



**UNIVERSIDADE DO ESTADO DA BAHIA - UNEB**  
**DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA I**

**CÁLCULO DA TAXA DE CORROSÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS**

Salvador  
2024



UNIVERSIDADE DO ESTADO DA BAHIA - UNEB  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA I

CÁLCULO DA TAXA DE CORROSÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS

Fase intermediária do projeto apresentado como parte dos requisitos para obtenção de parte da nota da II unidade da disciplina Computação Aplicada a Engenharia, do curso de Engenharia de Produção Civil da Universidade do Estado da Bahia - UNEB.

**Discentes:** Clara Ferreira Santos e João Vinícius Duarte  
**Orientador:** Profº Drº Robson Marinho da Silva

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>5</b>
1.1	Motivações e justificativas . . . . .	5
1.2	Objetivo . . . . .	5
1.3	Metodologia . . . . .	6
1.4	Cronograma . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Referencial teórico</b>	<b>6</b>
2.1	Corrosão . . . . .	6
2.2	Tipos de Corrosão . . . . .	7
2.3	Taxa de Corrosão . . . . .	11
2.4	Avaliação da agressividade da água: Incrustações e Corrosão . . . . .	11
2.5	Python . . . . .	12
<b>3</b>	<b>Proposta do programa</b>	<b>14</b>
3.1	Objetivo . . . . .	14
3.2	Descrição Narrativa . . . . .	14
<b>4</b>	<b>Código em Python</b>	<b>16</b>
4.1	Biblioteca . . . . .	19
<b>5</b>	<b>Rede de Petri</b>	<b>20</b>
5.1	Rede de Petri modelada no software HPSim . . . . .	21
5.2	Rede de Petri Colorida modelada no software CPN Tools . . . . .	22
5.3	Fluxos e processos . . . . .	23
5.4	Descrição do Fluxo de Trabalho: . . . . .	24
5.5	Categorias e Resultados . . . . .	24
<b>6</b>	<b>Considerações Parciais</b>	<b>24</b>

# Lista de Figuras

1	Corrosão Uniforme . . . . .	7
2	Corrosão Por Placas . . . . .	8
3	Corrosão Alveolar . . . . .	8
4	Corrosão Puntiforme/Pite . . . . .	8
5	Corrosão Transgular . . . . .	9
6	Corrosão Intergranular . . . . .	9
7	Corrosão Filiforme . . . . .	9
8	Corrosão Esfoliação . . . . .	10
9	Corrosão Gráfica . . . . .	10
10	Corrosão por Dezincificação . . . . .	10
11	Empolamento pelo hidrogênio . . . . .	11
12	Exemplo de placas de metais diferentes submetidas a mesma condição climática para comparação. . . . .	11
13	Resultado do IER para a água analisada. . . . .	12
14	Linguagem de programação em Python . . . . .	13
15	Script em Python . . . . .	16
16	Script em Python . . . . .	17
17	Script em Python . . . . .	18
18	Funcionamento do programa . . . . .	18
19	Biblioteca . . . . .	19
20	Biblioteca . . . . .	20
21	Rede de Petri (HPSim) . . . . .	21
22	Rede de Petri antes do disparo (CPN Tools) . . . . .	22
23	Rede de Petri antes do disparo (CPN Tools) . . . . .	22
24	Rede de Petri após do disparo (CPN Tools) . . . . .	23
25	Rede de Petri após do disparo (CPN Tools) . . . . .	23

## Lista de Tabelas

1	Níveis de agressividade da água . . . . .	14
---	---	----

## Resumo

A análise das manifestações patológicas aborda as principais razões por trás das condições patológicas no aço, desde suas origens até os métodos de prevenção e salvaguarda. A presença de anomalias patológicas resulta na deterioração do aço, levando-o a não atender mais aos propósitos para os quais foi concebido. A corrosão é a principal anomalia encontrada no aço, propagando-se pela superfície em contato com agentes corrosivos e resultando na degradação do material metálico. A negligência de medidas preventivas e de reparação compromete o desempenho do aço, acarretando sérios riscos à segurança, portanto, é crucial garantir a manutenção adequada das estruturas metálicas desde as fases iniciais de projeto. No contexto da engenharia de materiais e estrutural, a criação de programas computacionais dedicados ao cálculo da taxa de corrosão em estruturas metálicas assume uma relevância crescente e estratégica. A corrosão, um processo natural e inevitável na interação dos metais com o ambiente, representa uma das principais causas de degradação e falha estrutural em diversos setores industriais e de infraestrutura. Nesse sentido, a disponibilidade de ferramentas computacionais capazes de prever e quantificar a taxa de corrosão é fundamental para a tomada de decisões informadas em relação ao gerenciamento de ativos, planejamento de manutenção e otimização de recursos.

# 1 Introdução

A corrosão é um fenômeno espontâneo e natural de reações químicas ou eletroquímicas que ocorrem na interface entre o meio corrosivo e o metal. Esse processo representa um meio de deterioração do metal, propagando-se pela superfície e afetando todos os metais sujeitos à corrosão, especialmente em ambientes agressivos. No Brasil, as construções de estruturas metálicas enfrentam desafios significativos devido às condições climáticas variáveis. A região experimenta amplas oscilações de temperatura, frequentemente no mesmo dia, além de volumes consideráveis de precipitação e poluição. Esse ambiente hostil pode causar diversas anomalias nas estruturas metálicas, tornando-se um fator preocupante para sua durabilidade e integridade. Além disso, representa um dos maiores desafios em termos econômicos, ecológicos e de segurança dentro da sociedade quando se trata de lidar com substâncias metálicas. Os gastos imediatos associados a esse material incluem a busca por materiais mais duráveis, aumentos na espessura, aplicação de revestimentos protetores, uso de inibidores de corrosão e métodos eletroquímicos, inspeções regulares, manutenção e reparos frequentes, além da necessidade de monitorar as condições ambientais e de infraestrutura.

Por esse motivo, a avaliação e o cálculo da taxa de corrosão em estruturas metálicas representam um elemento fundamental na engenharia, bem como na gestão de ativos industriais e de infraestrutura. A corrosão, fenômeno intrínseco à interação de metais com o ambiente circundante, é uma das principais causas de deterioração e falha estrutural em sistemas metálicos, acarretando consequências econômicas, ambientais e de segurança significativas. Portanto, ao longo deste estudo, será explorado o papel do Python e da rede de Petri colorida na concepção de um programa capaz de estimar a taxa de corrosão em estruturas metálicas e determinar os sinais de agressividade da água, a partir da análise dos seus parâmetros, para o cálculo do pH de saturação e do índice de Ryznar (IER). Mostrando que compreender e quantificar a taxa de corrosão é primordial para o desenvolvimento de estratégias eficazes de mitigação de danos.

## 1.1 Motivações e justificativas

O desenvolvimento de um programa em Python para calcular taxas de corrosão e avaliar a qualidade da água é motivado pela necessidade de ferramentas precisas, eficientes e acessíveis na engenharia civil. Este programa aborda questões relacionadas à integridade estrutural, a identificação precoce de altas taxas de corrosão e os níveis de agressividade da água, permitindo a tomada de medidas preventivas e contribuindo, dessa forma, para uma infraestrutura mais segura e durável.

Sendo assim, a criação de um programa em linguagem Python a partir de uma modelagem em Rede de Petri colorida com o auxílio do software CPNTools para o cálculo da taxa de corrosão e avaliação da agressividade da água (capacidade de ser incrustante ou corrosiva) em estruturas metálicas é crucial para a análise correta do risco de degradação, implementação de estratégias de manutenção adequadas, a segurança operacional e a sustentabilidade de infraestruturas metálicas em diversas áreas da engenharia.

## 1.2 Objetivo

O objetivo geral deste projeto de pesquisa é elaborar um programa através da linguagem Python, a partir da modelagem em rede de Petri colorida, capaz de realizar cálculo da taxa de corrosão em estruturas metálicas, estabelecendo as impressões de agressividade da água por meio da análise de seus parâmetros, visando ao cálculo do pH de saturação e do índice de Ryznar (IER). Espera-se, dessa forma, um script capaz de executar os cálculos da maneira correta e confiável, que auxilie na compreensão, previsão e redução dos efeitos

corrosivos sobre materiais metálicos, contribuindo assim para o desenvolvimento de soluções mais eficazes na engenharia de materiais e estrutural.

### 1.3 Metodologia

Para realizar os estudos propostos, conforme consta nos objetivos, pretende-se seguir os seguintes passos:

1. Aprofundamento teórico de autores que versaram sobre o cálculo de taxa de corrosão e dos níveis de agressividade da água;
2. Análise de exemplos práticos;
3. Modelagem do script preliminar em rede de Petri do programa no software HPSim;
4. Modelagem em rede de Petri colorida do programa reformulado no software CPN Tools;
5. Verificar as funções do Python para utilização no programa;
6. Teste no programa realizado para averiguar o desempenho.

### 1.4 Cronograma

	30 dias	60 dias	90 dias
Definição do projeto	x		
Aprofundamento teórico	x		
Análise de exemplos práticos	x		
Verificar as funções do Python para utilização no programa		x	
Teste no programa realizado para averiguar o desempenho		x	
Finalização do Fase 1 do projeto		x	
Apresentação do pré-projeto		x	
Modelagem 1 da rede de petri preliminar no software HPSim		x	
Modelagem 2 da rede de Petri no software CPN Tools		x	
Reformulação do programa no Python		x	
Teste no programa para averiguar o desempenho		x	
Finalização da Fase Intermediária do projeto			x

## 2 Referencial teórico

### 2.1 Corrosão

De acordo com Gentil [2007], a corrosão é definida como a deterioração de um material por ação química ou eletroquímica do meio ambiente juntamente ou não com esforços mecânicos (tração, compressão, flexão e torção).

A corrosão também pode ocorrer em materiais não-metálicos, por exemplo, na borracha, madeira, concreto e polímeros. Neste caso, a corrosão ocorre por meio da ação química ou térmica do meio sobre o material. A perda da elasticidade da borracha, devido à oxidação por ozônio, altera suas propriedades; as madeiras que são expostas a elevados teores de umidade, liberam vapores ácidos orgânicos, reduzindo sua resistência mecânica; e a deterioração do cimento do tipo Portland, o qual é empregado no concreto, é causada pela ação dos íons sulfato. Todos esses fenômenos são considerados corrosão, mas o termo mais empregado para designá-los é degradação Callister [2000].



Assim, quando ocorre a deterioração do metal devido ao processo de oxidação, inicia-se o fenômeno da corrosão. Em um ciclo negativo, ocorre um aumento na perda do metal, que se torna cada vez mais vulnerável aos danos resultantes do contato com o ambiente. Se o metal contiver ferro em sua composição, isso resulta na formação de ferrugem. Quando os metais ferrosos estão oxidados e corroídos, começam a produzir hidróxido ferroso, levando à formação da camada avermelhada conhecida como ferrugem. A ferrugem compromete a integridade do metal e, em alguns casos, torna a sua recuperação inviável, dependendo da extensão do dano.

Segundo Wolynec [2003], os mecanismos eletroquímicos ocorrem em reações químicas que envolvem transferência de carga ou elétrons por meio de uma interface ou eletrólito. A corrosão eletroquímica é uma ação espontânea que pode ocorrer quando o metal se encontra em conexão com um eletrólito, onde ocorrem simultaneamente os processos anódico e catódico.

Os metais raramente são encontrados no estado puro. Eles quase sempre são encontrados em combinação com um ou mais elementos não-metálicos presentes no ambiente. Minérios são, de modo geral, formas oxidadas do metal. Os fenômenos de corrosão de metais envolvem uma grande variedade de mecanismos que, no entanto, podem ser reunidos em quatro grupos, a saber:

- Corrosão em meios aquosos (90)
- Oxidação e corrosão quente (8)
- Corrosão em meios orgânicos (1,8)
- Corrosão por metais líquidos (0,2)

Entre parênteses está indicada, de forma estimada, a porcentagem de cada um dos tipos de corrosão. A partir disso, é possível observar que de fato o meio mais propício para que a corrosão ocorra é meio exposto a líquidos.

## 2.2 Tipos de Corrosão

A corrosão em material metálico pode ser classificada em 11 tipos: uniforme, por placas, alveolar, puntiforme ou por pites, intergranular, transgranular, filiforme, esfoliação, corrosão gráfitica, dezincificação, empoamento pelo hidrogênio Gentil [2007] . Sendo definidos da seguinte maneira:

### A. Uniforme

Corrosão que se processa em toda extensão da superfície, ocorrendo perda uniforme de espessura. Segundo Gentil [2007], esta terminologia é usada, por alguns, como corrosão generalizada, que, porém, não deve ser empregada apenas para corrosão uniforme, pois pode-se ter, também corrosão por pite ou alveolar generalizada, isto é, em toda extensão da superfície corroída.



Figura 1: Corrosão Uniforme

## B. Placas

Esse tipo de corrosão afeta apenas algumas partes do material, ou seja, é localizada em regiões da superfície metálica e não em toda extensão formando placas com escavações. Além disso, determinadas partes se soltam.

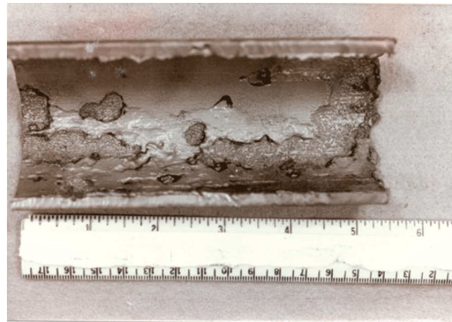


Figura 2: Corrosão Por Placas

## C. Alveolar

Corrosão que se processa na superfície metálica produzindo sulcos ou escavações semelhantes a alvéolos, apresentando fundo arredondado e profundidade geralmente menor que seu diâmetro. Esse tipo de corrosão pode evoluir e ocasionar uma corrosão galvânica. É percebida com frequência em rolos que lidam com valor e cilindros hidráulicos.



Figura 3: Corrosão Alveolar

## D. Puntiforme ou Pite

Corrosão que ocorre em pontos ou pequenas áreas localizadas na superfície metálica produzindo pites, que são cavidades que apresentam o fundo em forma angulosa e profundidade geralmente maior do que o seu diâmetro.



Figura 4: Corrosão Puntiforme/Pite

## E. Transgranular

Este tipo de corrosão se processa nos grãos cristalinos da rede cristalina do material metálico, o qual, pela perda de suas propriedades mecânicas poderá fraturar à menor sollicitação mecânica, assim como no caso da corrosão intergranular, sendo que seus efeitos são muito mais catastróficos que o caso da corrosão intergranular.

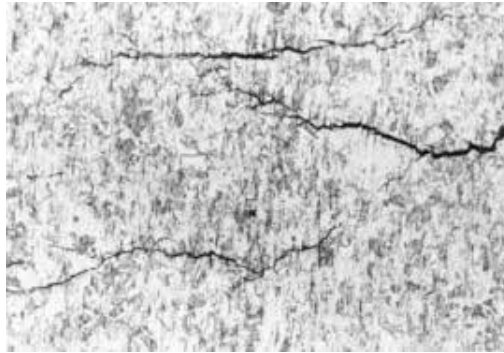


Figura 5: Corrosão Transgular

#### F. Intergranular

Este tipo de corrosão localiza-se entre os grãos da estrutura cristalina do material metálico, o qual perde suas propriedades mecânicas e pode fraturar quando submetido a esforços mecânicos menores que o esperado, como é o caso da corrosão sob tensão fraturante (stress corrosion cracking, SCC).

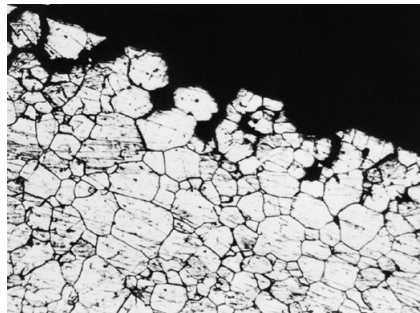


Figura 6: Corrosão Intergranular

#### G. Filiforme

Este tipo de corrosão se processa sob a forma de finos filamentos, mas não profundos, que se propagam em diferentes direções e que não se cruzam.



Figura 7: Corrosão Filiforme

#### H. Esfoliação

A corrosão se processa de forma paralela à superfície metálica. Ocorre em chapas ou componentes extrudados que tiveram seus grãos alongados e achatados.



Figura 8: Corrosão Esfoliação

#### **I. Grafítica**

O ferro fundido cinzento sofre esse tipo de corrosão, em temperatura ambiente, com a conversão do ferro metálico, deixando a área corroída com aspecto escuro, característico da grafita, que fica intacta e que pode ser facilmente retirada com espátula.

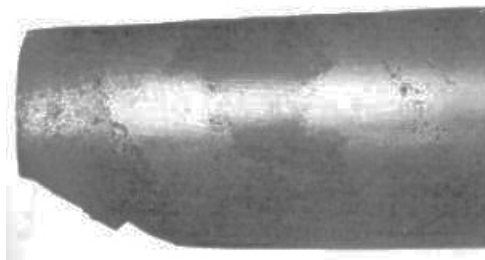


Figura 9: Corrosão Grafítica

#### **J. Dezincificação**

Essa corrosão ocorre em ligas de cobre-zinco (latões), corroendo, preferencialmente, o zinco e observando-se o aparecimento de regiões com coloração avermelhada, característica do cobre, diferenciando da coloração amarela típica dos latões.



Figura 10: Corrosão por Dezincificação

#### **K. Empolamento pelo hidrogênio**

Se o hidrogênio for gerado na superfície de um material, ele migra para o interior e acumula-se em defeitos existentes, como laminações ou inclusões não metálicas. O hidrogênio acumulado passa da forma atômica a molecular e provoca o aparecimento de altas pressões no interior da falha. Quando o acúmulo de hidrogênio ocorre em falhas próximas à superfície, a deformação pode provocar empolamentos, sendo comum denominar este processo de empolamento pelo hidrogênio.





Figura 11: Empolamento pelo hidrogênio

## 2.3 Taxa de Corrosão

A taxa de corrosão é uma medida que avalia a rapidez com que um metal se deteriora em determinado ambiente. Essencialmente, representa a velocidade na qual a corrosão afeta o metal, levando em consideração as condições ambientais, o tipo de metal e as características da peça em análise. Esses resultados desempenham um papel crucial na determinação do metal mais adequado para ser empregado em um ambiente específico. Por exemplo, a necessidade de manutenção em estruturas metálicas é substancialmente maior em regiões costeiras em comparação com áreas do interior do Brasil, devido à influência da umidade e da salinidade do ar. Utilizando os dados obtidos por meio desses cálculos, é viável estabelecer um planejamento de manutenção que atenda às exigências de setores industriais, entre outros. A avaliação correta das taxas de corrosão é, de modo geral, de grande importância para a determinação da vida útil provável de equipamentos e instalações industriais.



Figura 12: Exemplo de placas de metais diferentes submetidas a mesma condição climática para comparação.

## 2.4 Avaliação da agressividade da água: Incrustações e Corrosão

A intensidade das corrosões e incrustações varia de acordo com a composição e características hidroquímicas da água e das condições operacionais. O caráter agressivo das águas é proveniente das condições geológicas, predominantemente ácidas, que tornam as águas pouco mineralizadas, com pH ácido e com baixa dureza. Trata-se da capacidade de dissolver o carbonato de cálcio na presença de gás carbônico e à medida que a temperatura aumenta, o seu potencial agressivo diminui Uechi et al.

Já o processo de incrustação pode ser definido como a deposição de materiais, mais ou menos aderentes, nas diversas partes constituintes da captação. A corrosão pode auxiliar no processo de incrustação ao liberar metais que podem ser precipitados sob a forma de óxidos, hidróxidos e carbonatos. As incrustações mais frequentes são as de carbonato de cálcio. Para avaliar a água em termos de agressividade e incrustação são utilizados métodos indiretos de avaliação como o Índice de Saturação e o Índice de Ryznar (IER). A determinação das características químicas da água pode auxiliar na adoção de medidas e procedimentos específicos que minimizarão esses problemas e facilitarão na manutenção.

Pelo Índice de saturação, o valor negativo corresponde ao caráter agressivo das águas, ou seja, tendência da água em dissolver depósitos cálcicos, havendo subsaturação de  $\text{CaCO}_3$ . Caso contrário, se for positivo, corresponde ao caráter incrustante das águas, tendendo a formar precipitados e causar obstruções. Nesse caso há a supersaturação de  $\text{CaCO}_3$ . Quando o LSI se apresenta nulo, há um equilíbrio calco- carbônico, tornando a água nem incrustante e nem agressiva.

O índice de Ryznar indica a probabilidade de ocorrência de corrosão, com base no pH e  $\text{pH}_s$ . A severidade da corrosão ou precipitação, ou seja, a relação do estado de saturação do carbonato de cálcio e a camada formada podem ser classificadas pelo Índice de Estabilidade proposto por Ryznar em 1944, onde  $\text{pH}_s$  é o pH teórico da água que esta alcançaria em equilíbrio com o  $\text{CaCO}_3$  (pH de saturação) e o  $\text{pH}_a$  é o pH atual da água.

Os valores obtidos através do Índice de Ryznar podem ser interpretados da seguinte forma:

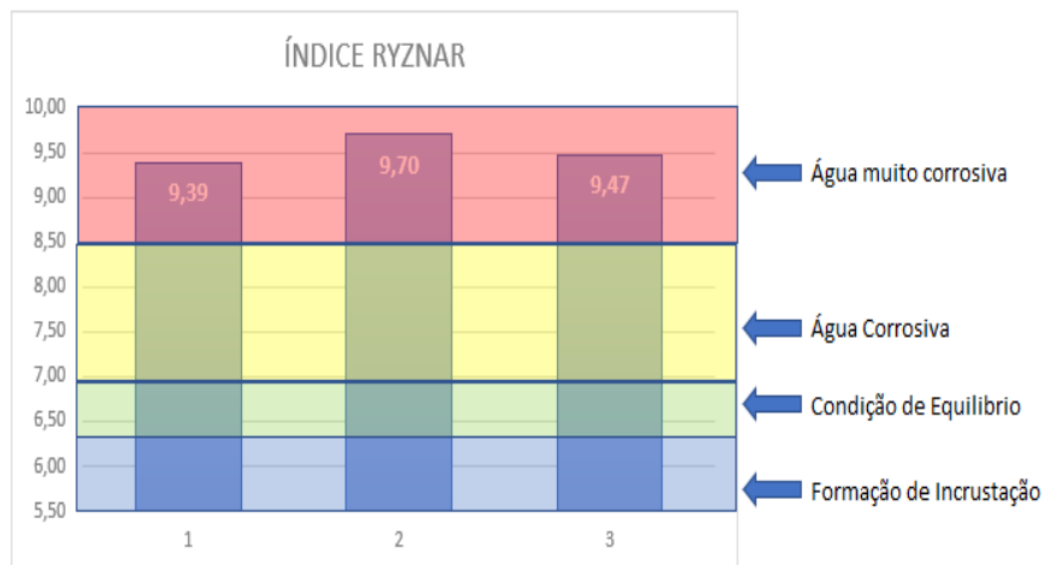


Figura 13: Resultado do IER para a água analisada.

## 2.5 Python

A linguagem de programação Python é muito interessante como primeira linguagem de programação devido à sua simplicidade e clareza. Embora simples, é também uma linguagem poderosa, podendo ser usada para administrar sistemas e desenvolver grandes projetos. É uma linguagem clara e objetiva, pois vai direto ao ponto, sem rodeios Menezes [2010]. Emergindo como uma ferramenta versátil e eficaz na criação de programas computacionais destinados, por exemplo, a calcular a taxa de corrosão de estruturas metálicas.

A versatilidade do Python é uma característica fundamental que o torna adequado para o desenvolvimento de programas voltados à análise da corrosão. Sua sintaxe clara e legível facilita a implementação de algoritmos complexos, proporcionando uma compreensão intuitiva e eficiente das operações realizadas no cálculo da taxa de corrosão. Essa clareza na codificação é essencial para a transparência e a replicabilidade dos resultados obtidos, aspectos cruciais no contexto acadêmico e científico. Segundo Menezes [2010], a linguagem Python foi escolhida por simplificar o trabalho de aprendizado e fornecer grande poder de programação. Como é um software livre, disponível praticamente para qualquer tipo de computador, sua utilização não envolve a aquisição de licenças de uso, muitas vezes a um custo proibitivo.

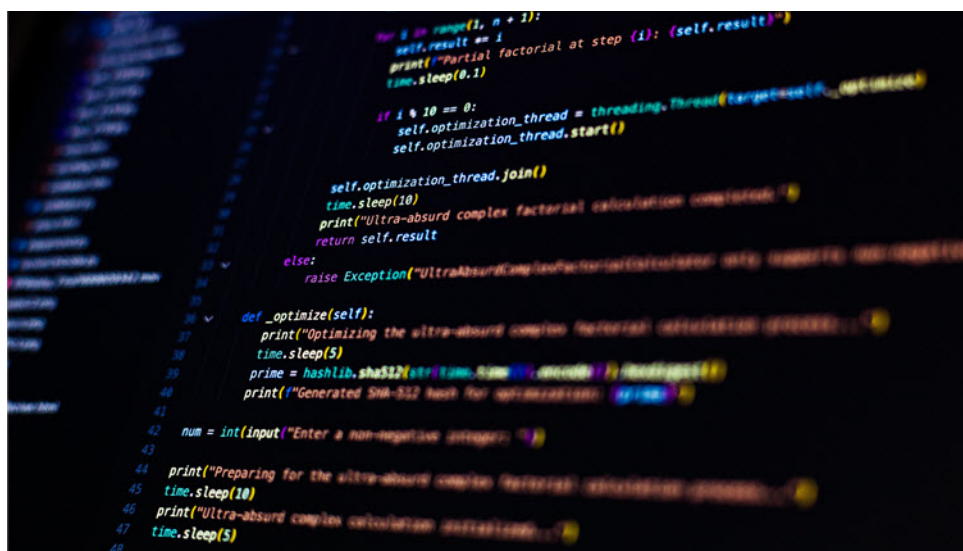


Figura 14: Linguagem de programação em Python

De acordo com Cruz [2015], o uso do Python é importantíssimo, visto que tal linguagem conta com uma vasta biblioteca-padrão e documentação, as quais possibilitam que muitas coisas sejam feitas sem dependências adicionais, o que por sua vez resulta em um rico ecossistema de melhoria da produtividade dos desenvolvedores. Essas bibliotecas reduzem significativamente o tempo e o esforço necessários para implementar algoritmos complexos, permitindo que os pesquisadores se concentrem na interpretação e na validação dos resultados obtidos.

A comunidade de desenvolvedores Python é outro aspecto relevante a ser considerado, uma vez que contribui ativamente com o desenvolvimento e aprimoramento contínuo de bibliotecas e ferramentas especializadas para análise da corrosão. A colaboração entre os membros da comunidade enriquece o ecossistema de desenvolvimento em Python, promovendo a troca de conhecimentos e experiências e incentivando a inovação e o avanço científico.

A capacidade de integração do Python com outras ferramentas e tecnologias também é uma vantagem significativa. A linguagem Python pode ser facilmente integrada a interfaces gráficas e bancos de dados, proporcionando uma experiência de usuário intuitiva e facilitando a análise e o gerenciamento de grandes volumes de dados experimentais. Essa integração eficiente aumenta a acessibilidade e a usabilidade dos programas desenvolvidos, ampliando assim seu potencial de aplicação em pesquisas acadêmicas e industriais.

Logo, o Python desempenha um papel fundamental na criação de programas, à exemplo do cálculo da taxa de corrosão, oferecendo uma combinação única de versatilidade, eficiência e recursos especializados. Sua sintaxe clara, vasta gama de bibliotecas científicas, comunidade ativa e capacidade de integração o tornam uma escolha ideal para pesquisadores e acadêmicos que buscam desenvolver ferramentas poderosas e eficazes para análise e previsão da corrosão em materiais metálicos.

## 3 Proposta do programa

### 3.1 Objetivo

A proposta do programa, nessa fase intermediária, consiste no cálculo da taxa de penetração da corrosão (TPC) ou a perda da espessura do material de estruturas metálicas, possibilitando a categorização da taxa de corrosão em função de sua intensidade. Além disso, o programa faz a análise e classificação da qualidade da água, calculando o pH de saturação e o Índice de Estabilidade de Ryznar (IER), os valores obtidos para a água investigada sob o parâmetro proposto por Ryznar poderá ser analisado através da relação entre o valor obtido para o IER e o estágio da corrosão que são indicadores importantes para informar sobre a propensão da água a causar incrustações ou ser agressiva, o que é essencial para o tratamento adequado e a proteção das estruturas metálicas.

Faixa considerada	Classificação da água
IER inferiores a 6,5	não incrustante e agressiva
IER entre 6,5 e 7	não incrustante e ligeiramente agressiva
IER está entre 7 e 8	incrustante e ligeiramente agressiva
IER superiores a 8	água é incrustante

Tabela 1: Níveis de agressividade da água

### 3.2 Descrição Narrativa

#### 1. Importação de módulos:

- O programa começa importando o módulo “metal potenciais”, que contém as funções para obter propriedades de metais.
- Importa o módulo “math” para realizar cálculos matemáticos, como “log10”, necessárias para cálculos químicos.

#### 2. Definição da classe “Metal”

- A classe “Metal” é definida para representar as propriedades e cálculos relacionados à corrosão de metais.
- O método “init” inicializa os atributos da classe “metal” (tipo de metal), “corrente” (corrente de corrosão em amperes), “area” (área do eletrodo em  $\text{cm}^2$ ) e “aquoso” (indicador se o metal está em meio aquoso).
- Define a constante de Faraday “F” (96485 C/mol), usada nos cálculos de corrosão.

#### 3. Método para calcular a taxa de corrosão::

- O método “calcular taxa corrosao” obtém as propriedades do metal (“E padrao”, “massa molar”, “n”) usando a função “obter propriedades metal” do módulo “metal potenciais”.
- Verifica se o metal foi encontrado na tabela de potenciais padrão. Se não, imprime uma mensagem de erro e retorna “None”.
- Calcula a taxa de oxidação em g/s por unidade de área e retorna esse valor.

#### 4. Método para classificar a corrosão:

- O método “classificar corrosao” classifica a taxa de corrosão em “Alto”, “Moderado” ou “Baixo” com base no valor da taxa fornecida.

#### 5. Definição da classe “Agua”:

- A classe “Agua” é definida para realizar cálculos relacionados à qualidade da água.
- O método “calcular pHs” calcula o pH de saturação (pHS) usando temperatura, STD (Sólidos Totais Dissolvidos), concentração de  $\text{Ca}^{+2}$  de  $\text{CaCO}_3$ , e alcalinidade de  $\text{CaCO}_3$ .



- Utiliza funções matemáticas como “math.log10” para calcular os termos.
- 6. Método para calcular o Índice de Estabilidade de Ryznar (IER):**
- O método “calcular IER” calcula o Índice de Estabilidade de Ryznar (IER) com base no pH de saturação (pHS) e o pH real da água.
- 7. Método para classificar a água:**
- O método “classificar água” classifica a água em quatro categorias com base no valor do IER.
- Por exemplo:
- Com base no Índice de Estabilidade de Ryznar (IER), o programa determina o nível de agressividade da água.
  - Para valores de IER inferiores a 6,5, a água é classificada como “não incrustante e agressiva”.
  - Para valores de IER entre 6,5 e 7, a água é considerada “não incrustante e ligeiramente agressiva”.
  - Quando o IER está entre 7 e 8, a água é identificada como “incrustante e ligeiramente agressiva”.
  - Caso contrário, programa imprime “água é incrustante.”.
- 8. Solicitando entradas do usuário:**
- O programa solicita entradas do usuário para o metal e suas propriedades, bem como para a análise da água.
- 9. Instanciando a classe “Metal” e calculando a taxa de corrosão:**
- Cria uma instância da classe “Metal” com os dados fornecidos pelo usuário.
  - Chama o método “calcular taxa corrosao” para calcular a taxa de corrosão.
  - Se a taxa de corrosão for calculada com sucesso, chama o método “classificar corrosao” para determinar o nível de corrosão e imprime os resultados.
- 10. Calculando pHS e IER:**
- Usa os métodos estáticos da classe “Água” para calcular o pH de saturação (pHS), o Índice de Estabilidade de Ryznar (IER) e a classificação da água.
  - Imprime os resultados para o usuário.

## 4 Código em Python

```
1  import metal_potenciais
2  import math
3  class Metal:
4      def __init__(self, metal, corrente, area, aquoso):
5          self.metal = metal
6          self.corrente = corrente
7          self.area = area
8          self.aquoso = aquoso
9          self.F = 96485 # Constante de Faraday em C/mol
10
11     def calcular_taxa_corrosao(self):
12         E_padrao, massa_molar, n = metal_potenciais.obter_propriedades_metal(self.metal)
13
14         if E_padrao is None:
15             print("Metal não encontrado na tabela de potenciais padrão.")
16             return None
17
18         # Taxa de oxidação em g/s por unidade de área
19         taxa_ox = (self.corrente * massa_molar) / (n * self.F * self.area)
20
21         return taxa_ox
22
23     def classificar_corrosao(self, taxa):
24         if taxa > 1e-4:
25             return "Alto"
26         elif taxa > 1e-6:
27             return "Moderado"
28         else:
29             return "Baixo"
```

Figura 15: Script em Python

```

class Agua:
    @staticmethod
    def calcular_pHS(temperatura, STD, Ca_CaCO3, alcalinidade_CaCO3):
        A = (math.log10(STD) - 1) / 10
        B = -13.12 * math.log10(temperatura + 273) + 34.55
        C = math.log10(Ca_CaCO3) - 0.4
        D = math.log10(alcalinidade_CaCO3)
        pHS = (9.3 + A + B) - (C + D)
        return pHS

    @staticmethod
    def calcular_IER(pHS, pH_real):
        return 2 * pHS - pH_real

    @staticmethod
    def classificar_agua(IER):
        if IER < 6.5:
            return "Água não incrustante, água agressiva"
        elif 6.5 <= IER <= 7:
            return "Água não incrustante, ligeiramente agressiva"
        elif 7 < IER <= 8:
            return "Água incrustante, ligeiramente agressiva"
        else:
            return "Água incrustante"

```

Figura 16: Script em Python

```

# Solicitando entrada do usuário
metal_input = input("Digite o metal (ex: Zn, Cu): ")
corrente_input = float(input("Digite a corrente de corrosão observada (em amperes): "))
area_input = float(input("Digite a área do eletrodo (em cm^2): "))
aquoso_input = input("O metal está em meio aquoso? (sim/não): ").strip().lower() == 'sim'
# Entradas para a análise da água
temperatura_input = float(input("Digite a temperatura da água (em °C): "))
STD_input = float(input("Digite o STD da água: "))
Ca_CaCO3_input = float(input("Digite a concentração de Ca2+ de CaCO3 (em mg/L): "))
alcalinidade_CaCO3_input = float(input("Digite a alcalinidade do CaCO3 (em mg/L): "))
pH_real_input = float(input("Digite o pH real da água: "))
# Instanciando a classe Metal
metal_obj = Metal(metal_input, corrente_input, area_input, aquoso_input)
# Calculando a taxa de corrosão
taxa_de_corrosao = metal_obj.calcular_taxa_corrosao()

if taxa_de_corrosao is not None:
    nivel_corrosao = metal_obj.classificar_corrosao(taxa_de_corrosao)
    meio = 'meio aquoso' if aquoso_input else 'meio não aquoso'
    print(f"A taxa de corrosão para {metal_input} em {meio} é {taxa_de_corrosao:.6e} g/s por cm^2.")
    print(f"O nível de corrosão é {nivel_corrosao}.")
# Calculando pH e IER
pHS = Agua.calcular_pHS(temperatura_input, STD_input, Ca_CaCO3_input, alcalinidade_CaCO3_input)
IER = Agua.calcular_IER(pHS, pH_real_input)
classificacao_agua = Agua.classificar_agua(IER)
print(f"O pH de saturação (pHS) é: {pHS:.2f}")
print(f"O Índice de Estabilidade de Ryznar (IER) é: {IER:.2f}")
print(f"A classificação da água é: {classificacao_agua}")

```

Figura 17: Script em Python

```

29         else:
30             return "Alto"

```

PROBLEMS OUTPUT DEBUG CONSOLE **TERMINAL** PORTS

```

O nível de corrosão é Alto.
O pH de saturação (pHS) é: 9.42
O Índice de Estabilidade de Ryznar (IER) é: 13.84
A classificação da água é: Água incrustante
PS C:\python>

```

Figura 18: Funcionamento do programa

## 4.1 Biblioteca

```
# metal_potenciais.py

# Definindo os dados de potenciais padrão e outras propriedades
v dados_potenciais = {
    'Li': {'E° (V)': 3.04, 'Massa Molar (g/mol)': 6.94, 'n': 1},
    'K': {'E° (V)': 2.92, 'Massa Molar (g/mol)': 39.10, 'n': 1},
    'Ca': {'E° (V)': 2.87, 'Massa Molar (g/mol)': 40.08, 'n': 2},
    'Na': {'E° (V)': 2.71, 'Massa Molar (g/mol)': 22.99, 'n': 1},
    'Mg': {'E° (V)': 2.37, 'Massa Molar (g/mol)': 24.31, 'n': 2},
    'Al': {'E° (V)': 1.66, 'Massa Molar (g/mol)': 26.98, 'n': 3},
    'Zn': {'E° (V)': 0.76, 'Massa Molar (g/mol)': 65.38, 'n': 2},
    'Cr': {'E° (V)': 0.74, 'Massa Molar (g/mol)': 52.00, 'n': 3},
    'Fe': {'E° (V)': 0.44, 'Massa Molar (g/mol)': 55.85, 'n': 2},
    'Ni': {'E° (V)': 0.25, 'Massa Molar (g/mol)': 58.69, 'n': 2},
    'Pb': {'E° (V)': 0.13, 'Massa Molar (g/mol)': 207.2, 'n': 2},
    'H2': {'E° (V)': 0.00, 'Massa Molar (g/mol)': 2.02, 'n': 2},
    'Cu': {'E° (V)': -0.34, 'Massa Molar (g/mol)': 63.55, 'n': 2},
    'Ag': {'E° (V)': -0.80, 'Massa Molar (g/mol)': 107.87, 'n': 1},
    'Au': {'E° (V)': -1.50, 'Massa Molar (g/mol)': 196.97, 'n': 1}
}
```

Figura 19: Biblioteca

```
def obter_propriedades_metal(metal):
    """
    Função para obter o potencial padrão de oxidação, massa molar e n de um metal.

    Args:
    metal (str): Símbolo do metal (ex: Zn, Cu).

    Returns:
    tuple: (E° (V), Massa Molar (g/mol), n) se o metal for encontrado, caso contrário (None, None, None).
    """
    propriedades = dados_potenciais.get(metal)
    if propriedades:
        return propriedades['E° (V)'], propriedades['Massa Molar (g/mol)'], propriedades['n']
    else:
        return None, None, None
```

Figura 20: Biblioteca

## 5 Rede de Petri

A Rede de Petri Colorida (CPN - Colored Petri Net) é uma ferramenta poderosa para modelagem, análise e simulação de sistemas complexos, como o programa em Python que calcula a taxa de corrosão de metais e a classificação da qualidade da água. A utilização de CPN neste contexto oferece diversas vantagens que facilitam a compreensão, verificação e validação do comportamento do sistema.

A CPN ajudou a estruturar o programa de uma maneira clara e visual. Cada lugar e transição na rede representa um estado ou evento significativo do programa. Por exemplo, lugares como “Metal escolhido”, “Corrente”, e “Taxa de corrosão” refletem diretamente as variáveis de entrada e saída no programa Python. As transições, como “Calcular taxa de corrosão” e “Calcular o Ph de saturação”, correspondem a funções ou cálculos importantes. Isso facilita a visualização do fluxo de dados e operações, tornando o sistema mais intuitivo e compreensível.

Com CPN, foi possível realizar análises formais e simulações para verificar e validar o comportamento do sistema. Através da simulação, podemos observar como os tokens se movem pela rede, verificando se os cálculos e classificações ocorrem conforme o esperado. Isto é particularmente útil para detectar e corrigir erros lógicos no programa, garantindo que todas as condições e transições sejam corretamente implementadas.

Portanto, a utilização de uma Rede de Petri Colorida para modelar o programa em Python trouxe vários benefícios significativos. Ela proporcionou uma estrutura clara e modular, facilitou a verificação e validação do comportamento do sistema, permitiu a análise de desempenho e melhorou a documentação e comunicação entre os envolvidos. Dessa forma, a CPN não apenas ajudou a garantir a correção e eficiência do programa, mas também tornou o processo de desenvolvimento mais organizado e compreensível.



## 5.1 Rede de Petri modelada no software HPSim

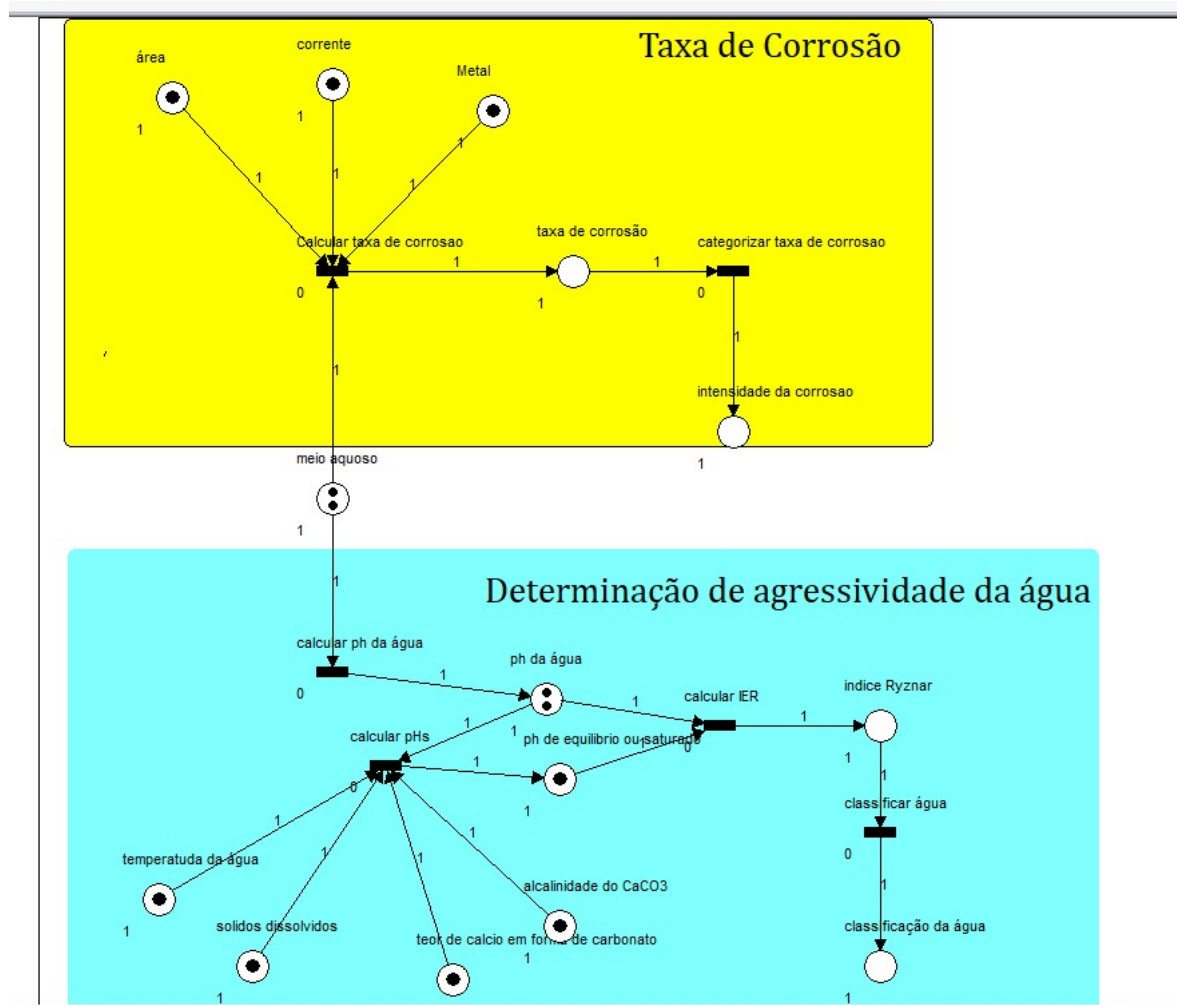


Figura 21: Rede de Petri (HPSim)

O vídeo mostrando o funcionamento da rede estará no git hub com as restantes partes do trabalho.

## 5.2 Rede de Petri Colorida modelada no software CPN Tools

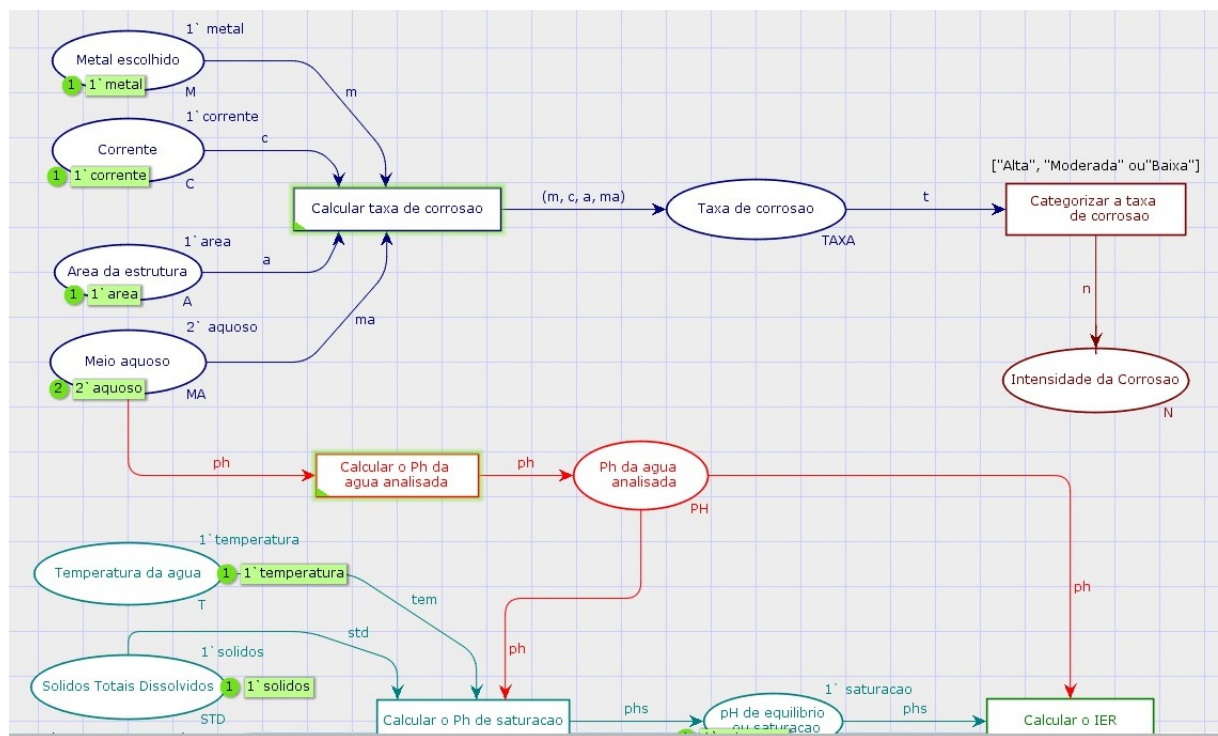


Figura 22: Rede de Petri antes do disparo (CPN Tools)

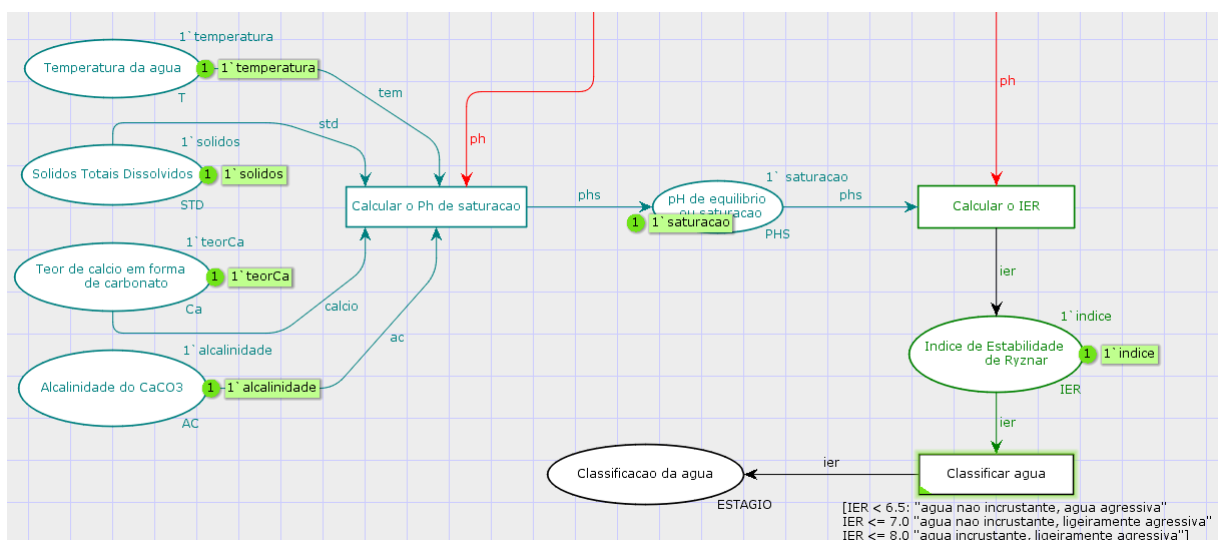


Figura 23: Rede de Petri antes do disparo (CPN Tools)



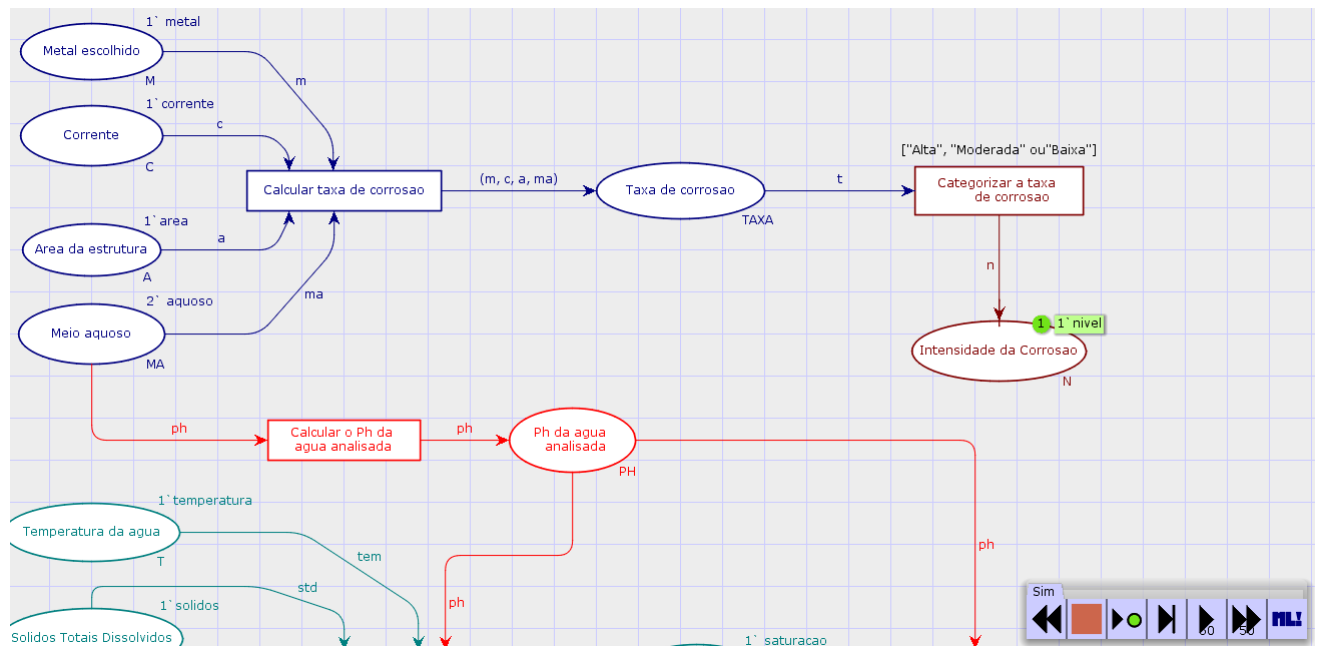


Figura 24: Rede de Petri após do disparo (CPN Tools)

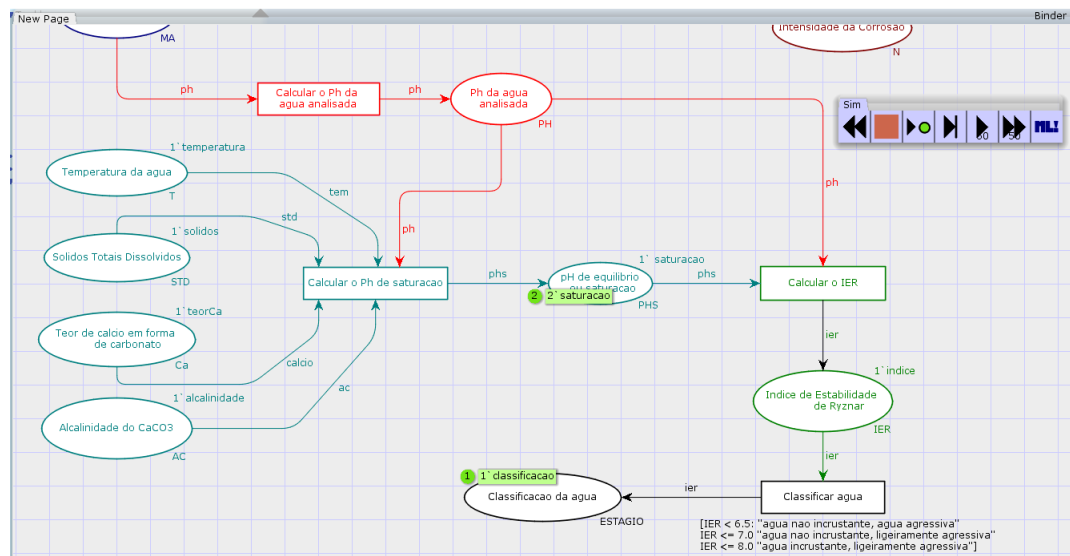


Figura 25: Rede de Petri após do disparo (CPN Tools)

### 5.3 Fluxos e processos

- **Calcular Taxa de Corrosão:** Requer os valores de M, C, A e MA. Saída: Taxa de corrosão (TAXA).
- **Categorizar a Taxa de Corrosão:** Entrada: Taxa de corrosão (t). Saída: Intensidade da Corrosão (N).
- **Calcular o pH da Água Analisada:** Entrada: Meio aquoso (MA). Saída: pH da água analisada (PH).
- **Calcular o pH de Saturação:** Requer os valores de T, STD, Ca e AC e do Ph da água analisada. Saída: pH de equilíbrio ou saturação (PHS).

- **Calcular o Índice de Estabilidade de Ryznar (IER):**

Requer pH da água analisada (PH) e pH de saturação (PHS). Saída: Índice de Estabilidade de Ryznar (IER).

- **Classificar Água:**

Entrada: Índice de Estabilidade de Ryznar (IER). Saída: Classificação da água (ESTÁGIO).

## 5.4 Descrição do Fluxo de Trabalho:

### 1. Entrada dos Dados:

Primeiro, os dados sobre o metal, corrente, área da estrutura e meio aquoso são introduzidos. Paralelamente, a temperatura da água, sólidos totais dissolvidos, teor de cálcio e alcalinidade também são inseridos.

Processamento Inicial: Com os valores do metal, corrente, área e meio aquoso, calcula-se a taxa de corrosão. O meio aquoso é usado também para calcular o pH da água analisada.

### 2. Análise de pH e Saturação:

A partir dos parâmetros da água (temperatura, sólidos, teor de cálcio, pH da água e alcalinidade), calcula-se o pH de saturação. Em seguida, o pH da água analisada também é combinado com o pH de saturação para calcular o Índice de Estabilidade de Ryznar (IER).

### 3. Classificação da Corrosão:

A taxa de corrosão calculada é categorizada para determinar a intensidade da corrosão. O IER é usado para classificar a água em termos de seu estágio de incrustação ou agressividade.

## 5.5 Categorias e Resultados

A Taxa de Corrosão pode ser categorizada em “Alta”, “Moderada” ou “Baixa”. A Classificação da Água com base no IER pode resultar em:

- IER menor que 6.5: “água não incrustante, água agressiva”;
- IER menor ou igual 7.0: “água não incrustante, ligeiramente agressiva”;
- IER menor ou igual 8.0: “água incrustante, ligeiramente agressiva”;

Este fluxo detalhado ajuda na compreensão de como cada parâmetro influencia a taxa de corrosão e a classificação da água, auxiliando no monitoramento e mitigação da corrosão em sistemas aquosos.

## 6 Considerações Parciais

A partir da pesquisa realizada, é notória a importância de calcular as taxas de corrosão, bem como conhecer os tipos de corrosão. Visto que, ao calcular essa taxa para diferentes metais em diferentes ambientes, ele permite uma melhor seleção de materiais, planejamento de manutenção, proteção ambiental e, acima de tudo, a preservação da integridade estrutural, essencial para a segurança pública. Além disso, a análise do potencial da água para causar corrosão ou incrustação, se mostra útil, por exemplo, para o gerenciamento de sistemas de abastecimento de água e esgoto. O programa permite calcular índices como o Índice de Estabilidade de Ryznar (IER) e o pH de saturação (PHS), fornecendo uma avaliação precisa da agressividade da água. Logo, engenheiros civis podem usar esses dados para escolher metais que ofereçam maior resistência à corrosão. Isso ajuda a otimizar os recursos disponíveis e a reduzir custos associados à manutenção corretiva.

## Referências

LTC Gentil, V. editora, 5 a edição. *Rio de Janeiro*, 2007.

William Callister. *Ciência E Engenharia de Materiais: Uma Introdução* . Grupo Gen-LTC, 2000.

Stephan Wolynech. *Técnicas eletroquímicas em corrosão Vol. 49*. Edusp, 2003.

Denise Agüena Uechi, Sandra Garcia Gabas, and Giancarlo Lastoria. Importância da determinação dos índices de incrustação e de corrosão de águas subterrâneas em sistemas de abastecimento: um caminho para o uso sustentável.

Nilo Ney Coutinho Menezes. Introdução a programação com python. *São Paulo: Novatec*, page 34, 2010.

Felipe Cruz. *Python: Escreva seus primeiros programas*. Editora Casa do Código, 2015.