694	0,3	25/03/2019
Fosfato	mg/L	0,01	<0,01	---	26/03/2019
Manganês	mg/L	0,005	0,231	0,1	25/03/2019

**Tabela 03:** Resultados do ensaio de qualidade da água (conclusão).

PARÂMETROS	UNIDADE	LQ/FAIXA	RESULTADOS ANALÍTICOS	PRC Nº5/2017 – VMP	DATA DO ENSAIO
Mercúrio	mg/L	0,0001	<0,0001	0,001	25/03/2019
Magnésio	mg/L	0,001	4,73	---	25/03/2019
Níquel	mg/L	0,001	<0,001	0,07	25/03/2019
Nitrato	mg/L	0,3	<0,3	10	23/03/2019
Nitrito	mg/L	0,01	<0,01	1	23/03/2019
Nitrogênio Amoniacal	mg/L	0,1	<0,1	---	29/03/2019
Potássio	mg/L	0,001	1,95	---	25/03/2019
Sódio	mg/L	0,005	19,5	200	25/03/2019

**Tabela 04:** Parâmetros exigidos para a água de reposição bacia da torre (continua).

ÍTENS	FAIXA DE EXIGÊNCIA
pH (25° C)	6,5 ~ 8,0
Condutividade Elétrica (25° C $\mu$ s/cm)	200 ou menos
M alcalinidade (ppm)	50 ou menos
Dureza Total (ppm)	50 ou menos
Cloro (ppm)	50 ou menos
Íons de Ácido Sulfúrico	50 ou menos

**Tabela 04:** Parâmetros exigidos para a água de reposição bacia da torre (conclusão).

ÍTENS	FAIXA DE EXIGÊNCIA
Ferro Total (ppm)	0,3
Enxofre (ppm)	Não detectado
Amônio (ppm)	0,2 ou menos
Sílica (ppm)	30 ou menos
Ácido Carbônico Livre (ppm)	***

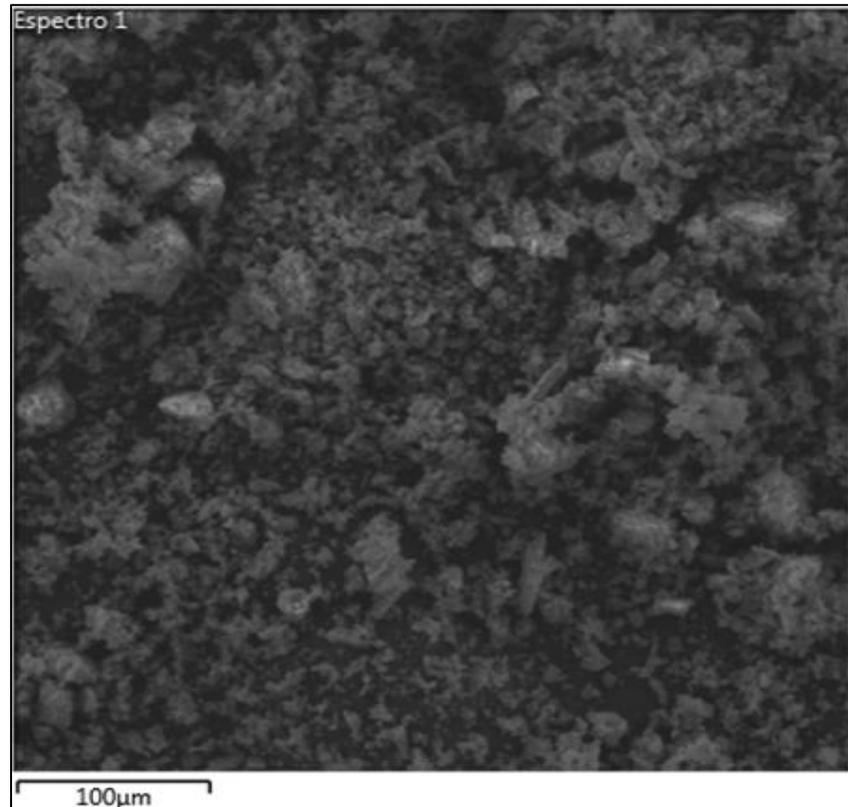
Comparando os dados fornecidos nas Tabelas 03 e 04, se observa que a água foi reprovada quanto à sua dureza total ( $73,2 > 50$ ) e ferro total ( $0,694 > 0,3$ ), além do alto teor de bicarbonato (como  $\text{CaCO}_3$ ). Esses três parâmetros estão relacionados à tendência do surgimento de incrustações e corrosão no sistema da torre de resfriamento. Nota-se ainda, na Tabela 03, que o laudo de qualidade de água não trouxe informações quanto à concentração sílica, um dos parâmetros mais influentes no surgimento de incrustações.

#### 4.2 MEV e EDS

A seguir, as imagens geradas pelo microscópio eletrônico de varredura para cada amostra, além das concentrações calculadas para os elementos identificados pelo detector de raios-X.

- **Amostra 01**

**Figura 26:** Imagem gerada pelo MEV para a amostra 01.



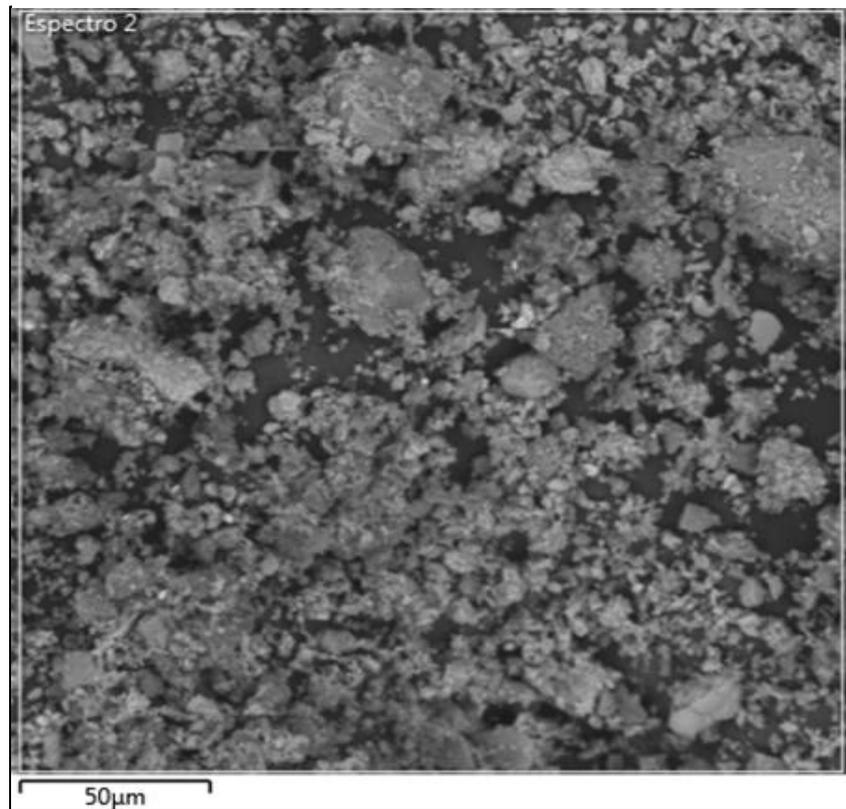
Fonte: Própria.

**Tabela 05:** Concentrações atômicas identificadas no ensaio EDS para amostra 01

Elemento	Concentração atômica
Magnésio	15%
Silício	73%
Cálcio	11%
Ferro	1%
TOTAL	100%

- **Amostra 02**

**Figura 27:** Imagem gerada pelo MEV para a amostra 02.



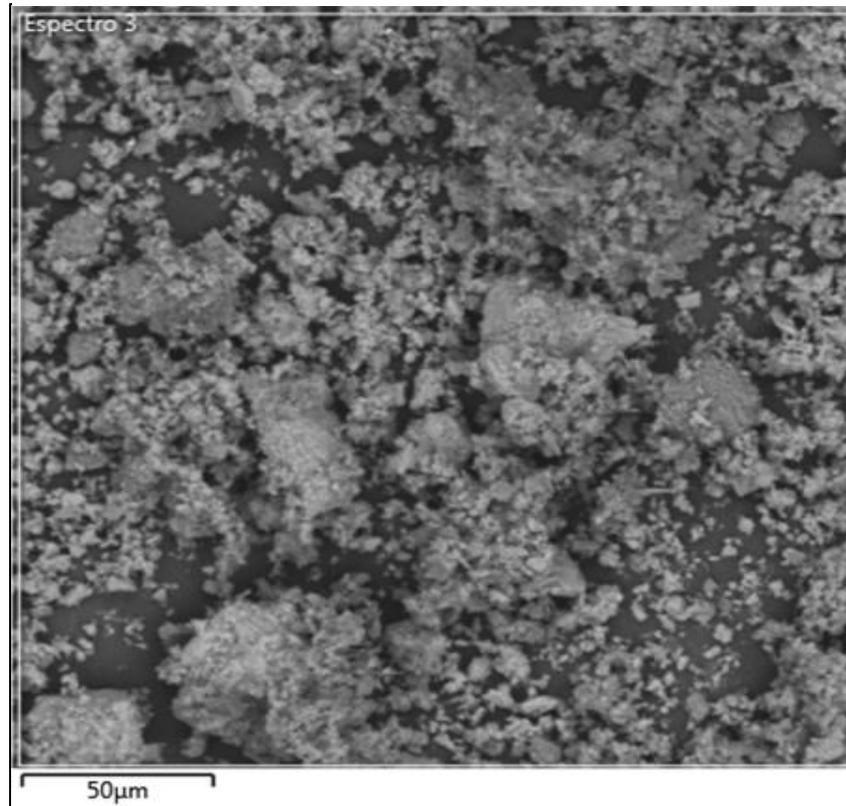
Fonte: Própria.

**Tabela 06:** Concentrações atômicas identificadas no ensaio EDS para amostra 02.

Elemento	Concentração atômica
Magnésio	2%
Silício	24%
Cálcio	18%
Ferro	56%
Alumínio	1%
TOTAL	100%

- **Amostra 03**

**Figura 28:** Imagem gerada pelo MEV para a amostra 03.



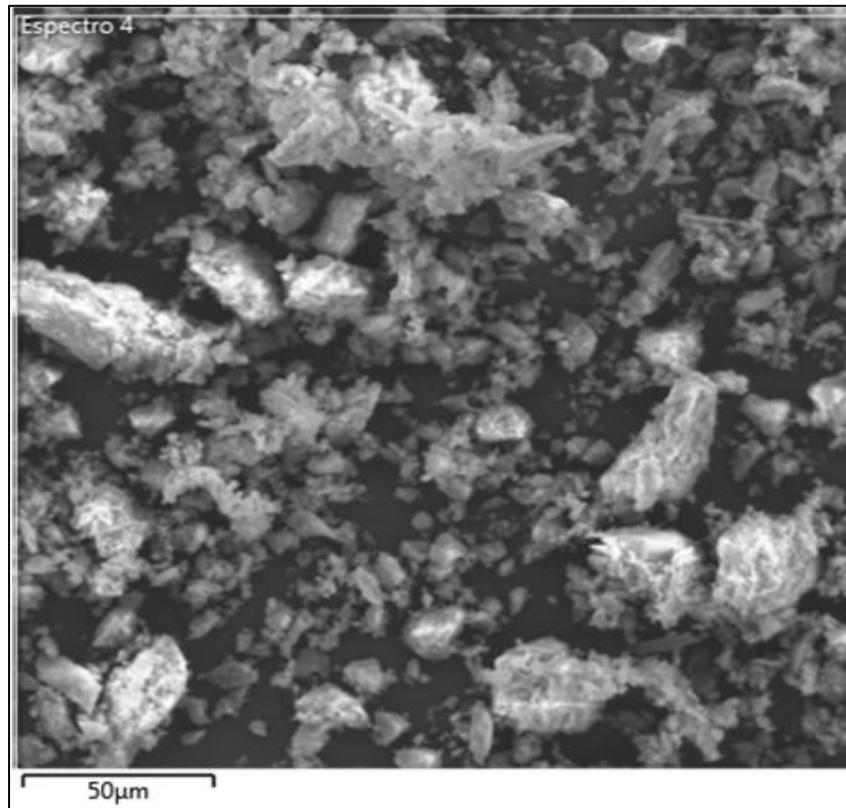
Fonte: Própria.

**Tabela 07:** Concentrações atômicas identificadas no ensaio EDS para amostra 03.

Elemento	Concentração atômica
Magnésio	3%
Silício	23%
Cálcio	5%
Ferro	67%
TOTAL	100%

- **Amostra 04**

**Figura 29:** Imagem gerada pelo MEV para a amostra 04.



Fonte: Própria.

**Tabela 08:** Concentrações atômicas identificadas no ensaio EDS para amostra 04.

Elemento	Concentração atômica
Magnésio	14%
Silício	65%
Cálcio	20%
Ferro	1%
Sódio	1%
TOTAL	100%

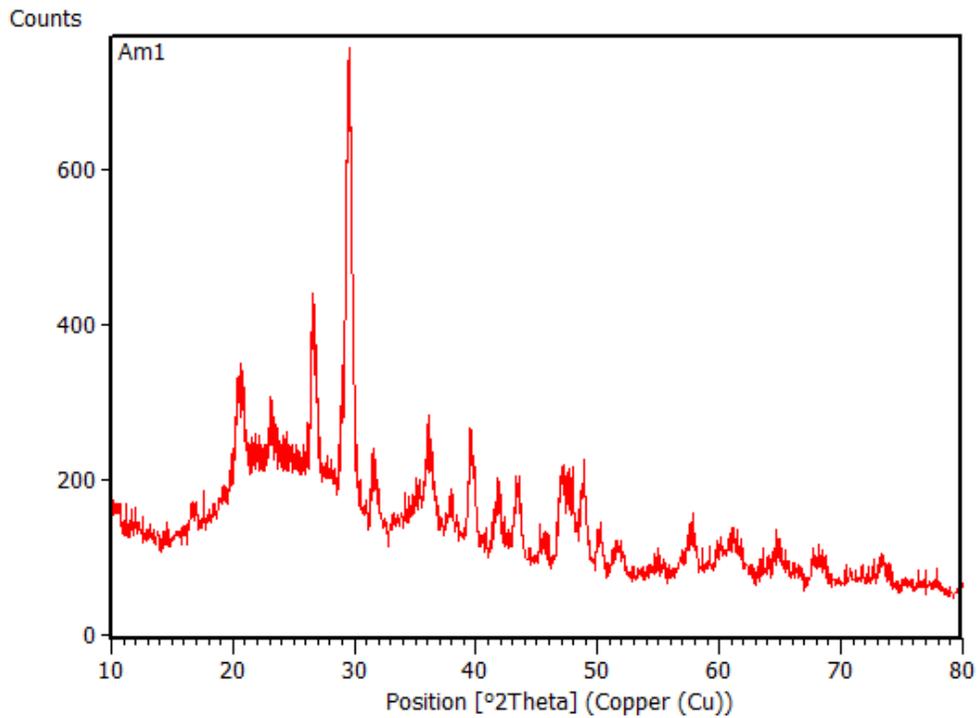
### 4.3 DRX

Após a realização dos ensaios no difratômetro, foram gerados os difratogramas referentes a cada uma das quatro amostras. Foi utilizado o software XPert HighScore Plus versão 3.0e da empresa europeia Malvern PANalytical. O software é utilizado para identificação de compostos cristalinos a partir do perfil de difração e quantificação das proporções de cada fase através do método de Rietveld. Para caracterização das amostras foram inseridos cartões de difração de diversas fases cristalinas, obtidos a partir do banco de dados aberto do COD (Crystallography Open Database). O programa realiza comparações entre o perfil da amostra e os cartões do banco de dados, determinando os compostos de maior correspondência com o material analisado. São identificadas as posições e intensidade dos picos do material presente na amostra, e então determinados os cartões compatíveis.

Os resultados obtidos pelo EDS guiaram a escolha dos cartões apresentados no software como possíveis fases presentes na amostra, através da identificação e concentração dos elementos presentes. Após a escolha dos cartões, foi realizado o refinamento de Rietveld, método utilizado para quantificação das fases cristalinas. Para atestar a confiabilidade do refinamento o parâmetro “Goodness of Fit” (qualidade do ajuste), relacionado com o nível de compatibilidade do refinamento, deve ser menor do que 5,0. As imagens do refinamento, juntamente com os parâmetros de compatibilidade, para cada amostra estão inseridas nos anexos.

- **Amostra 01**

**Figura 30:** Difratoograma gerado para a amostra 01.



**Tabela 09:** Fases cristalinas identificadas e concentrações calculadas pelo método de rietveld.

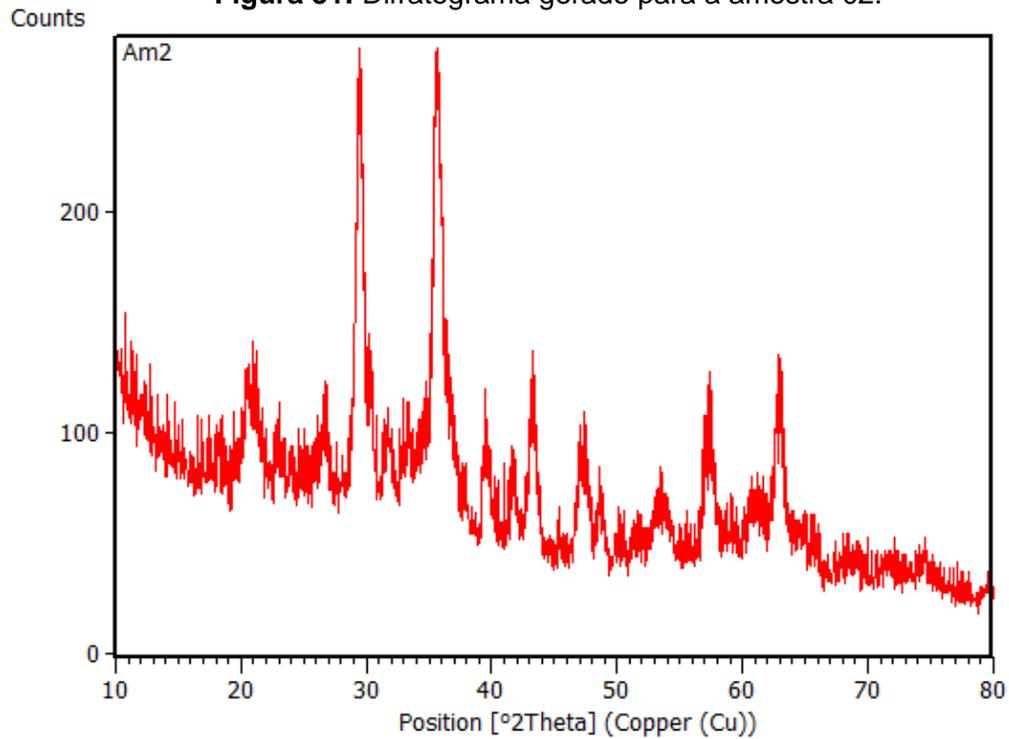
Fase Cristalina	Concentração
Magnésio Calcita (Ca,Mg)CO <sub>3</sub>	66,4%
Quartzo (SiO <sub>2</sub> )	27,%
Florensovite (Cu,Zn)Cr <sub>1.5</sub> Sb <sub>0.5</sub> S <sub>4</sub>	6,6%
TOTAL	100%

Os resultados apresentados na tabela mostram concentrações elevadas de magnésio calcita, uma variação da calcita, e de quartzo, variação da sílica. Conforme apresentado na

revisão conceitual, são minerais bastante abundantes em toda a crosta terrestre e dois dos principais compostos causadores de incrustações.

- **Amostra 02**

**Figura 31:** Difratograma gerado para a amostra 02.



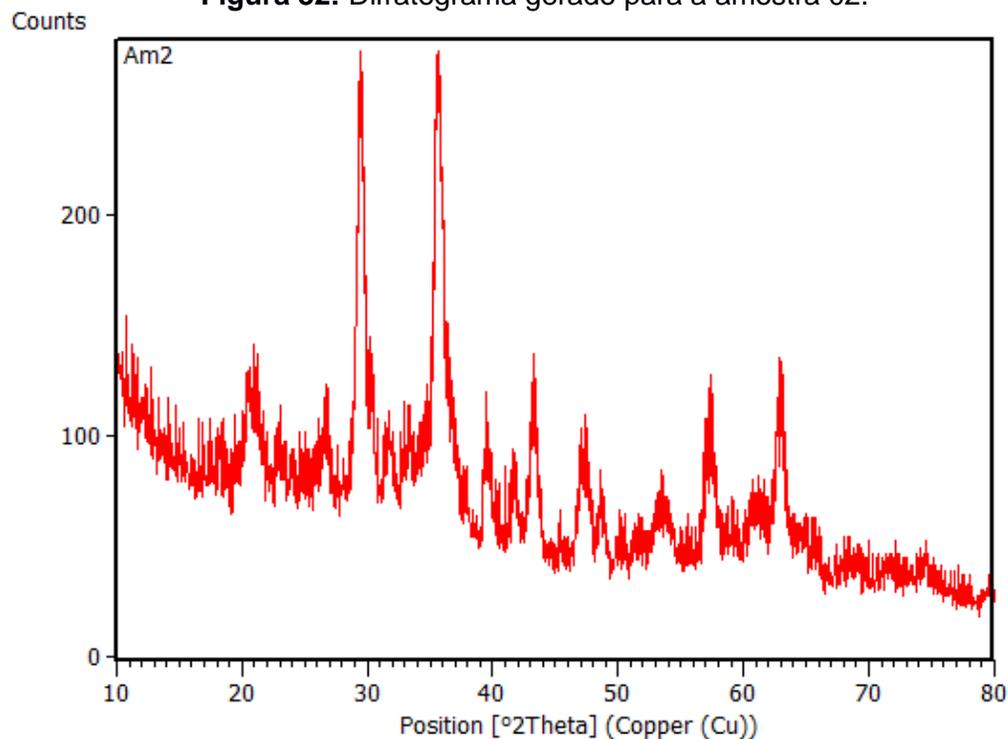
**Tabela 10:** Fases cristalinas identificadas e concentrações calculadas pelo método de rietveld.

Fase Cristalina	Concentração
Calcita (CaCO <sub>3</sub> )	53,7%
Magnetita (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )	26,5%
Coesita (SiO <sub>2</sub> )	19,8%%
TOTAL	100%

Os resultados encontrados para amostra 04 mostram concentrações elevadas de calcita, coesita (variação da sílica) e magnetita. A magnetita é um mineral formado pelos óxidos de ferro II (FeO) e III (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Apesar da identificação da magnetita, é possível que a quantidade de óxidos de ferro encontrada seja produto das reações de corrosão das tubulações, principalmente por ter sido retirada em um ponto de mudança de direção (mais propício ao surgimento de incrustações, acelerando o processo de corrosão). A coloração amarronzada da amostra indica a possível presença de óxidos de ferro.

- **Amostra 03**

**Figura 32:** Difractograma gerado para a amostra 02.



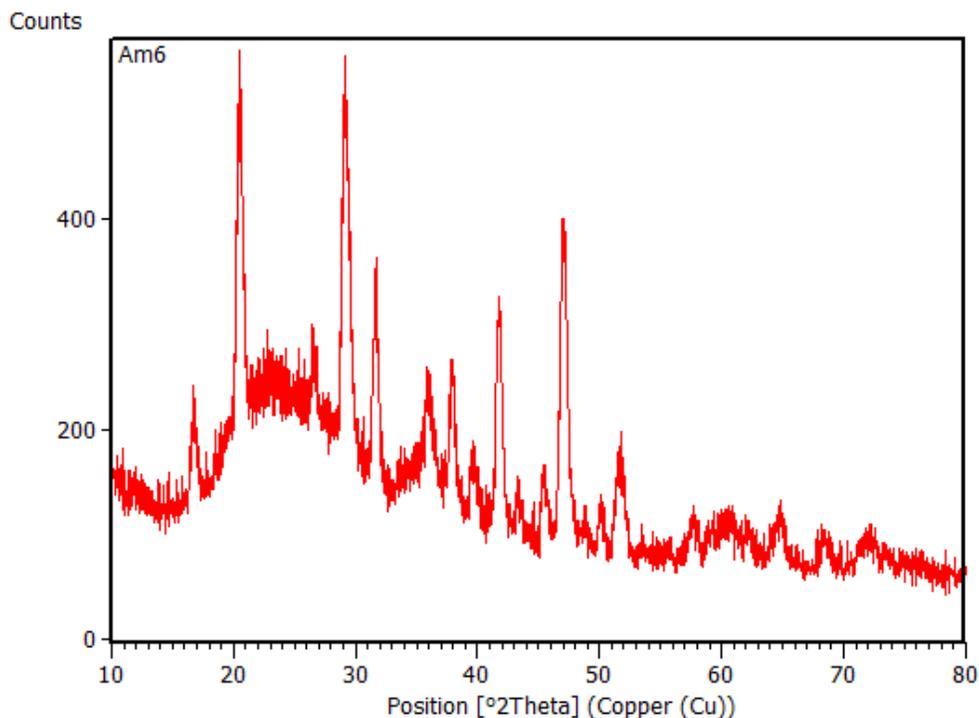
**Tabela 11:** Fases cristalinas e concentrações calculadas pelo método de rietveld.

Fase Cristalina	Concentração
Magnetita (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )	40,9%
Coesita (SiO <sub>2</sub> )	59,1%
TOTAL	100%

A análise do difratograma apresentado pela amostra 03 identificou duas fases, a magnetita e a coesita. Assim como a amostra 02, a amostra 03 foi coletada em um ponto de elevada perda de carga (joelho de 90°), sendo um ponto sujeito ao surgimento de incrustações. Portanto, é possível que a fase identificada como magnetita seja na realidade produto da corrosão nas tubulações. Foi identificada novamente uma alta concentração de coesita, variação da sílica e grande causadora de incrustações.

- **Amostra 04**

**Figura 33:** Difratograma gerado para a amostra 02.



**Tabela 12:** Fases cristalinas e concentrações calculadas pelo método de rietveld.

Fase Cristalina	Concentração
Monohidrocalcita (CaCO <sub>3</sub> .H <sub>2</sub> O)	92,2%
Coesita (SiO <sub>2</sub> )	7,3%
Deuterido de cério e ferro (Ce <sub>2</sub> D <sub>4</sub> .7Fe <sub>17</sub> )	0,5%
TOTAL	100%

A análise da amostra 04 revelou uma concentração elevada de monohidrocalcita, uma variação hidratada da calcita, uma concentração menor de coesita e um percentual insignificante de um composto desconhecido, contendo ferro e cério. Como mencionado anteriormente, as variações de calcita e sílica são grandes causadoras de incrustações.

#### 4.4 CUSTO VULCAN S250

A Tabela 13 abaixo mostra as informações técnicas do equipamento, como também o seu custo de aquisição do equipamento fornecido pela equipe Acquasolo.

**Tabela 13:** Custo de aquisição Vulcan S250

Equipamento	Vulcan S250
Descrição	Vazão nominal de 250 m <sup>3</sup> /h e capacidade para trabalhar com tubos de até 10" (250 mm) de diâmetro, temperatura da água até 90°C e teor de ferro máximo de 1,0 mg/l.
Custo de unitário	R\$ 58.840,00

#### 4.5 CUSTO ABRANDADORES POR TROCA IÔNICA

Os valores da Tabela 14, apenas indicam informações técnicas e o custo do equipamento. Não está contemplando os valores de sistema de bombeamento, instalações do equipamento na Termoverde, dos acessórios, como por exemplo, o hidrômetro e além de qualquer outros custos associados a melhoria e adequação nas dependências da Termoverde, para que o sistema possa ser instalado com eficácia e eficiência. Também não está contemplado o valor de um tanque mais um equipamento extra.

**Tabela 14:** Custo de aquisição Vulcan S250

<b>Equipamento</b>	<b>Abrandador automatico GS 50.000</b>
<b>Descrição</b>	<p>Filtro que tem por finalidade a redução do teor de dureza presente na água. Apresenta regeneração automática, que pode ser programada para acontecer em qualquer dia/horário, em válvula de controle digital com indicação de vazão horaria. Tanque em polietileno com fibra de vidro medindo 125 x 270 cm, possui internamente 1,250 litros de resina catiônica. Acompanha Tanque de Regeneração rotomoldado de 900 litros para cada abrandador ou 01 de 5.000 litros para o sistema todo. Expansão livre de 35% da altura do tanque na regeneração. Campanha estimada em 1000 m3 na vazão de 53 m3/h. Consumo de sal de 150 kgs por regeneração.</p>
<b>Custo Unitário</b>	<b>R\$ 76.000,00</b>
<b>Custo Total</b>	<b>R\$ 304.000,00</b>

#### 4.6 CUSTO MANUTENÇÃO E HORA MÁQUINA PARADA

A Termoverde mantém um custo de manutenção anual do sistema de troca de calor, informados na tabela 15. Na composição deste custo de manutenção não há valores de mão de obra da Termoverde, uma vez que há necessidade de contratação de uma empresa para execução desta atividade.

O custo de hora parada, devido a manutenção do chiller, também é verificado para análises do estudo de viabilidade econômica. Isso porque, contabilizar o quanto a empresa deixa de disponibilizar para o mercado em forma de energia significa o não atendimento ao cliente concessionado, conseqüentemente, capital financeiro que não é recebido. A contabilização do valor de maquinário parado devem ser multiplicados por dois (2), já que a intervenção no chiller acontece a cada seis (6) meses.

A última manutenção do chiller ocorreu entre os dias 04 e 06 de novembro, totalizando 18 horas e 55 minutos, do equipamento com intervenção. O custo do MegaWatt/hora, deste equipamento vale R\$ 260,00.

Os valores dos custos despendidos pela Termoverde encontram-se na tabela abaixo.

**Tabela 15:** Custo de Manutenção e hora máquina parada.

Custo manutenção anual	R\$	60.000,00
Custo/hora maquina parada anual	R\$	9.838,40

#### 4.7 RESULTADOS DOS INDICADORES

Com as informações, de custo de manutenção, custos de hora maquina parada e os custos de aquisições dos equipamentos, aplicaram-se as fórrmulas para o calcularmos o payback, VPL (Valor presente líquido) e ROI (Retorno sobre investimento).

**Tabela 16:** Resultado dos indicadores

<b>Indicadores/Equipamento</b>	<b>Vulcan S500</b>	<b>Abrandador aut. GS 50.000</b>
<b>Payback (ano)</b>	0,84	4,35
<b>ROI</b>	1,19	0,23
<b>VPL</b>	- R\$ 17.932,69	- R\$ 263.092,69

Para geração do payback, utilizou-se o custo de manutenção, juntamente com custo da hora máquina parada, ocorrido na intervenção do chiller. Os valores para Vulcan ficaram, com a recuperação do valor investido, no período de 10 meses e 3 dias (0,84 anos), menos de um ano após a aplicação e aquisição. Já para o sistema de abrandamento, o retorno se dará em 52 meses e 7 dias (4,35 anos), quase cinco anos de espera.

Para o cálculo do ROI em relação ao Vulcan tem-se 1,19 vezes o retorno do investimento. É de fato, real, já que é o inverso do que foi indicado no payback. Para os sistema de abrandamento, ele é cinco vezes menor que a quantidade que esse retorno sobre o investimento é obtido (0,23), se comparado ao Vulcan. Mostra-se uma informação concreta, pois é o inverso do foi mostrado com o payback e como mostra a teoria, quanto maior for o resultado do ROI, mas viável se torna a aplicação do investimento.

O valor do VPL é negativo para ambas propostas de soluções, pelo seguinte motivo:

- O VPL consiste em sua formulação, uma taxa de juros, conhecida como TMA (taxa mínima de retorno), que é composta por vários fatores externos e internos, como taxas de juros (Taxa Selic), apetite ao risco da empresa, tempo de investimento, por exemplo. Como não se obteve acessos as informações de dados financeiros da Termoverde, apenas aplicou a taxa Selic, que é conhecida e aberta a consultoria pública (4,90% a.a, em novembro de 2019).

## 5.0. CONCLUSÕES

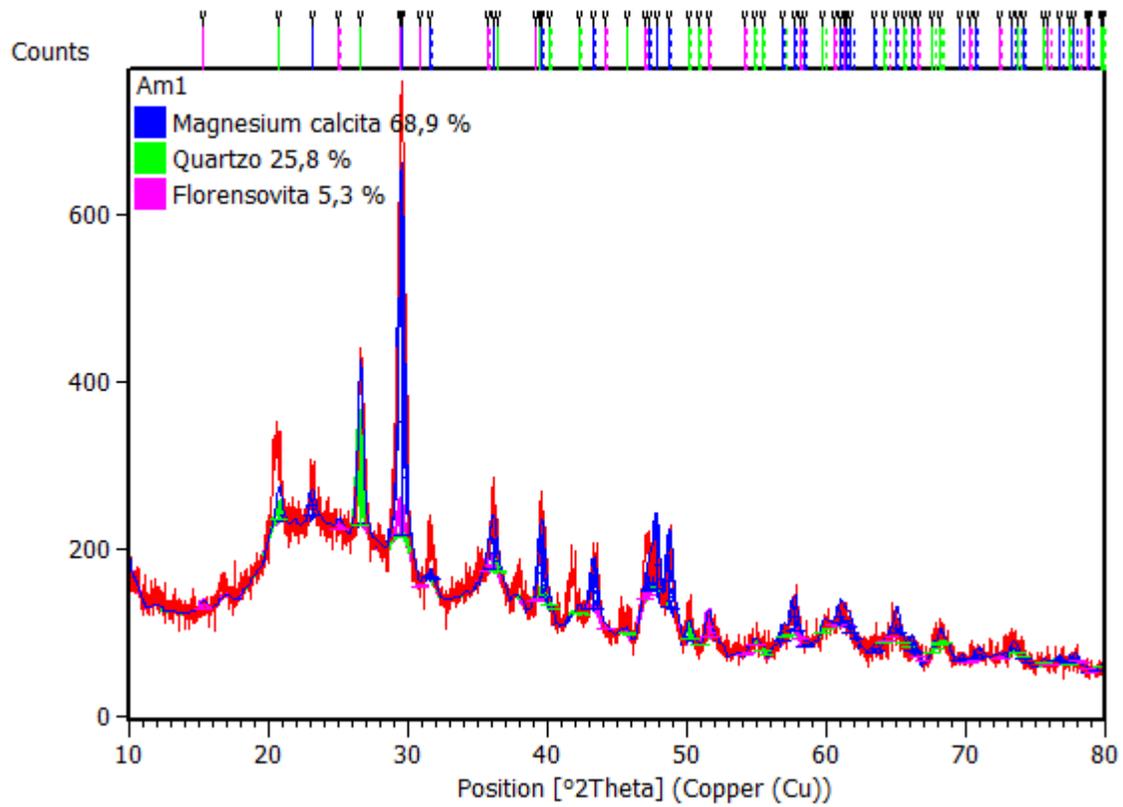
A partir dos resultados encontrados nos ensaios de caracterização e análise dos parâmetros de qualidade da água, constatou-se que a água utilizada no sistema de resfriamento possui concentrações elevadas de compostos contendo carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), dois dos principais causadores de incrustações em sistemas a base de água. Os resultados apresentados no laudo atestam a potabilidade da água, mas indicam que o tratamento adotado é insuficiente para atender às exigências do sistema de resfriamento.

Diante do cenário exposto, dos investimentos em uma das opções de sistemas para resolução da problemática, verificados também juntos a aplicação de alguns indicadores financeiros, fica identificado que a aquisição do sistema Vulcan financeiramente, leva vantagem sobre os abrandadores, já que, além do que foi mostrado nos indicadores, não se faz necessário o despendimento de custos de instalações para o sistema de abrandamentos. É importante salientar que em todo e qualquer investimento deve ser levado em consideração a saúde financeira da Termoverde, para aplicação de capital e essas informações não foram objetos de verificação.

## 6.0. ANEXOS

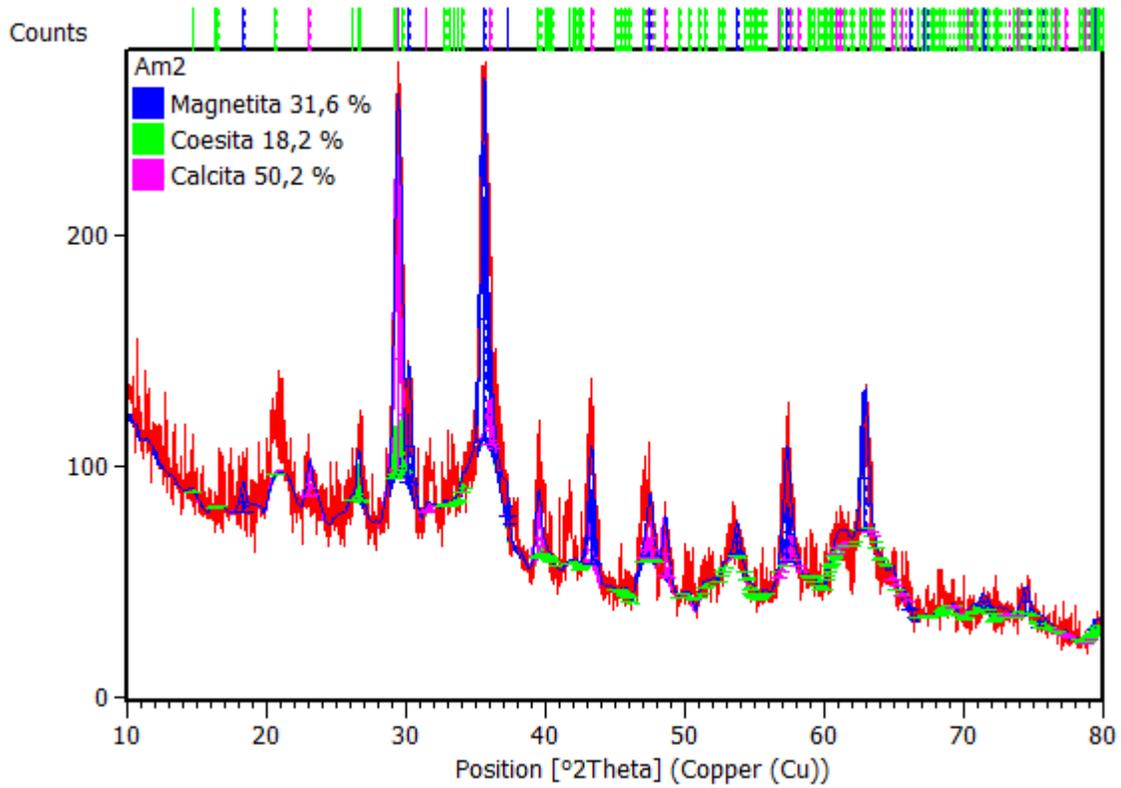
### 6.1. REFINAMENTO DE RIETVELD

- Amostra 01



Agreement Indices	
Condition Number	2210519000000
R expected	8,40191
R profile	8,5637
Weighted R profile	11,1596
D-statistics	0,55721
Weighted D-statistics	0,66322
Goodness of Fit	1,76417

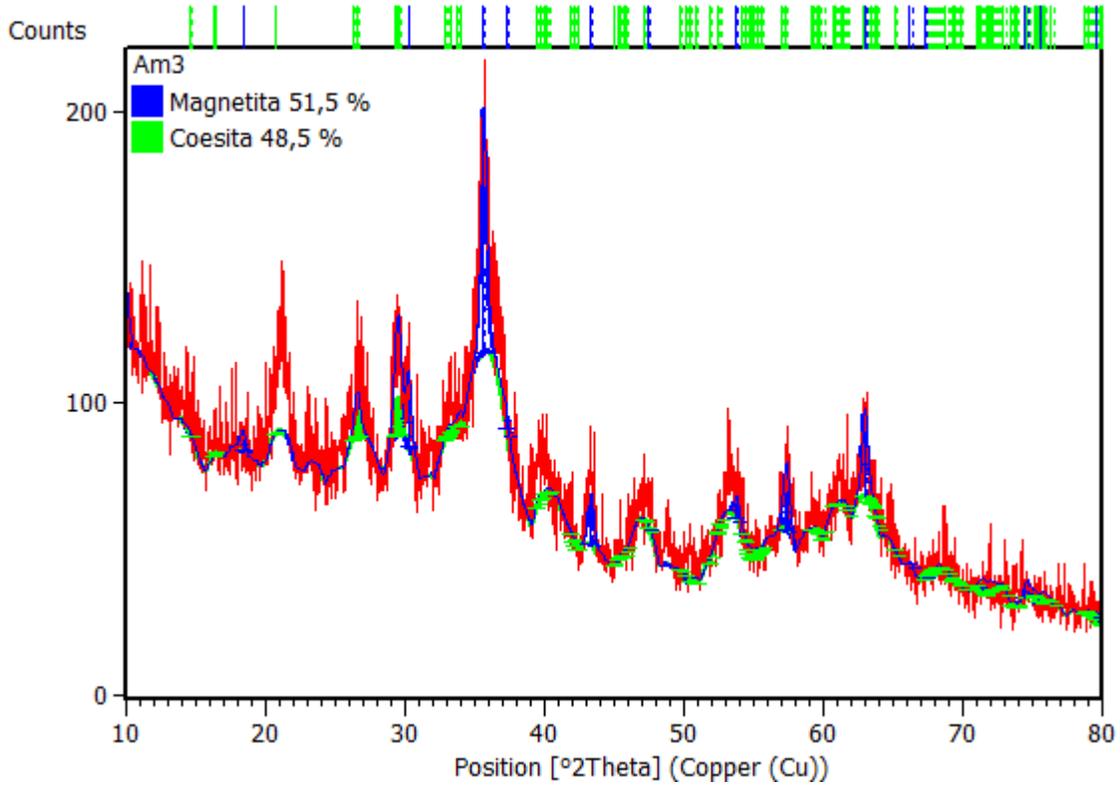
- Amostra 02



Agreement Indices

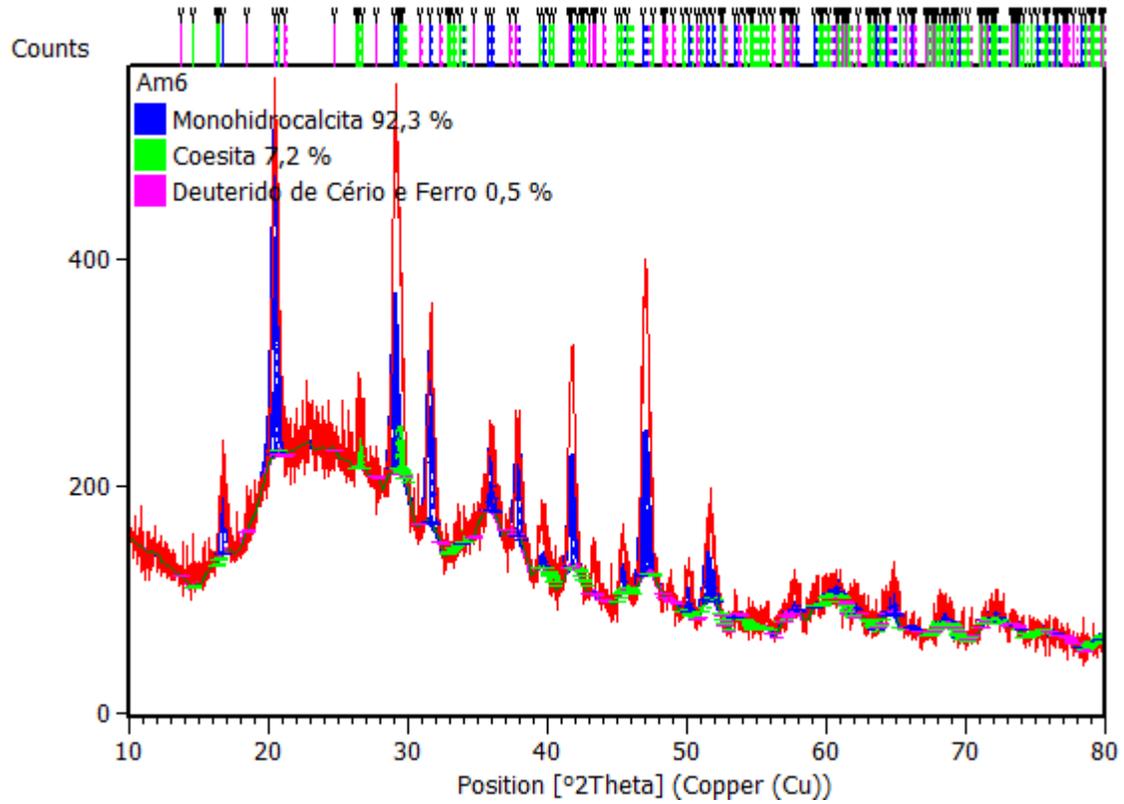
Condition Number	94906250000
R expected	11,77621
R profile	9,57897
Weighted R profile	12,19833
D-statistics	0,66692
Weighted D-statistics	0,64766
Goodness of Fit	1,07298

- Amostra 03



Agreement Indices	
Condition Number	809722200000
R expected	11,96665
R profile	9,61882
Weighted R profile	12,04066
D-statistics	0,59975
Weighted D-statistics	0,57567
Goodness of Fit	1,01241

- **Amostra 04**



Agreement Indices	
Condition Number	208589700000
R expected	8,3116
R profile	7,20519
Weighted R profile	9,29969
D-statistics	0,99624
Weighted D-statistics	0,97096
Goodness of Fit	1,25189

## 6.2. ESCOPO DO SERVIÇO DE MANUTENÇÃO



### Dados do Cliente

<b>Cliente</b>		<b>Data</b>	
TERMOVERDE SALVADOR		06/11/2109	
<b>Contato</b>	<b>Telefone / Fax</b>	<b>TAG</b>	
Jorge Santos	71 988314390	E-471003	
<b>Local da Instalação</b>			
UTE TERMOVERDE			
<b>Equipamento</b>	<b>Fabricante</b>	<b>Modelo</b>	<b>Nº Série</b>
Chiller Absorption	ND	ND	ND

### Relatório Diário de Obra

#### DESCRIÇÃO DOS SERVIÇOS

**EQUIPE EXECUTANTE**  
Frank Kunghe / Hebert Fian

ATIVIDADE	PERÍODO	
	INÍCIO	TÉRMINO
Chegada no cliente	07:35	NA
Circulação de água com a CIP	N/A	8:45
Desmobilização da CIP	8:45	10:30
Iniciamos a limpeza mecânica com hidrojateamento de baixa pressão.	10:30	12:15
Parada de almoço	12:15	13:15
Retorno do hidrojateamento	13:15	18:10
Saída do Cliente	NA	18:30

#### OBSERVAÇÕES DO CLIENTE

#### TABELA DE HORAS

Participação de DDS	NA	Aguardando cliente (especificar)	NA
Aguardando liberação de P.T.	NA	Aguardando WCR/Coldclima	NA



São Paulo, 28/07/2019.

**PARA:**  
**TERMOVERDE SALVADOR S.A.**

**A/C Sr. Eng. Danilo Laert – Gerência Operacional.**

---

**REF.: LIMPEZA QUÍMICA E MECÂNICA DE TROCADORES**  
**UNIDADE DE ABSORÇÃO LG**  
**PRP1482-2019 Rev 01.**

---

Em atenção à solicitação de V.Sa., apresentamos proposta para serviços de limpeza química e mecânica em trocadores de calor, de acordo com informações recebidas do cliente, em um total de uma unidade.

#### **1 – Unidades beneficiadas**

Estão sendo considerados para este trabalho a limpeza de unidade de absorção LG, nos trocadores da parte superior e inferior, conforme desenhos fornecidos.

#### **2 – SERVIÇOS**

Estão sendo considerados nesta proposta o escopo abaixo descrito:

- Envio de unidade móvel de limpeza, pertencente a Coldclima, e produtos químicos para execução dos trabalhos ao cliente.
- Limpeza química no condensador com circulação de produto químico compatível, para retirada de incrustações.
- Enxague e retirada do produto químico do sistema.
- Limpeza complementar com unidade rotativa de limpeza e hidrojato de baixa pressão.
- Limpeza mecânica no evaporador da unidade

## **7.0. REFERÊNCIAS**

- BLEICHER, L; SASAKI, J.M. Introdução à Difração de Raios-X em Cristais. Ceará. Universidade Federal do Ceará, 2000. Disponível em <http://www.raiosx.ufc.br/site/wp-content/uploads/downloads/2013/01/apostila.pdf>. Acesso em: Junho de 2019.

- Carla Elieze LEIDENS, Mauro Alberto NUSKE; Douglas FAORO; Jocias Maier ZANATTA; ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA E FINANCEIRA ENTREAQUISIÇÃO DE MÁQUINA OU TERCEIRIZAÇÃO: estudo de caso em uma indústria de confecções. 2016. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Santa Maria.
- CAVAZZANA, G.H. Análise da Corrosividade e Incrustação das Águas Subterrâneas na Região Urbana de Campo Grande – MS. Mato Grosso do Sul. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufms.br:8443/jspui/bitstream/123456789/2195/1/Guilherme%20Henrique%20Cavazzana.pdf>. Acesso em: Agosto de 2019.
- DEDAVID, B.A; GOMES, C.I; MACHADO,G. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA Aplicações e preparação de amostras. Editoria PUC-RS, 2007. Disponível em: <http://www.pucrs.br/edipucrs/online/microscopia.pdf>. Acesso em: Junho de 2019.
- GITMAN, L. J. Princípios de Administração Financeira. 10ª edição, São Paulo: Harbra. 2007.
- KAHN, H. PMI-2201 DIFRAÇÃO DE RAIOS X. Disponível em: [http://www.angelfire.com/crazy3/qfl2308/1\\_multipart\\_xF8FF\\_2\\_DIFRACAO.pdf](http://www.angelfire.com/crazy3/qfl2308/1_multipart_xF8FF_2_DIFRACAO.pdf). Acesso em: Jun. 2019.
- MARTINS, J. Raios X e Difração de Bragg. 2011. (15m06s). Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=nLKUPwqoFas>>. Acesso em: Maio de 2019.
- MEDEIROS, Izana Manuela Araújo Ferreira de et al. Abrandamento de águas via troca iônica. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- REBELATTO, D. A. N. Projeto de Investimento. 1. ed. Barueri - SP: Editora Manole, 2004. v. 01. 329p.
- SILVA, B. M. et al. MODELAGEM DO ABRANDAMENTO DA ÁGUA POR PRECIPITAÇÃO DOS ÍONS  $Ca^{+2}$  E  $Mg^{+2}$  E FLOTAÇÃO POR AR

DISSOLVIDO. Blucher Chemical Engineering Proceedings, v. 1, n. 1, p. 85-90, 2014.

- TROVATI, J. Tratamento de Água de Resfriamento. Curso Online Tratamento de Água, 2004. Disponível em: [http://www.snatural.com.br/PDF\\_arquivos/Torre-Caldeira-Tratamento-Agua.pdf](http://www.snatural.com.br/PDF_arquivos/Torre-Caldeira-Tratamento-Agua.pdf). Acesso em: Maio de 2019.
- WASSERTECHNIK, Christiani. Vulcan Descaler. Disponível em <https://www.cwt-international.com/cwt/pt/vulcan-descaler/como-funciona.html>. Acesso em: Junho de 2019.
- Linha Industrial Acquasolo. Disponível em: <http://www.acquasolo.com.br/>. Acesso em: Junho de 2019.
- Toro. Taxa Selic: o que é e qual a taxa acumulada hoje. Disponível em: <https://artigos.toroinvestimentos.com.br/taxa-selic-o-que-e-tabela-acumulada-mensal>> Acesso em: Novembro de 2019.