

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA HÍDRICA

**A influência da Ferrobactéria e Bactéria Redutora
de Sulfato na corrosão de equipamentos de centrais
Hidrelétricas – da teoria ao campo.**

Milton Mineo Hirai

Itajubá
2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA HÍDRICA

Milton Mineo Hirai

**A influência da Ferrobactéria e Bactéria Redutora
de Sulfato na corrosão de equipamentos de centrais
Hidrelétricas – da teoria ao campo.**

**Dissertação submetida ao Programa de Pós
Graduação em Engenharia Hídrica como parte dos
requisitos para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Hídrica.**

Área de concentração: Geração Hidrelétrica

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho

**Co-Orientadora: Profa. Dra. Márcia Regina
Baldissera Rodrigues**

**Itajubá
2020**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

EM ENGENHARIA HÍDRICA

Milton Mineo Hirai

A influência da Ferrobactéria e Bactéria Redutora de Sulfato na corrosão de equipamentos de centrais Hidrelétricas – da teoria ao campo.

Dissertação aprovada por banca examinadora em 19 de novembro de 2020, conferindo ao autor o título de **Mestre em Ciências em Engenharia Hídrica.**

Banca Examinadora

Prof. Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho (Orientador)

Profa. Dra. Márcia Regina Baldissera Rodrigues (Co-orientadora)

Prof. Dr. Oswaldo Honorato de Souza Junior

Prof. Dr. Frederico Fábio Mauad

Itajubá
2020

DEDICATÓRIA

Dedico esta pesquisa para honra e glória de Deus.

Para minha esposa Edna, aos filhos Eduardo e Danilo que sempre me apoiaram em todas as fases da vida pessoal e profissional.

AGRADECIMENTOS

Ao meu Deus por sua graça e bênção.

A minha amada família pelo apoio ao longo de todo período de dedicação.

Aos meus orientadores, o Prof. Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho a Prof.^a Dr.^a Márcia Regina Baldissera Rodrigues, pelo amor à profissão na transmissão e compartilhamento de conhecimentos.

Ao Grupo Humma que gentilmente colaborou executando tratamento superficial de passivação dos cupons de aço inoxidável.

Em especial para equipes de operação e manutenção das empresas Furnas Centrais Elétricas e Engie pelo apoio irrestrito nos experimentos desenvolvidos na Usina Hidrelétrica Serra da Mesa e Usina Hidrelétrica Cana Brava.

“Pois o Senhor dá a sabedoria; da sua boca é que vem o conhecimento e o entendimento”.

Provérbios 2:6

RESUMO

Os conceitos de ferrobactéria e bactéria redutora de sulfato são desconhecidos pela maioria dos profissionais da área de geração em centrais hidrelétricas, porém seu ataque corrosivo é recorrente em dezenas de usinas. As consequências desse tipo de corrosão afetam a vida útil dos equipamentos ocasionando falhas ou paradas para manutenção com interrupção da geração de energia. Esta pesquisa de mestrado profissional apresenta por objetivo investigar esse tipo de biocorrosão, seu ataque nos diversos tipos de metais utilizados em componentes hidromecânicos, métodos de mitigação e controle químico no sistema de água de resfriamento. Para avaliação da corrosão foram instalados diferentes corpos de provas metálicos nos reservatórios de Serra da Mesa e Cana Brava, no rio Tocantins, com medições periódicas de perda de massa individual. Desta pesquisa ficou constatado que o grau de corrosão é diretamente influenciado pela profundidade da água e elaborada hipótese da influência do solo original do reservatório na proliferação da ferrobactéria. Concluindo que utilizar água superficial é a melhor solução com mínimo de impacto ambiental no controle da biocorrosão em centrais hidrelétricas.

Palavras Chave: Biocorrosão. Ferrobactéria. Hidrelétrica.

ABSTRACT

The concepts of iron bacteria and sulfate-reducing bacteria are unknown to most professionals in the generation area of hydroelectric plants, but their corrosive attack is recurrent in dozens of plants. The consequences of this type of corrosion affect the useful life of the equipment, causing failures or maintenance stops with interruption of energy generation. This professional master's research aims to investigate this type of biocorrosion, its attack on the different types of metals used in hydromechanical components, mitigation methods and chemical control in the cooling water system. To assess corrosion, different metallic specimens were installed in the Serra da Mesa and Cana Brava reservoirs, on the Tocantins River, with periodic measurements of individual mass loss. From this research it was found that the degree of corrosion is directly influenced by the depth of the water and a hypothesis of the influence of the original soil of the reservoir on the proliferation of iron bacteria was elaborated. In conclusion using surface water is the best solution with minimal environmental impact in the control of biocorrosion in hydroelectric power plants.

Keywords: Biocorrosion. Iron bacteria. Hydroelectric.

RELAÇÃO DE FIGURAS

Figura 1: Substância polimérica extracelular em diferentes dimensões.....	5
Figura 2: A maturação do biofilme	6
Figura 3: Despolarização catódica sob biofilme oxigenado	7
Figura 4: Esquema da redução do ferro e formação erosão da superfície.....	8
Figura 5: Esquema de um tubérculo	9
Figura 6: Colônia de tubérculos.....	9
Figura 7: Sequência da obstrução de tubulação por efeito de ferrobactéria	10
Figura 8: Tubulação de turbina atacada por ferrobactéria.....	11
Figura 9: Esquema de BRS na biocorrosão.....	12
Figura 10: Ilustração esquemática de transferência de elétrons	13
Figura 11: Fotos da bactéria redutora de sulfato em colônia (A)	13
Figura 12: Fotos da bactéria redutora de sulfato na forma isolada.....	14
Figura 13: Porca aço inoxidável AISI 304 atacada por BRS e coberta pelo tubérculo.....	15
Figura 14: Visual das porcas inox com pits profundos após limpeza do tubérculo.....	15
Figura 15: Exemplo de distribuição de concentração de O ₂ , CO ₂ conforme profundidade.	17
Figura 16: Variação de Oxigênio Dissolvido (mg L ⁻¹) ao longo da coluna d'água.....	18
Figura 17: Variação de pH na coluna vertical	18
Figura 18: Esquema de presença de ferrobactéria em relação ao OD.	19
Figura 19: Cupons para teste de corrosão	21
Figura 20: Placa de trocador de calor após limpeza.	22
Figura 21: Superfície interna de conduto forçado coberto por tubérculos	23
Figura 22: Comparação entre caixa espiral pintada e conduto forçado sem pintura.	23
Figura 23: Reservatório de biocida e bomba do sistema de inibidor químico.	25
Figura 24: Painel de controle geral de dosagem e injeção do hipoclorito de cálcio	25
Figura 25: Circuito elétrico de instalação de sistema de corrente impressa.....	27
Figura 26: Vista no detalhe conexão ao anodo sacrifício da proteção catódica.....	28
Figura 27: Trocadores de calor com biofilme e alimentado por <i>HOD UV</i>	29
Figura 28: Conjunto de equipamentos <i>HOD UV</i> em sistema de água de resfriamento.	29
Figura 29: Rios Tocantins e Araguaia	32
Figura 30: Localização dos reservatórios de 1 - Serra da Mesa e 2 - Cana Brava–GO.	33
Figura 31: Reservatório Serra da Mesa	34

Figura 32: Vista do reservatório da usina Serra da Mesa.....	35
Figura 33: Vista jusante da usina Cana Brava.....	35
Figura 34: Cupons dos diversos metais com balança de milésimo de grama.	36
Figura 35: Cesto com cupons inicialmente utilizado	37
Figura 36: Amostras sendo lançadas na usina Cana Brava	38
Figura 37: Dispositivo criado para fixar cupons	39
Figura 38: Vista interna com cupons e arruela de teste.....	39
Figura 39: Última amostragem de Serra da Mesa perdida por enrosco em detritos	40
Figura 40: Suporte do dispositivo de cupons na usina Serra da Mesa	40
Figura 41: Dispositivo para coleta de água subsuperficial.....	42
Figura 42: Coleta de amostra de água no tubo de sucção da usina Cana Brava	43
Figura 43: Espectrofotômetro portátil para medição de ferro dissolvido.....	44
Figura 44: Situação como apresentada após 151 dias de imersão.....	46
Figura 45: Visual após limpeza química	46
Figura 46: Medições de ferro dissolvido em água profunda	50
Figura 47: Esquema de captação alternativa até sistema de resfriamento	51
Figura 48: Localização da entrada da captação alternativa.....	52
Figura 49: Mosaico de solos.....	57
Figura 50: Vista da casa de força da Usina Pedra do Cavalo.....	64
Figura 51: Amostra de substrato de tubérculo.....	65
Figura 52: Desmontagem da cuba de alojamento da vedação de eixo de turbina.....	65
Figura 53: Corrosão na face de vedação de contato com cinta de grafite.	66
Figura 54: Corrosão na porca de fixação da vedação do eixo.....	66
Figura 55: Corrosão perimetral do eixo dentro da caixa de vedação do eixo	67
Figura 56: Detalhe da corrosão em forma laminar.....	67
Figura 57: Situação de biocorrosão na face da comporta segmento.	68
Figura 58: Instalação de sistema de proteção catódica na comporta.....	68
Figura 59: Instalação de corrente impressa no conduto forçado	69
Figura 60: Uma das falhas do sistema instalado.	69
Figura 61: Atrito desgastou proteção e ocasionou curto-circuito do sistema.....	70
Figura 62: Ataque corrosivo em porca inox e porca passivada.....	70
Figura 63: Tubérculos em comporta ensecadeira provisória sem pintura.....	71
Figura 64: Situação do conduto forçado sem pintura.....	71
Figura 65: Corrosão da solda após 6.836 horas de operação.	72

Figura 66: Corrosão no teto do pré-distribuidor.....	72
Figura 67: Tubérculos no pré-distribuidor com 360 h de operação.	73
Figura 68: Visão do pré-distribuidor com conduto forçado sem pintura.	73
Figura 69: Corrosão na parte superior do aro de saída da turbina.....	74
Figura 70: Erosão no aro de saída comparado ao palito de fósforo	74
Figura 71: Comporta vagão inspeção de 1.240 horas	75
Figura 72: Corrosão no alojamento do eixo de rolete da comporta.	76
Figura 73: Corrosão no alojamento de parafusos de rodas.	76
Figura 74: Corrosão na face de rolamento da roda da comporta.....	77
Figura 75: Na esquerda, arruela galvanizada a fogo	77
Figura 76: Edícula e baias de tanques de produtos químicos biocidas.	78
Figura 77: Sala de painel e bombas dosadoras para injeção de inibidores químicos.....	78
Figura 78: Ponto de injeção após filtro autolimpante do sistema de água de resfriamento.	79

ABREVIATURAS

<i>AISI</i>	- <i>American Iron and Steel Institute</i>
ANA	- Agência Nacional de Águas
<i>ASTM</i>	- <i>American Society for Testing and Materials</i>
BRS	- Bactéria redutora de sulfato
<i>CAPEX</i>	- <i>Capital Expenditure</i> = despesas de implantação
<i>DET</i>	- <i>Direct electron transfer</i> = transferência direta de elétron
<i>DNA</i>	- <i>Deoxyribonucleic Acid</i> = ácido desoxirribonucleico
DNIT	- Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte
EMATER	- Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural
<i>EPS</i>	- <i>Polymeric extracellular substance</i> = substância extracelular polimérica
<i>HOD UV</i>	- <i>Hydro–Optic Disinfection Ultraviolet</i> - sistemas de luz ultravioleta hidro-óptica
IBAMA	- Instituto Brasileiro do Meio ambiente
<i>MET</i>	- <i>Mediated electron transfer</i> = transferência mediada de elétron
<i>MIC</i>	- <i>Microbiologically Influenced Corrosion</i> = corrosão microbiologicamente influenciada
<i>NACE</i>	- <i>National Association of Corrosion Engineers</i>
NBR	- Norma Brasileira
O&M	- Operação e Manutenção
OD	- Oxigênio Dissolvido
ONS	- Operador Nacional do Sistema
<i>OPEX</i>	- <i>Operational Expenditure</i> = despesas de operação
PIB	- Produto Interno Bruto
<i>PVC</i>	- <i>Polyvinyl chloride</i> = Policloreto de polivinila
RX	- Raios X
<i>SAE</i>	- <i>Society of Automotive Engineers</i>
SDSC	- Sistema digital de supervisão e controle
SS	- Subsuperficial
TA	- Tomada d'água
<i>Trip</i>	- Desligamento ocasionado pelo sistema de proteção da unidade geradora.
UG	- Unidade geradora

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Justificativa	2
1.1	Objetivos.....	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	Conceito da biocorrosão	4
2.2	Biofilme.....	4
2.3	Ferrobactéria	6
2.4	Tubérculo	8
2.5	Bactéria redutora de sulfato BRS.....	11
2.6	Meios favoráveis para biocorrosão	11
2.6.1	Influência da radiação solar.....	16
2.6.2	Oxigênio dissolvido e pH.....	16
2.6.3	Velocidade do fluxo	19
2.7	Métodos de mitigação.....	20
2.7.1	Monitoramento por cupons	20
2.7.2	Limpeza mecânica	21
2.7.3	Pintura protetiva.....	22
2.7.4	Inibidores químicos.....	24
2.7.5	Proteção catódica por corrente impressa.....	26
2.7.6	Desinfecção com ultravioleta.....	28
3	METODOLOGIA	30
4	ESTUDO DE CASO	32
4.1	Cronologia: problemas e providências	37
4.2	Medição de ferro dissolvido.....	42
4.3	Resultados.....	44
4.3.1	Aquisição de dado dos cupons.....	44
4.3.2	Cálculo da taxa de corrosão	47
4.3.3	Resultado da medição de ferro dissolvido	49
4.4	Análise de resultados.	50
5	CONCLUSÕES	53
5.1	Sugestões para futuros trabalhos	53
	APÊNDICE A	55
	ANEXO A	64

1 INTRODUÇÃO

A corrosão pode ser definida basicamente como resultado da interação entre o material com seu meio ambiente (AHMAD, 2006). De acordo com Pedferri (2018), um estudo recente (*NACE – Impact*, 2016) a corrosão em todas suas formas provocam um custo global de US\$ 2,5 trilhões de prejuízos. Ao se fazer uma varredura no *site* Google sobre o tema específico de “biocorrosão” obtém-se mais de dez mil citações sobre o assunto, com diversos setores afetados por esse tipo de corrosão, tais como petróleo, indústria naval, alimentos, poços artesianos, hidrelétricas, etc. (FREITAS; INEZ; JOROSKI, 2002; VIDELA, 2003). Sua ação nefasta resulta em grandes perdas na área industrial, onde na Inglaterra é estimado que 50% das falhas de corrosão em tubulações tenham influência da biocorrosão (BEECH; GAYLARDE, 1999); as perdas financeiras corresponderiam à cifra de 2% a 3% do PIB de países desenvolvidos (ENNING; GARRELF, 2014).

Segundo Enning e Garrelfs (2014) não há dados do custo mundial de perdas decorrentes da apenas da biocorrosão na infraestrutura e energia, mas a estimativa de bilhões de dólares é realista. Já Little e Lee (2007) relatam que a corrosão microbiologicamente influenciada *MIC* (do inglês *Microbiologically Influenced Corrosion*) pode representar até 50 por cento do custo total da corrosão. Em artigo *update* Little e Lee (2014) observaram que o termo biocorrosão é mais utilizado na Europa e América Latina, sendo que nos EUA é relacionado com corrosão interna de implantes em corpos vivos.

No Brasil, na década de 90, a Petrobrás estimou um gasto de cerca de US\$ 6,5 milhões/ano com neutralizantes de biocorrosão na bacia de Campos (ARAÚJO; COUTINHO; AGUIAR, 1992). Desta forma, considerando os altos custos decorrentes de problemas ocasionados, ter conhecimento e domínio da biocorrosão é de grande importância para controle de corrosão de equipamentos.

Embora Revie e Uhlig (2008) afirmarem que a *MIC* pode ocorrer onde não seria prevista e com taxas excepcionalmente altas, talvez no futuro essa previsão seja possível diante dos atuais estudos que evoluem mundialmente com entidades, eventos e pesquisas específicas na área de bioincrustação e biocorrosão. Os modernos recursos de microscopia eletrônica e técnicas de espectroscopia possibilitam pesquisa precisa ao nível de sequenciamento genético do *DNA* de populações de biofilme e matriz da biocorrosão (TELEGID; SHABAN; VASTAG, 2018; GARCIA *et al.*, 2009). Em um século o estudo da biocorrosão deu um salto gigantesco quando comparado aos primeiros estudos de

ferrobactérias que David Ellis e Edmund Harder apresentaram em 1919. Apesar de todo avanço do conhecimento de biocorrosão, curiosamente o tratamento usual para controle de ferrobactérias em tubulações é de injetar produtos biocidas alcalinizantes no sistema, que era o mesmo método já preconizado há um século.

Desta forma, esta pesquisa explora o conhecimento do fenômeno da biocorrosão por ferrobactérias e BRS (bactéria redutora de sulfato) sem aprofundamentos em conceitos de microbiologia, sendo o foco o entendimento básico do processo físico-químico e investigar os diversos métodos de controle existentes. Durante o desenvolvimento das investigações, foi possível tecer a hipótese de eventual influência na proliferação de ferrobactérias pelo tipo de solo original da área inundada na formação do reservatório, descrito no **Apêndice A**.

Está incluído como **Anexo A** o caso da usina hidrelétrica Pedra do Cavalo, fartamente ilustrado com fotos, de corrosão nos equipamentos e os diversos métodos utilizados na tentativa de debelar a biocorrosão manifestada ainda no início da geração de energia. Resultando ao final da pesquisa uma visão geral da teoria ao campo para domínio da biocorrosão e, subsidiar adoção das opções de tratamentos aplicáveis em futuros projetos no Brasil como também em outros países.

1.1 Justificativa

No setor de hidrogeração no Brasil há registro de dezenas de centrais hidrelétricas onde a ação da biocorrosão acarreta problema de disponibilidade quando é necessária paralisação para limpeza de sistema de água de resfriamento. É problema recorrente quando desconhecem a forma de controle desta corrosão por bactérias e que, quando conhecido e tratado, elevam os custos das despesas de operação *OPEX* (do inglês *Operational Expenditure*) empenhados na instalação e manutenção de métodos de mitigação, sendo comum a rotina de consumo constante de produtos químicos biocidas.

O trabalho de manutenção para simples limpeza de trocadores de calor tubular ou de placas implicará e horas de paralisação da geração de energia. E se for necessário realizar limpeza de incrustações na tubulação de vedação de eixo da turbina, será trabalho de semanas com necessidade de movimentação de comportas, esgotar e isolar a unidade geradora. Para ideia de valor tomemos como exemplo uma unidade geradora de 100 MW, e o preço aproximado de R\$ 500,00 / MWh do mercado livre de energia em outubro 2020. Neste caso, cada hora de paralisação significaria perda de receita de R\$ 50.000,00. Há ainda o reflexo destas paralisações também afetarem os índices de indisponibilidade ajustados junto a ANEEL.

Considerando a relevância do assunto de pouco domínio pela área técnica de engenharia das usinas e perdas financeiras que ocasionam, a proposição desta pesquisa é de investigação teórica e prática e pretendendo obter conhecimentos que deem lastro para ações efetivas de soluções para o controle da corrosão microbiologicamente influenciada.

1.2 Objetivos

O objetivo principal desta pesquisa é estudar a ação da biocorrosão por ferrobactéria e bactéria redutora de sulfato de forma compreensível para técnicos e engenheiros, sem disparatar em aprofundamentos dos conceitos de microbiologia. A consecução do conhecimento dos fundamentos teóricos é demonstrada em estudos de casos do comportamento de diversos corpos de provas metálicos posicionados no reservatório da usina Serra da Mesa e de Cana Brava. E em paralelo, avaliar os métodos de controle usuais e proposta alternativa para mitigar ação da biocorrosão em futuros empreendimentos de geração hídrica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O assunto de corrosão por bactérias especificamente em centrais hidrelétricas possui pouca literatura impressa disponível. Para compreensão do fenômeno bioquímico deste tipo de corrosão, a revisão bibliográfica foi desenvolvida em livros e artigos técnicos disponibilizados na internet. Entretanto, como a grande maioria destas fontes disponibilizadas trata de aprofundamento em microbiologia, procurou-se esmiuçar e sintetizar os conceitos e concentrando nos pontos mais importantes para um entendimento básico do processo da biocorrosão em materiais submersos.

Parte da fonte de pesquisa é derivada da recuperação da memória técnica adquirida durante desempenho profissional de trabalhos de montagem eletromecânica e gerência de O&M em plantas de centrais hidrelétricas, cuja experiência é retratada em várias figuras com ilustrações dos casos reais e possibilitando melhor visualização e compreensão da teoria.

2.1 Conceito biocorrosão

Segundo Schwertzer (2010) a biocorrosão não um tipo especial de corrosão e sim agravamento da corrosão influenciada pelas condições ambientais. A corrosão microbiológica é um fenômeno bioquímico que facilita o desenvolvimento de outros processos de corrosão, onde bactérias dispersas na água se desenvolvem de acordo com condições favoráveis locais neste meio líquido. Por exemplo, a concentração de sais, oxigênio promovem sua aglomeração para formação de biofilme e iniciar o processo corrosivo com formação de biocorrosão com microescavações na superfície do metal (JIMÉNEZ, 2015).

De acordo com Videla (2003) a biocorrosão resulta da ação de processos biológicos que ocorrem no interior do biofilme e eletroquímicos no contato deste com o metal, resultando na sua degradação. Em resumo, a corrosão microbiológica refere-se a modificações originadas por contato e reações entre os micro-organismos, sejam eles bactérias, algas, fungos e a interface metal/solução.

2.2 Biofilme

Para melhor compreensão, denominamos de biofilme a estrutura aderida às superfícies metálicas e sob o mesmo ocorre a biocorrosão do material base. O biofilme, segundo Allison (2003, *apud* Menoita *et al.*, 2012) “são incrustações de estrutura de micro-organismos, material polimérico extracelular e resíduo do ambiente colonizado aderidos a uma superfície

sólida, formando uma estrutura porosa e altamente hidratada, contendo pequenos canais, abertos por entre as microcolônias”.

Na figura 1 Flemming e Wingender (2010) representaram as substâncias poliméricas extracelulares como os biopolímeros de origem microbiana composta por polissacarídeos, proteínas, glicoproteínas, glicolípídeos, substâncias húmicas, *DNA* extracelular (*e-DNA*), além de outros. Formam um arcabouço tridimensional nos biofilmes conferindo aos mesmos uma maior coesão, além de aprisionarem os micro-organismos determinando assim as condições de vida neste microambiente.

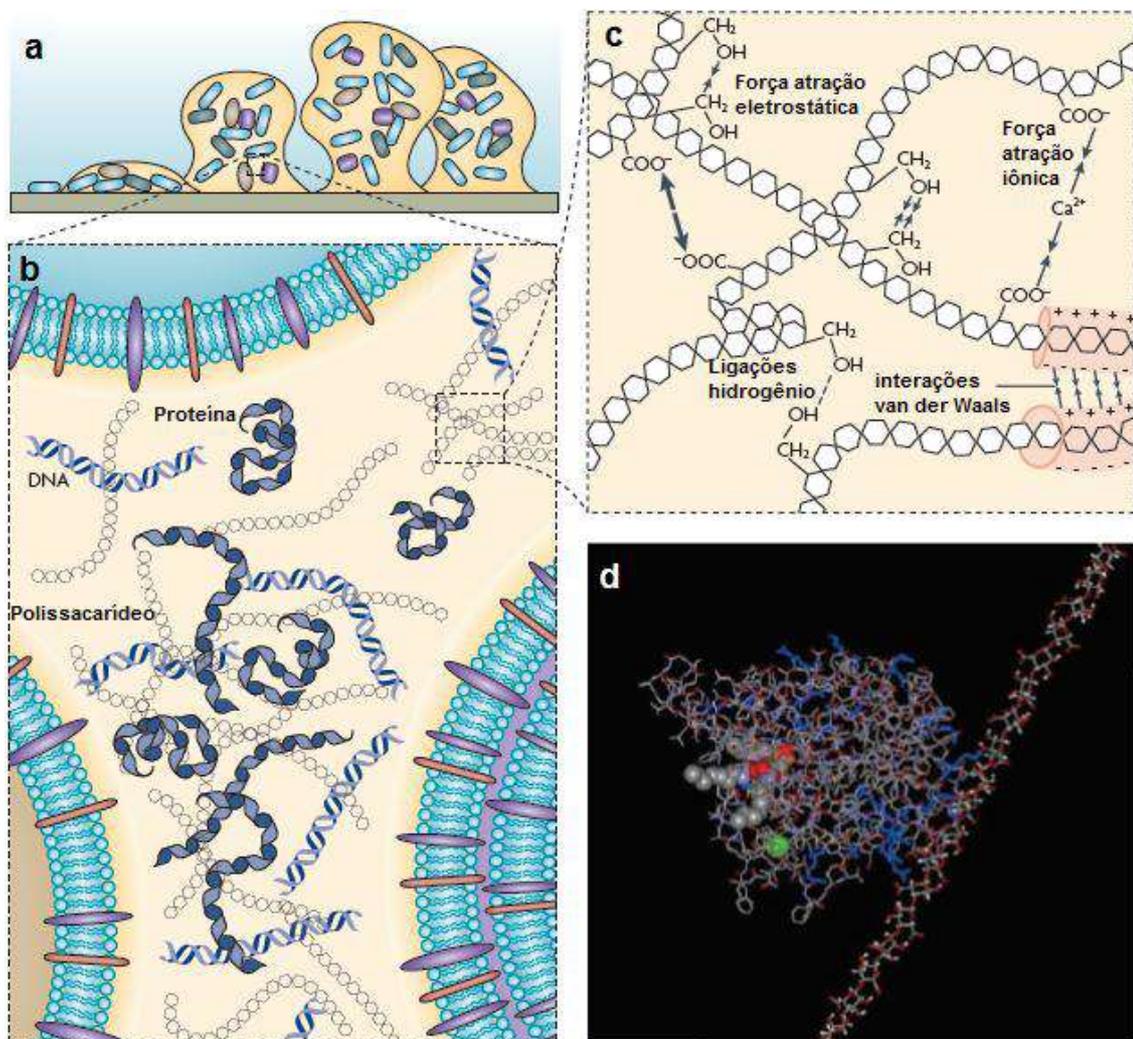


Figura 1: Substância polimérica extracelular em diferentes dimensões.
Fonte: Flemming e Wingender (2010)

O desenvolvimento de um biofilme ocorre em vários estágios conforme mostrado na figura 2, onde o primeiro estágio consiste na adesão reversível de bactérias a uma superfície. Durante o segundo estágio de acumulação, as bactérias secretam substância extracelular

polimérica *EPS* compoendo 85 a 98% da matéria orgânica do biofilme. No terceiro estágio, os micro-organismos se dividem e formam microcolônias. O quarto passo é a maturação do biofilme que se torna espesso. O último estágio é a fase de dispersão: “sob o efeito de forças hidrodinâmicas, as bactérias se separam da matriz e dispersas podendo colonizar outras superfícies” (MONROE, 2007).

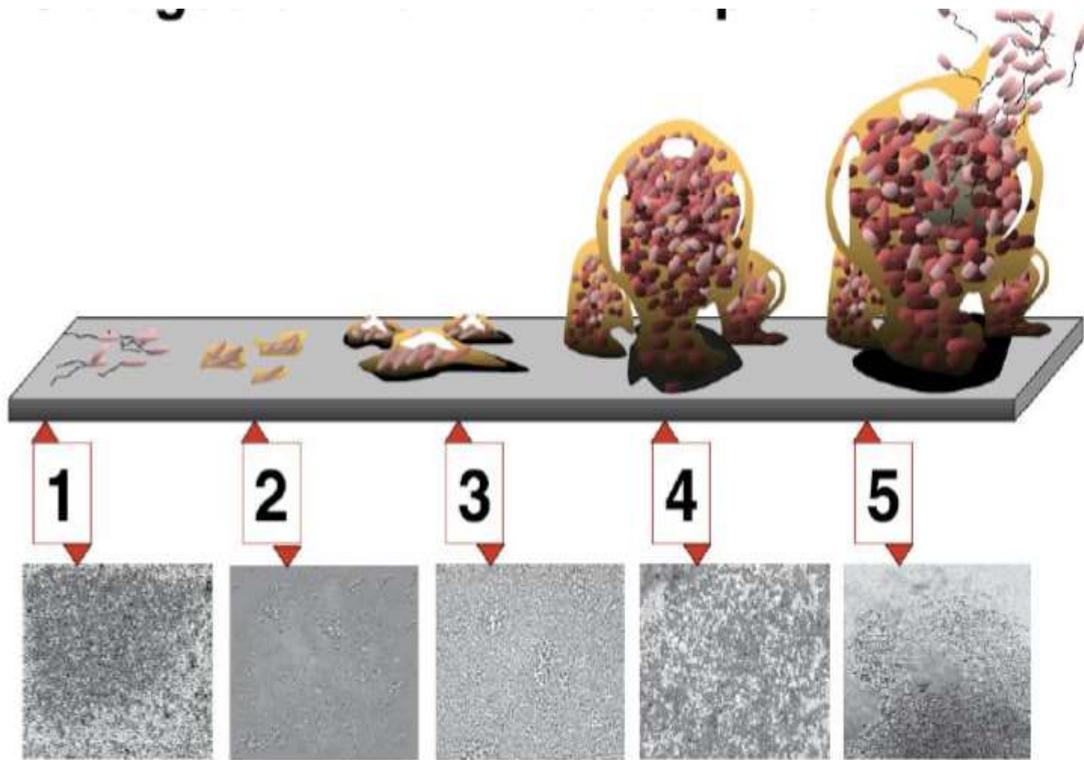


Figura 2: A maturação do biofilme é um processo complexo de desenvolvimento que envolve cinco estágios: 1, ligação inicial; 2, fixação irreversível; 3, maturação I; 4, maturação II; 5, dispersão. Cada estágio do desenvolvimento no diagrama com respectiva microfotografia de um biofilme em desenvolvimento.

Fonte: Monroe (2007)

2.3 Ferrobactéria

De acordo com Beech e Sunner (2004) “as interações físico-químicas entre material metálico e seu ambiente podem levar à corrosão”. “A corrosão eletroquímica é uma reação química que envolve a transferência de elétrons a partir do método de remoção de metais para um aceitador de elétrons externo, causando a liberação dos íons metálicos no meio circundante e a deterioração do metal”.

“Este processo prossegue através de uma série de reações de oxidação (anódica) e redução (catódica) de reações químicas espécies em contato direto com, ou nas proximidades, a superfície metálica. Em soluções aeradas, a reação catódica é a redução de oxigênio, enquanto que em soluções anóxicas é, geralmente, a evolução do hidrogênio. A taxa da reação anódica (dissolução do metal) diminui gradualmente com o tempo, porque os produtos de

oxidação (produtos de corrosão) aderem à superfície formando uma camada que fornece uma barreira de difusão para os reagentes.

A estabilidade de tais camadas depende da sua química e morfologia e determina a suscetibilidade geral do metal à corrosão. Atividade microbiana dentro dos biofilmes formados em superfícies de materiais metálicos, afetam a cinética de reações catódicas e / ou anódicas e também pode modificar consideravelmente a química de qualquer camada protetora, levando a aceleração ou inibição da corrosão” (BEECH; SUNNER, 2004).

Assim, Araujo (1992) conceitua que esta deterioração do metal devido à atividade microbiana é denominada biocorrosão ou corrosão microbialmente influenciada *MIC* (ARAUJO; COUTINHO, AGUIAR, 1992). A figura 3 apresenta o esquema do modelo de corrosão e reações envolvendo íons metálicos na substância extracelular polimérica *EPS* no interior de biofilme sobre base ferrosa (BEECH; SUNNER, 2004). Sendo:

(a) “ Fe^{3+} obtido como resultado da oxidação de Fe^{2+} produzido anodicamente, sendo unido ao *EPS* e o complexo $\text{Fe}^{3+}/\text{EPS}$ é depositado na superfície do metal.

(b) os elétrons são transferidos diretamente do zero valente Fe para o Fe^{3+} ligado ao *EPS*, reduzindo-o a Fe^{2+} . Na presença de oxigênio, atuando como receptor de elétrons terminal, o $\text{Fe}^{2+}/\text{EPS}$ é reoxidado em Fe^{3+} .

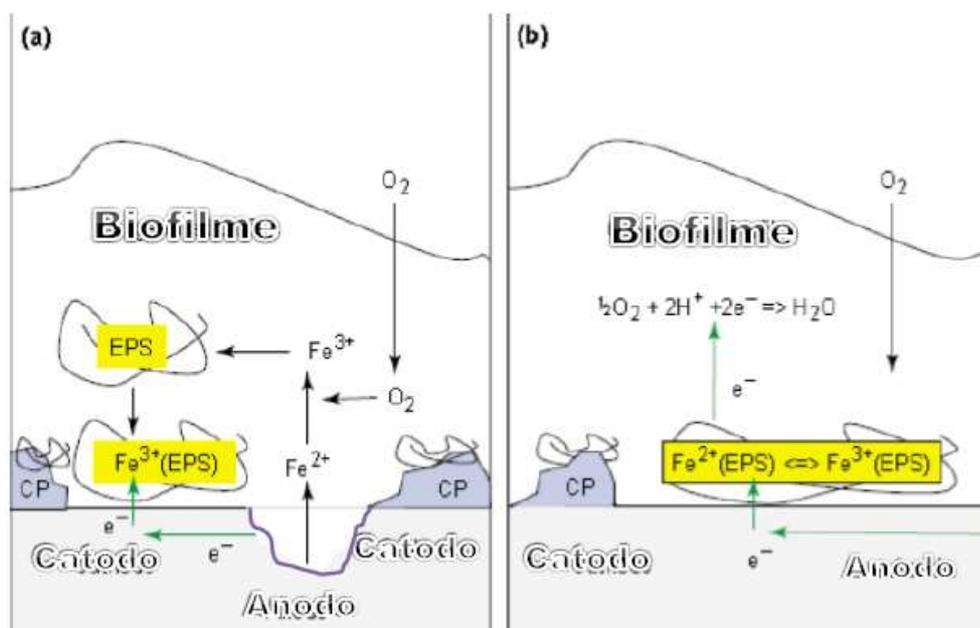


Figura 3: Despolarização catódica sob biofilme oxigenado, devido à ligação $\text{Fe}^{3+} / \text{EPS}$.

Fonte: Beech; Sunner (2004)

Na representação simplificada de Marangoni (2009) da figura 4 as ferrobactérias oxidam íons ferrosos (Fe^{2+}) a íons férricos (Fe^{3+}) e precipitando insolúveis de óxidos $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{H}_2\text{O}$ ou hidróxidos de ferro $\text{Fe}(\text{OH})_3$.

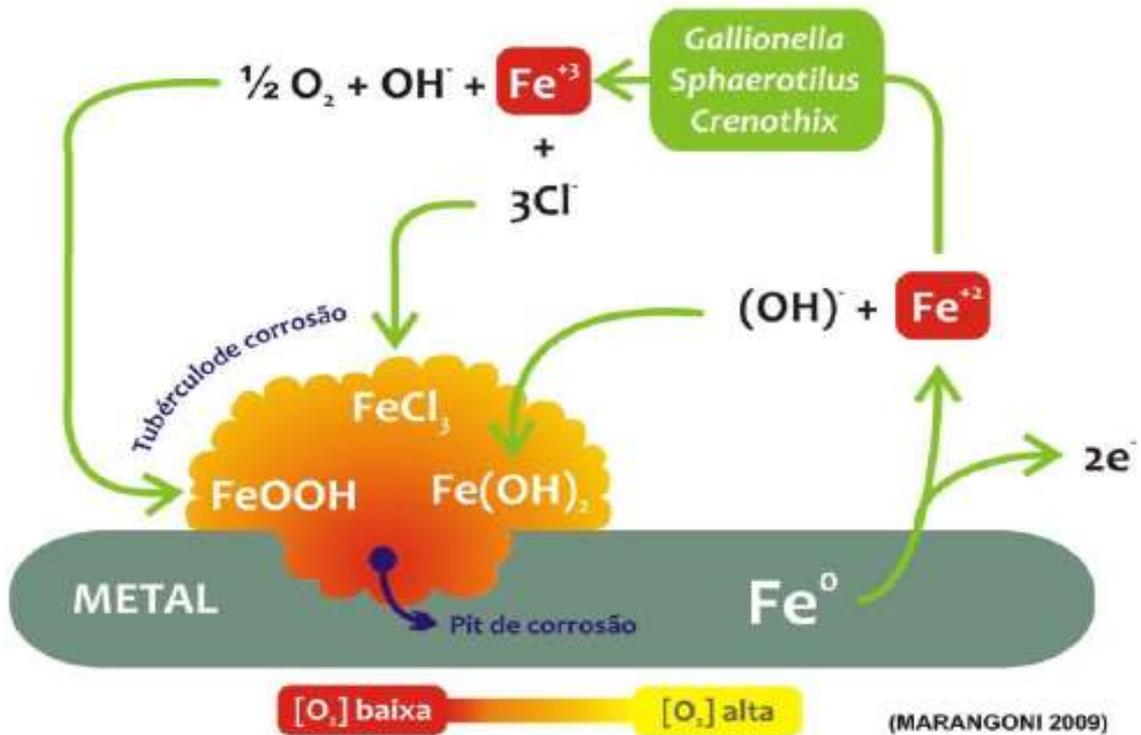


Figura 4: Esquema da redução do ferro e formação erosão da superfície.
Fonte: Marangoni (2009)

2.4 Tubérculo

Enning e Garrelfs (2014) apresentaram que na reação de redução do ferro, forma-se um revestimento de subprodutos que denominamos como tubérculo. Este material extracelular forma uma crosta de hidróxido férrico precipitado e visivelmente com aparência de um caroço ou verruga. Com o tempo, vai impregnando com óxidos de ferro, resultando numa massa crescente de cor fosca marrom/avermelhada com precipitações de ferrobactérias do ambiente.

Vários autores descreveram as morfologias internas dos tubérculos e sendo que Ray *et al.* (2010) detalhou o tubérculo com a seguinte composição do esquema da figura 5: crosta exterior constituída de hematita, carbonato e silicato; casca interna; material do núcleo; cavidade do líquido; e base corrosiva. E para exemplificar caso real, a figura 6 mostra de vários tubérculos que se formaram nos pontos com danos localizados em pontos com falhas na pintura da superfície de uma pá de pré-distribuidor de turbina.

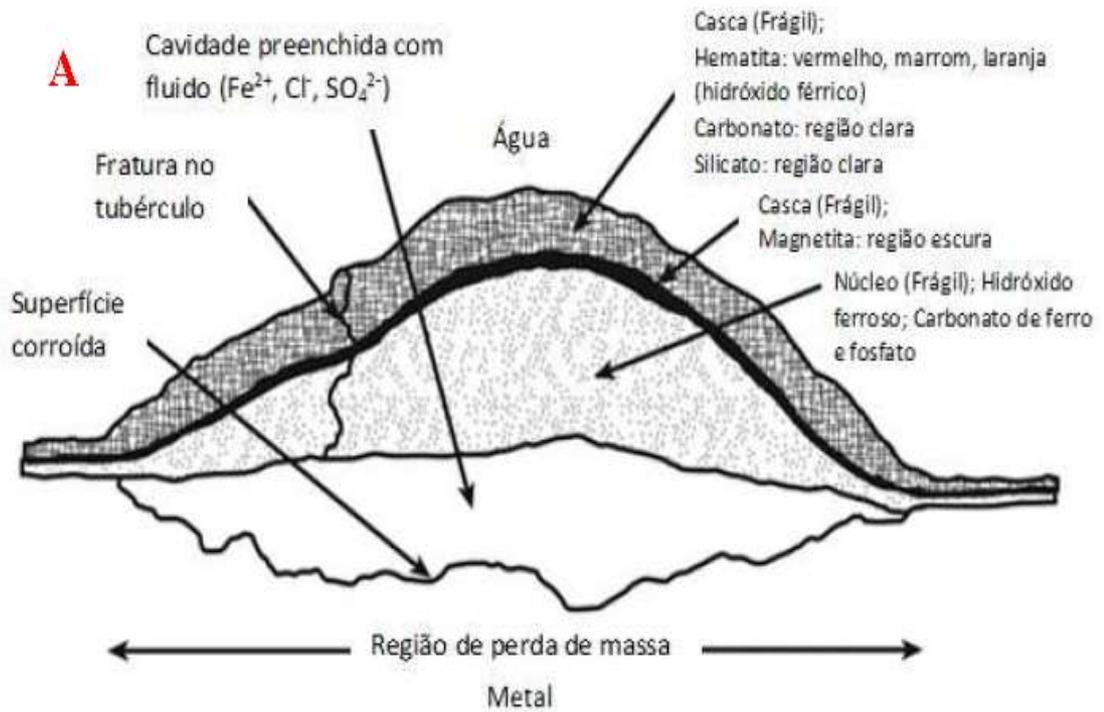


Figura 5: Esquema de um tubérculo
Fonte: Ray *et al.* (2010)



Figura 6: Colônia de tubérculos
Fonte: acervo do autor (2005)

Na figura 7 Videla (2003) representou a evolução de tubérculos que podem chegar a obstruir totalmente a tubulação ou a perfurar sua parede. Para exemplificar com caso real, a figura 8 é foto dessa obturação gradativa de acúmulo de tubérculos de consórcio de ferrobactérias e BRS no interior da tubulação de água de vedação de eixo da turbina.

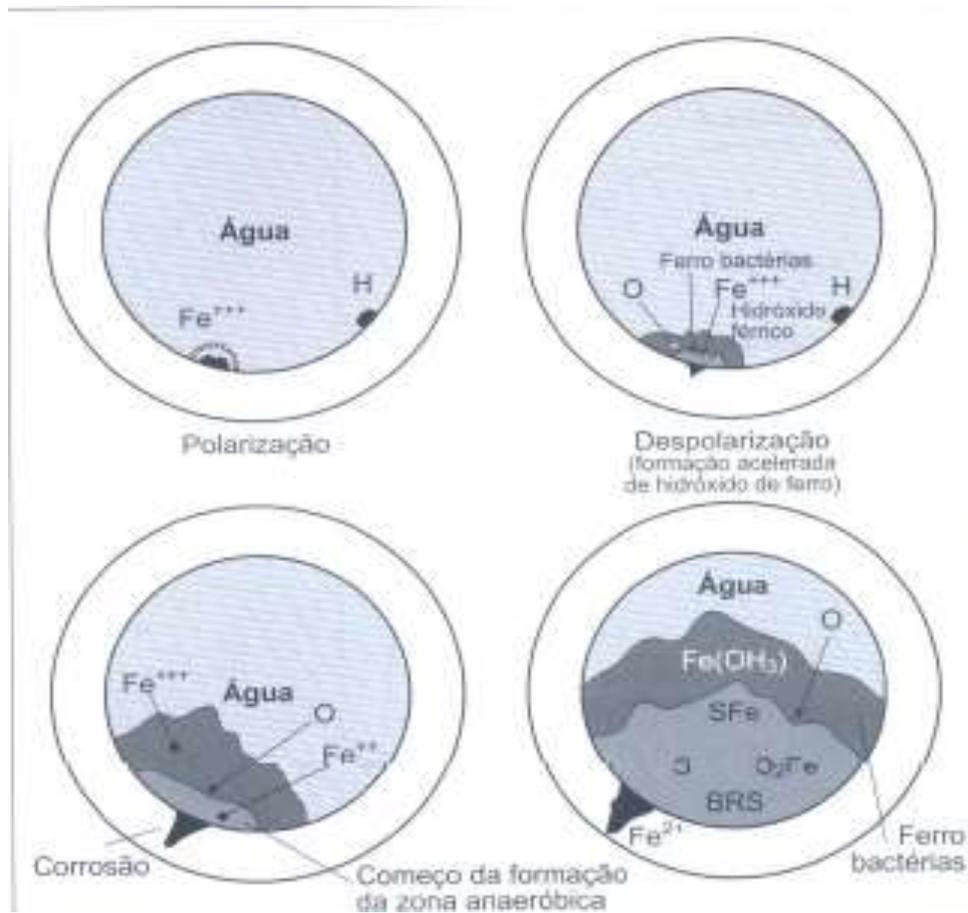


Figura 7: Sequência da obstrução de tubulação por efeito de ferrobactéria em consórcio com bateria redutora de sulfato BRS.

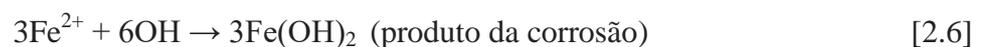
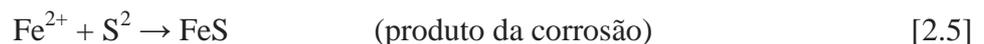
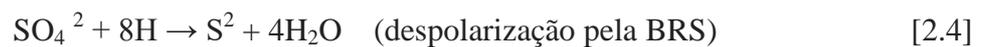
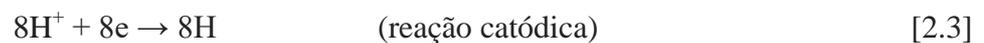
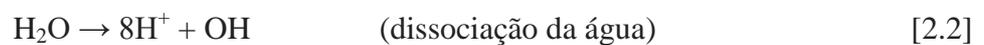
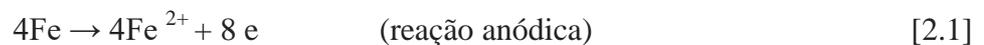
Fonte: Videla (2003)



Figura 8: Tubulação da vedação de eixo de turbina atacada por ferrobactéria + bactéria redutora de sulfato.
Fonte: acervo do autor (2005)

2.5 Bactéria redutora de sulfato BRS

A figura 9, reproduzida do livro, Borenstein (1994) apresenta biocorrosão do ferro como um fenômeno que ocorre em consórcio de ferrobactéria e BRS com as seguintes fases: reação anódica, reação catódica, formação de hidrogênio, despolarização anódica (com formação de produtos corrosivos), despolarização catódica (redução de sulfato pela BRS e formação de sulfetos) e dissociação do sulfeto de hidrogênio. Representadas propostas como:



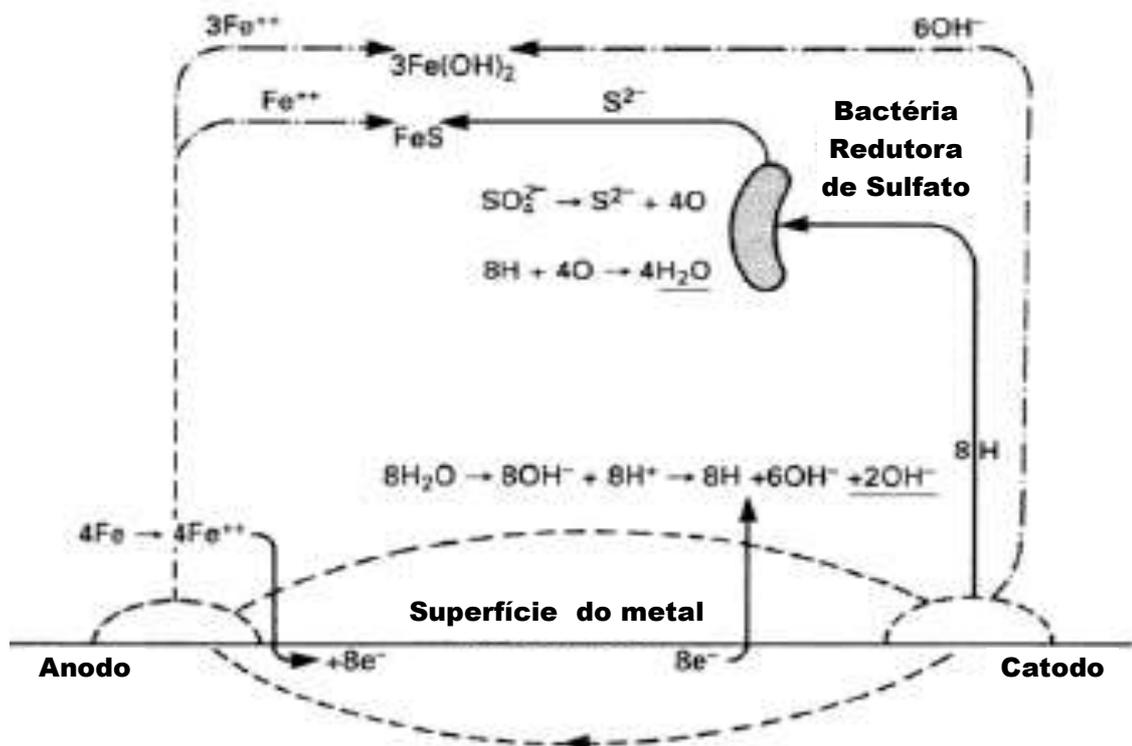


Figura 9: Esquema de BRS na biocorrosão.
Fonte: Borenstein (1994)

Os elétrons extracelulares liberados da oxidação de ferro são usados pelo biofilme. Sem um biofilme, os elétrons não podem ser utilizados pelas células suspensas no líquido porque os elétrons, ao contrário dos íons, não se deslocam no líquido.

A transferência extracelular de elétrons possui três formas principais: contato direto, *pili* condutivo e mediador de elétrons. Um grupo de pesquisadores mostrou que as células BRS formavam os *pili* (nanofios) para se fixarem à superfície e, coletar/transferir elétrons na redução de sulfato para sobreviver à privação de fontes de carbono. Sendo que o mediador de elétrons seria secretado por micróbios ou já pré-existente no meio líquido (LI, Y. *et al.*, 2018).

A figura 10 demonstra as formas de transferência de elétrons *DET* (do inglês *direct electron transfer*), oxidação e redução com transferência por mediada de elétron *MET* (do inglês *mediated electron transfer*) e o detalhe de nanofio condutor (*conductive pili*). O processo inicia com o ponto de contato de um tipo de proteína, o citocromo, que promove o transporte de elétrons por reação de redução através de micro pelos (*conductive pili*). No caso, os “citocromos c facilitam a interação entre bactérias e óxido de metal durante a redução formando uma transferência de cadeia de elétrons” (PINTO 2016).

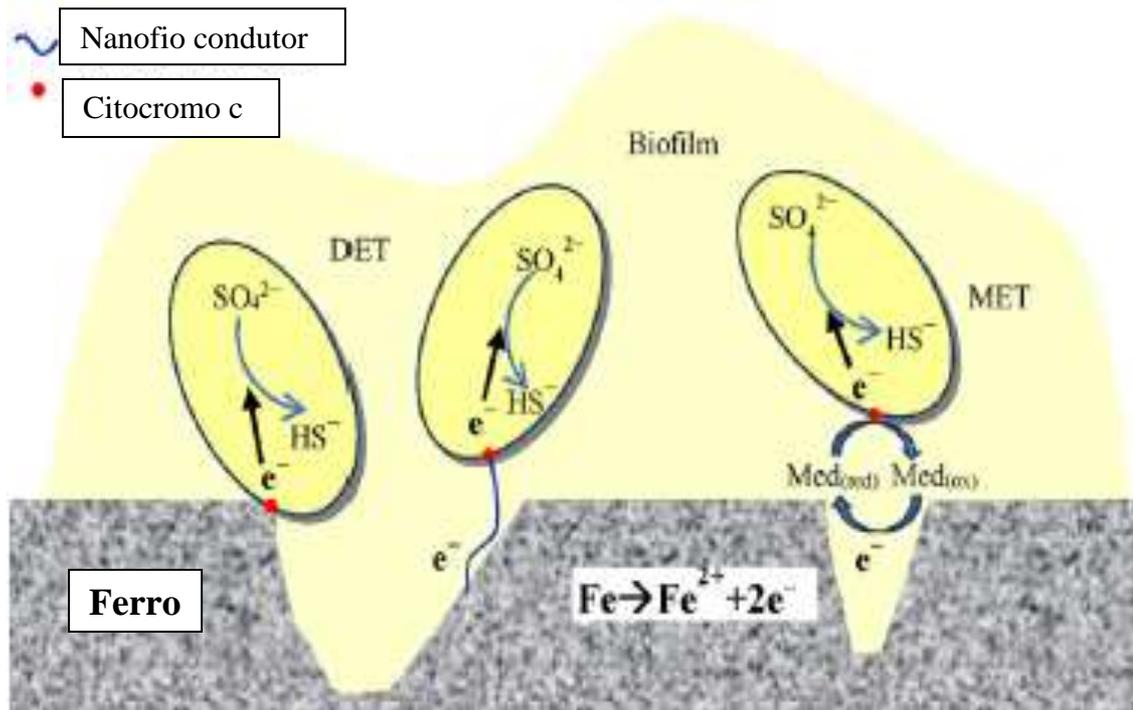


Figura 10: Ilustração esquemática de transferência direta de elétron (*DET*), oxidação e redução com transferência por mediada de elétron (*MET*) e o detalhe de nanofio condutor (*conductive pili*).
Fonte: Li, Y. *et al.* (2018)

Os pesquisadores Li, Y. *et al.* (2018) apresentaram fotos de microscópio eletrônico de varredura a BRS em colônia (A) e na forma isolada (B) com detalhes do *conductive pili* nas figuras 11 e 12, respectivamente.

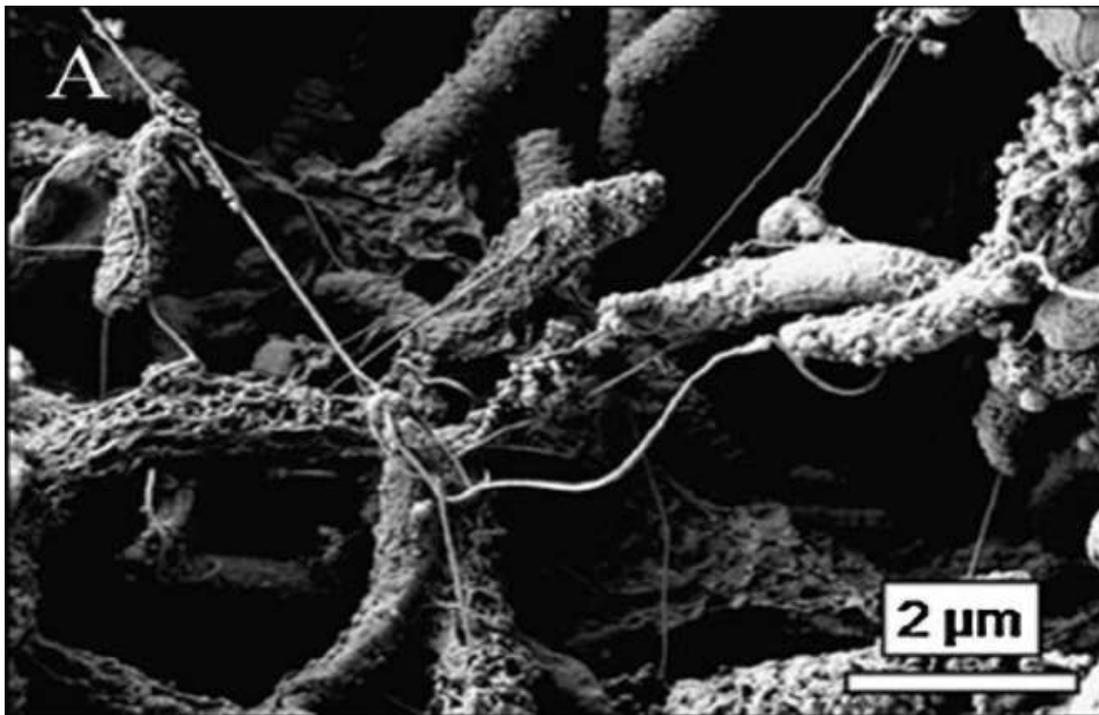


Figura 11: Fotos da bactéria redutora de sulfato em colônia (A)
Fonte: Li, Y. *et al.* (2018)

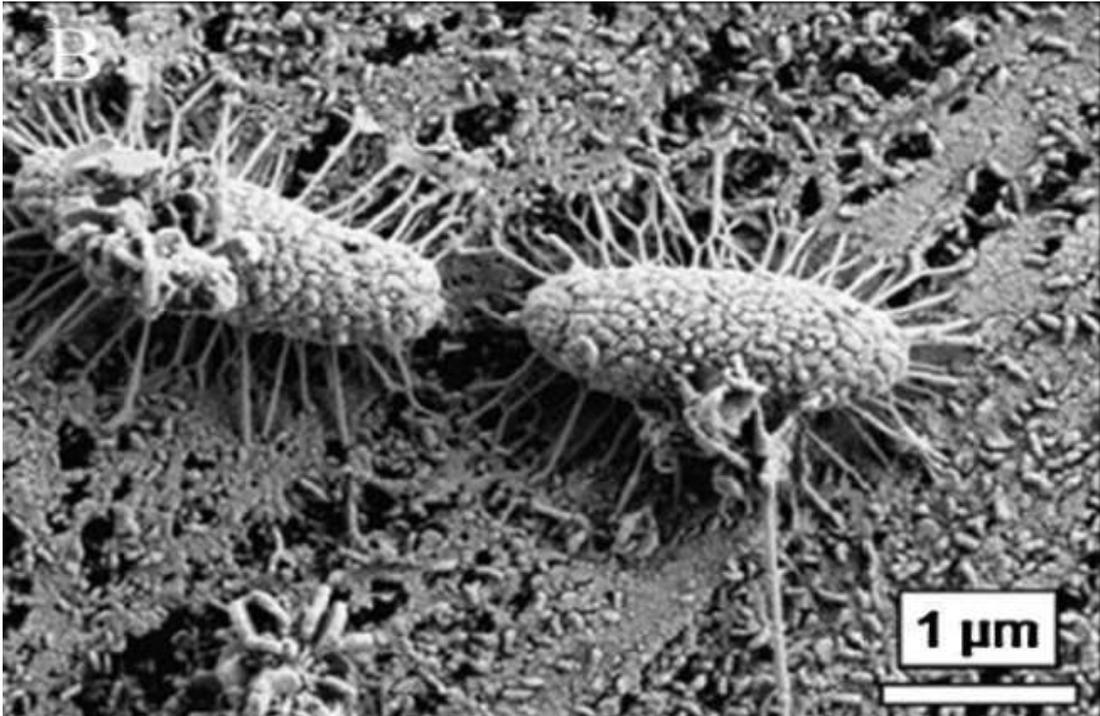


Figura 12: Fotos da bactéria redutora de sulfato na forma da isolada (B)
Fonte: Li, Y. *et al.* (2018)

A BRS é capaz de provocar corrosão em aço inoxidável quando a camada de proteção natural do inox se rompe pela ação do biofilme e a combinação de condições da água for favorável ao seu desenvolvimento. Os tipos de aços inoxidáveis mais comuns aplicados em centrais hidrelétricas são: séries 304 austenítico, não magnético, com manganês na composição e, 410 martensítico, magnético. Porcas da série *AISI 304* (do inglês *American Iron and Steel Institute*), por exemplo, são amplamente utilizadas em fixação de vedações de comportas das usinas.

Há evidências que a BRS reage com manganês/níquel da composição do aço inox *AISI* série 304 e provocando a corrosão por *pits* (escavações) na superfície abaixo do tubérculo. Por exemplo, temos as fotos da figura 13 e 14 da fixação de vedação de comporta por meio do conjunto parafuso *AISI 410* e somente ataque na porca *AISI 304*.



Figura 13: Porca aço inoxidável *AISI 304* atacada por BRS e coberta pelo tubérculo.
Fonte: acervo do autor (2005)

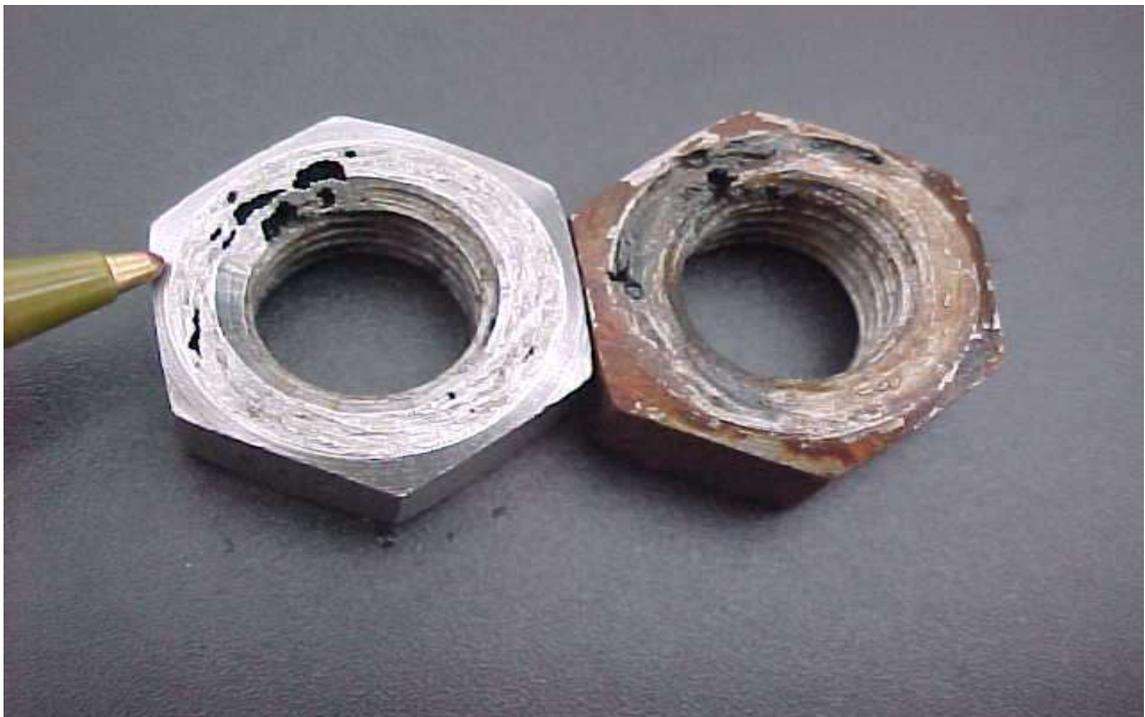


Figura 14: Visual das porcas inox *AISI 304* com *pits* profundos após limpeza do tubérculo.
Fonte: acervo do autor (2005)

2.6 Meios favoráveis para biocorrosão

Vários fatores influenciam na ocorrência e desenvolvimento de ferrobactérias e relacionamos a seguir tópicos de alguns itens importantes, sem se limitar a estes, tais como: as inter-relações de reações químicas com influência de radiação solar, profundidade, oxigênio dissolvido, pH e velocidade da água.

2.6.1 Influência da radiação solar

Estudos em lagos mostram que a produção de bactérias é negativamente afetada pela luz do sol (LINDELL; GRANELI; TRANVIK, 1996). A pesquisa de Nelson *et al.* (2018) relata que a radiação ultravioleta da luz solar influencia na constituição do DNA e proteína da bactéria, provocando sua neutralização quando danifica seu mecanismo de se replicarem. Em especial as comunidades das bactérias encontradas em águas superficiais, quando na enzima os fótons reduzem ferro férrico Fe^{2+} para ferroso Fe^{3+} (MELTON, *et al.*, 2014).

Esta oxidação do Fe^{2+} ocorre na zona subsuperficial denominada de zona eufótica, que é a camada entre a superfície e até onde alcança 1% da radiação da luz solar, cuja altura é normalmente de 2 a 2,5 vezes a profundidade de visualização do Disco de Secchi.¹ (BLEDISK, 2009).

2.6.2 Oxigênio dissolvido e pH

Segundo Esteves (1998) o OD oxigênio dissolvido na água possui estratificação como uma curva de forma logarítmica onde sua concentração decai acentuadamente conforme a profundidade do reservatório, e de comportamento inverso da saturação de CO_2 . A figura 15 exemplifica a comportamento típico de saturação destes itens conforme profundidade do lago de várzea do rio Trombetas – PA.

Além da acidez da água com $pH < 7$ e concentração de oxigênio há também a influência da temperatura, que segundo Chang e Lansing (1982) aumento na temperatura de $2^\circ C$ implica no dobro da taxa de corrosão em certos materiais.

¹ “Disco Secchi é um dispositivo usado para medir a transparência da água em todos os tipos de águas abertas (lagos, reservatórios, baías, oceanos). O disco Secchi é um disco branco de 8 polegadas ou alternando quadrantes iguais em preto e branco. É baixado na água de um lago ou outro corpo de água até que não possa mais ser visto pelo observador. Esta profundidade de desaparecimento, chamada de profundidade Secchi”. (BLEDISK, 2009).

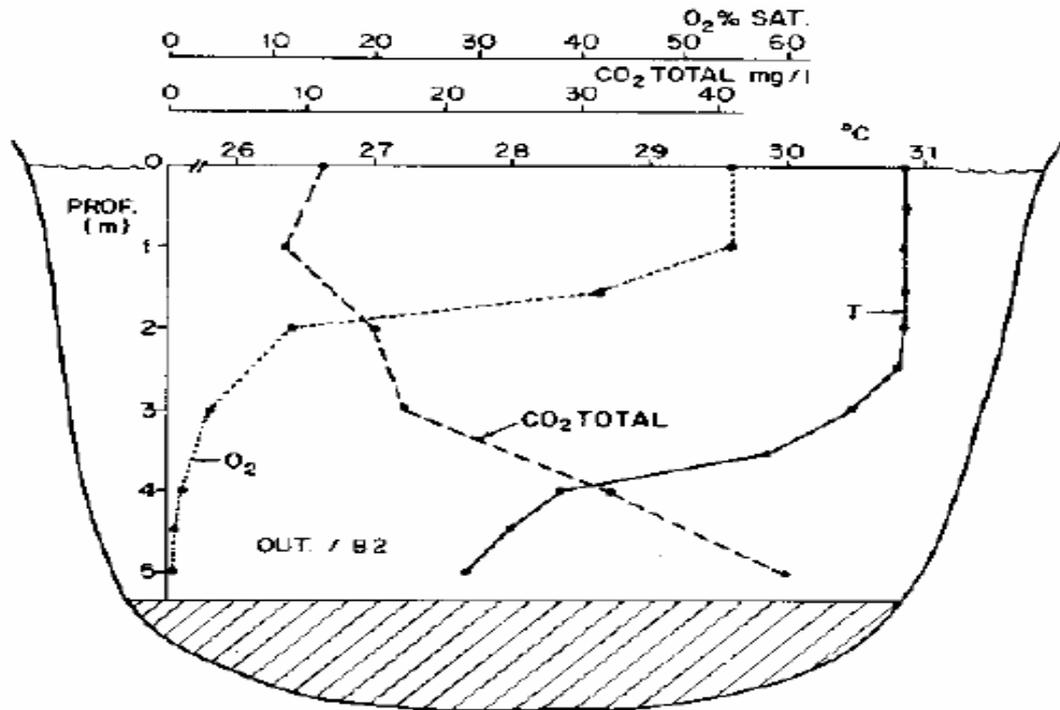


Figura 15: Exemplo de distribuição de concentração de O_2 e CO_2 conforme profundidade.
Fonte: Esteves (1998)

De acordo com Esteves (1998) as principais fontes de oxigênio para a água são a atmosfera e a fotossíntese, enquanto as perdas se dão: pelo consumo a partir da decomposição de matéria orgânica (oxidação), perdas para a atmosfera, respiração de organismos aquáticos e pela oxidação de íons metálicos como, por exemplo, o ferro e o manganês.

Bonfim e Bortoni (2017) realizaram experimento na lagoa Dom Helvécio–MG onde os resultados obtidos para a concentração de OD, pH ao longo da coluna d'água coincide com a proposição anterior de Esteves (1998), e os resultados das alterações entre medições em diversas profundidades estão reproduzidas nas Figuras 16 e 17.

Em adição, podemos observar também que a redução de pH e OD ocorrem abaixo da zona fótica, ou seja, onde há menor intensidade de ultravioleta acentua-se a estratificação vertical de acordo com aumento da profundidade. Na figura 18 Marangoni (2010) mostra esquematicamente que o desenvolvimento da biocorrosão ocorre em níveis de baixo OD.

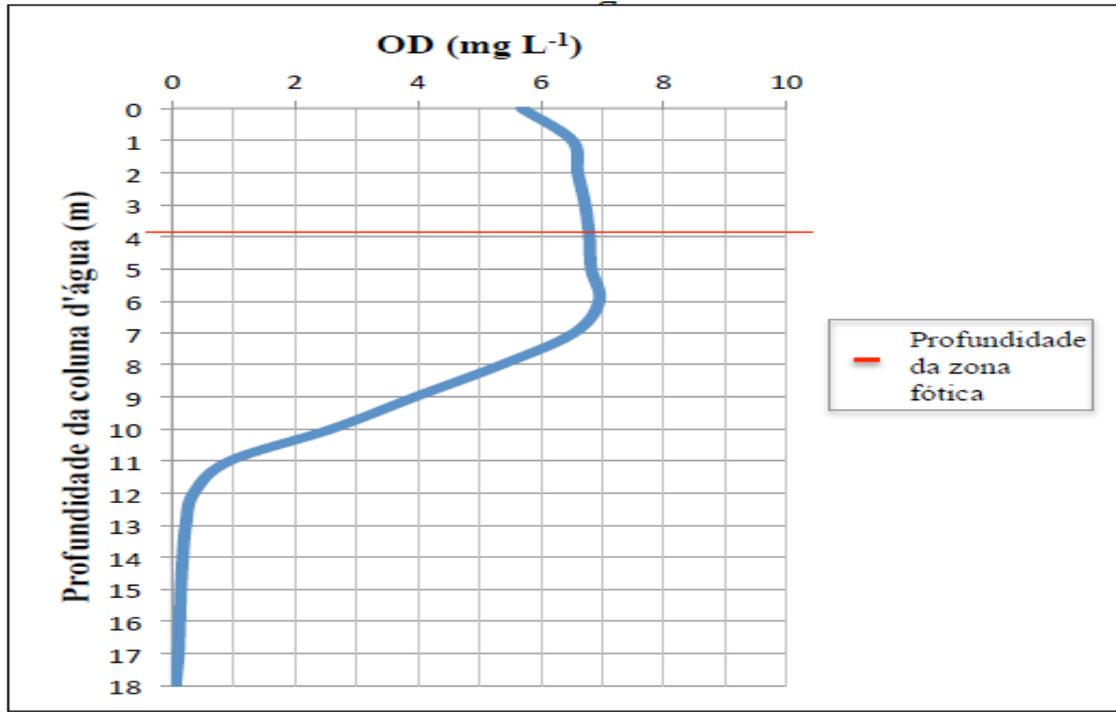


Figura 16: Variação de Oxigênio Dissolvido (mg L^{-1}) ao longo da coluna d'água.
Fonte: Bonfim e Bortoni (2017)

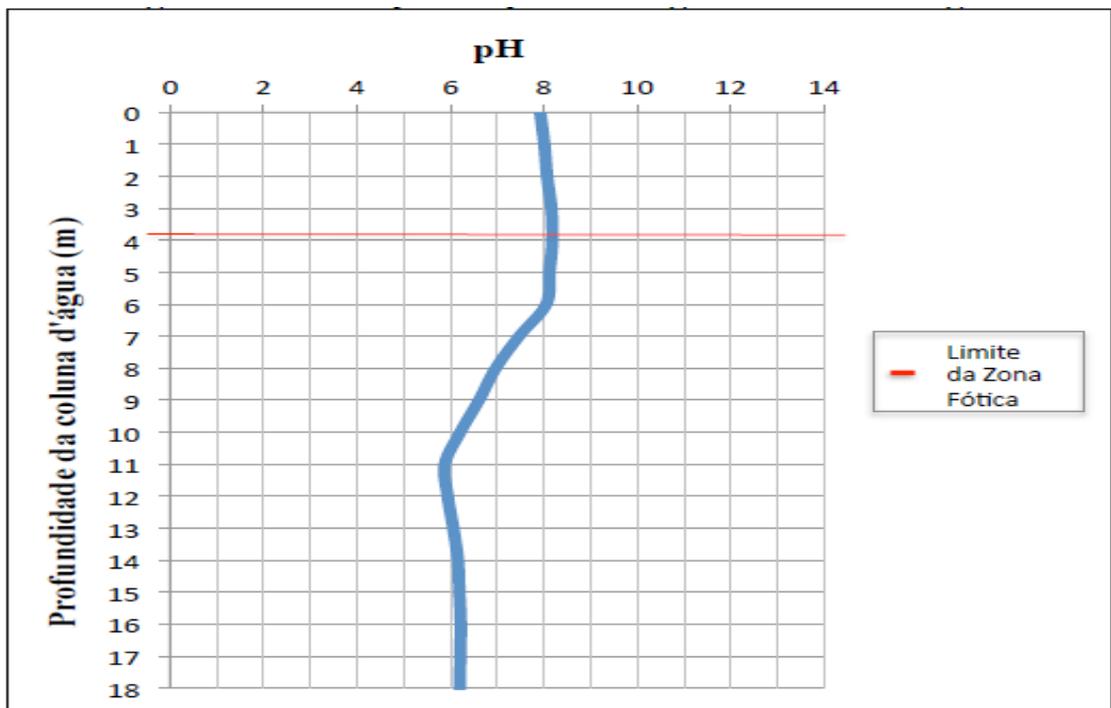


Figura 17: Variação de pH na coluna vertical
Fonte: Bonfim e Bortoni (2017)

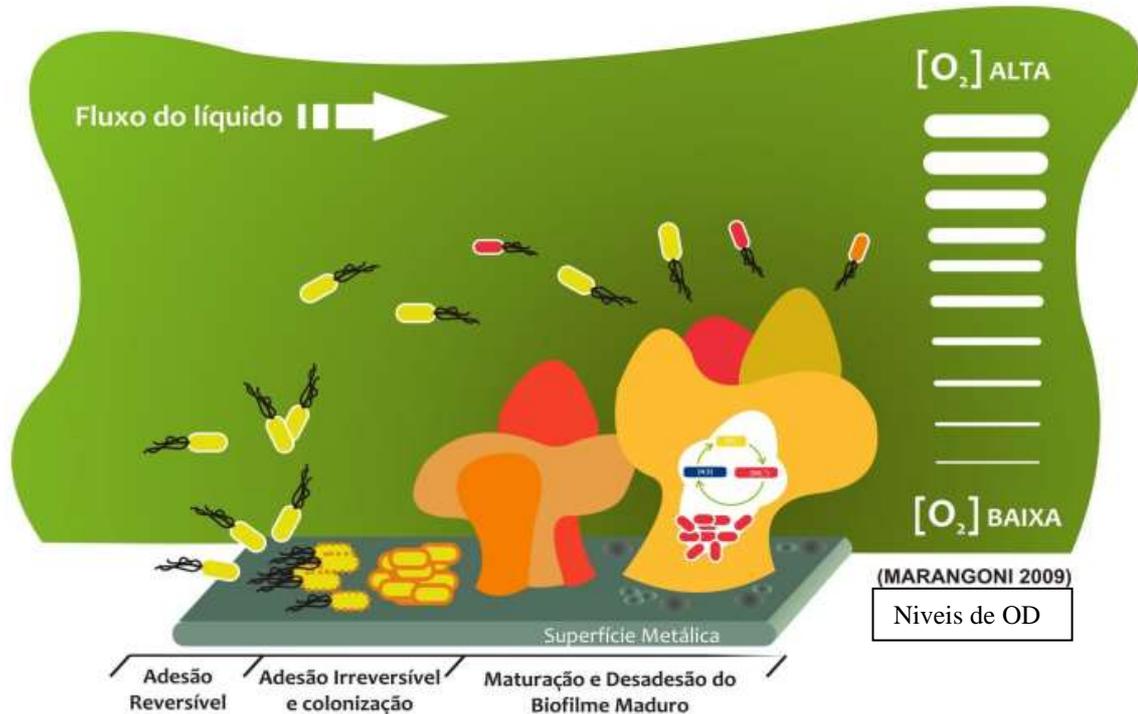


Figura 18: Esquema de presença de ferrobactéria em relação ao OD.
Fonte Marangoni (2010)

De acordo com Uhlig (1975) “a aeração da água reduz a atividade de bactérias anaeróbicas uma vez que são incapazes de prosperar na presença de O₂ dissolvido”.

Além do OD, pH, profundidade e radiação solar, a ferrobactéria obviamente depende a presença de ferro dissolvido no meio e acordo com Moruzzi (2012) este ferro dissolvido nas águas superficiais é geralmente presente na forma íon férrico Fe³⁺ que influenciado pelas condições acima precipita para formação do Fe²⁺. As ferrobactérias mais comuns listadas por Videla (2003), Marangoni (2009) são: *Gallionella*, *Sphaerotillus*, *Crenothrix* e *Leptothrix*. Todas necessitam do íon ferroso Fe²⁺ para obter energia e se manifestam em regiões mais profundas do reservatório com pouco OD.

2.6.3 Velocidade do fluxo

A velocidade do fluxo na superfície do metal também pode acelerar ou diminuir a corrosão (ARAUJO; COUTINHO; AGUIAR, 1992). O que observamos nas hidrelétricas é que o ataque de ferrobactéria e BRS é inversamente proporcional à velocidade do fluxo da água na superfície molhada. Regiões com alta velocidade praticamente não havia como fixar o biofilme e assim sem desenvolvimento da biocorrosão, no entanto, em locais de baixa velocidade o biofilme conseguia se fixar e iniciar o processo de corrosão. No caso de água estagnada, a corrosão pelo consórcio de ferrobactéria e BRS pode provocar sérias consequências para equipamentos da usina.

Como exemplo, há o caso ocorrido na usina Pedra do Cavalo–BA cuja barragem foi inaugurada em 1985, com finalidade específica de abastecimento de água para Salvador e controle de cheias do rio Paraguaçu nos municípios históricos de Cachoeira e São Félix. Posteriormente, em 2005 foi instalada a central hidrelétrica composta de duas unidades geradoras de 81MW para turbinar água do reservatório infestado de ferrobactéria e BRS reproduzidas durante 20 anos. Desta condição inicial de priorizar o abastecimento de água em detrimento à geração de energia, no período de estiagem as unidades geradoras permaneciam desligadas, porém devida condição do ONS de prontidão para geração imediata os condutos e sistema de resfriamento permaneciam meses cheios de água parada.

As consequências desta situação e operação intermitente foram devastadoras para os vários componentes hidráulicos e sistemas auxiliares mecânicos; estão fartamente ilustradas nas figuras do **Anexo A**. E além das imagens, está também disponibilizado na internet o livre acesso do vídeo do autor (<https://www.youtube.com/watch?v=9t7PZl0Uzq8>), onde é possível visualizar a situação da época da corrosão em condutos forçados que não possuíam pintura interna.

2.7 Métodos de mitigação e controle

A condição ideal antes de iniciar a construção de uma planta de central hidrelétrica é fazer uma investigação das condições da água do futuro reservatório. Este estudo de análise físico-química da água é realizado por empresas com expertise e equipamentos especiais em laboratório para identificar e quantificar a presença de bactérias existentes que podem favorecer desenvolvimento da biocorrosão. E se resultados constatarem severidade de concentração, o empreendedor terá antecipadamente informação de grande valia para seleção dos equipamentos e especificação de procedimentos preventivos.

Em unidades em operação os métodos normalmente empregados na prevenção, controle ou mitigação da biocorrosão, são: análise por cupons, limpeza mecânica, pintura, inibidores químicos, desinfecção por ultravioleta, proteção catódica (JIMÉNEZ, 2015).

2.7.1 Monitoramento com cupons de inspeção.

Uma forma de executar essa amostragem de água é, no local da futura implantação da usina ou na unidade em operação, instalar cupons (corpos de prova) de diversos tipos de metais que ficarão imersos na água. Estes cupons ficam confinados em caixas isoladas denominadas *biobox* e inspecionadas periodicamente. E através de avaliação visual, medições de perda de massa e análise microbiológica apoiada por microscópio de varredura eletrônica,

espectroscopia e difração de RX (CUSTODIO *et al.*, 2009) se faz a quantificação da corrosão.

Atualmente com sofisticados equipamentos de laboratório de microbiologia, é possível mensurar com alta precisão a taxa de corrosão e até identificar por sequenciamento genético o tipo do agente promotor da biocorrosão. (MARANGONI, 2013; VIDELA; HERRERA, 2005; OLIVEIRA, 2013; BEECH; SUNNER; HIRAOKA, 2005). Na figura 19 mostra um exemplo de cupons (corpo de prova) para teste de corrosão. Eles são de diversos tamanhos e fabricados nos mais diferentes materiais.



Figura 19: Cupons para teste de corrosão
Fonte: Usinagem Franchi Ltda (2019)

2.7.2 Limpeza mecânica

Para mitigar biofilmes e consequências da biocorrosão, as centrais hidrelétricas gastam muito homem/hora na limpeza de tubulações e trocadores de calor, gerando custos e afetando as taxas de indisponibilidade programada. Sendo que há dois tipos comuns de trocadores de calor: radiador ar/água com feixes de tubos de cobre (muito usados em geradores) e o óleo/água com sanduíche de chapas de inox (no resfriamento de óleo).

Não se observa ocorrência de biocorrosão na parte interna na carcaça de radiador de gerador, pois são usualmente pintadas internamente e, observamos que os tubos de cobre normalmente não são atacados como no aço carbono, porém há pesquisa que até mesmo o cobre puro sofre ação de biocorrosão e assim recomendável realizar inibição (LI, X. *et al.*, 2018). Já em trocadores de calor de placas utilizadas no resfriamento de mancais, é comum o gradativo acúmulo de tubérculos causarem restrição da vazão entre laminados de placas e, provocando aquecimento do sistema de resfriamento até culminar em desligamento ocasionado por bobina de disparo do circuito de proteção da unidade geradora (*Trip*). Na figura 20 local de tubérculos removidos na placa após limpeza mecânica com hidrojateamento.



Figura 20: Placa de trocador de calor após limpeza.
Fonte: acervo do autor (2003)

2.7.3 Pintura protetiva

Os equipamentos hidromecânicos como comportas, grades, condutos forçados são normalmente pintados com tinta à base de alcatrão de hulha com grande resistência à corrosão. Entretanto, há projetos onde a superfície interna de conduto forçado não é pintada quando se opta pela sobre espessura para compensar corrosão no período de vida útil, mas essa opção acarreta grande risco quando ocorrer biocorrosão acelerada, figura 21.

A biocorrosão no conduto forçado da hidrelétrica Pedra do Cavalo teve velocidade assustadora de deterioração interna. Após tentativa frustrada de controle por sistema de proteção catódica por circuito impresso de corrente, foi necessário paralisar a geração por longo período para execução de pintura interna. Os prejuízos foram de grande monta pela indisponibilidade de geração e custos imprevistos de trabalho de jateamento com granalha de aço para remoção da superfície corroída e posterior pintura com tinta especial a base de alcatrão de hulha. Pela figura 22 é notória a eficiência de pintura de proteção.



Figura 21: Superfície interna de conduto forçado coberto por tubérculos
Fonte: acervo do autor (2005)



Figura 22: Comparação da diferença entre caixa espiral pintada e conduto forçado sem pintura.
Fonte: acervo do autor (2005)

2.7.4 Inibidores químicos

O problema da ferrobactéria também é muito comum nos sistemas de água tratada e poço artesianos, sendo solução usual das empresas de saneamento é de, além dos produtos normais de tratamento para potabilidade, utilizar produtos químicos biocidas (FREITAS; INEZ; JOROSKI, 2002). Dentre estes produtos biocidas os mais empregados são cloro, hidróxido de cloro, atualmente o hidróxido de cálcio é o produto usualmente utilizado na neutralização da biocorrosão, e curiosamente o hidróxido de cálcio é o mesmo bactericida aplicado há quase um século na endodontia para tratamento de canal de dente (SATHORN; PARASHOS; MESSER, 2007).

A ferrobactéria se desenvolve em condição de pH mais ácido e com esta condição o controle por injeção de inibidores químicos biocidas, são injetados no sistema de água de resfriamento, que é composto por sistemas de tubulações diversas onde é impossível fazer proteção com pintura interna. Os biocidas mais utilizados são do tipo alcalinizantes tais como peróxido de hidrogênio, dióxido de cloro, hipoclorito de cálcio e hipoclorito de sódio, que são empregados em sistemas completos automatizados que fazem injeções intermitentes diárias diretamente no fluxo do circuito de água a ser tratada.

Nas hidrelétricas a captação de água bruta normalmente ocorre por ramal derivado do conduto forçado, portanto, utilizando águas profundas do reservatório para sistema de resfriamento. Nessa condição, atualmente o método largamente empregado de controle da biocorrosão é o sistema de injeção de biocidas no sistema de resfriamento. Esses sistemas são de alto custo de implantação quando são necessárias bombas de dosagem, instrumentação e integrado ao sistema digital de supervisão e controle SDSC da usina. Além da mão de obra para O&M do sistema, requer razoável consumo mensal de produtos químicos. Existem poucos estudos detalhados sobre os impactos ambientais desses produtos químicos utilizados e, legislação explícita de regulamentação específica de uso de biocidas em hidrelétricas. Desta forma, uma eventual nova normativa de órgãos ambientais poderá trazer transtornos para os atuais sistemas que se utilizam de inibidores químicos. As figuras 23 e 24 mostram o sistema de inibição instalado na usina de Serra da Mesa.



Figura 23: Reservatório de biocida e bomba do sistema de inibidor químico.
Fonte: acervo do autor (2019)



Figura 24: Painel de controle geral de dosagem e injeção do hipoclorito de cálcio
Fonte: acervo do autor (2019)

Existem diversas fábricas de produtos químicos comercializando biocidas de marcas próprias cujos efeitos residuais ainda não foram pesquisados em profundidade. Dentre esses citamos o MXD100 que é utilizado em algumas usinas no controle da biocorrosão e principalmente para outro problema de controle de mexilhão dourado². Recentemente o IBAMA havia proibido este biocida e depois concedeu liberação para uso emergencial com prazo até final deste ano 2020, mesmo em seu despacho classificando-o como produto “Extremamente Tóxico e Altamente Perigoso ao Meio Ambiente” (IBAMA, 2018).

O Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA, em cumprimento ao parecer de força executória relativo à sentença - processo SEI-Ibama 00807.004549/2018-25 - e atendendo ao disposto no Art. 14º, inciso I, do Decreto nº 4.074/02, torna público que concedeu para a empresa Max Clean Ambiental e Química S/A o Registro para uso emergencial do produto de marca comercial: MXD-100; nº do Registro: 6925/15; Nome Químico do Ingrediente Ativo: *didecyl dimethyl ammonium chloride* e *Dimethyl isopropyl benzyl ammonium chloride*; Nome Comum do Ingrediente Ativo: *Blend* de quaternário de amônio; Indicação de uso aprovada: produto para uso em ambientes hídricos no controle do mexilhão-dourado² *Limnoperna fortunei* em sistemas de resfriamento de usinas hidrelétricas; Classificação Toxicológica: Classe I - Extremamente tóxico; Classificação do Potencial de Periculosidade Ambiental: I - Altamente Perigoso ao Meio Ambiente. Validade: 02 anos a contar da data de assinatura. Data de assinatura: 03/12/2018. (Comunicado nº 3933352, de 05/12/2018; processo SEI/IBAMA nº 02001.006925/2015-74).

Posto isto, além dos custos associados na implantação de sistemas de injeção e consumo dos biocidas, sob a ótica de gerenciamento ambiental é temerário este controle de corrosão com uso indiscriminado de produtos químicos lançados diretamente em diversos rios, ainda que com anuência parcial e provisória do IBAMA.

2.7.5 Proteção catódica por corrente impressa.

Este processo consiste em injetar um sistema de corrente elétrica que afeta as interações de natureza eletroquímicas e utilizando o ânodo de sacrifício como proteção do conjunto. Este equipamento converte corrente alternada para corrente elétrica contínua de baixa voltagem. Composto de regulador de tensão de saída os retificadores de proteção

² Mexilhão dourado é molusco asiático invasor cuja reprodução desenfreada causa entupimento de tubulações em várias hidrelétricas no país.

catódica estão disponíveis em diversas capacidades de corrente “impressa”. Sistemas de corrente impressa como da figura 25 são inerentemente mais complexos do que os sistemas galvânicos e, tipicamente, requerem mais manutenção e possui boa eficiência na diminuição da taxa de corrosão quando se altera a polarização catódica da superfície metálica (GENTIL, 1996; MACEDO, 2013).

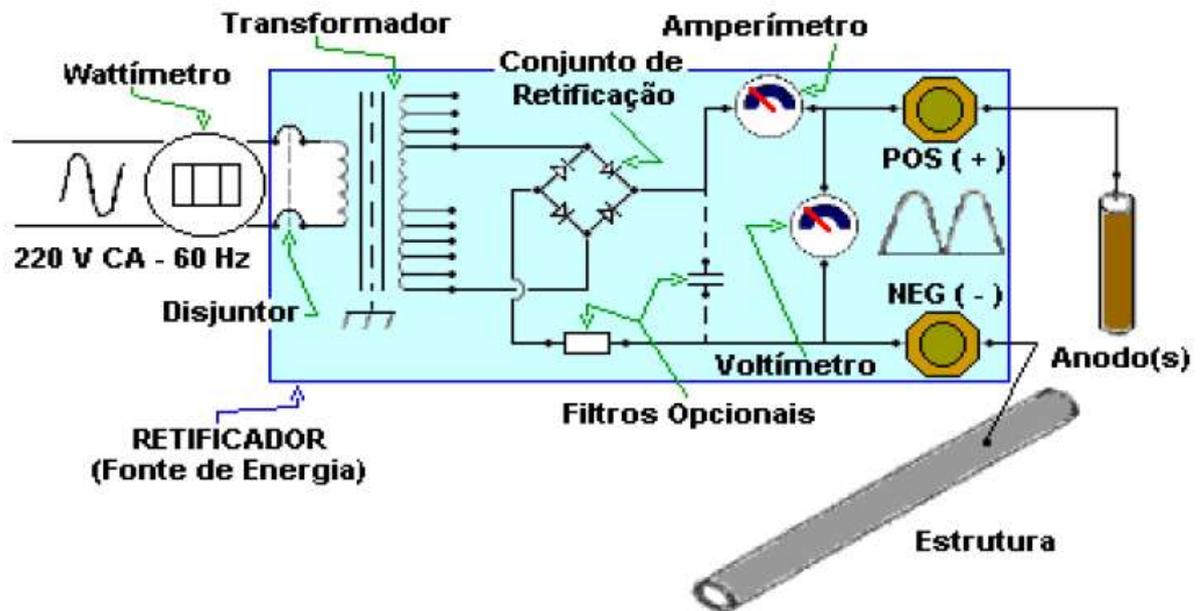


Figura 25: Circuito elétrico de instalação de sistema de corrente impressa
Fonte: Macedo (2013).

Um exemplo da aplicação real deste tipo de sistema de proteção por corrente impressa da figura 26 e anexo A foi da instalação no conduto forçado da usina Pedra do Cavallo como parte das ações iniciais de controle da biocorrosão de conduto não pintado internamente.



Figura 26: Vista no detalhe conexão ao anodo de barra chata de titânio de sacrifício da proteção catódica
Fonte: acervo do autor (2005)

2.7.6 Desinfecção por ultravioleta

Em sua pesquisa sobre inativação mediada pela luz solar em organismos, Nelson *et al.* (2018) observou que em algum momento durante a exposição solar, as bactérias sofrem danos na proteína (capsídeo) de seu sistema de proteção e proliferação. Em seu artigo Aquino (2010) relata que a luz ultravioleta em comprimentos de onda específicos entre 100 e 280 nanômetros (ou bilionésimos de metro) consegue eliminar bactérias. Desta mesma forma também as ferrobactérias quando expostos à luz ultravioleta destrói seu material genético eliminando sua capacidade de se reproduzirem.

Estes conceitos corroboram para entendimento da nova técnica de controle de formação de biofilme pelo equipamento denominado sistemas de luz ultravioleta hidro-óptica *HODUV* (do inglês *Hydro-Optic Disinfection Ultraviolet*). Em experimento prático Pucherelli *et al.* (2018) reportou que a bioincrustação na usina de Parker Dam, EUA, foi reduzida 75% após o primeiro ano de operação do *HODUV* e eliminando o vetor causador de biocorrosão ainda no segundo e terceiro anos após sua implantação. Além da questão do impedir a formação de biofilme, também combateu a infestação de um tipo de mexilhão. (HARIF *et al.*, 2011). Figura 27.

A foto da figura 28 é do sistema de *HODUV* da fabricante israelense Atlantium Technologies operando com sucesso na Parker Dam, Colorado, EUA.



Figura 27: Trocador de calor - da esquerda com biofilme e da direita alimentada por *HODUV*.
Fonte: Pucherelli *et al.* (2018)

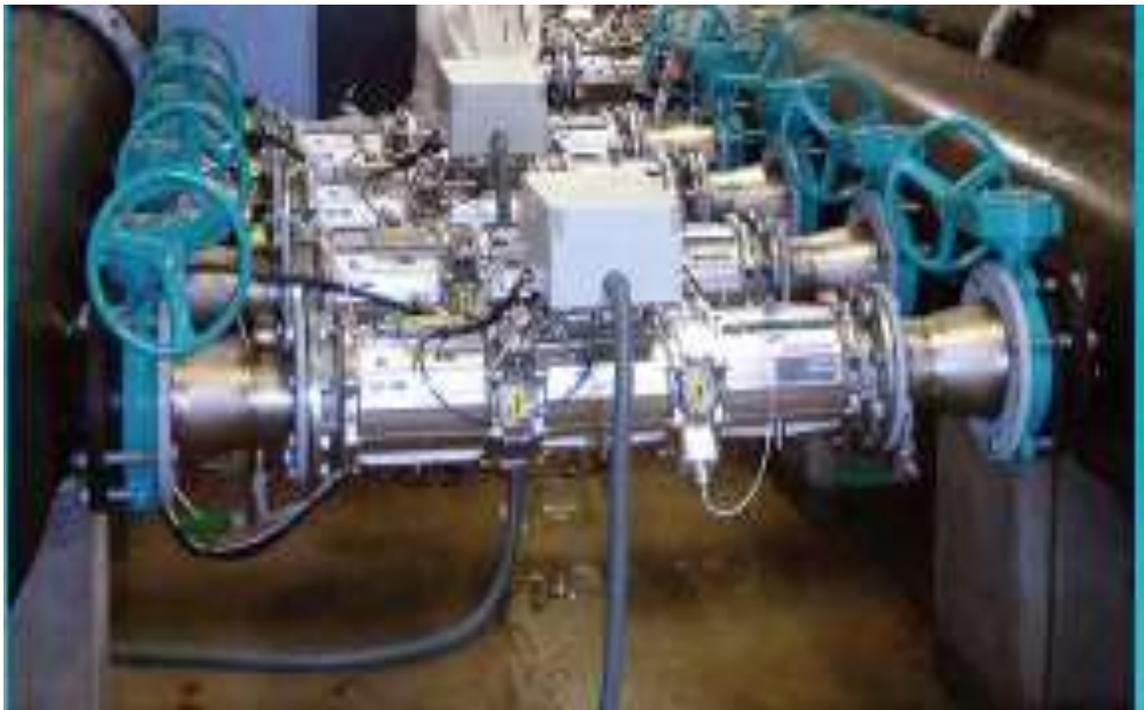


Figura 28: Conjunto de equipamentos *HODUV* acoplado ao sistema de água de resfriamento.
Fonte: Atlantium Technologies (2019)

3 METODOLOGIA

A definição do tema de biocorrosão foi decorrente das experiências vivenciadas com problema da biocorrosão em diversas usinas hidrelétricas e as poucas informações no seu trato pelas equipes de O&M. Desta forma, com objetivo de aquisição de conhecimentos, a ferramenta de revisão bibliográfica desta pesquisa está lastreada em publicação de artigos diversos e livros disponibilizados em sites como da Elsevier, SciELO, Academia.edu, ResearchGate sobre o assunto da biocorrosão e seus métodos de mitigação. Outra contribuição importante foi orientações obtidas em reunião com Dr. René Peter Schneider da Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Química.

Com filtragem da revisão bibliográfica visando investigação específica para área de geração de energia e, com os recursos locais disponíveis na UNIFEI, ficou constatada a inviabilidade de realização de experimento de cultura isolada de bactérias promotoras da biocorrosão. Sendo então definida por realizar estudos de casos com experimentos empíricos *in situ* em hidrelétricas com problemas de corrosão por ferrobactérias e BRS. Sendo que a escolha dos tipos de materiais dos corpos de provas foi de acordo com metais mais comumente utilizados nos equipamentos das centrais hidrelétricas.

Para escolha do local de estudo de caso, foram meses de tratativas com operadoras de hidrelétricas para obtenção de aceite para acesso às instalações e desenvolvimento das pesquisas. E outro período na procura por fornecedor de pequena quantidade de corpos de prova (cupons) e seu tratamento de passivação. As empresas não atendem pouca quantidade e também não vendem para pessoa física. Mas felizmente após várias tratativas e justificando necessidade para desenvolvimento de uma pesquisa técnica, uma pequena metalúrgica aceitou o fornecer os cupons; e depois uma grande empresa de tratamento superficial de aço inoxidável colaborou graciosamente na passivação de corpos de prova de aço inox *AISI* 304 e *AISI* 410.

Após corpos de prova adquiridos e tratados foi necessário comprar de instrumental específico, como balança de precisão de milésimo de grama e espectrofotômetro portátil, equipamentos para avaliação de perda de massa dos cupons e teor de ferro Fe^{2+} dissolvido na água, respectivamente. Após todo material provisionado, foi acordado com as operadoras das usinas Serra da Mesa e Cana Brava um cronograma de visitas trimestrais para medições quantitativas de corrosão. Finalizando com planejamento de logística para deslocamentos por todo período da pesquisa.

Durante o período do experimento prático houve diversas intercorrências nas campanhas e entre as quais a inadequação do sistema de imersão dos corpos de provas. E como medida corretiva foi inventado um dispositivo de fixação para imersão dos cupons que gerou solicitação de registro de patente no INPI, tornando-se o Produto desta pesquisa.

Ainda durante o período do mestrado com conceitos das aulas de geologia e georreferenciamento possibilitou levantar e mapear o histórico do tipo de solo original antes da construção da usina de Serra da Mesa. E com a projeção da área inundada com a formação do reservatório de Serra da Mesa foi elaborada a hipótese de que alguns tipos de solos ricos em ferro, quando inundados, podem influenciar na proliferação de ferrobactérias no reservatório (**Apêndice A**).

Com os dados levantados e as medições realizadas nos corpos de prova e quantidade de teor de ferro dissolvido, foi consumada a análise individual da taxa de corrosão em cada tipo de material dos corpos de prova e finalizando com as conclusões desta pesquisa. E como resultado adicional prático desta pesquisa, o autor consolidou parceria para prospecção de novos negócios com a empresa Sigura Water Brasil, que forneceu e assiste sistemas de neutralização química para mais de duas dezenas de empreendimentos.

4 ESTUDO DE CASO

Os estudos de caso foram realizados nos reservatórios das centrais hidrelétricas Serra da Mesa e Cana Brava, que estão localizadas no início do rio Tocantins no estado de Goiás, municípios de Minaçu e Cavalcante, figura 29 e 30

A bacia do rio Tocantins inicia no estado de Goiás, passando pelo Maranhão e com sua foz no Pará, perto da capital Belém. O rio também pode ser chamado de Tocantins-Araguaia, por se encontrar com o rio Araguaia entre o Tocantins na região do Bico do Papagaio no Pará, sendo nos seus 2400 km de extensão diversos projetos foram implantados em cascata, sendo as seguintes usinas em operação: Serra da Mesa, Cana Brava, São Salvador, Peixe Angical, Lajeado, Estreito e Tucuruí.

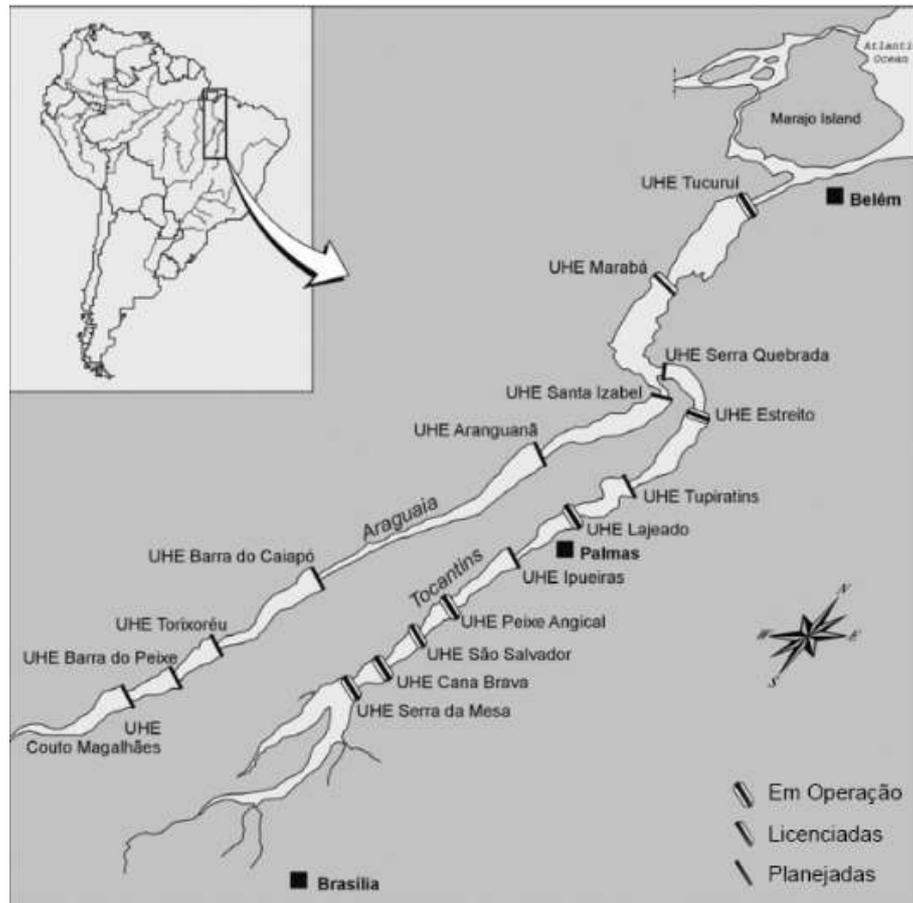


Figura 29: Rios Tocantins e Araguaia; as hidrelétricas e o status de implantação.

Fonte: Museu Paraense Emílio Goeldi

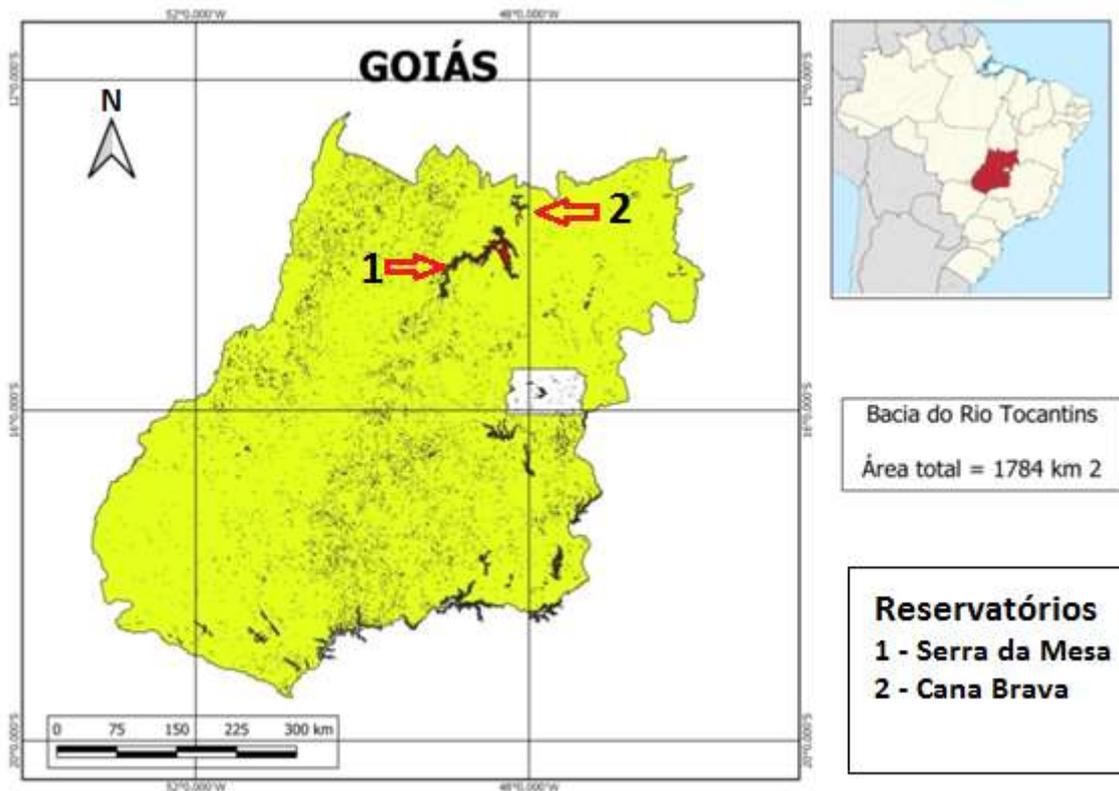


Figura 30: Localização dos reservatórios 1 = Serra da Mesa ; 2 = Cana Brava – GO.

Fonte: imagem disponível na *internet* e editada pelo autor (2020)

A Usina Hidrelétrica Serra de Mesa que está instalada no rio Tocantins ao extremo norte do estado de Goiás, 421 km de Brasília, com 1.275 MW de capacidade instalada para geração e iniciou operação em 1998. Possui uma área de 1.784 km² e reservatório com volume de água de 54.400 hectômetros cúbicos. Sua barragem para geração de energia fica em Minaçu–GO e a área do reservatório abrange ainda os municípios limieiros de Campinaçu, Uruaçu, Colinas do Sul, Niquelândia, Barro Alto, Campinorte e São Luiz do Norte. A figura 31 apresenta a vista do reservatório em foto por satélite.

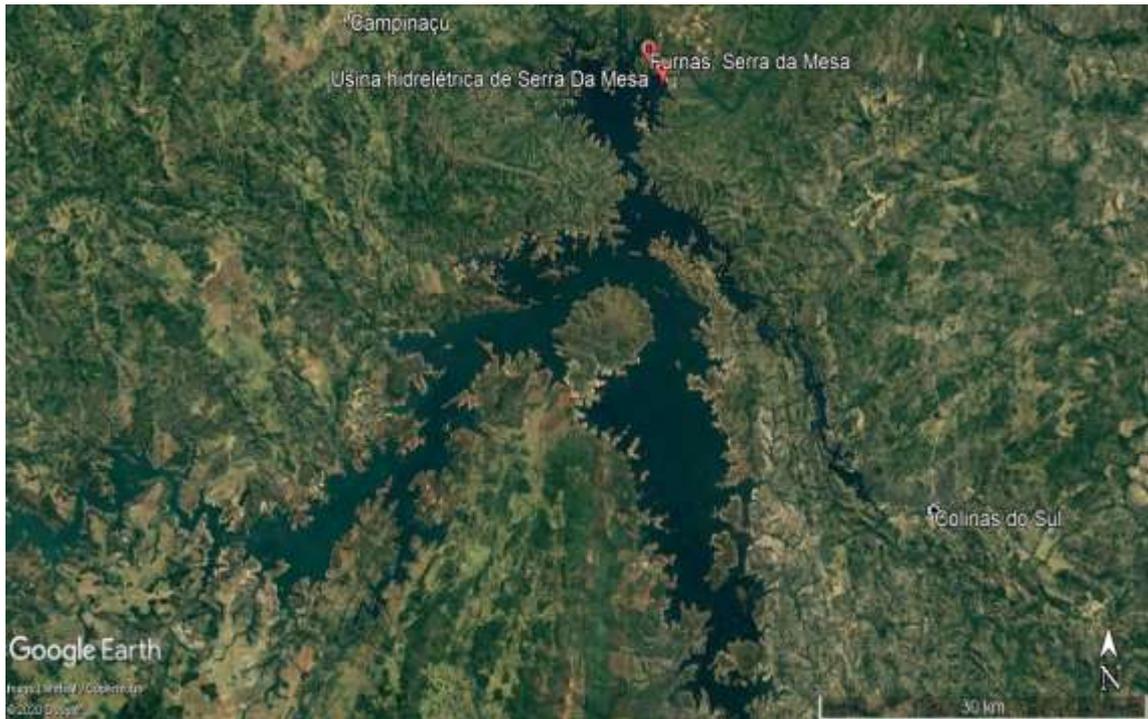


Figura 31: Reservatório Serra da Mesa
 Fonte: *Google Earth* (2016)

A usina Cana Brava foi inaugurada em 2002 e possui três unidades geradoras de 150 MW e um reservatório a fio d'água com área inundada de 139 km² e volume total de 2.300 hectômetros cúbicos. Está localizada a 413 km de Brasília e abrangendo áreas dos municípios de Minaçu e Cavalcante–GO. Como está apenas a 50 km, em linha reta, a jusante de Serra da Mesa, a qualidade da água de seu reservatório é diretamente relacionada com as condições desta primeira usina. A figura 4 mostra vista aérea de satélite com projeção do reservatório.

A parte empírica consistiu da experiência de avaliação visual e quantitativo de corrosão realizada nestas usinas hidrelétricas. Figuras 32 e 33. Em ambos locais os dispositivos com cupons foram imersos no paramento de montante de tomada d'água, até altura próxima da entrada da boca de adução. Na usina Serra da Mesa foi pendurado com suporte na crista da tomada d'água, até elevação 420 m do paramento esquerdo à UG-3, e identificado como “Serra da Mesa–TA”. Na usina Cana Brava foi instalado na mureta do bloco de separação entre tomada d'água e vertedouro, na elevação 336 m, e denominado como “Cana Brava–TA”, descendo cesto até elevação 307 m, correspondente à altura média da boca de entrada da tomada d'água. Em Cana Brava, também foi instalado outro conjunto das mostras de cupons num cesto a 3 m abaixo da superfície do reservatório, e denominado como “Cana Brava SS”.



Figura 32: Vista do reservatório da Usina Serra da Mesa
Fonte: acervo do autor (2019)

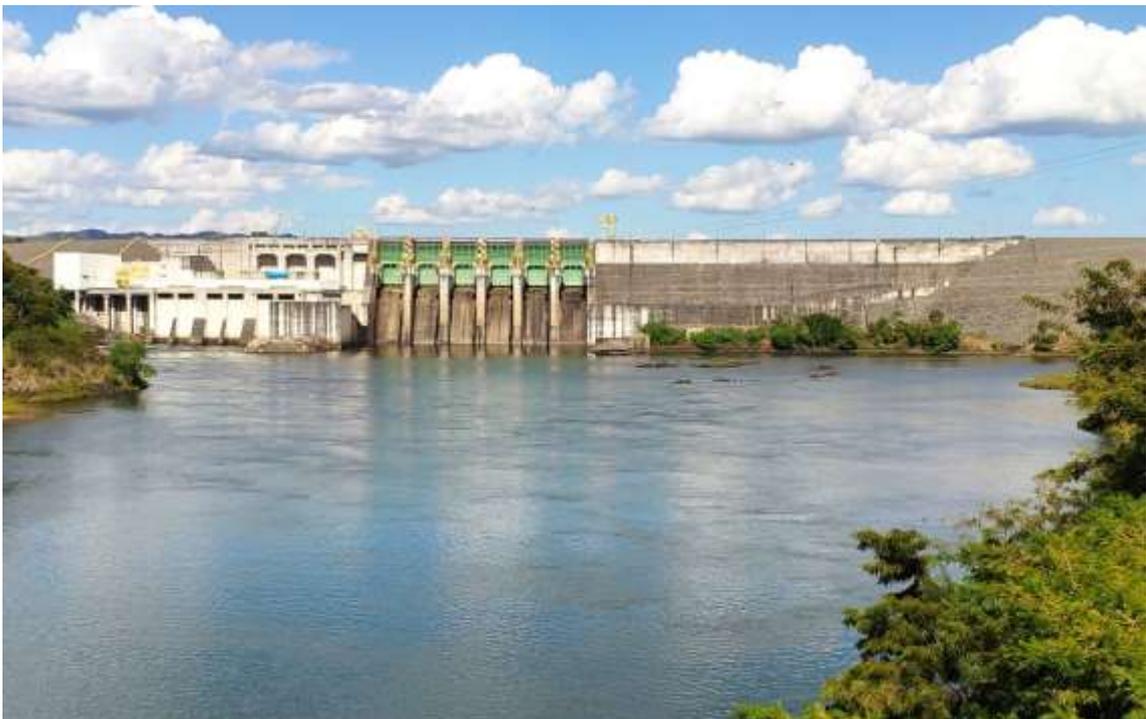


Figura 33: Vista jusante da Usina Cana Brava
Fonte: acervo do autor (2019)

Para realizar a investigação do efeito da biocorrosão foi utilizado o método de acompanhamento da taxa de corrosão em corpos de prova (cupons). Estes cupons foram inspecionados em três campanhas de medições periódicas com objetivo de fazer um

comparativo de perda de massa consumida pela corrosão e verificar quais seriam os metais mais resistentes à ação da ferrobactéria.

Para realizar a pesquisa os cupons foram adquiridos da Metalúrgica Franchi, o tratamento de passivação dos cupons inoxidáveis foi executado no Grupo Humma Eletropolimento & Passivação. A fosfatização foi realizada de forma direta com imersão de cupons de aço *SAE 1020* (do inglês *Society of Automotive Engineers*) por 24 horas no produto Fosfatox (ácido oxilálico $H_2C_2O_4$ + ácido fosfórico H_3PO_4). Para execução das medições foram utilizados os seguintes instrumentos:

- Balança digital profissional MTC – cap. máx. 50 g (+/- 0,001 g)
- Espectrofotômetro portátil Hanna HI721– cap. máx. 5,00 ppm (+/- 0,01 ppm)
- Reagente fenantrolina EPA 315B ma - Hanna HI721-25, para ferro
- Paquímetro digital Uyustools CLD006 – cap. máx. 150 mm (+/- 0,01 mm)
- Trena Protsega FMT30A-20 – cap. 30 m (divisão 2 mm)

Os cupons foram fabricados nos seguintes materiais metálicos: de aço inoxidável *ASI 304*, *ASI 304* passivado, *ASI 410*, *ASI 410* passivado, aço carbono *SAE 1020*, *SAE 1020* fosfatizado, cobre e arruela galvanizada a fogo; todas as amostras previamente identificadas e pesadas com balança digital de precisão de milésimo de grama. Figura 34.



Figura 34: Cupons dos diversos metais e pesagem inicial com balança de milésimo de grama.

Fonte: acervo do autor (2020)

4.1 Cronologia: problemas e providências.

A cada noventa dias, aproximadamente, os cupons foram inspecionados e pesados individualmente para acompanhamento da ação de ferrobactéria. Os cupons foram colocados em tubos de plásticos com diversas furações para circulação de água e, todos agrupados em um cesto de plástico vazado. Figura 35. Mas, além de uma interferência humana indevida, todas as amostras de água profunda foram perdidas por enroscar em eventual material submerso decorrente do arraste do cesto com alterações de nível/vazão nos reservatórios.

Devido a este problema de arraste do cesto foi reavaliada outra forma de submersão dos cupons. Como não existe equipamento para possibilitar a imersão destes cupons, foi necessário idealizar um dispositivo inédito com pouco arraste para alojamento dos cupons durante o período de imersão nos reservatórios das usinas Serra da Mesa e Cana Brava, em profundidade subsuperficial e ao nível da entrada da adução. A figura 36 é o momento de lançamento dos cupons de profundidade.



Figura 35: Cesto com cupons inicialmente utilizado
Fonte: acervo do autor (2019)



Figura 36: Amostras sendo lançadas na usina Cana Brava
Fonte: acervo do autor (2019)

O dispositivo foi fabricado com tubo *PVC* 4” provido de diversas furações laterais para passagem de água e diminuição do arraste, e diversas luvas roscadas de 3/4” foram soldados com resina acrílica, onde os cupons ficam alojados em *plugs* e pinos de plástico. Na parte superior provida de alça para suspensão vertical e na parte inferior outra alça para prender corpo de prova de arruela galvanizada a fogo, conforme figuras 37 e 38.

Este dispositivo inventado tornou-se o **Produto** desta pesquisa e em 29/03/2020 protocolado pedido de registro de patente junto ao INPI como Invenção de Modelo de Utilidade, sob número BR 20 2020 006329, intitulado: “Suporte para corpos de prova para testes de corrosão”, tendo o orientador e co-orientadora como co-inventores.



Figura 37: Dispositivo criado para fixar cupons
Fonte: acervo do autor (2019)



Figura 38: Vista interna com cupons e arruela de teste.
Fonte: acervo do autor (2019)

Infelizmente todas as amostras de Serra da Mesa foram perdidas por motivos diversos: intervenção humana indevida, de quebra do fio de sustentação e de enroscos com galhada submersa arrastada pela correnteza local, foto 39. Na foto 40 o suporte de suspensão do dispositivo para imersão no paramento de montante da tomada d'água.



Figura 39: última amostragem de Serra da Mesa perdida por enrosco em detritos
Fonte: acervo do autor (2019)



Figura 40: Suporte do dispositivo de cupons na usina Serra da Mesa
Fonte: acervo do autor (2020)

A princípio a meta era realizar três campanhas de acompanhamento e ter dados para compor uma avaliação do ataque de ferrobactérias a cada 90 dias. Ocorreram diversos problemas cujas datas de campanhas e ocorrências estão resumidas no quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Cronograma de campanhas e situação do conjunto de cupons

Campanha	Serra da Mesa–TA	Cana Brava–SS	Cana Brava–TA
A - 06/06/19	Data zero	Data zero	Data zero
B - 02/08/19	Perdida/substituída	Avaliado	Perdida/substituída
C - 05/11/19	Perdida/substituída	Avaliado	Perdida
D - 04/02/20	Perdida/Medição ferro	Medição ferro	Medição ferro

Fonte: autor (2020)

- **Campanha A:** foi data zero da instalação das primeiras amostras de cupons em profundidade TA na usina Serra da Mesa e Cana Brava, e no nível subsuperficial Cana Brava SS. E a partir desta fazer as inspeções/medições para verificação do grau de corrosão em cada amostra metálica.
- **Campanha B:** retorno após três meses para primeiras medições quando foi constatada perda do cesto de cupons da usina “Serra da Mesa TA”, ocasionado por intervenção humana indevida que rompeu o fio de sustentação. Na usina Cana Brava houve perda do cesto de cupons da TA por quebra do fio de sustentação com atrito na parede do bloco de concreto. Nesta data, os dois conjuntos de cupons foram substituídos por novos e tornando-se nova data zero para acompanhamento.
- **Campanha C:** foi antecipada após comunicado do pessoal de O&M, das duas usinas, de problemas de travamento no fundo do reservatório e assim decidido abandonar o cesto com criação do dispositivo tubular de fixação parcial de cupons da Serra da Mesa–TA (sem os cupons passivados). Por falta de cupons não foram substituídas amostras em Cana Brava–TA. Nesta data, foi possível apenas inspecionar os cupons da Cana Brava–SS.
- Na campanha **D:** com quase noventa dias o retorno final a expectativa era realizar as inspeções finais, mas surpreendentemente as amostras de Serra da Mesa – TA foram novamente perdidas por enroscarem em material flutuante arrastado pelo aumento de nível dos reservatórios. Felizmente foi possível resgatar a amostra Cana Brava–SS para inspeção e medição da corrosão e servir como subsídio para conclusão parcial da pesquisa.

4.2 Medição de ferro dissolvido

Por ocasião da última campanha foram realizadas medições de ferro dissolvido nas duas hidrelétricas. As amostras de água foram colhidas a 3 m metros de profundidade da superfície do reservatório e também no dreno lateral da porta de acesso do tubo de sucção nas duas hidrelétricas; esta amostra do tubo de sucção é a mesma água profunda que as usinas normalmente derivam para o sistema de resfriamento.

Para coletar estas amostras ao nível subsuperficial foi criado um dispositivo de ampola dentro de tubo metálico, com rolha e dois fios de *nylon*, um de sustentação e outro para abertura da vedação. Ao atingir a profundidade de 3 m baixo da superfície, a rolha era liberada e assim o recipiente interno preenchido com água daquela profundidade. Figura 41.



Figura 41: Dispositivo para coleta de água subsuperficial
Fonte: acervo do autor (2020)

A coleta de amostra de água profunda foi diretamente no dreno lateral da escotilha do tubo de sucção nas duas usinas. Figura 42. Essa amostra representa a mesma água que alimenta o sistema da água de resfriamento quando derivado de conduto forçado antes da entrada para caixa espiral.



Figura 42: Coleta de amostra de água no tubo de sucção da usina Cana Brava
Fonte: acervo do autor (2020)

Para esse experimento de medição de ferro dissolvido foi utilizado um espectrofotômetro digital portátil e reagente. O reagente é fornecido pré-dosado em sachês individuais para volume fixo da amostra de água e permitindo atingir medições com rapidez e precisão. Figura 43.

A simples adição de um sachê de reagente à amostra de volume específico de água, a reação estará completa e determinará a concentração da amostra. Este método de colorimetria o reagente Fenantrolina reage com presença de ferro Fe^{2+} causando alteração da coloração na amostra. Os resultados do instrumento apresentam concentração de ferro em mg/L (ppm), sendo que os reagentes usados com amostras que possuam uma faixa esperada de 0,00 a 5,00 mg/L de ferro e o espectrofotômetro precisão de 0,01 mg/L (ppm).



Figura 43: Espectrofotômetro portátil para medição de ferro dissolvido
 Fonte: acervo do autor (2020)

4.3 RESULTADOS

4.3.1 Aquisição de dados dos cupons

As tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 resumem todas as inspeções de valores registrados. A preparação para pesagem após cada inspeção foi com decapagem química com ácido sulfúrico a 20% e remoção de umidade com limpeza manual com algodão embebido com álcool isopropílico. Em seguida, pesados individualmente com balança de precisão de 0,001 g. Foram perdidos os conjuntos de cupons das usinas Serra da Mesa e Cana Brava para acompanhamento da corrosão em água profunda, desta forma restando apenas o conjunto ensaiado em condição subsuperficial Cana Brava–SS com cupons acondicionados em tubos em cesto plástico.

Tabela 4.1: Massa Cana Brava–SS (em gramas).

Campanha	410	410Pass	304	304Pass	1020	1020Fosf	Cobre	ArruelaGalv.
06/06/19	10,873	10,549	10,773	11,050	10,756	10,839	12,094	21,206
02/08/19	10,871	10,547	10,770	11,046	10,600	10,653	12,086	21,152
05/11/19	10,871	10,547	10,770	11,046	9,403	9,650	12,072	21,135

Fonte: autor (2020)

Tabela 4.2: Massa Cana Brava–TA (em gramas).

Campanha	410	410 Pass	304	304 Pass	1020	1020 Fosf	Cobre	Arruela Galv.
06/06/19	10,833	10,739	11,039	11,020	10,838	10,789	12,052	19,842
02/08/19 *	10,878	10,711	11,278	11,057	10,987	10,663	12,060	20,464
05/11/19 #	—	—	—	—	—	—	—	—

Fonte: autor (2020)

Observações:

*Quebrou linha em 09/07/19 e subst. em 02/08/19 com dispositivo tubular

#Dispositivo prendeu no fundo e impossibilitando remoção para inspeção

Tabela 4.3: Massa dos Cupons Serra da Mesa–TA (em gramas).

Campanha	410	410 Pass	304	304 Pass	1020	1020 Fosf	Cobre	Arruela Galv.
06/06/19	10,768	10,722	10,928	10,958	10,895	10,792	12,067	19,835
02/08/19 ®	10,879	10,734	10,989	11,014	10,905	10,730	12,080	22,229
05/11/19 Δ	10,921	—	10,979	—	10,834	10,690	12,070	19,005
04/02/20 ☒	—	—	—	—	—	—	—	—

Fonte: autor (2020)

Observações:

® Intervenção humana indevida quebrou linha e subst. em 02/08/19 com dispositivo tubular

Δ Quebrou linha em 10/09/19 e subst. em 05//11/19 com dispositivo tubular

☒ Enroscado em garrancheira – perdido em 04/02/20

As fotos das figuras 44 e 45 apresentam a variação visual do acabamento da superfície de cupom de *SAE 1020* após ataque corrosivo da ferrobactéria antes e após limpeza química.

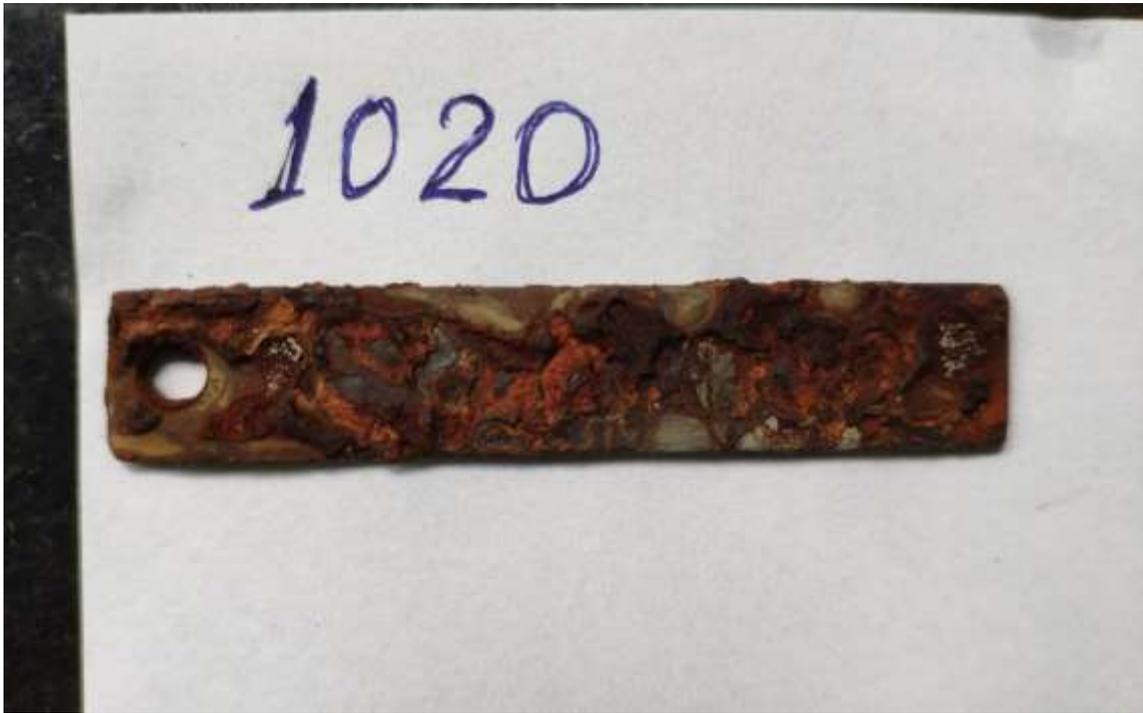


Figura 44: Situação como apresentada após 151 dias de imersão
Fonte: acervo do autor (2020)

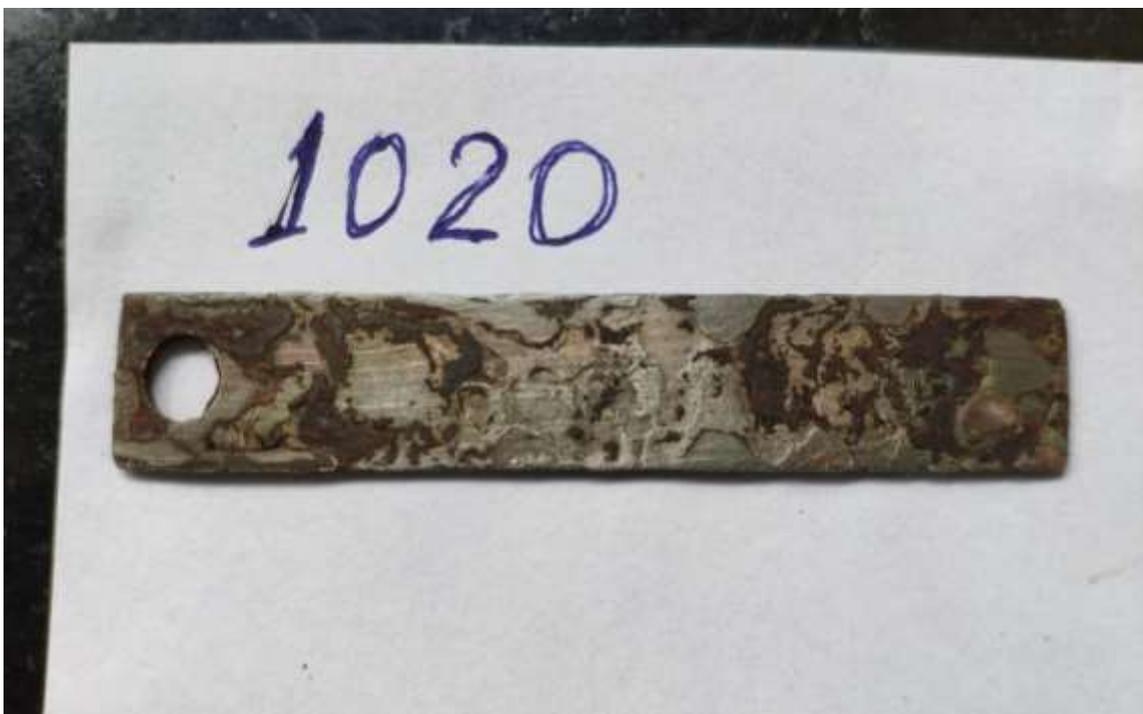


Figura 45: Visual após limpeza química
Fonte: acervo do autor (2020)

4.3.2 Cálculo da taxa de corrosão

Para os cálculos da taxa de corrosão foram realizados com dados dos cupons da usina Cana Brava–SS, tabela 4.4 que estavam instalados 3 m abaixo do nível do reservatório.

Tabela 4.4: Massa Cana Brava–SS (em gramas).

Campanha	410	410 Pass	304	304 Pass	1020	1020 Fosf	Cobre	Arruela Galv.
06/06/19	10,873	10,549	10,773	11,050	10,756	10,839	12,094	21,206
02/08/19	10,871	10,547	10,770	11,046	10,600	10,653	12,086	21,152
05/11/19	10,871	10,547	10,770	11,046	9,403	9,650	12,072	21,135

Fonte: autor (2020)

O intervalo entre as campanhas C1 (06/06/19) e C2 (02/08/19) foi de 56 dias ou 1.344 horas. E o entre campanhas C2 (02/08/19) e C3 (05/11/19) foi de 95 dias ou 2.280 horas. O tempo total entre o início e fim das campanhas Ct (06/06/19→05/11/19) foi de 151 dias ou 3.624 horas. Todos os cupons têm dimensões padronizadas por estampagem com 7,5 cm comprimento x 1,28 cm largura, área total dos dois lados de 19,2 cm². Arruela quadrada galvanizada a fogo com dimensões de 3,24 cm, furo 1,4 cm, com área total de 21,7 cm².

Para os cálculos da taxa de corrosão foram realizadas as análises de perda de massa regidas pela norma *ASTM G1 03-2003* (do inglês *American Society for Testing and Materials*), pela equação 4.1:

$$TC = \frac{\Delta M \cdot 8,76 \times 10^4}{A \cdot T \cdot D} \quad [4.1]$$

Onde:

TC = taxa de corrosão, em (milímetros/ano).

A = área da superfície exposta do cupom, em cm².

ΔM = perda de massa, em gramas.

T = tempo de exposição, em horas.

D = densidade do cupom, em g/cm³.

A norma *NACE RP0075-2005* (do inglês *National Association of Corrosion Engineers*) avalia essa taxa de corrosão de acordo com os cálculos de perda de massa e classifica em quatro níveis, conforme tabela 4.5:

Tabela 4.5: taxas de corrosão e classificação

Taxa de Corrosão TC (mm/ano)	Classificação
Menor que 0,025	Baixa
Entre 0,025 – 0,12	Moderada
Entre 0,13 – 0,25	Alta
Maior que 0,25	Severa

Fonte: NACE (2005)

Realizados os cálculos individualmente para cada tipo de cupom, os resultados estão apresentados na tabela 4.6:

Tabela 4.6: períodos de perda de massa x tempo

Cupom	A	D	$\Delta M1$	T1	$\Delta M2$	T2	$\Delta M3$	T3
410	19,2	7,78	0,002	1.344	0,000	2.280	0,002	3.624
410 pass	19,2	7,78	0,002	1.344	0,000	2.280	0,002	3.624
304	19,2	8,00	0,003	1.344	0,000	2.280	0,003	3.624
304 pass	19,2	8,00	0,004	1.344	0,000	2.280	0,004	3.624
1020	19,2	7,87	0,156	1.344	1,197	2.280	1,353	3.624
1020 fosf	19,2	7,87	0,186	1.344	1,003	2.280	1,189	3.624
cobre	19,2	8,96	0,008	1.344	0,006	2.280	0,014	3.624
Arruela galv	9,88	7,88	0,054	1.344	0,018	2.280	0,072	3.624

Fonte: autor (2020)

Sendo:

 $\Delta M1$ - perda massa campanha C1/C2 $\Delta M2$ - perda de massa campanha C2 / C3 $\Delta M3$ - perda total de massa Campanha C1 / C3

T1; T2; T3 – tempo em horas de submersão.

Após os cálculos as taxas de corrosão os resultados finais e respectiva classificação de cada cupom estão apresentados na tabela 4.7 abaixo:

Tabela 4.7: grau de corrosão dos cupons

Cupom	TC1	TC2	TCt	Classificação
410	0,0008	0	0,0008	Baixa
410 pass.	0,0008	0	0,0008	Baixa
304	0,0013	0	0,0013	Baixa
304 pass.	0,0017	0	0,0017	Baixa
1020	0,0673	0,3044	0,2164	Severa/Alta
1020 fosf.	0,0802	0,2798	0,1902	Severa/Alta
Cobre	0,0030	0,0013	0,0020	Baixa
Arruela galv.	0,0452	0,0088	0,0223	Baixa

Fonte: autor (2020)

4.3.3 Resultados das medições de ferro dissolvido

A última campanha D foi dedicada para medição de ferro Fe^{2+} em águas subsuperficiais e na passagem pelo tubo de sucção. E como esperado pelos conceitos teóricos de influência de ultravioleta e nível de OD, não foi registrado presença de Fe^{2+} em profundidade abaixo de 3 m da superfície dos reservatórios das duas usinas. Já nas amostras coletadas no tubo de sucção, apresentou índices nos dois empreendimentos e, com 70% a mais de concentração em Serra da Mesa. A figura 46 é o registro das leituras do espectrofotômetro estão listadas na tabela 4.8.

Tabela 4.8: medição de ferro dissolvido (ppm)

Local	Serra da Mesa	Cana Brava
Subsuperficial – 3m	0	0
Tubo de sucção	0,19	0,11

Fonte: autor (2020)



Figura 46: Medições de ferro dissolvido em água profunda
 Fonte: acervo do autor (2020)

4.4 Análise dos resultados.

É de conhecimento que sem luz ultravioleta natural, água estagnada e com baixo índice de OD são fatores ideais para proliferação de ferrobactérias. Ao colocar cupom em tubo de plástico com diversos furos e todas as amostras juntas num cesto de plástico trançado, de cor marrom escuro, criou-se artificialmente um ambiente confinado sem circulação de água e bloqueando a luz ultravioleta do sol. Desta forma, mesmo uma pequena quantidade de Fe^{+2} presente na água não detectada na espectrofotometria realizada, encontrou condições favoráveis para promover a corrosão do cupom de aço carbono.

Como consequência, os resultados obtidos foram de taxa de corrosão alta ou severa nos cupons de aço carbono *SAE 1020* e *SAE 1020* fosfatizado. Ao analisarmos este desvio entre o resultado teórico e prático, concluiu-se que a razão fundamental foi decorrente do uso equivocado de cesto para imersão dos cupons. E não foi possível comparar com as amostras de águas profundas perdidas que estavam no dispositivo idealizado.

A exceção do corpo de prova de aço carbono *SAE 1020*, a avaliação dos demais cupons foi de taxa de corrosão irrelevante. As amostras de aço inoxidável apresentaram taxa diminuta no início e sem alteração na segunda fase do teste e sendo confirmada que o aço inox austenítico não magnético *AISI 304* o valor foi o dobro do verificado no aço inox martensítico magnético *AISI 410* nesta condição de favorecimento artificial de ferrobactéria.

O aço *AISI 310*, dada sua composição, é mais susceptível à corrosão biológica e desta

forma deve ser evitado em locais sabidamente com problema de ferrobactéria e/ou BRS. E os cupons de cobre a aço galvanizado apresentaram nos primeiros 56 dias uma taxa de corrosão maior comparada aos 95 dias posteriores, que foi significativamente menor. Ao final da análise, todos foram classificados como baixa taxa de corrosão.

Como nas medições com espectrofotômetro foi confirmada inexistência de ferro dissolvido em água subsuperficial, o resultado imaginado e esperado era de nenhuma ou muito pouca ação de ferrobactérias e valores ínfimos de taxa de corrosão nos cupons instalados nessa profundidade. E confirmando assim a razão da usina Cana Brava de não ter problema de corrosão ou entupimento de seu sistema de água de resfriamento.

Em Cana Brava existe a derivação comum do ramal do conduto forçado para alimentação do sistema de água de resfriamento, porém é uma linha reserva para uso excepcional. A captação normal de fato é realizada através de tubulação embutida com entrada na estrutura da tomada d'água a cerca de 3 m abaixo do nível mínimo normal de operação do reservatório. Seguindo por tubulação embutida no concreto estrutural até a galeria mecânica da casa de força, conectando ao sistema de água de resfriamento, tal como representado em croqui da figura 47. Este mesmo processo da captação alternativa também foi implantado na usina hidrelétrica Estreito–MA, detalhe na figura 48.

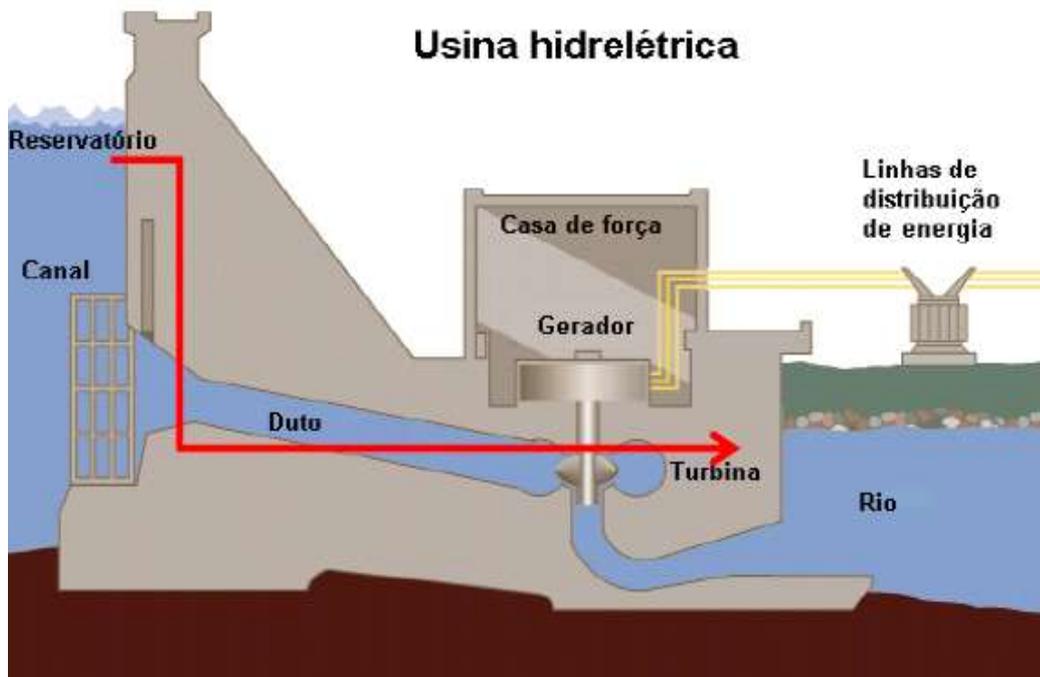


Figura 47: Esquema de captação alternativa até sistema de resfriamento
 Fonte: imagem disponível na internet e editada pelo autor (2020)



Figura 48: localização da entrada da captação alternativa na hidrelétrica Estreito.
Fonte: acervo do autor (2010)

5 CONCLUSÕES

O resultado desta pesquisa confirma que os cupons mais atacados foram por bactérias que proliferam com maior intensidade em águas profundas, de pouca oxigenação, baixa luminosidade e, não se desenvolvem ao nível subsuperficial do reservatório onde há maior oxigenação e incidência direta de ultravioleta solar.

O método usual de controle com biocidas, embora eficiente, é oneroso e motivo de preocupação dada ausência de estudos e pesquisas das consequências ambientais dos produtos químicos lançados nos corpos hídricos. Assim, a que a melhor solução na prevenção de problemas de biocorrosão nos futuros empreendimentos deve ser adotada ainda durante fase de despesas de construção do empreendimento - *CAPEX* (do inglês *Capital Expenditure*). Onde além da prática normal de derivação de água pelo conduto forçado, incluir no projeto/construção a captação alternativa de água de resfriamento ao nível subsuperficial.

Segundo técnicos da empresa Engie, em suas usinas Cana Brava, São Salvador e Estreito, todas implantadas no rio Tocantins e também a usina Jirau no rio Madeira têm ferrobactérias e BRS em seus reservatórios, mas não usam neutralização química, pois foram providas de captação alternativa de água e ao longo do período de operação permanecem sem biocorrosão em seus sistemas de água de resfriamento.

Portanto, a divulgação desta pesquisa poderá auxiliar empreendedores, técnicos e projetistas de centrais hidrelétricas “fornecendo oportunidade para melhorar nossa compreensão da biocorrosão em sistemas projetados e água superficial natural exposta à luz solar, bem como otimizar o *design* de sistemas projetados para melhorar a desinfecção” (NELSON *et al.*, 2018) e alinhadas com a preocupação ambiental, possibilitar soluções satisfatórias através do exercício da Boa Prática da Engenharia.

5.1 Sugestões para futuros trabalhos

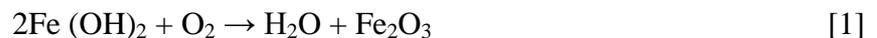
- Para evitar perdas de amostras por problemas de: intervenção indevida por terceiros, quebra de fio de sustentação pela força de arraste da adução e travamento em detritos flutuantes, o ideal é fixar o dispositivo com cupons em fio de prumo/boia ancorada distante da montante da tomada d'água.
- Caso se deseje uma pesquisa mais aprofundada, o ideal é desenvolver atividades em conjunto com profissional e laboratório de microbiologia que detêm expertise e recursos para cultura, identificação, qualificação e quantificação precisa dos tipos de bactérias presentes na biocorrosão.

- Estudos prévios de pedologia e exames microbiológicos da água, antes e após formação dos reservatórios de futuros empreendimentos de centrais hidrelétricas poderão comprovar ou refutar a hipótese de previsibilidade de proliferação de ferrobactéria, com inundação de solos predominantemente de classe cambissolo e/ou latossolos.

APÊNDICE A - Hipótese de Influência do Solo Original.

A dúvida do porque alguns reservatórios de usinas possuem mais ferrobactérias que outros, motivou a investigação em conceitos de pedologia que são “estudos relacionados com a identificação, a formação, a classificação e o mapeamento dos solos” (KER *et al.* 2012), como eventual contribuição no processo de proliferação de ferrobactéria.

Segundo Hungria (1992) já foram identificados alguns micro-organismos que, sob condições anaeróbias, podem usar o ferro como acceptor final de elétrons e, nesse caso, apresentando uma conversão enzimática do íon. Um fenômeno que possivelmente está associado com a redução microbiana do Fe é a gleização (saturação) dos solos inundados, atribuída ao sulfeto ferroso produzido sob anaerobiose, quando o teor de água aumenta. E quando o meio natural favorece que água desoxigenada chegue a uma fonte de oxigênio, as ferrobactérias usam esse oxigênio para converter o ferro ferroso solúvel num precipitado avermelhado insolúvel de ferro férrico:



De acordo com Brandão (1992) solos que são submetidos a condições de encharcamento temporário ou permanente, ocorrem modificações químicas e físicas que atuam profundamente no equilíbrio microbiológico. Pelas pesquisas de pedologia identificou-se que dois tipos de solos são ricos em ferro na sua composição: cambissolo e latossolo.

Cambissolo é solo rico em ferro e de acordo com Shinzato (2005) a classe háplico perférrico é bastante influenciada pelo material de origem, neste caso, o itabirito, material rico em ferro e esta classe apresenta solos com teor muito alto de óxido de ferro, superior ou igual a 36%.

Latossolo Vermelho-Amarelo é solo com coloração vermelho-amarelada devido ao elevado teor de óxidos de ferro, principalmente hematita (Fe_2O_3 – óxido de ferro) que confere cor vermelha aos solos e goethita (FeOOH – oxihidróxido de ferro) que confere cor amarela aos solos (SHINZATO, 2005).

Na formação do reservatório da usina Serra da Mesa oito municípios tiveram parte das suas terras inundadas segundo distribuição na tabela 1. A pesquisa podológica se limitou na área do reservatório de Serra da Mesa por ter maior volume e diretamente afeta a qualidade da água reaproveitada em Cana Brava, cujo volume é 95% menor.

Tabela 1 – Participação dos municípios lindeiros no reservatório Serra da Mesa

Municípios	Área Município km²	Área Inundada km²	Área Inundada %	Reservatório %
Niquelândia	9.847,2	1.018,7	10,35	57,09
Campinaçu	1.976,9	332,3	16,81	18,62
Uruaçu	2.135,3	277,5	13,00	15,55
Colinas do Sul	1.707,6	68,5	4,01	3,84
Minaçu	2.860,0	47,7	1,67	2,67
Barro Alto	2.046,1	35,8	1,35	2,01
Campinorte	1.069,6	3,5	0,33	0,20
São Luís do Norte	732,8	0,5	0,07	0,03
Total		1.784,5		100

Fonte: Furnas, Projeto básico (1996)

No estado de Goiás observamos os seguintes grupos de solos: Latossolo, Cambissolo, Argissolo, Nitossolo, Neossolo Quartzarênico, Neossolo Litólico, Plintossolo, e Gleissolo, sendo Latossolo e Cambissolo os grupos predominantes, sendo as respectivas porcentagens explicitadas na tabela 2.

Tabela 2 – Tipo de solo predominante

Tipo de solo	Porcentagem %
Latossolo	44,49
Cambissolo	19,09

Fonte: SEGPLAN-GO (2011)

Os percentuais gerais destes dois principais tipos de solos predominantes em Goiás foram comparados com os das áreas dos três principais municípios atingidos e, surpreende quando esta proporção se inverte alternando para predominância de Cambissolo. Portanto, só estas áreas totalizaram 91,26% da área inundada do reservatório, tabela 3.

Tabela 3 – Maiores municípios inundados pelo reservatório

Municípios	Tipo de solo				
	Latossolos Diversos %	Área Latossolo km²	Cambissolo Háplico %	Área Cambissolo km²	Área Reservatório km²
Niquelândia	18,6	189,5	60,2	613,2	802,7
Campinaçu	7,0	23,3	71,2	236,6	259,9
Uruaçu	43,2	119,9	26,0	72,1	192
Total		332,7		921,9	1 254,6

Fonte: Emater (2016)

Com as informações pesquisadas em geologia, pedologia e dados do SIG, foi gerado um mapa de abrangência no mosaico de solos do reservatório da usina Serra da Mesa, figura

49. A ferramenta utilizada foi programa QGIS para simulação com sobreposições das camadas dos diversos tipos de solos da área de Serra da Mesa, projetando os limites da área inundada pela formação do reservatório da usina hidrelétrica. (EMATER a, 2017; EMATER b, 2016). Como resultado do levantamento pedológico e mapeamento SIG sobre área da região foi possível confirmar que os 1.254,6 km², correspondente a 70% da área inundada, submergiu locais de Cambissolo e Latossolos diversos.

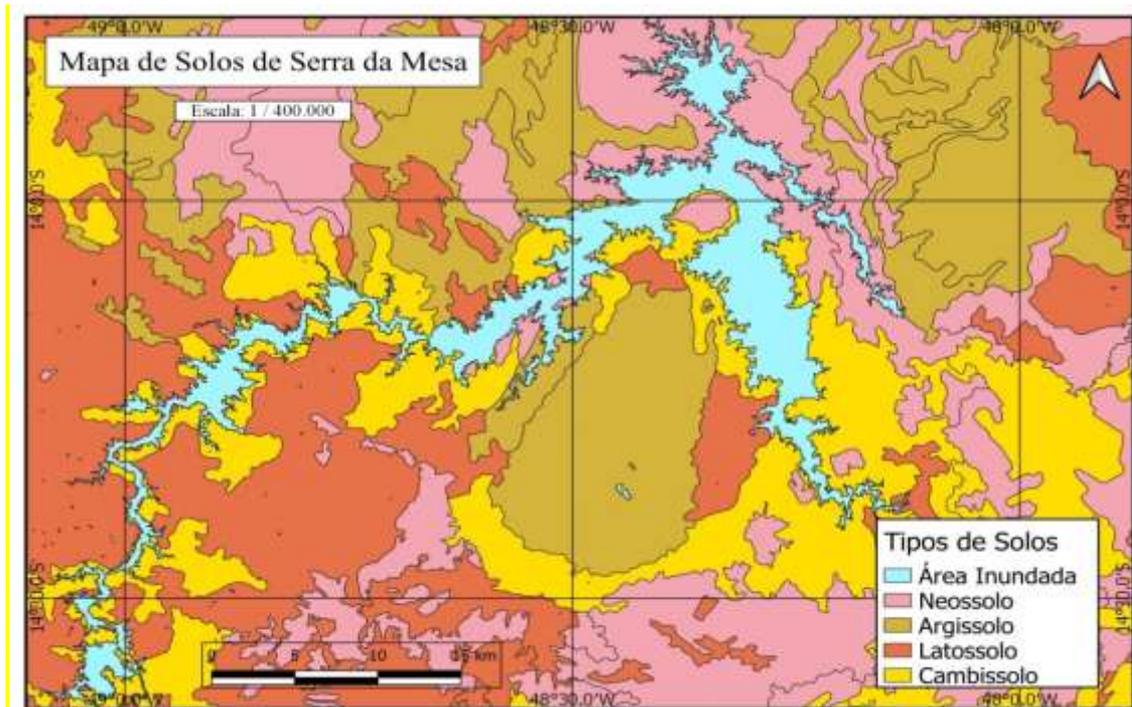


Figura 49: Mosaico de tipos de solos
Fonte: Emater (2016), adaptado pelo autor.

De acordo com Robege (2008) a água é o eletrólito essencial para reação de corrosão em solos saturados; desta forma deu origem a hipótese de que estes tipos de solos, quando permanecem inundados para formação de reservatório, propiciam a formação de ferrobactérias quando há oxidação do ferro presente nos solos e em água subterrânea. A gleização (permanente saturação com água) favorece a sua mobilidade para o meio aquático desse sistema lântico, disseminando as ferrobactérias no reservatório.

Portanto, em se confirmando esta hipótese, teremos uma ferramenta auxiliar na previsibilidade de proliferação de ferrobactérias em reservatórios. E possibilitando planejamento de ações prévias para mitigar os efeitos deletérios da biocorrosão em equipamentos de centrais hidrelétricas.

REFERÊNCIAS

- AHMAD, Z. Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control. **Butterworth-Heinemann**. Reino Unido, 2006.
- ALLISON, D.G. Molecular architecture of biofilm matrix. *Biofilms in Medicine, Industry and Environmental Biotechnology*, p.81. **IWA Publishing**. Londres, 2003.
- AQUINO, V. Ultravioleta, a luz que livra a água das contaminações microbiológica. Portal **Tratamento de Água**. São Paulo, 2010.
Disponível< <https://www.tratamentodeagua.com.br/artigo/ultravioleta-a-luz-que-livra-a-agua-das-contaminacoes-microbiologicas/>>, acesso 15/10/2019.
- ARAÚJO, J.T.C.; COUTINHO, C.M.L.M.; AGUIAR, L.E.V. Sulphate-reducing bacteria associated with biocorrosion – A Review. **Memórias do Instituto Oswaldo Cruz**, v.8 (3), 329-337, Rio de Janeiro, 1992.
Disponível<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S007402761992000300001>, acesso 14/02/2020.
- ASTM G1-03-2003 .Standard practice for preparing, cleaning and evaluation corrosion test specimens. **ASTM – American Society for Testing and Materials**, Pensilvânia, EUA, 2003.
- BEECH, I.B.; GAYLARDE, C.C. Recent advances in the study of biocorrosion – an overview, **Revista de Microbiologia**, v.30, n.3, 117-190, São Paulo, 1999.
Disponível<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S000137141999000300001>, acesso 17/03/2019.
- BEECH, I.B.; SUNNER, J.A Biocorrosion: towards understanding interactions between biofilms and metals. **Current Opinion in Biotechnology**, v.15,181-186, Londres, 2004.
Disponível< <https://www.d.umn.edu/biology/documents/Oster3.pdf>>, acesso 22/03/2019.
- BEECH, I.B.; SUNNER, J.A.; HIRAOKA, K. Microbe-surface interactions in biofouling and biocorrosion processes. **International Microbiology**, v.8, 157-168, Madri, 2005.
Disponível<https://pdfs.semanticscholar.org/003f/bfc6cce866cddace3433421708c34854f801.pdf?_ga=2.67444753.1446239037.1584092479-281874414.1583575737>, acesso 16/03/2019.
- BLEDISK, L.A. Secchi Disk. **Encyclopedia of Earth**. Boston University. EUA, 2009.
Disponível<https://www.researchgate.net/publication/233942582_Secchi_disk>, acesso 19/09/2020.
- BONFIM, A.C.F., BORTONI, S.F. Influência da radiação solar na lagoa Dom Helvécio no Parque Estadual Rio Doce (PERD) In: **Anais III Congresso Internacional RESAG**, ABAS, Belo Horizonte, 2017.
Disponível<<http://www.resag.org.br/congressoresag2017/anais/trabalhos/aprvado?q=bonfim>>, acesso 25/02/2020.
- BORENSTEIN, S.W. Microbiologically influence corrosion handbook. **Woodhead Publishing Limited**, Cambridge. 1994.

BRANDÃO, E. Microbiologia do Solo. Componentes da comunidade microbiana do solo; **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, cap 1, 1-15. Campinas, 1992.

Disponível<http://www.esalq.usp.br/departamentos/lso/arquivos_aula/LSO_400%20LIVRO%20%20MICROBIOLOGIA%20DO%20SOLO.pdf>, acesso 15/10/2020.

CHARNG, T.; LARSING, F. Review of corrosion causes and corrosion control in a technical facility. **Nasa Technical Reports Server**. EUA, 1982.

Disponível<https://tmo.jpl.nasa.gov/progress_report/42-69/69O.PDF>, acesso 15/11/2019.

CUSTODIO, O.M.; PRADO, A.O.; ARMENDÁRIZ, V.H.J.; FRANSSES, R.S. Corrosión microbiológica em aceros de bajo carbono. **Revista de Ingeniería Investigación y Tecnología**, v.X, n.1, 9-19, Envigado, Colômbia, 2009.

Disponível<https://www.researchgate.net/publication/262431738_Corrosion_microbiologica_en_aceros_de_bajo_carbono>, acesso 16/03/2019.

ELLIS, D. Iron Bacteria. **Methuen & Co Ltd**. Inglaterra, 1919.

EMATER a. Atlas rural e agropecuário: regional Serra da Mesa. **Gerência de Inteligência Territorial da Emater**. Goiânia, 2017.

Disponível<https://www.emater.go.gov.br/wp/wpcontent/uploads/2019/01/Serra%20da%20Mesa%20%20-%20Atlas_Agro.pdf>, acesso em 13/01/2019.

EMATER b. Distribuição de solos de Goiás – Classe de solos dos municípios goiano. **Agência Goiana de Assistência Técnica, Extensão Rural e Pesquisa Agropecuária**, Goiânia, 2016.

Disponível< <http://www2.sieg.go.gov.br/post/ver/226836/mapeamento-desolos-1:250.000>>, acesso 13/11/2019.

ENNING, D.; GARRELF, J. Corrosion of iron by sulfate-reducing bacteria: new views of an old problem. **Applied and Environmental Microbiology**, v.80, n.4, 1226-1236, EUA, 2014.

Disponível< <https://aem.asm.org/content/80/4/1226> >, acesso 22/03/2019.

ESTEVEZ, F.A. Fundamentos de Limnologia. Rio de Janeiro: **Interciência**. 2ª ed 1998.

Disponível<<http://www.scielo.mec.pt/pdf/cpm/v33n1-2/v33n1-2a03.pdf>>, acesso 16/03/2019.

FLEMMING, H.C.; WINGENDER, J. The biofilm matrix. **Nature Reviews Microbiology**. v.8, 623-633, Londres, 2010.

Disponível<https://www.researchgate.net/publication/45440998_The_Biofilm_Matrix>, acesso 13/03/2019.

FREITAS, C.A.; INEZ, G.B.; JOROSKI, R. Projeto piloto de combate as ferrobactérias em poços tubulares no aquífero aluvionar de Amaro Lanari no Vale do Aço – MG. In: **Anais XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**, ABAS, Florianópolis 2002.

Disponível<<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/issue/view/1187>, acesso 16/03/2019.

GARCIA, C.M.; BERTON, M.A.C.; MARANGONI, P.R.D.; ROBL, D.; PIMENTEL, I.C.; DALZOTO, P.; VICENTE, V. Manutenção de usinas hidroelétricas: a influência de microrganismos formadores de biofilmes e de corrosão microbiológica. In: **Anais XX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**, Recife, 2009.

Disponível<<http://www.cgti.org.br/publicacoes/wpcontent/uploads/2016/03/MANUTEN%C3%87%C3%83O-DE-USINAS-HIDROEL%C3%89TRICAS-A-INFLU%C3%8ANCIA-DE-MICROORGANISMOS-FORMADORES-DE-BIOFILMES-E-DE-CORROS%C3%83O-MICROBIOL%C3%93GICA.pdf>>, acesso 24/03/2019.

GENTIL, V. Corrosão. Rio de Janeiro: **LTC Editora**, ed.3, 1996.

HARDER, E. Iron Depositing Bacteria and their Geologic Relations. **Washington Government Printing Office**. EUA, 1919.

HARIF, T.; ELIFANTZ, H.; MARGLIT, E.; HERZBERG, M.; LICHI, T.; MINZ, D. The effect of UV pre-treatment on biofouling of BWRO membranes: a field study. **Desalination and Water Treatment**, v.31, 151-163, EUA, 2011.

Disponível<https://www.researchgate.net/publication/254226366_The_effect_of_UV_pretreatment_on_biofouling_of_BWRO_membranes_A_field_study>, acesso 24/03/2019.

HUNGRIA, M. Microbiologia do Solo. Transformações microbianas de outros elementos, **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, cap 23, 329-340, Campinas, 1992.

Disponível<http://www.esalq.usp.br/departamentos/Iso/arquivos_aula/LSO_400%20LIVRO%20%20MICROBIOLOGIA%20DO%20SOLO.pdf>, acesso 15/10/2019.

JIMÉNEZ, J.A.S.; Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota técnica). **Tecnología en Marcha**, v.28, n.3, 127-136, Costa Rica, 2015.

Disponível<<https://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v28n3/0379-3982-tem-28-03-00127.pdf>>, acesso 16/03/2019.

KER, J.C.; KURI, N.; SHAEFER, C.E.G.R.; TORRADO, P.V. Pedologia – Fundamentos. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, 2012.

LI, X.L.; NARENKUNNAR, J.; RAJASEKAR, A.; TING, Y.P. Biocorrosion of mild steel and copper used in cooling tower water and its control. **3Biotech**, v.8, article 178 Verlag, Alemanha, 2018.

Disponível< <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5847642/>>, acesso 22/03/2019.

LI, Y.; XU, D.; CHEN, C.; LI, X.; JIA, R.; ZHANG, D.; SAND, W.; WANG, F.; GU, T. Anaerobic microbiologically influenced corrosion mechanisms interpreted using bioenergetics and bioelectrochemistry: A review. **Journal of Materials Science & Technology**, v.34, 1713-1718, Shenyang, China, 2018.

Disponível<https://www.researchgate.net/publication/323189315_Anaerobic_Microbiologically_Influenced_Corrosion_Mechanisms_Interpreted_Using_Bioenergetics_and_Bioelectrochemistry_A_Review>, acesso 22/03/2019.

LINDELL, M.J.; GRANALI, W.; TRANVIK, L. J. Effects of sunlight on bacterial growth in lakes of different humic content. **Aquatic Microbial Ecology** 11, 135-141. Alemanha, 1996

Disponível<https://www.researchgate.net/publication/250219911_Effects_of_sunlight_on_bacterial_growth_in_lakes_of_different_humic_content>. acesso 19/09/2020.

LITTLE, B. J.; LEE, J.S. Microbiologically Influenced Corrosion. **John Wiley & Sons**. EUA, 2007.

LITTLE, B.J.; LEE, J.S. Microbiologically influenced corrosion: an update. **International Materials Reviews** vol. 59, n° 7. Reino Unido, 2014.

Disponível <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a612612.pdf>> acesso 28/06/2020

MACEDO, J. Corrosão Custo x Prevenção. **Anais V Simpósio Mineiro de Química, CRQMG**. Belo Horizonte, 2013.

Disponível<<https://docplayer.com.br/1222440-15-09-2013-revisao-corrosao.html>> acesso 14/01/2019.

MARANGONI, P.R.D. **Caracterização de biofilmes formados em superfície metálica**. 2009. 96 p. Dissertação (Mestrado em Microbiologia). Universidade Federal do Paraná, 2010
Disponível< <http://livros01.livrosgratis.com.br/cp126012.pdf> >, acesso 25/03/2019.

MARANGONI, P.R.D.; ROBL, D.; BERTON, M.A.C.; GARCIA, C.M.; BOZZA, A.; PORSANI, M.V.; DALZOTO, P.R.; VICENTE, V.A.; PIMENTEL, I.C. Occurrence of sulphate reducing bacteria (SRB) associated with biocorrosion on metallic surfaces in a hydroelectric power tation in Ibirama (SC) – Brazil. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v.56, n.5, 801-809, Curitiba, 2013.

Disponível< <http://www.scielo.br/pdf/babt/v56n5/11.pdf>>, acesso 16/03/2019.

MELTON, E. D.; SWANNER, E.D., BEHRENS, S.; SCHMIDT, C.; KAPPLER, A. The interplay of microbially mediated and abiotic reactions in the biogeochemical Fe cycle. **Nature Reviews Microbiology**, v12, Reino Unido, 2014

Disponível< <http://college.agrilife.org/rootbiome/wp-content/uploads/sites/38/2015/06/2014-Melton-et-al-microbial-Fe-biogeochem-cycle-Review-nrmicro3347.pdf>>, acesso 19/09/20.

MENOITA, E.; SANTOS, V.; TESTAS, C.; GOMES, C.; SANTOS, A. Biofilms: Knowing the Entity. **Journal of Aging & Inovation**, 1 (2): 23-32. Portugal, 2012.

Disponível <<http://www.journalofagingandinnovation.org/wp-content/uploads/3-Biofilmes-conhecer-a-Entidade.pdf>>, acesso em 19/03/20.

MONROE, D. Looking for chinks in the armor of bacterial biofilms. **PLoS Biology**. v.5, i.11, e.307, 2458-2461, EUA, 2007.

Disponível<<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2071939/>>, acesso 24/03/2019.

MORUZZI, R.B., REALI, M.A.P. Oxidação e remoção de ferro e manganês em águas para fins de abastecimento público ou industrial – uma abordagem geral. **Revista de Engenharia e Tecnologia**. v.4, n. 1, 29-43. Ponta Grossa, 2012.

Disponível<<https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/134886/ISSN217672702012-04-01-29-43.pdf?sequence=1>>, acesso 13/03/2019.

NACE RP-07-75. Standard recommended practice, preparation, installation, analysis and interpretation of corrosion coupons in oilfield operations, **NACE International Institute, Houston**, EUA, 1999.

NELSON, K.L.; BOEHM, A.B.; DAVIES-COLLEY, R.J.; DODD, M.C.; KOHN, T.; LINDEN, K.G.; LIU, Y.; MARACCINI, P.A.; MCNEILL, K.; MITCH, W.A.; NGUYEN, T.H.; PARKER, K.M.; RODRIGUEZ, L.A.; SASSOUBRE, L.M.; SILVERMAN, A.I.; M WIGGINTONN, K.R.; E ZEPPO, R.G. Sunlight-mediated inactivation of health-relevant microorganisms in water: a review of mechanisms and modeling approaches. **Enviromental Science: Processes & Impact**. Londres, 2018.

Disponível<<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2018/em/c8em00047f#!divAbstract>>, acesso 25/02/2020.

OLIVEIRA, E.S.D. **Biocorrosão em cupons de aço carbono expostos à água doce**. 2009. 96 p. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia Industrial). Universidade Federal do Pernambuco, Recife. 2013

Disponível<<https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/13342/1/Edkarlla%20Sousa%20Dantas%20de%20Oliveira.pdf>>, acesso 17/03/2019.

PEDEFERRI, P. Corrosion Science and Engineering. **Springer Nature Switzerland**. Suíça, 2018.

PINTO, D. **Electronic transfer within a microbial fuel cell. Better understanding of Experimental and Structural Parameters at the Interface between Electro-active Bacteria and Carbon-based Electrodes**. Tese (doutorado em química de materiais). Universidade Pierre et Marie Curie – Paris, 2016.

Disponível<<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01481318/document>> acesso 17/04/2019.

PUCHERELLI, S.F.; CLAUDI, R.; PRESCOTT, T. Control of biofouling in hydropower cooling systems using HOD ultraviolet light. **Management of Biological Invasions**, v. 9, n. 4, 451–461, Helsinki, Finlândia, 2018.

Disponível<https://www.reabic.net/journals/mbi/2018/4/MBI_2018_Pucherelli_etal.pdf>, acesso 16/03/2019.

RAY, R.I.; LEE, J.S.; LITTLE, B.J.; GERKE, T.L. The anatomy of tubercles: a corrosion study in a fresh water estuary. **Materials and Corrosion**, v.61, i.12, 993-999, Berlim, 2010.

Disponível < <https://www.d.umn.edu/biology/documents/Oster1.pdf> >, acesso 24/03/2019.

ROBEGE, P.R. Corrosion Engineering Principles and Practice. **The McGraw-Hill Companies**, EUA, 2008.

SATHORN, C.; PARASHOS, P.; MESSER, H. Antibacterial efficacy of calcium hydroxide intracanal dressing: a systematic review and meta-analysis. **International Endodontic Journal**. Reino Unido, 2007

Disponível<<https://www.endoexperience.com/documents/SathornCaOH2Review2007.pdf>> acesso 18/09/2020.

SCHWERTEZER, P. A. Fundamentals of Corrosion – mechanisms, causes and preventative methods. **Taylor and Francis Group LLC**. EUA, 2010

SHINZATO, E. Projeto APA Sul RMBH: estudos do meio físico, pedologia. CPRM/EMBRAPA/SEMAD. **Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais**. Belo Horizonte, 2005.

Disponível<http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/10218/rel_apa_sulrmbhv5a.pdf?sequence=24>, acesso 15/11/2019.

TELEGID, J.; SHABAN, A.; VASTAG, G. Biocorrosion – Steel. Encyclopedia of Interfacial Chemistry, 28–42. **Elsevier**, Holanda, 2018

Disponível<file:///C:/Users/Mineo%20Hirai/Downloads/AS6337475190456341528108591060_content_1.pdf> acesso 18/09/2020.

UHLIG, H.H. Corrosion y control de corrosion. Espanha: **Urmo SA de Ediciones**, 1975
Disponível<https://www.academia.edu/8619523/CORROSION_AND_CORROSION_CONTROL_An_Introduction_to_Corrosion_Science_and_Engineering>, acesso 07/03/2020.

VIDELA, H.A. Biocorrosão, biofouling e biodeterioração de materiais. São Paulo: **Editora Edgard Blücher**, 2003.

VIDELA, H. A.; HERRERA, L.K. Microbiologically influenced corrosion: looking to the future. **International Microbiology**, v.8, 169-180, Madri, 2005.
Disponível<https://pdfs.semanticscholar.org/42ef/45cba99ed2ec45b080ab7e23ff9c76103fbb.pdf?_ga=2.167601214.1446239037.1584092479-281874414.1583575737>, acesso 16/03/2019.

Anexo A - Caso da hidrelétrica Pedra do Cavalo.

A usina está instalada na Bahia, a 45 km de Feira de Santana, inserida na barragem Pedra do Cavalo, no rio Paraguaçu, tendo o município de Cachoeira à margem esquerda e Governador Mangabeira à margem direita, figura 50. O reservatório que possui 180 km² e volume útil total de 4.546.000 m³; foi formado em agosto de 1984 e sendo sua destinação de uso múltiplo: controle das cheias das cidades à jusante (Cachoeira e São Félix); recurso hídrico de abastecimento de água para Salvador; suporte para projetos de irrigação. Em dezembro de 2004 a Votorantim Cimentos iniciou a operação comercial e em janeiro 2005 a segunda unidade, cada uma com capacidade de 80 MW.

No primeiro ano de operação da usina foi verificada corrosão acelerada nas paredes internas do conduto forçado. A agressividade desta corrosão atacou até porcas de aço inox e revestimento galvanizado a fogo nas tubulações do sistema de resfriamento do gerador. Foi instalado como meio protetor um sistema de proteção catódica por corrente impressa no interior dos condutos forçados e nas comportas segmento do vertedouro. Porém, a velocidade de fluxo e corrosão galvânica nos suportes do circuito de corrente impressa foi necessária remoção do sistema do interior do conduto forçado.

Outro sistema instalado foi de injeção de produtos químicos biocidas, mas estes não tiveram sucesso efetivo dado ao regime intermitente de operação da usina. Como o abastecimento de água era prioridade, no período de seca a usina permanecia inoperante por meses, porém em estado de prontidão os condutos forçados e tubulações permaneciam cheios de água estagnada. Esta condição atípica de operação de usina potencializou a corrosão generalizada dos equipamentos.

As situações são ilustradas neste anexo onde todas as figuras são do acervo do autor.



Figura 50: Vista da casa de força da Usina Pedra do Cavalo



Figura 51: mostra de substrato de tubérculo.



Figura 52: Desmontagem para inspeção da cuba de alojamento da vedação de eixo de turbina

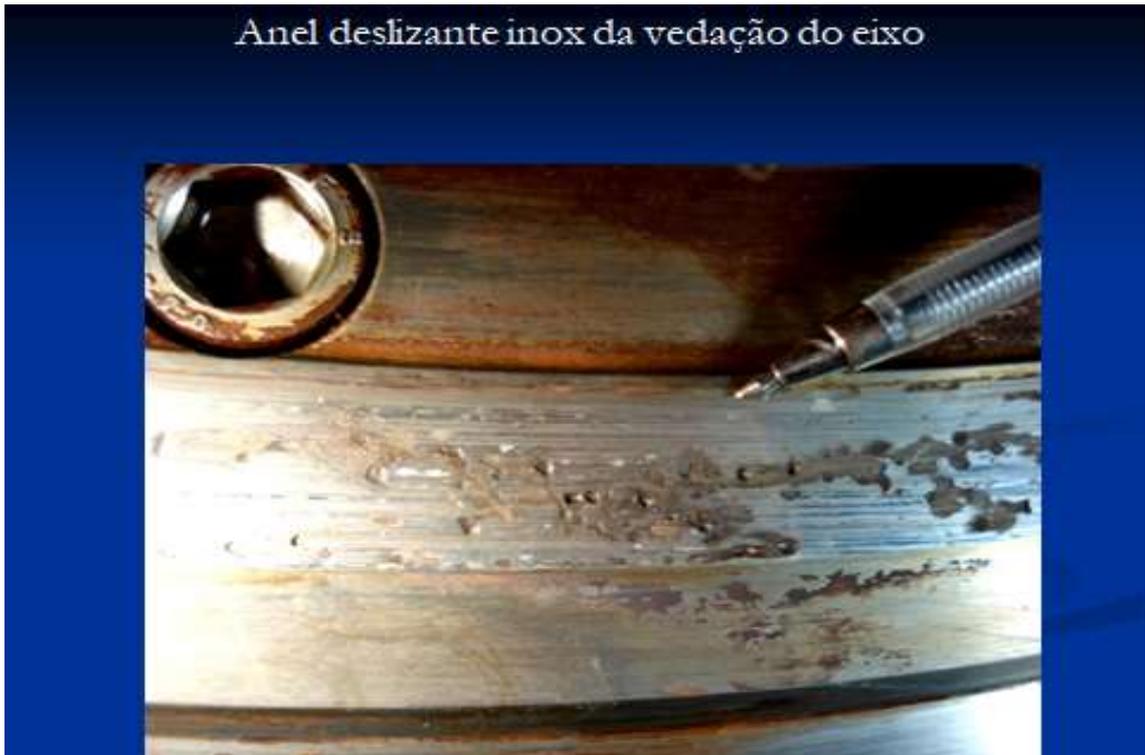


Figura 53: Corrosão na face de vedação de contato com cinta de grafite.



Figura 54: Corrosão na porca de fixação da vedação do eixo.



Figura 55: Corrosão perimetral do eixo dentro da caixa de vedação do eixo.



Figura 56: Detalhe da corrosão em forma laminar.



Figura 57: Situação de biocorrosão na face da comporta segmento.



Figura 58: Instalação de sistema de proteção catódica na comporta.
No detalhe a caixa de alojamento do anodo de sacrifício de titânio.



Figura 59: Instalação de corrente impressa no conduto forçado



Figura 60: Uma das falhas do sistema instalado.



Figura 61: Atrito desgastou proteção e ocasionou curto circuito do sistema.



Porca inox corroída

Porcas inox novas.
Comum e a passivada
(escura).

Figura 62: Ataque corrosivo em porca inox *AISI* 304 e diferença entre porca passivada.



Figura 63: Tubérculos em comporta ensecadeira provisória sem pintura



Figura 64: Situação do conduto forçado sem pintura material SAR-50 de 19 mm de espessura.



Figura 65: Corrosão removeu até cordão de acabamento da solda após 6.836 horas de operação.



Figura 66: Corrosão no teto do pré-distribuidor



Figura 67: Tubérculos no vértice de palheta do pré-distribuidor com 360 h de operação.

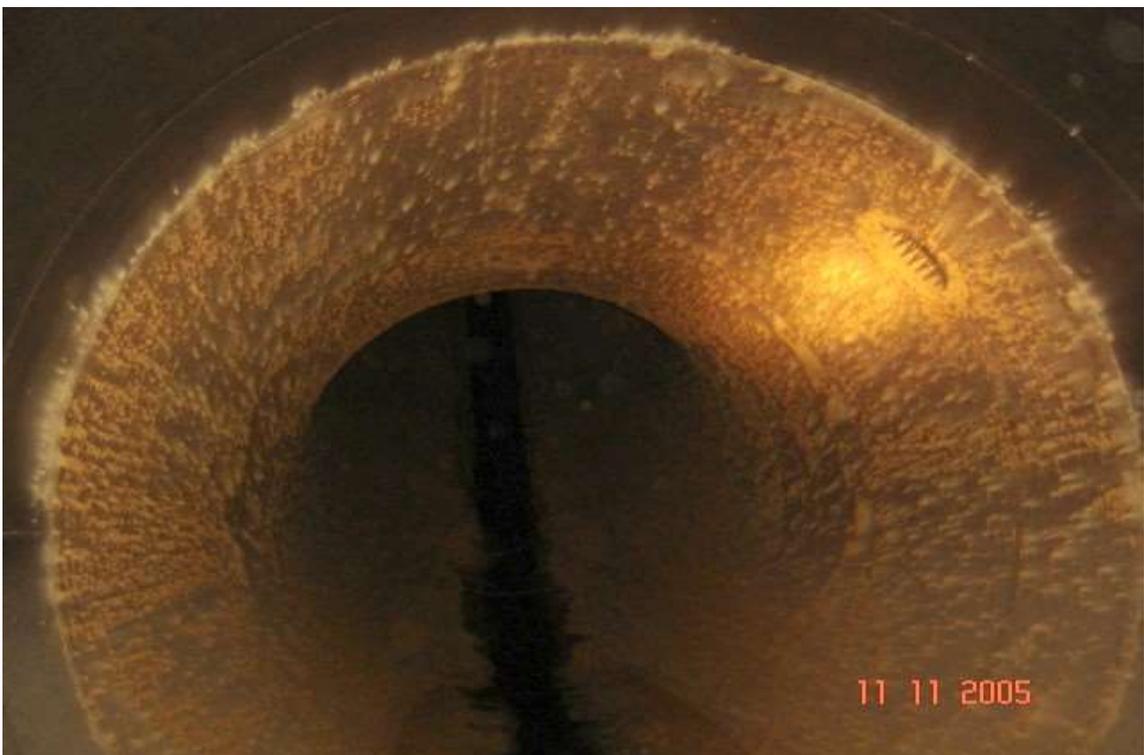


Figura 68: Visão da fronteira do pré-distribuidor pintado com conduto forçado sem pintura.



Figura 69: Corrosão na parte superior do aro de saída da turbina



Figura 70: Erosão no aro de saída comparado ao palito de fósforo



Figura 71: Comporta vagão inspeção após 1.240 horas de operação



Figura 72: Corrosão no alojamento do eixo de rolete da comporta.



Figura 73: Corrosão no alojamento de parafusos de rodas.



Figura 74: Corrosão na face de rolamento da roda da comporta.



Figura 75: Na esquerda, arruela galvanizada a fogo após uma semana de imersão profunda no lago usina



Figura 76: Edícula e baias de tanques de produtos químicos biocidas.



Figura 77: Sala de painel e bombas dosadoras para injeção de inibidores químicos.



Figura 78: Ponto de injeção após filtro autolimpante do sistema de água de resfriamento.

F I M