ANÁLISE DE DISPONIBILIDADE EM ETE'S CONSIDERANDO REDUNDÂNCIAS OPERACIONAIS SEGUNDO CADEIAS DE MARKOV.

Bruno Fernandes de Holanda[(1)]
Técnico em Sistemas de Saneamento - Mecânica (Sabesp), com mais de 12 anos de experiência no ramo de mecânica industrial, incluindo manutenção, projetos e engenharia. Graduado em Engenharia Mecânica (USJT), especialista em Gestão de Manutenção na Indústria 4.0 (SENAI), especializado em Engenharia Ambiental e Saneamento Básico (UMC), CAMA-Certified Asset Management Assessor, atualmente cursando mestrado em Eng. Mecânica de Projetos e Fabricação no PPGEM (Poli-USP).

Endereço[(1)]**:** Rua Dorval José Svizzero, 20 – Jd. Lapenna / São Miguel Paulista - São Paulo - SP - CEP: 08071-163 - Brasil - Tel: +55 (11) 98332-3804 - e-mail: fernandes.holanda@hotmail.com

RESUMO

A disponibilidade é um dos indicadores de manutenção mais importantes para gestão de ativos, pois em setores de alta criticidade, como o saneamento, perdas nesse aspecto podem causar sérias consequências aos clientes e ao meio ambiente.

A Sabesp, como uma das maiores empresas de saneamento do mundo em população atendida e é crucial que suas Estações de Tratamento de Esgotos (ETE's) operem de acordo com sua demanda e qualidade adequadas.

O trabalho propõe um novo modelo analítico baseado na teoria das cadeias de Markov para aprimorar a análise de confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade (RAM) das ETE's operadas pela Sabesp. Embora já exista um modelo de análise desses dados, alguns processos considerados críticos operam com redundância e os métodos atuais não consideram adequadamente essas condições.

A proposta do trabalho é apresentar os processos fundamentais numa ETE, delimitando quais são estes sistemas críticos e sua estratégia de operação. Em seguida, elaborar e aplicar o modelo Markoviano, permitindo estimativas mais precisas de disponibilidade, levando em conta a configuração das redundâncias operacionais.

Ao considerar os equipamentos as redundâncias e os regimes de operação, este modelo fornece uma visão mais abrangente e precisa do desempenho dos sistemas avaliados, permitindo identificar o dimensionamento adequado dessas instalações e otimizar os processos de manutenção e operação.

PALAVRAS-CHAVE: Disponibilidade; Cadeias de Markov; Tratamento de Esgoto.

1-INTRODUÇÃO

Em setores críticos, como é o caso do saneamento, especificamente o tratamento de esgotos, perdas de disponibilidade podem causar sérios prejuízos, seja para a população atendida, o meio ambiente e até mesmo a própria empresa responsável. Por isso, garantir o pleno funcionamento dos ativos considerando os riscos associados é fundamental para uma operação eficiente.

A Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo - Sabesp, fundada em 1973, é uma das maiores empresas de saneamento do mundo em população atendida (28,4 milhões de pessoas abastecidas com água e 25,2 milhões de pessoas com coleta de esgoto), em 375 municípios paulistas, e responde sozinha por cerca de 30% do total de investimentos em saneamento básico feito no Brasil (Sabesp, 2024). Sabendo de tamanha importância, a companhia, que tem o papel de protagonismo no mercado de saneamento, deve aplicar metodologias que garantam sua eficiência operacional enquanto mitiga riscos a custos adequados.

Desde 2021, a Divisão de Manutenção dos Sistemas de Tratamento de Esgotos Leste – OEML, realiza avaliações periódicas de desempenho dos ativos baseada em Análise RAM. A aplicação do método proporcionou uma visão completa e detalhada a respeito de uma vasta lista de ativos operados nas ETE's. No entanto, a ferramenta desenvolvida para tais análises não comtemplava casos particulares, como é o caso de processos que operam com redundância por serem considerados como de alto risco operacional.

O objetivo geral deste trabalho é demonstrar a aplicação de um modelo analítico baseado na teoria das cadeias de Markov para aprimorar a Análise RAM nos ativos de uma ETE (Estação de Tratamento de Esgoto) da região metropolitana de São Paulo operada pela Sabesp, de tal forma que possa ser posteriormente aplicado nas demais unidades. Com isso, se pretende avaliar a disponibilidade de ativos que operam com redundâncias e se obter o

dimensionamento de disponibilidade adequado desses processos baseando-se no equilíbrio entre o plano de produção e os riscos envolvidos.

2-REVIISÃO BIBLIOGRÁFICA

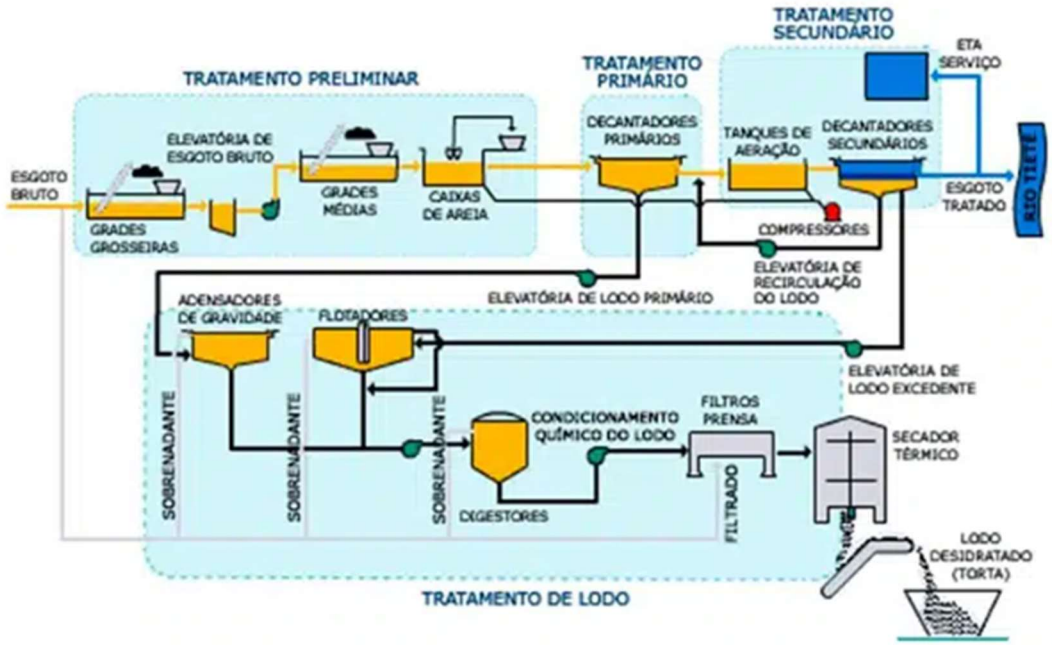
2.1- Processo de Tratamento de Esgotos.

As ETE's reproduzem, através de processos físicos, químicos e/ou biológicos, em curto período, condições necessárias e suficientes, normalmente encontradas na natureza em corpos hídricos receptores tais como rios, lagos e banhados), para promover a decomposição da matéria orgânica presente nos esgotos. Ao final do processo, tanto a fase líquida quanto a sólida devem estar aptas, segundo legislação ambiental impostos pelo padrão de saúde da Resolução CONAMA nº 357/2005.

A Sabesp adota diferentes processos para tratamento dos esgotos, variando em função do tipo e situação do efluente. Assim, o esgoto bruto pode ser submetido a diferentes níveis de tratamento: preliminar, primário, secundário e terciário. No Brasil, a maioria das ETE's realiza o tratamento até o nível secundário, sendo raros os casos onde é adotado o terciário. (ReCESA, 2013).

Predominantemente, as ETE's operadas pela Sabesp utilizam o processo de lodo ativado, que é esquematizado na Figura 1:

Figura 1: Fluxograma do sistema de lodos ativados convencional.



Fonte: Aqua Solution (2024)

A seguir, são sintetizados os processos de tratamento:

- *Tratamento Preliminar (Grades, Caixa de Areia, Elevação, Medição de Vazão)*

Os sólidos grosseiros são removidos do fluxo líquido através de sistemas de gradeamento. Partículas abrasivas, predominantemente inorgânicas, como areia e terra, são removidas em unidades denominadas desarenadores. Pelo fato de fluir por gravidade entre os processos, nesta etapa o esgoto é bombeado à cota mais alta da ETE.

- *Tratamento Primário (Decantador Primário)*

Sedimentação dos sólidos em suspensão de maior densidade. Simultaneamente, as partículas de menor densidade, como graxas e óleos, flutuam para a superfície. Estas parcelas constituem o lodo primário, que é removido para o adensamento.

- *Tratamento Secundário (Tanque de Aeração e Decantador Secundário)*

O tanque de aeração fornece oxigênio necessário para reações biológicas que consomem a matéria orgânica do esgoto, enquanto o Decantador secundário sedimenta o lodo formado nestas reações.

- *Adensamento*

Ocorre a sedimentação do lodo proveniente dos tratamentos primário e secundário, reduzindo assim, o volume e umidade do lodo que seguirá ao processo de digestão.

- *Digestão*

Trata-se de um processo de fermentação anaeróbia do lodo, desenvolvido por uma sequência de ações realizadas por vários tipos de bactérias responsáveis pela remoção de matéria orgânica.

- *Desidratação*

Operação destinada a reduzir o volume do lodo através da retirada do excesso de umidade. Usualmente, consiste de regularização química do lodo seguida desidratação mecânica em Filtros Prensa.

2.2-Análise RAM

Confiabilidade (Reliability), Disponibilidade (Availability) e Mantenabilidade (Maintainability) são os três tópicos da Engenharia de Confiabilidade que mensurados em conjunto, formam o que é definido como Análise RAM.

- *Disponibilidade*

A Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT, através da NBR 5462, define Disponibilidade como "medida do grau que um item estará em estado operacional e confiável no início da missão, quando a missão for exigida aleatoriamente no tempo" (ABNT NBR 5462, 1994).

Em suma, significa que Disponibilidade é a probabilidade de um equipamento ou sistema estar apto a operar quando solicitado.

- *Confiabilidade*

Entende-se Confiabilidade, segundo a ABNT, como: Capacidade de um item desempenhar uma função especificada, sob condições e intervalo de tempo pré-determinado (ABNT NBR 5462, 1994).

Portanto, ainda de acordo com Silveira (2017), a Confiabilidade é relacionada com a probabilidade de que um item sobreviva em um determinado intervalo, ou seja, não falhe num intervalo de tempo predeterminado.

- *Mantenabilidade*

Conforme a definição de Gurski (2002), Mantenabilidade é a facilidade com que se efetuam os reparos e outras atividades de manutenção em um sistema ou equipamento. Portanto, pode ser entendida como a capacidade da mão de obra disponível em atender as demandas relacionadas à manutenção.

De acordo com a definição apresentada, é possível relacionar a Mantenabilidade de um sistema ao Backlog da equipe de manutenção responsável, já que este indicador indica se o efetivo está corretamente dimensionado e se atende suas demandas em tempo adequado (VIERRI, 2007).

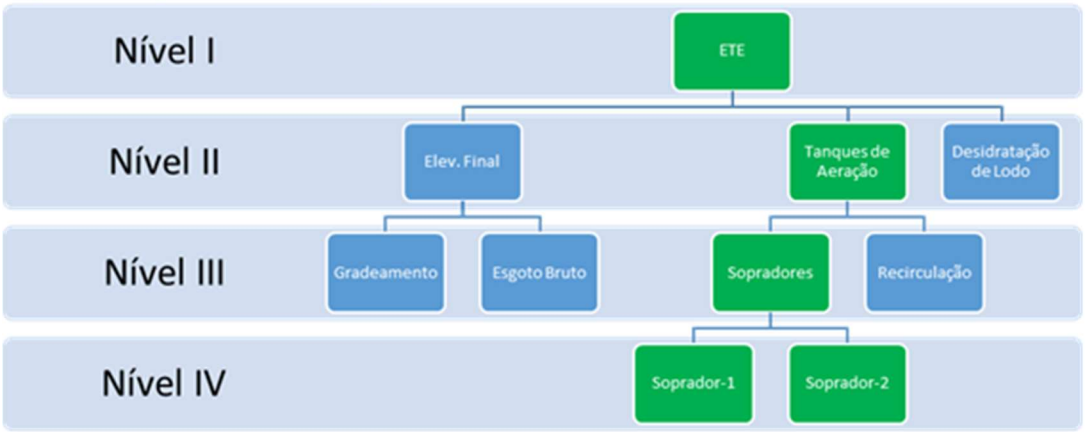
Branco Filho (2006) define Backlog como o tempo que a equipe de manutenção precisa para executar todos os serviços pendentes, considerando que não cheguem novos pedidos de serviço durante a execução destes serviços.

2.3-Disponibilidade em sistemas redundantes.

As estações de tratamento de esgoto (Nível I) são conjuntos complexos, constituídos de várias instalações (Nível II) que representam etapas do processo, formando sub-instalações (Nível III) que representam funções específicas dessas etapas, que por sua vez são constituídas posições operacionais (Nível IV), que representam conjuntos de equipamentos capazes de desempenhar tais funções. Estes níveis podem ser combinados em série ou paralelo de acordo com requisitos operacionais.

O esquema da Figura 2 exemplifica essas subdivisões através de um diagrama de blocos, destacando um dos processos até o nível de Posição Operacional:

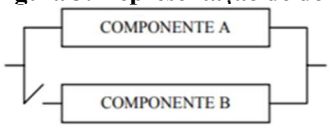
Figura 2: Diagrama de blocos simplificado.



Fonte: Autor (2024)

O diagrama apresentado na figura 2 caracteriza-se pela combinação de uma série de níveis em série ou paralelo. No caso específico em destaque, ocorre uma redundância passiva entre dois sopradores em paralelo, isto é, enquanto um opera, o outro permanece inativo na condição de reserva. Portanto, o sistema de sopradores pode apresentar as seguintes condições, conforme exemplo adaptado de Miranda e Brick (2003) e representado na Figura 3:

Figura 3: Representação de dois componentes em redundância passiva.

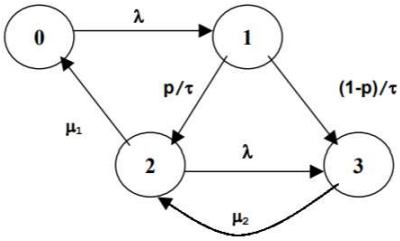


Fonte: Miranda e Brick (2003)

- Um soprador em operação e outro componente em redundância passiva. A capacidade do sistema é de 100 % da nominal.
- O soprador que está operacional falha e o redundante não entra em operação imediata. A capacidade do sistema é 0%.
- O soprador redundante entra em operação e assume a função do que falhou. A capacidade retoma 100%.
- Ambos os sopradores falham, ou o segundo falha e o primeiro ainda não foi restabelecido. A capacidade é novamente 0%.

A figura 4 esquematiza os possíveis estados (círculos numerados) e transições (setas) do sistema nessa condição. A transição λ corresponde à taxa de falhas dos componentes, μ é a taxa de reparo, enquanto p a probabilidade de sucesso na partida, e τ o tempo de partida.

Figura 4: Representação dos estados para sistema com redundância passiva de dois componentes.



Fonte: Miranda e Brick (2003)

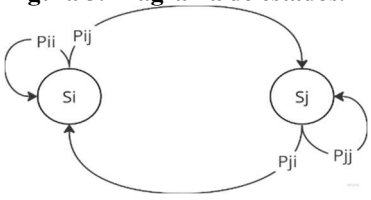
Por isso, a disponibilidade da função dos sopradores não pode ser determinada pela simples média de disponibilidade entre eles, sendo necessária a aplicação de metodologias mais complexas, como cadeias de Markov.

2.4-Cadeias de Markov

De acordo com Golmakani et al. (2014), uma cadeia de Markov pode ser descrita como:

Seja S={s1,s2,…,sn} um conjunto de estados. O processo começa em um desses estados, transitando entre eles sucessivamente e aleatoriamente. Cada mudança de estado é chamada de passo. Se uma cadeia está no estado atual si, então ela se altera para o estado *s*j no próximo passo com uma probabilidade *p*ij, que não depende do ocorrido nos passos anteriores, apenas do atual. A probabilidade *p*ij, é chamada probabilidade de transição. O processo pode permanecer no estado que se encontra e sua probabilidade será *p*ii. A figura 5 exemplifica o diagrama de estados do processo:

Figura 5: Diagrama de estados.



Fonte: Autor (2024)

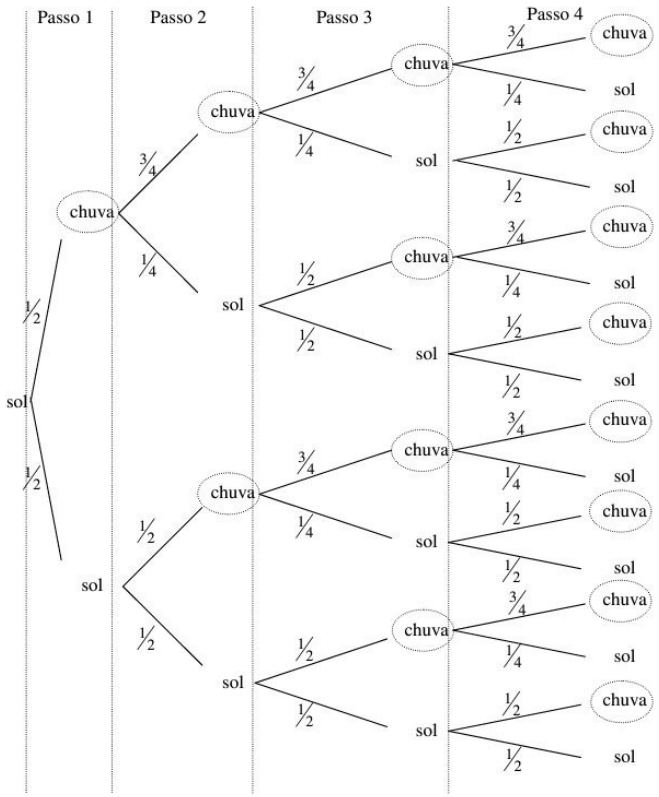
Exemplo:

Numa região hipotética, onde se observa dois estados a serem estudados: dias ensolarados e dias chuvosos, os quais serão designados pelos índices 0 e 1, respectivamente. A partir de observações históricas, foram obtidas para um passo (ou seja, um dia) as probabilidades de transição supostas constantes:

- Em caso de dia ensolarado, a probabilidade do dia seguinte se manter na mesma condição é de ½ para cada hipótese.
- Em dias chuvosos, a probabilidade de o próximo dia ser ensolarado é de ¼, enquanto a sucessão de dias com chuva corresponde a ¾.

Desejamos determinar a probabilidade de chuvas após quatro passos (dias). Para isso, representamos na figura 6, a árvore de probabilidades seguida da Tabela 1, contendo seus cálculos:

Figura 6: Árvore de probabilidades.



Fonte: UFPE (2011)

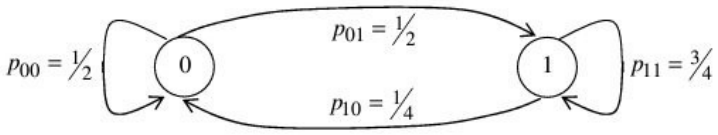
Tabela 1: Cálculo de probabilidades.

Produtos de probabilidades de transição	Probabilidades parciais
$p_{00}p_{00}p_{00}p_{01} = \frac{1}{2}\frac{1}{2}\frac{1}{2}\frac{1}{2}$	$\frac{1}{16}$
$p_{00}p_{00}p_{01}p_{11} = \frac{1}{2}\frac{1}{2}\frac{1}{2}\frac{3}{4}$	$\frac{3}{32}$
$p_{00}p_{01}p_{10}p_{01} = \frac{1}{2}\frac{1}{2}\frac{1}{4}\frac{1}{2}$	$\frac{1}{32}$
$p_{00}p_{01}p_{11}p_{11} = \frac{1}{2}\frac{1}{2}\frac{3}{4}\frac{3}{4}$	$\frac{9}{64}$
$p_{01}p_{10}p_{00}p_{01} = \frac{1}{2}\frac{1}{4}\frac{1}{2}\frac{1}{2}$	$\frac{1}{32}$
$p_{01}p_{10}p_{01}p_{11} = \frac{1}{2}\frac{1}{4}\frac{1}{2}\frac{3}{4}$	$\frac{3}{64}$
$p_{01}p_{11}p_{10}p_{01} = \frac{1}{2}\frac{3}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{2}$	$\frac{3}{64}$
$p_{01}p_{11}p_{11}p_{11} = \frac{1}{2}\frac{3}{4}\frac{3}{4}\frac{3}{4}$	$\frac{27}{128}$
Probabilidade total (probabilidade do estado 1 em quatro passos)	$\frac{85}{128} \approx 0{,}664$

Fonte: UFPE (2011)

Outro modo de se representar e resolver o sistema apresentado é através da construção dos diagramas de estado e matrizes de transição, representado na Figura 7:

Figura 7: Diagrama de estados e matriz de transição conforme exemplo.



$$P = \begin{bmatrix} p_{00} & p_{01} \\ p_{10} & p_{11} \end{bmatrix} \rightarrow P = \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 \\ 1/4 & 3/4 \end{bmatrix}$$

Fonte: UFPE (2011)

Com a matriz de transição P, é possível determinar as probabilidades de cada estado multiplicando a por si mesma na quantidade n de passos.

Portanto, podemos afirmar que:

$$P_{(p_i^n)} = P^n \qquad \textit{Equação 1}$$

Para o exemplo em questão, supondo que se pretenda obter as probabilidades de chuva para o 4º dia a partir do estado inicial, temos:

$$P^4 = \begin{array}{c|cc} & s0 & s1 \\ \hline s0 & 34\% & 66\% \\ s1 & 33\% & 67\% \end{array}$$

Note que os resultados da matriz P^4 nos traz as probabilidades de clima daqui a 4 dias, e também que estes resultados independem do resultado do dia atual. Dessa forma, portanto, é possível determinar as probabilidades de clima para daqui a n passos independentemente da influência dos estados atuais.

3-METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho pode ser classificada como uma abordagem quantitativa acerca da coleta e análise de dados com ferramentas estatísticas e explicativa, visto que seu objetivo visa demonstrar a aplicabilidade dessas ferramentas através de um estudo de caso em uma estação específica: a ETE São Miguel.

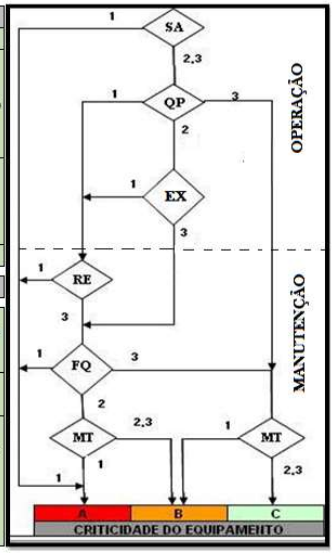
O estudo se inicia pela seleção dos sistemas analisados, elencando etapas do processo e estados possíveis com base em critérios como criticidade e/ou plano de produção. Depois, são levantados os dados históricos de falha dos sistemas selecionados e estimadas as probabilidades para cada transição de estado. Por fim, são elaborados os diagramas de estado e matrizes de transição para obtenção dos resultados a serem analisados.

3.1-Seleção dos sistemas

Para selecionar os sistemas a serem estudados, foram escolhidos aqueles que são operados com redundâncias, e em seguida, aplicado um algoritmo de avaliação de criticidade que considera parâmetros operacionais e de manutenção como o esquema representado na figura 8:

Figura 8: Avaliação de Criticidade.

O EFEITO DA FALHA DO EQUIPAMENTO: Operação				
		ALTA (1)	MÉDIA (2)	BAIXA (3)
SA	Segurança e meio ambiente	Risco real de Provocar acientes pessoais, agressões ao meio ambiente ou danos materiais próprios ou de terceiros	Risco pequeno ou médio de Provocar exposição a riscos de acidentes ao meio-ambiente ou ao patrimônio próprio ou de terceiros.	Não apresenta nenhum risco
QP	Qualidade e Produtividade	Afeta a qualidade (parâmetros de legislação/contrato) ou a quantidade (vazão esgoto ou água de reúso via rede)	Afeta os processo intermediários internos (ex: Produção de gás/Lodo)	Não afeta
EX	Extravasão	Provoca extravasão imediata	Pode causar extravasão	Não provoca extravasão
O EQUIPAMENTO ANALISADO: Manutenção				
RE	Redundância	Não possui equipamento reserva ou sistema opcional	-	Possui equipamento reserva ou sistema opcional
FQ	Frequencia de quebra	Apresenta quebra no intervalo de 0 a 3 meses	Apresenta quebra no intervalo de 3 meses a 1 ano	Apresenta quebra no intervalo de 1 ano ou mais
MT	Mantenabilidade	Possui tempo de reparo superior a 90 dias e/ou custo de reparo superior a R$ 100.000,00, e/ou maior/igual a 70% do valor de um equipamento novo.	Possui tempo de reparo na faixa de 30 a 90 dias e/ou custo de reparo na faixa de R$ 50.000 a R$ 99.999,00, e/ou 50% do valor de um equipamento novo	Possui tempo de reparo inferior a 30 dias e/ou custo do reparo inferior a R$ 49.999,00, e/ou 30% do valor de um equipamento novo



Fonte: Sabesp (2021)

Com base nessa sistemática, foram elencados na Tabela 2, os equipamentos de criticidade "A" que operam com redundância:

Tabela 2: Posições Operacionais selecionadas.

ETE	INSTALAÇÃO	SUB-INSTALAÇÃO	POSIÇÃO OPERACIONAL	CRITICIDADE
ETE-SÃO MIGUEL	ELEVATÓRIA FINAL	BOMBEAMENTO ESGOTO BRUTO	BOMBA PRINCIPAL DE ESGOTO BRUTO 1	A
			BOMBA PRINCIPAL DE ESGOTO BRUTO 2	A
			BOMBA PRINCIPAL DE ESGOTO BRUTO 3	A
	TANQUES DE AERAÇÃO	SOPRADORES TANQUES DE AERAÇÃO	SOPRADOR TANQUES DE AERAÇÃO-3	A
			SOPRADOR TANQUES DE AERAÇÃO-4	A
	ELEVATÓRIA DE RECIRCULAÇÃO	BOMBEAMENTO LODO ATIVADO	BOMBA RECIRCULAÇÃO DE LODO ATIVADO-1	A
			BOMBA RECIRCULAÇÃO DE LODO ATIVADO-2	A
			BOMBA RECIRCULAÇÃO DE LODO ATIVADO-3	A

Fonte: Autor (2024)

Baseando-se no plano de produção da ETE e dados dos equipamentos em operação, são obtidas as capacidades requeridas pelos processos e as capacidades disponíveis das posições operacionais.

A seguir, as figuras 9, 10 e 11 precedidas da descrição dos sistemas selecionados e seus parâmetros:

Elevatória Final - Bombeamento de Esgoto Bruto:

- Função: Bombeamento de esgoto da rede coletora para o processo de tratamento;
- Capacidade requerida: 1500 L/s;
- Regime operacional: 3 conjuntos moto-bomba operando individualmente, sendo as capacidades:
  - Bombas 1 e 2: 1800 L/s;
  - Bomba 3: 1000 L/s.

Figura 9: Bombas da Elevatória de Esgoto Bruto.



Fonte: Sabesp (2024)

Observação: Apesar da capacidade da bomba 3 ser inferior à requerida, existe uma elevatória externa à ETE capaz de bombear cerca de 40% da vazão necessária à jusante da instalação. Portanto, para este estudo é considerada a hipótese de que a bomba 3 opera em regime suficiente para cumprir a função.

Tanques de Aeração – Sopradores:

- Função: Remoção de matéria orgânica via processo aeróbio;
- Capacidade requerida: 20000 Nm^3/h;
- Regime operacional: 2 compressores centrífugos operando individualmente com capacidade de 35000Nm^3/h cada.

Figura 10: Sopradores e Tanques de Aeração.



Fonte: Sabesp (2024)

Elevatória de Recirculação - Bombeamento de Lodo Ativado:

- Função: Recircular o lodo ativado para o processo biológico e descartar o excedente.;
- Capacidade requerida: 1350 L/s;
- Regime operacional: 3 conjuntos moto-bomba operando em pares com capacidade de 750 L/s cada.

Figura 11: Bombas da Elevatória de Recirculação de Lodo Ativado.



Fonte: Sabesp (2024)

3.2-Levantamento de dados

A coleta de dados foi realizada a partir do banco de dados do sistema SAP-PM (Figura 12), sistema integrado de gestão empresarial (ERP), capaz de armazenar e controlar informações de paradas intervenções nas plantas operadas.

A cada evento de manutenção ocorrido, é registrado uma Nota de Manutenção (NM), onde constam a informações da ocorrência, como: equipamento, local, data/hora de ocorrência etc. Esta NM é recebida pelo setor de manutenção e aprovada, tornando-se uma Ordem de Manutenção (OM), onde são registradas as tratativas e operações realizadas.

Figura 12: IW29-Lista de notas

Exibir notas: lista de notas

Nota

Local de instalação	Denominação do loc.instalação	Descrição	Nota	Ordem	Início avaria	HInícAv.	Fim da avaria	HFimAvar	Parada
100ETESMIGL1-TQA01-GMS01-SOP03	SOPRADOR TANQUES DE AE...	Retrofit do Soprador 3 do TA	10363782	8000339208	03.06.2020	17:43:19	30.07.2021	10:00:00	X
100ETESMIGL1-EEE01-GBG01-BOM03	BOMBA PRINCIPAL DE ESGO...	EQUIPAMENTO ATINGIDO PELO ALAGAMENTO	10394025	8000367814	10.02.2020	10:00:00	11.02.2021	16:00:00	X
100ETESMIGL1-TQA01-GMS01-SOP04	SOPRADOR TANQUES DE AE...	CORRIGIR TEMPO DE PARTIDA SOPRADOR 4	10398244	8000371558	14.09.2020	11:03:51	14.09.2021	12:00:00	
100ETESMIGL1-EEL01-GBL01-BOM02	BOMBA RECIRCULAÇÃO DE L...	Forte vazamento pela gaxeta BB2 recirc.	10406996	8000381091	22.10.2020	13:43:28	15.02.2021	11:30:00	
100ETESMIGL1-EEE01-GBG01-BOM02	BOMBA PRINCIPAL DE ESGO...	BB2 elevatória final inoperante	10442000	8000412059	23.01.2021	17:16:36	23.01.2021	20:40:00	
100ETESMIGL1-EEE01-GBG01-BOM02	BOMBA PRINCIPAL DE ESGO...	BB2 Elevatória final não desliga PU 55%	10450025	8000418911	22.02.2021	08:09:07	24.02.2021	15:30:00	
100ETESMIGL1-EEE01-GBG01-BOM02	BOMBA PRINCIPAL DE ESGO...	Elevatória - BB02 com alarme	10451063	8000420638	24.02.2021	21:47:17	24.02.2021	23:59:00	
100ETESMIGL1-EEE01-GBG01-BOM03	BOMBA PRINCIPAL DE ESGO...	Avaliar Operação CJ Motobomba 3 EF	10452594	8000421051	01.03.2021	15:08:20	13.08.2021	00:00:01	
100ETESMIGL1-EEL01-GBL01-BOM01	BOMBA RECIRCULAÇÃO DE L...	Preventiva Bomba 1 Recirculação	10452746	8000421249	01.03.2021	08:42:32	01.03.2021	12:00:00	
100ETESMIGL1-EEL01-GBL01-BOM02	BOMBA RECIRCULAÇÃO DE L...	Preventiva Bomba 2 Recirculação	10452747	8000421250	01.03.2021	08:42:32	01.03.2021	10:00:00	
100ETESMIGL1-EEL01-GBL01-BOM03	BOMBA RECIRCULAÇÃO DE L...	Preventiva Bomba 3 Recirculação	10452748	8000421251	01.03.2021	06:42:32	01.03.2021	08:30:00	
100ETESMIGL1-EEE01-GBG01-BOM03	BOMBA PRINCIPAL DE ESGO...	Bomba 03 - EEEB Ajuste	10455516	8000424177	12.03.2021	14:37:35	01.04.2021	00:00:00	
100ETESMIGL1-EEE01-GBG01-BOM02	BOMBA PRINCIPAL DE ESGO...	BOMBA DESARMANDO ALARME DE TEMPERATURA	10456597	8000425812	22.03.2021	10:10:53	01.04.2021	00:00:00	
100ETESMIGL1-EEE01-GBG01-BOM02	BOMBA PRINCIPAL DE ESGO...	BB2 Elev.Final alarme alta temperatura	10457073		18.03.2021	07:10:11	18.03.2021	07:11:00	
100ETESMIGL1-TQA01-GMS01-SOP04	SOPRADOR TANQUES DE AE...	Soprador 4 inoperante	10461376	8000429423	03.04.2021	21:50:13	04.04.2021	02:00:00	X
100ETESMIGL1-EEE01-GBG01-BOM02	BOMBA PRINCIPAL DE ESGO...	BOMBA Nº 02 COM DESARME INDEVIDO	10463246	8000430503	09.04.2021	14:39:46	13.08.2021	00:00:01	
100ETESMIGL1-TQA01-GMS01-SOP04	SOPRADOR TANQUES DE AE...	Sop04 - Não atua	10466112	8000433075	19.04.2021	14:25:01	19.04.2021	23:00:00	X
100ETESMIGL1-EEE01-GBG01-BOM02	BOMBA PRINCIPAL DE ESGO...	PREVENTIVA BB 2 EF	10468842	8000435408	30.04.2021	16:12:32	30.04.2021	16:14:00	
100ETESMIGL1-TQA01-GMS01-SOP04	SOPRADOR TANQUES DE AE...	Soprador nº04 não funciona	10469062	8000437007	02.05.2021	16:28:11	02.05.2021	20:00:00	X
100ETESMIGL1-EEE01-GBG01-BOM02	BOMBA PRINCIPAL DE ESGO...	Bomba não aciona em automático	10469490	8000437015	03.05.2021	13:49:55	04.05.2021	13:00:00	
100ETESMIGL1-EEL01-GBL01-BOM02	BOMBA RECIRCULAÇÃO DE L...	Vazamento na Gaxeta da Bomba nº 2	10489025	8000453725	15.07.2021	08:16:02	15.07.2021	11:30:00	
100ETESMIGL1-EEL01-GBL01-BOM01	BOMBA RECIRCULAÇÃO DE L...	PREVENTIVA BOMBA 1 RECIRCULAÇÃO	10489302	8000453803	15.07.2021	08:16:02	15.07.2021	16:30:00	
100ETESMIGL1-EEL01-GBL01-BOM03	BOMBA RECIRCULAÇÃO DE L...	PREVENTIVA BOMBA 3 RECIRCULAÇÃO	10489303	8000453804	15.07.2021	08:16:02	15.07.2021	14:30:00	
100ETESMIGL1-EEL01-GBL01-BOM02	BOMBA RECIRCULAÇÃO DE L...	Bomba recirculação para manutenção	10491448	8000455694	23.07.2021	23:48:21	24.07.2021	09:00:00	X
100ETESMIGL1-TQA01-GMS01-SOP03	SOPRADOR TANQUES DE AE...	VERIFICAR VAZAMENTO DE ÓLEO NO COMP 3	10497874	8000461570	13.08.2021	09:53:31	29.03.2022	08:30:00	

Fonte: SAP-PM Sabesp (2024)

Pretendendo fornecer um estudo representativo, foram levantados os dados de janeiro de 2021 até dezembro de 2023, nos sistemas selecionados para análise.

Com as informações fornecidas pelo relatório de notas do SAP-PM, é possível determinar e tabular os estados possíveis em cada sistema e estimar as probabilidades de transição.

A figura 13 apresenta parte de uma planilha onde foram dispostas as datas e situação diária (Disponível=D/Indisponível=I) de cada uma das posições operacionais analisadas. Através das combinações de disponibilidade são definidos e descritos os estados numa coluna à direita. Relacionando cada estado diário com seu antecessor, é possível determinar suas transições, e por fim, com base na proporção de dias que cada transição ocupou no período analisado, é obtida cada uma de suas probabilidades.

Figura 13: Histórico de estados e passos.

Local	ETE São Miguel													
Instalação	*Elevatória Final*					*Tanques de Aeração*				*Elevatória de Recirculação*				
ub-Instalaçã	*Bombeamento Esgoto Bruto*					*Sopradores*				*Bombeamento Recurculação*				
ção Operaci	BOMBA PRINCIPAL DE ESGOTO BRUTO 1	BOMBA PRINCIPAL DE ESGOTO BRUTO 2	BOMBA PRINCIPAL DE ESGOTO BRUTO 3	Estado	Transição	SOPRADOR TANQUES DE AERAÇÃO-3	SOPRADOR TANQUES DE AERAÇÃO-4	Estado inicial	Transição	BOMBA RECIRCULAÇÃO DE LODO ATIVADO-1	BOMBA RECIRCULAÇÃO DE LODO ATIVADO-2	BOMBA RECIRCULAÇÃO DE LODO ATIVADO-3	Estado	Transição
Data														
01/01/2022	D	I	D	s0	p01	I	D	s1	p11	D	I	D	s1	p11
02/01/2022	D	I	D	s1	p11	I	D	s1	p11	D	I	D	s1	p11
03/01/2022	D	D	D	s1	p10	I	D	s1	p11	D	I	D	s1	p11
04/01/2022	D	D	D	s0	p00	I	D	s1	p11	D	I	D	s1	p11
05/01/2022	D	D	D	s0	p00	I	D	s1	p11	D	I	D	s1	p11
06/01/2022	D	D	D	s0	p00	I	D	s1	p11	D	I	D	s1	p11
07/01/2022	D	D	D	s0	p00	I	D	s1	p11	D	I	D	s1	p11
08/01/2022	D	D	D	s0	p00	I	D	s1	p11	D	I	D	s1	p11
09/01/2022	D	D	D	s0	p00	I	D	s1	p11	D	I	D	s1	p11
10/01/2022	D	D	D	s0	p00	I	D	s1	p11	D	I	D	s1	p11
11/01/2022	D	D	D	s0	p00	I	D	s1	p11	D	I	D	s1	p11
12/01/2022	D	I	D	s0	p01	I	D	s1	p11	D	I	D	s1	p11
13/01/2022	D	D	D	s1	p10	I	D	s1	p11	D	I	D	s1	p11
14/01/2022	D	D	D	s0	p00	I	D	s1	p11	D	I	D	s1	p11
15/01/2022	D	D	D	s0	p00	I	D	s1	p11	D	I	D	s1	p11
16/01/2022	D	D	D	s0	p00	I	D	s1	p11	D	I	D	s1	p11
17/01/2022	D	D	D	s0	p00	I	D	s1	p11	D	I	D	s1	p11
18/01/2022	D	D	D	s0	p00	I	D	s1	p11	D	I	D	s1	p11

Fonte: Autor (2024)

3.3-Aplicação no modelo

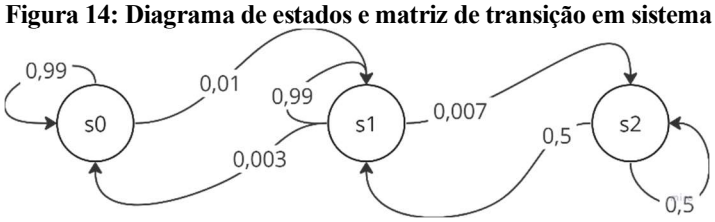
Com os dados obtidos na etapa anterior, foram elaborados os diagramas de estado e as matrizes de transição, apresentados nas figuras 14,15 e 16.

Para o caso dos sopradores, são possíveis 3 estados:

0) Um soprador em operação e outro em stand-by.
1) O soprador que está operacional falha e o redundante entra em operação imediata.
2) Ambos os sopradores falham, ou o segundo falha e o primeiro ainda não foi restabelecido.

As probabilidades são distribuídas e esquematizadas como a seguir:

Figura 14: Diagrama de estados e matriz de transição em sistema de 2 sopradores.



M_{SOP} =

	s0	s1	s2
s0	99%	1%	0%
s1	0,3%	99%	0,7%
s2	0%	50%	50%

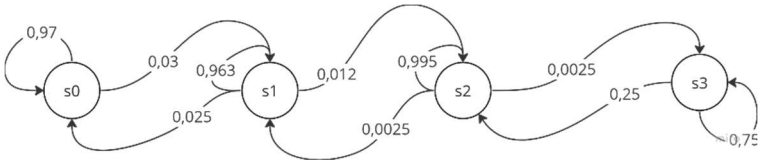
Fonte: Autor (2024)

Para as bombas de esgoto bruto, são possíveis 4 estados:

0) Uma bomba disponível e as demais em stand-by.
1) Uma bomba falha e uma redundante entra em operação imediata.
2) Duas bombas falham e a elevatória opera com apenas uma.
3) Todas falham e a elevatória não cumpre a função requerida.

As probabilidades são distribuídas e esquematizadas como a seguir:

Figura 15: Diagrama de estados em sistema de 3 bombas de esgoto bruto.



M_{EEF} =

	s0	s1	s2	s3
s0	97%	3%	0%	0%
s1	2,5%	96,3%	1,2%	0%
s2	0%	0,2%	99,5%	0,2%
s3	0%	0%	25%	75%

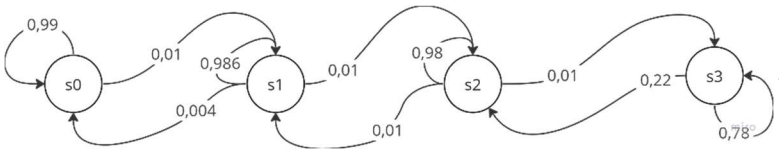
Fonte: Autor (2024)

Para as bombas de recirculação, são possíveis 4 estados:

0) Duas bombas operam bomba disponível e a reserva em stand-by.
1) Uma bomba falha e a redundante entra em operação imediata.
2) Duas bombas falham e a elevatória opera em déficit de vazão requerida.
3) Todas falham e a elevatória não cumpre a função requerida.

As probabilidades são distribuídas e esquematizadas como a seguir:

Figura 16: Diagrama de estados em sistema de 3 bombas de recirculação de lodo ativado.



M_{ERL} =

	s0	s1	s2	s3
s0	99%	1%	0%	0%
s1	0,4%	98,7%	1%	0%
s2	0%	1%	98%	1%
s3	0%	0%	22%	78%

Fonte: Autor (2024)

Os três modelos foram calculados em 730 passos (dias) através de uma planilha em MS Excel apoiada por um script em VBA (Visual Basic for Application) para realizar as iterações e registros dos dados. Com isso, foram obtidas as estimativas para o período de 2 anos adiante da análise.

4-RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através dos modelos construídos, foi possível determinar a probabilidade de cada sistemas apresentar cada estado possível de acordo com "n" passos. Ou seja, estimar as chances de uma instalação ser capaz ou não de cumprir sua função, levando em conta suas redundâncias e histórico de falhas.

Com o modelo calculado em 730 iterações foi possível registrar a probabilidade das transições para cada instalação durante os 2 anos como mostra a figura 16 a seguir:

Figura 16: Registros das probabilidades de transição calculadas pelo modelo.

Instalação	Passo	p00	p01	p02	p03	p10	p11	p12	p13	p20	p21	p22	p23	p30	p31	p32	p33
EEE	1	94%	6%	0%	0%	5%	93%	2%	0%	0%	0%	98%	1%	0%	0%	6%	94%
SOP	1	97%	3%	0%		1%	98%	1%		0%	74%	25%					
ERL	1	98%	2%	0%	0%	1%	97%	2%	0%	0%	3%	96%	1%	0%	0%	39%	61%
EEE	2	91%	9%	0%	0%	7%	90%	4%	0%	1%	1%	97%	2%	0%	0%	8%	92%
SOP	2	96%	4%	0%		1%	98%	1%		0%	86%	13%					
ERL	2	97%	3%	0%	0%	1%	96%	3%	0%	0%	4%	94%	1%	0%	1%	52%	47%
EEE	3	88%	12%	0%	0%	9%	87%	5%	0%	1%	1%	96%	3%	0%	0%	11%	89%
SOP	3	94%	6%	0%		1%	97%	1%		1%	92%	7%					
ERL	3	96%	4%	0%	0%	1%	95%	4%	0%	0%	5%	93%	2%	0%	2%	61%	37%
EEE	4	85%	14%	0%	0%	11%	84%	6%	0%	1%	1%	95%	3%	0%	0%	13%	87%
SOP	4	93%	7%	0%		2%	97%	1%		1%	95%	4%					
ERL	4	95%	4%	0%	0%	2%	94%	4%	0%	0%	7%	91%	2%	0%	2%	68%	29%
							...										
EEE	314	17%	19%	51%	13%	17%	18%	52%	13%	14%	16%	55%	15%	14%	15%	56%	15%
SOP	314	19%	80%	1%		19%	80%	1%		19%	80%	1%					
ERL	314	22%	47%	30%	1%	19%	48%	32%	1%	18%	48%	33%	1%	18%	48%	33%	1%
EEE	315	17%	19%	51%	13%	17%	18%	52%	13%	14%	16%	55%	15%	14%	15%	56%	15%
SOP	315	19%	80%	1%		19%	80%	1%		19%	80%	1%					
ERL	315	22%	47%	30%	1%	19%	48%	32%	1%	18%	48%	33%	1%	18%	48%	33%	1%
							...										
EEE	729	15%	17%	54%	14%	15%	17%	54%	14%	15%	17%	54%	14%	15%	17%	54%	14%
SOP	729	19%	80%	1%		19%	80%	1%		19%	80%	1%					
ERL	729	20%	48%	32%	1%	20%	48%	32%	1%	20%	48%	32%	1%	20%	48%	32%	1%
EEE	730	15%	17%	54%	14%	15%	17%	54%	14%	15%	17%	54%	14%	15%	17%	54%	14%
SOP	730	19%	80%	1%		19%	80%	1%		19%	80%	1%					
ERL	730	20%	48%	32%	1%	20%	48%	32%	1%	20%	48%	32%	1%	20%	48%	32%	1%

Fonte: Autor (2024)

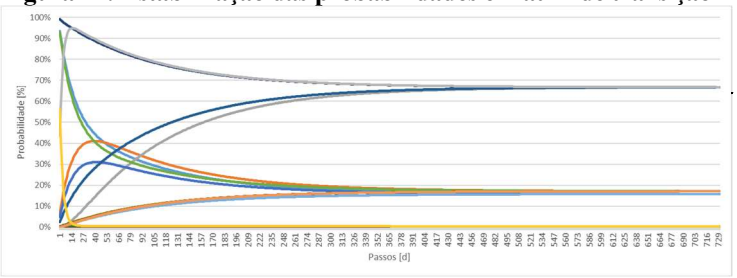
Estes dados apresentaram estabilização com o passar do tempo, convergindo para estados finais específicos independentemente dos iniciais, como será apresentado a seguir:

- *Elevatória de Esgoto Bruto*

Para a Elevatória de Esgoto Bruto, a matriz se estabiliza por volta do passo 400 e indica 67% de probabilidade de operar no estado "s2". A probabilidade de ocupar o estado "s3', onde não seria capaz de cumprir sua função é menor do que 1% e muito inferior às probabilidades de desempenho onde superariam sua demanda.

Esta condição é entendida aceitável, já que de acordo com o dimensionamento do plano de produção, é necessário que se opere apenas uma bomba por vez para a performance requerida do sistema.

Figura 17: Estabilização das probabilidades e matriz de transição final: Bombas de Esgoto Bruto.



M_{EEF} =

	s0	s1	s2	s3
s0	16%	17%	67%	0%
s1	16%	17%	67%	0%
s2	16%	17%	67%	0%
s3	16%	17%	67%	0%

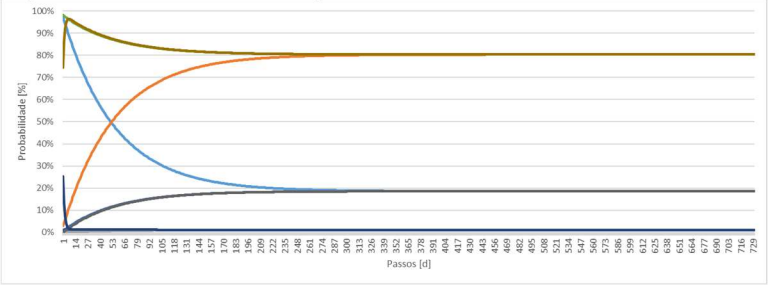
Fonte: Autor (2024)

- *Sopradores dos Tanques de Aeração*

No caso dos sopradores, a estabilização da matriz ocorre com cerca de 250 passos e apresenta 80% de probabilidade de operar no estado "s1". A probabilidade ocupar o estado "s2", onde não cumpriria sua função, é de cerca de 1%, enquanto 19% são as chances de se atingir o estado "s0", que indica superação de capacidades.

Do mesmo modo que na instalação anterior, a configuração atual também é satisfatória, já que a probabilidade de se atingir o estado "s2" é quase nula. Isso se deve ao fato de o histórico deste equipamento apresentar longos períodos de reparo, mas em contrapartida, quando operando, desempenha sua função com alta confiabilidade.

Figura 18: Estabilização das probabilidades e matriz de transição final: Sopradores.



M_{SOP} =

	s0	s1	s2
s0	19%	80%	1%
s1	19%	80%	1%
s2	19%	80%	1%

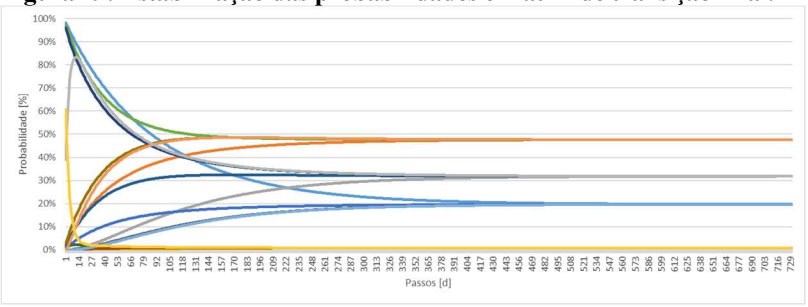
Fonte: Autor (2024)

- *Elevatória de Recirculação de Lodo*

Na elevatória de recirculação percebe-se que o estado "s1" é predominante com 48% de probabilidade. No entanto, o segundo estado mais provável, com 32% de chances de ocorrer, é o "s2", onde operaria com deficiência, já que essa instalação demanda de duas bombas disponíveis. A probabilidade de ocupar o estado "s0", que supera sua capacidade, é de apenas 20%.

Este caso apresenta uma condição considerada "de risco", já que embora o sistema tenda a se manter em um estado satisfatório, apresenta chances significativas de operar no estado "s2" que é incapaz de cumprir sua função com desempenho adequado.

Figura 19: Estabilização das probabilidades e matriz de transição final: Elevatória de Recirculação.



M_{ERL} =

	s0	s1	s2	s3
s0	20%	48%	32%	1%
s1	20%	48%	32%	1%
s2	20%	48%	32%	1%
s3	20%	48%	32%	1%

Fonte: Autor (2024)

5-CONCLUSÃO

A aplicação deste estudo atingiu o objetivo proposto, já que sua aplicação possibilitou a avaliação de disponibilidade estimada para sistemas que operam com redundância.

O método das cadeias de Markov proporciona uma estimativa coerente para se estimar a probabilidade de colapso nos sistemas operados considerando todos os possíveis eventos relacionados às estratégias de operação redundantes. Através dessa ferramenta, é possível avaliar a pertinência de instalações que operem com equipamentos reserva, e simular cenários de redimensionamento propostos, e com isso, tomar decisões sustentadas em dados sólidos.

Notou-se através do modelo aplicado que dos 3 subsistemas avaliados, 2 operam com segurança operacional adequada, enquanto 1 é passível de uma avaliação mais detalhada. Tal avaliação é importante nos dois sentidos, já que enquanto uma instalação corre potencial risco de indisponibilidade, as demais podem estar gerando custos desnecessários.

Como o estudo apresenta o uma avaliação quantitativa de riscos, é possível utilizar-se de seus resultados para basear diagnósticos e planos de melhoria para as instalações analisadas. Como exemplo, a elevatória de recirculação possui significativa probabilidade de insuficiência e recomenda-se intervenções no sentido de garantir o atendimento pleno de sua demanda operacional.

Sugere-se que este modelo seja reaplicado em outras ETE's, já que seus projetos são concebidos com os mais variados critérios de dimensionamento para sistemas redundantes. Além disso, também se propõe como continuidade para este estudo, a aplicação destes modelos em simulações que avaliem configurações alternativas dessas instalações. Assim, será possível apresentar modelos ótimos que equilibrem custo, risco e desempenho destes processos considerados críticos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AQUA SSOLUTION. 2024, Portal da Empresa. <acessado em 23/07/2024>

2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462: Confiabilidade e Mantenabilidade** – Referências - Elaboração. Rio de Janeiro, 1994.

3. BRANCO FILHO, Gil. **Indicadores e Índices de Manutenção.** Editora Ciência Moderna Ltda. Rio de Janeiro, 2006.

4. GOLMAKANI, A; SILVA, A.A; FREIRA, M.S.F.;BARBOSA, M.K.; CARVALHO, P.H.G.; ALVES, V.L.; **Cadeias de Markov.** VII Bienal da Sociedade Brasileira de Matemática Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2014

5. GURSKI, Carlos Alberto. **Curso de Formação de Operadores de Refinaria: Noções de Confiabilidade e Manutenção Industrial.** Petrobras, Curitiba, 2002.

6. MIRANDA, Marcelo Accorsi; BRICK, Eduardo Siqueira; **Modelo de confiabilidade, disponibilidade e manutenabilidade de sistemas aplicado a plataformas de petróleo.** XXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Ouro Preto-MG, 2003.

7. ReCESA; **Esgotamento Sanitário – Processos de Tratamento de Esgotos - Nível 1**; Brasil; ReCESA-Redede Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental

8. SILVEIRA, Júlio Cesar Agricola Costa da. **Análise RAM de um Sistema de Transporte de Bobinas de Aço.** Monografia (Especialização) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná UTFPR, Paraná, 2017.

9. UFPE-UNIVERSIDADE FEDERAL DO PERNAMBUCO.; **Capítulo 5 – Processos de Markov.** P146-200, Disponível em: https://www.cin.ufpe.br/~rmfl/ADS_MaterialDidatico/PDFs/Markov/ProcessosMarkovianos

10. VIERRI, Luiz Alberto; **Gerenciamento pela Qualidade Total na Manutenção Industrial: Aplicação Prática.** Rio de Janeiro: Qualitymark, 2007

11. Sabesp, 2024. Portal da Empresa <acessado em 02/04/2024>