

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO

Julio Henrique Dreher

ESTUDO DE CONFIABILIDADE PARA SUBSIDIAR A
TOMADA DE DECISÃO COM RELAÇÃO AO RISCO
OPERACIONAL DA BARRAGEM PRINCIPAL DA USINA
HIDRELÉTRICA DE ITAIPU BINACIONAL

Porto Alegre

2020

Julio Henrique Dreher

**ESTUDO DE CONFIABILIDADE PARA SUBSIDIAR A TOMADA DE DECISÃO
COM RELAÇÃO AO RISCO OPERACIONAL DA BARRAGEM PRINCIPAL DA
USINA HIDRELÉTRICA DE ITAIPU BINACIONAL**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação Mestrado Profissional em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, modalidade Profissional, na área de concentração em Sistemas da Qualidade.

Orientador: José Luis Duarte Ribeiro, Dr.

Porto Alegre

2020

Julio Henrique Dreher

**ESTUDO DE CONFIABILIDADE PARA SUBSIDIAR A TOMADA DE DECISÃO
COM RELAÇÃO AO RISCO OPERACIONAL DA BARRAGEM PRINCIPAL DA
USINA HIDRELÉTRICA DE ITAIPU BINACIONAL**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção na modalidade Profissional e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação Mestrado Profissional em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Jose Luis Duarte Ribeiro, Dr.

Orientador PMPEP/UFRGS

Profa. Christine Tessele Nodari

Coordenador PMPEP/UFRGS

Banca Examinadora:

Professora Angélica Alebrant Mendes, Dra. (CECS/UFABC)

Professor Michel José Anzanello, Ph.D. (PMPEP /UFRGS)

Profissional Reinaldo Andres Gonzalez Fernandez, Dr. (ITAIPU)

Dedicatória

À minha amada esposa Fabiana e meus filhos
Lucas e Lívia, pelo apoio incondicional em
todos os momentos. Sem vocês nenhuma
conquista valeria a pena.

Aos meus pais, Almir e Juliede, por sempre
acreditarem em mim e por terem dedicado suas
vidas em prol das realizações e da felicidade de
seus filhos.

AGRADECIMENTOS

Epígrafe

*“Um defeito escondido se tornará muito aparente nas piores
circunstâncias possíveis.”*

(Murphy)

RESUMO

A tomada de decisões está diretamente relacionada com o conhecimento da capacidade que um sistema tem em manter seu funcionamento em circunstâncias hostis e inesperadas, isto é, a partir do momento que uma falha em um sistema possa proporcionar risco à vida humana, degradação ambiental ou grandes perdas patrimoniais. As informações sobre a capacidade de resposta destes sistemas, frente a eventos críticos se torna importante tanto para definição de ações imediatas, visando reduzir os riscos, quanto para minimizar os danos após um evento crítico indesejável por meio do acionamento de planos de contingência. Esta dissertação concentra-se em encontrar as fraquezas do sistema, calcular a probabilidade e o potencial impacto dos riscos. Apresenta-se como importante opção para mitigar ameaças e amortecer impactos de eventos imprevisíveis. Desenvolver a resiliência na gestão da segurança em sistemas complexos representa uma possível defesa contra impactos de diferentes níveis. Nesse contexto, os sistemas críticos, como as barragens hidrelétricas, necessitam de estudos que avaliem a garantia do seu funcionamento a fim de evitar falhas inesperadas. Projetos de grandes barragens trazem grandes benefícios no controle de inundação, irrigação e geração de energia, no entanto, existem riscos à hidrologia, geologia, design, construção e envelhecimento. Esses riscos em potencial precisam ser mensurados e controlados para garantir a qualidade e a confiabilidade do sistema. O presente estudo de caso apresenta um procedimento para auxiliar a tomada de decisão com relação ao risco operacional da Barragem Principal da Usina Hidrelétrica da Itaipu Binacional, onde a tomada de decisão está alicerçada nos resultados das simulações provenientes do método de Monte Carlo. A análise do sistema de drenagem da Barragem Principal é observada em duas perspectivas, a primeira destaca quais são os equipamentos que apontam para as possíveis falhas no dimensionamento do projeto indicando onde devem ser aplicados os maiores esforços para sua melhoria. A segunda perspectiva foca na confiabilidade do sistema de drenagem da Barragem Principal por meio de simulações que utilizam dados históricos dos conjuntos de equipamentos e aplicam variações nos parâmetros da taxa de falha e de reparo. Como resultado, os piores casos de operação são analisados, além do comportamento deste sistema de drenagem ao longo do tempo. Este processo analisou o sistema de drenagem da Itaipu Binacional, quantificando sua robustez e permitiu aos gestores aperfeiçoar a operação do sistema de drenagem e a tomada de decisões.

Palavras-chave: Confiabilidade, Itaipu Binacional, Sistema de drenagem, Operação, Grandes barragens, Sistemas críticos, Simulação de Monte Carlo.

ABSTRACT

Decision-making is directly related to the knowledge of the ability of a system to maintain its functioning in hostile and unexpected circumstances, that is, from the moment that a failure in a system can pose a risk to human life, environmental degradation or major property losses. Information about the responsiveness of these systems in the face of critical events becomes important both for defining immediate actions, aiming to reduce risks, and to minimize damage after an undesirable critical event by triggering contingency plans. This dissertation focuses on finding the weaknesses of the system, calculating the probability and the potential impact of the risks. It presents itself as an important option to mitigate threats and cushion impacts of unpredictable events. Developing security management resilience in complex systems represents a possible defense against impacts at different levels. In this context, critical systems, such as hydroelectric dams, need studies that assess the guarantee of their operation in order to avoid unexpected failures. Large dam's projects bring great benefits in flood control, irrigation and energy generation, however, there are risks to hydrology, geology, design, construction and aging. These potential risks need to be measured and controlled to ensure the quality and reliability of the system. The present case study presents a procedure to assist decision making regarding the operational risk of the Main Dam of the Itaipu Binacional Hydroelectric Power Plant, where decision making is based on the results of the simulations from the Monte Carlo method. The analysis of the drainage system of the Main Dam is observed in two perspectives, the first highlights which are the equipment that point to possible flaws in the design of the project, indicating where the greatest efforts should be applied for its improvement. The second perspective focuses on the reliability of the main dam drainage system through simulations that use historical data from the equipment sets and apply variations in the failure rate and repair parameters. As a result, the worst operating cases are analyzed, in addition to the behavior of this drainage system over time. This process analyzed Itaipu Binacional's drainage system, quantifying its robustness and allowed managers to improve the operation of the drainage system and decision making.

Keywords: Reliability, Itaipu Binacional, Drainage system, Operation, Large Dams, Critical Systems, Monte Carlo Simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração de sistemas	25
Figura 2 - Corte transversal da barragem de Itaipu Binacional.....	31
Figura 3 – Bloco de instrumentação	33
Figura 4 – Vazão de infiltração pela fundação e concreto	34
Figura 5 – Conduto forçado.....	35
Figura 6 – Detalhes da junta de expansão	36
Figura 7 – Arranjo físico das estações de drenagem	37
Figura 8 - Estrutura civil do poço CQ03.	38
Figura 9 – Alimentação elétrica das estações de drenagem	39
Figura 10 – Modelo do sistema de drenagem.....	42
Figura 11 - Modelo de Markov a dois estados.	44
Figura 12 – Fluxograma do Algoritmo I	48
Figura 13 – Fluxograma do Algoritmo II.....	50
Figura 14 – Probabilidade de falha do sistema e convergência β . Caso 1.....	53
Figura 15 – Percentual de ocorrência dos equipamentos nas falhas do sistema.....	54
Figura 16 – Impacto da confiabilidade do sistema.....	55
Figura 17 – Alocação da confiabilidade para alcançar confiabilidade de 95% associada a 377,2 horas de operação sem reparos.	56
Figura 18 – Probabilidade de falha do sistema e convergência β . Caso 2.....	57
Figura 19 - Impacto da variação na taxa de reparo.....	58
Figura 20 - Impacto da variação na taxa de falha.....	59
Figura 21 – Mudança proposta na topologia do sistema de drenagem.....	60
Figura 22 – Percentual de falha do sistema e convergência β . Caso 3.....	61
Figura 23 – Fluxograma do Algoritmo III.....	62
Figura 24 – Parâmetros Gerais	63
Figura 25 – Diagrama	64
Figura 26 – Resultados – Criar fórmula	64
Figura 27 – Resultados - Calcular	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características das bombas de drenagem	38
---	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	TEMA E OBJETIVOS.....	14
1.2	JUSTIFICATIVA.....	15
1.3	MÉTODO.....	16
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	Confiabilidade.....	18
2.2	Manutenção de Sistemas.....	22
2.3	Sistemas de Componentes.....	22
2.4	Modelos de Sistemas.....	25
2.5	Resiliência.....	27
2.6	Método de Simulação de Monte Carlo	27
3	DESCRIÇÃO DO SISTEMA	30
3.1	Barragem Principal	30
3.2	Vazões de Infiltração pelas Fundações e Concreto.....	31
3.3	Junta de Expansão do Conduto Forçado	34
3.4	Estações de drenagem	37
3.5	Poço de drenagem CQ03.....	38
3.6	Alimentação elétrica	39
3.7	Modelo da Barragem Principal	41
3.8	Modelo do Sistema de Drenagem	42
3.9	Modelo de Operação dos equipamentos	44
3.10	Confiabilidade dos Componentes	44
4	APLICAÇÃO DO METODO DE MONTE CARLO PARA ANÁLISES.....	46
4.1	Classificação de Ponto Crítico do Sistema de Drenagem.....	47
4.2	Confiabilidade do Sistema de Drenagem.....	49
5	RESULTADO E DISCUSSÃO	52
5.1	Determinação dos Pontos Críticos do Sistema	52
5.2	Determinação da Confiabilidade do Sistema de Drenagem.....	56
5.3	Aplicativo de Análise Probabilística de Equipamento Crítico.....	61
6	CONCLUSÃO.....	66
7	REFERÊNCIAS.....	68
8	ANEXOS.....	72
8.1	CÓDIGOS DE LOCALIZAÇÃO	72
9	APÊNDICE.....	74
9.1	A - Dados Estatísticos	74
9.2	B - Algoritmos	87

9.2.1	Algoritmo para Determinação do Equipamento Crítico - MC_DEC	87
9.2.2	Algoritmo Sequencial - MC_SEQ.....	90
9.2.3	Algoritmo Sequencial com Iterações Fixa- MC_SEQ_TF.....	95
9.2.4	Algoritmo sequencial para quatro QQ - MC_DEC_4QQ	100

1 INTRODUÇÃO

Organizações são pressionadas a manter altos níveis de produtividade sem que sejam descuidados aspectos referentes à segurança das pessoas, instalações e meio ambiente. Nesse cenário, a integridade dos ativos deve ser garantida através de estratégias e atividades que visam mantê-los disponíveis, seguros e confiáveis (HASSAN; KHAN, 2012). Nesta perspectiva, que envolve o estudo e gestão da segurança nos sistemas complexos, a Engenharia de Resiliência apresenta-se como uma nova opção (HOLLNAGEL, 2006). Segundo Leveson (2006), resiliência é a habilidade do sistema impedir falhas ou adaptar-se às circunstâncias a fim de manter o controle sobre uma propriedade do sistema, para o caso deste estudo, a segurança dele.

Em instalações críticas cujas consequências de um acidente sejam elevadas economicamente ou socialmente, a relação custo benefício entre produção e segurança é, muitas vezes, pouco explorada. Para Reiman e Oedewald (2009), qualquer organização que tenha de lidar ou controlar riscos que podem causar danos significativos ao meio ambiente, público ou pessoal, se enquadram nessa categoria. Este tipo de organização deve possuir a capacidade de monitorar o seu estado atual, prever possíveis desvios, reagir a perturbações esperadas ou inesperadas, conhecer as fraquezas do sistema e aprender com os incidentes do passado (REIMAN; OEDEWALD, 2009). Cook, Render e Woods (2000) afirmam que uma maneira de reforçar a segurança nesse tipo de organização é desenvolver a capacidade do sistema detectar riscos e lidar com a variabilidade e incerteza do sistema.

Nessa mesma linha de raciocínio, as características dos sistemas de segurança física dessas organizações, normalmente são sobre dimensionadas ou duplicadas, diminuindo assim a probabilidade de risco de catástrofes, sem, no entanto, diminuir o impacto socioeconômico caso barreiras não planejadas sejam rompidas ou situações imprevistas ocorram. Instalações geradoras de energia elétrica com grandes barragens enquadram-se neste perfil de organizações de alta confiabilidade cujo risco operacional está, de alguma forma, fora de controle, o que as obrigam a constantemente revisitar sua capacidade de monitorar, antecipar e responder a eventos de risco à segurança de seus sistemas (HOLLNAGEL, 2006).

A Barragem da Itaipu Binacional (IB) inaugurada em 1982, está caracterizada como a mais profunda (170 metros), é a quarta maior em volume de água (29 km³) do Brasil. Esta barragem conta com instrumentos distribuídos no concreto e nas fundações, essenciais para monitorar o desempenho destas estruturas, permitindo avaliar a condição física da barragem

mesmo após 37 anos de operação. Mudanças na legislação e nas tecnologias existentes, alinhadas a visão organizacional, “Até 2020, a Itaipu Binacional se consolidará como a geradora de energia limpa e renovável com o melhor desempenho operativo e as melhores práticas de sustentabilidade do mundo, impulsionando o desenvolvimento sustentável e a integração regional” (Itaipu Binacional, 2018 | Visão), ressaltam o interesse de adotar práticas de resiliência para delinear a segurança operacional de seus ativos.

A aplicação de conceitos e técnicas de Engenharia de Confiabilidade (EC) alinhada aos preceitos da Engenharia de Resiliência (ER) apresenta-se como uma importante oportunidade para este tipo de organização considerada crítica. Essa aplicação conjunta permite revisar suas análises de risco tradicionais pela EC e inserir nestas os princípios e propriedades de ER, tornando a análise mais adequada aos preceitos da segurança proativa. Neste contexto, este trabalho aplicará princípios e conceitos de EC e ER, alinhados as heurísticas do Método de Monte Carlo (MMC) a fim de suplementar a análise de risco da Barragem Principal da Usina Hidrelétrica Itaipu Binacional.

Uma tomada de decisão operacional de uma instalação crítica em condições normais não exige conhecimentos adicionais do gestor, pois é baseada no “muito que dá certo”, contudo, eventos não desejáveis como acidentes, falhas inesperadas ou evento crítico qualquer que coloque em risco toda a instalação ou a vida das pessoas exigem que os gestores tomem decisões de forma rápida e precisa. Portanto, esta investigação subsidia o gestor na tomada de decisão, visando reduzir ao máximo os impactos nos ativos, no meio ambiente e na segurança das pessoas.

1.1 TEMA E OBJETIVOS

Essa dissertação utiliza técnicas de confiabilidade aplicadas em conjunto com a Engenharia de Resiliência para o estudo da Segurança Operacional na Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional, com o intuito de reduzir o impacto que eventuais acidentes de grandes proporções em tal estrutura podem causar às sociedades brasileira e paraguaia.

Especificamente, esta dissertação apresenta o sistema de drenagem indispensável para garantir o monitoramento das condições de vida da barragem e uma análise da confiabilidade deste sistema quando há ocorrência de falhas em equipamentos que o compõem. Dando seguimento ao trabalho, um estudo de capacidade de resposta do sistema é realizado inserindo

eventos críticos não desejáveis e avaliando seu impacto através do uso do Método de Monte Carlo não sequencial e sequencial.

O objetivo do Sistema de Drenagem é realizar o bombeamento da água presente nas cotas inferiores da forma mais econômica e confiável possível. Melhorar a confiabilidade do serviço após certo ponto requer investimentos acentuados. Este estudo de confiabilidade do sistema de drenagem tem como objetivo principal avaliar a capacidade de resposta do sistema de drenagem. Deste estudo são extraídos os seguintes objetivos secundários: determinar se é necessário realizar investimentos para que o sistema analisado obtenha índices de confiabilidade operativa aceitáveis aos gestores e, se sim, onde deve ser investido. Desenvolver um painel de gestão que indique a saúde do sistema de drenagem da barragem principal.

1.2 JUSTIFICATIVA

A promulgação da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) destinadas à acumulação de água para quaisquer usos. A PNSB é uma lei que tem o objetivo de garantir que padrões de segurança de barragens sejam seguidos, de forma a reduzir a possibilidade de acidentes e suas consequências, além de regulamentar as ações e padrões de segurança (AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS, 2020).

A Barragem da Itaipu Binacional inaugurada em 1982 está caracterizada como a mais profunda (170m) e a quarta maior em volume de água (29km³) do Brasil. Esta instalação conta com mais de cinco mil drenos, os drenos aliviam as subpressões geradas pelas águas que infiltram da fundação das barragens e do concreto, além de possuir uma instrumentação de auscultação das estruturas civis composta de mais de dois mil sensores que se encontram em operação desde a concepção da BP. Com as mudanças na legislação e nas tecnologias existentes, parte destes instrumentos foi automatizada, aumentando assim a facilidade de monitoramento das estruturas civis. Os instrumentos de auscultação são essenciais para monitorar o desempenho das estruturas de concreto e fundações, permitindo avaliar a condição da barragem mesmo após 37 anos de operação.

Parte da instrumentação e sensores está instalada nas cotas inferiores da BP, ou seja, está posicionada abaixo do nível de água à jusante, assim, a operação destes instrumentos está condicionada ao funcionamento de um sistema de drenagem capaz de manter essas cotas

livres de alagamentos ou inundações, esse sistema em questão, é formado por seis poços de drenagem, vinte e três conjuntos motobomba, centenas de metros de tubulações que chegam a 500 milímetros de diâmetro, além de dezenas de válvulas e registros. Neste sentido, o estudo de confiabilidade do sistema de drenagem, essencial para permitir o funcionamento do sistema que monitora o desempenho das estruturas de concreto e fundações, apresenta grande importância para os gestores, uma vez que, em caso de acidentes, representa um grande risco para o meio ambiente, para as pessoas e ativos de alto valor.

1.3 MÉTODO

O método utilizado é o estudo de caso, objetivando gerar conhecimento para aplicação prática dirigida à solução de um problema específico, classifica-se esta pesquisa como de natureza aplicada. Quanto à forma de abordagem, adaptado de Gil (2002), ela está classificada como quantitativa, uma vez que a coleta e tratamento de dados são quantificados e tratados matematicamente. Seus objetivos a classificam como exploratória.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em seis capítulos. A introdução ao tema compõe o primeiro capítulo, que justifica a importância de efetuar o estudo da confiabilidade do Sistema de Drenagem, subsidiando os gestores com informações sobre o comportamento do sistema de drenagem da barragem principal da Itaipu Binacional frente a eventos críticos, além de respaldar a necessidade de investimentos nos ativos da empresa. O método adotado é um estudo de caso que se baseia na engenharia de resiliência para avaliar o risco de inundação das cotas inferiores da barragem principal, fazendo uso de ferramentas computacionais como o *software MatlabTM*, *PROSISTM* e *PROCONFTM* os dois últimos fornecidos pelo CHTech Desenvolvimento de Sistemas LtdaTM.

O segundo capítulo apresenta uma revisão da literatura sobre conceitos de engenharia de confiabilidade, indicadores de segurança e princípios de engenharia de resiliência.

O terceiro capítulo descreve o Sistema de Drenagem da barragem principal da Itaipu Binacional, introduzindo informações de percolação, sistema de alimentação elétrica, distribuição dos poços de drenagem ao longo da barragem, além de apresentar os dados estatísticos dos elementos que compõem o sistema.

O quarto capítulo apresenta a formação das premissas para aplicação do Método de Monte Carlo - MMC aos dados de confiabilidade aplicados a uma análise de risco para inundação das cotas inferiores.

O quinto capítulo apresenta os resultados e discussões da modelagem desenvolvida no capítulo quatro para este estudo de caso.

O sexto capítulo apresenta as conclusões obtidas a partir da pesquisa desenvolvida, esclarecendo as limitações da pesquisa, as considerações e sugestões para estudos futuros. A última seção oferece contribuições e considerações da pesquisa e apresenta sugestões para estudos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Confiabilidade

O desempenho de qualquer bem de consumo, produto ou serviço deve atender às expectativas do cliente e/ou consumidor, a fim de garantir a competitividade da empresa. Essa capacidade de um sistema, produto ou serviço desempenhar sua função específica por meio de condições operacionais estabelecidas, por um período determinado pode ser descrita como confiabilidade (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

Os sistemas são uma coleção de componentes arranjados de acordo com um desenho específico e de modo a realizar funções desejadas (ELSAYED, 1996). Para determinar a confiabilidade de um sistema é necessário não apenas avaliar seus componentes, mas também a disposição dos mesmos e a sua interrelação (VACCARO, 1997). Nesse sentido, embora exista a tendência de considerar que um sistema composto por componentes altamente confiáveis será altamente confiável, o que determina o resultado da confiabilidade é a estrutura do sistema por completo.

Nesse contexto, sistemas críticos como aqueles que compõem as grandes barragens de hidrelétricas necessitam de estudos que avaliem a garantia do seu funcionamento, a fim de evitar falhas inesperadas (NIERADKA, 2016). Barragens são construídas para controlar o fluxo natural das águas, contudo, essa atividade apresenta riscos em potencial que precisam ser mensurados e controlados a fim de garantir a qualidade do sistema e a sua confiabilidade.

Para Lloyd e Lipow (1984), confiabilidade é uma característica que descreve o quão bom um produto realmente é. Pode ser descrita como a probabilidade, a um nível de confiança desejável, que o item venha a desempenhar suas funções, sem falhar, por um período específico. Eles destacam a importância de (i) definir as funções para as quais o produto, serviço, processo ou sistema foi projetado; (ii) entender quais são as operações normais de uso, para então poder estabelecer o que pode ser considerado uma falha; (iii) entender as condições do ambiente; (iv) e estabelecer o período de tempo durante o qual o produto deve funcionar corretamente. Além disso, não considerar a confiabilidade tem efeito no custo, no tempo, além de prejuízos psicológicos causados pela inconveniência (LLOYD; LIPOW, 1984).

Para Fogliatto e Ribeiro (2009), a confiabilidade está associada à operação bem-sucedida de um produto, processo ou sistema sem que haja quebras ou falhas. A

confiabilidade surge como um fator de desempenho dos sistemas, permitindo a análise do cumprimento dos parâmetros determinados no desenvolvimento dos projetos ao longo de um tempo estipulado e controlado, o tempo neste caso, não deve ser interpretado literalmente.

Confiabilidade pode ser considerada uma das dimensões mais importantes para avaliar a qualidade de um produto ou serviço (ELSAYED, 1996). Por esta razão, é cada vez mais relevante para as organizações, estando diretamente relacionada com a segurança e satisfação do cliente, e paradoxalmente relacionada com a competitividade no mercado. Para Guimarães (2002), as definições de confiabilidade evoluem à medida que consideram a probabilidade como a forma de descrevê-la. Nesse sentido, a confiabilidade é quantificada a partir da probabilidade. Sendo traduzida dessa forma, ela passa a ser mensurável, tornando-se mais fácil de avaliá-la objetivamente (VACCARO, 1997).

As definições de confiabilidade são associadas de forma primitiva à qualidade, assim, é necessário entender os conceitos e distinguir Qualidade de Confiabilidade. Segundo Halpern (1978), o termo Qualidade é definido como “a capacidade de um produto ou processo estar em conformidade com especificações e normas” onde o autor define a Confiabilidade como “a probabilidade de que um determinado item consiga cumprir um objetivo específico mediante condições ambientais determinadas em um período estabelecido”.

Neste contexto, a qualidade de um produto pode ser obtida através de validações de conformidade do produto ou sistema com o especificado em projeto, portanto, o conceito de qualidade está associado a um julgamento durante o estágio de testes e validações, enquanto a confiabilidade é mensurada através do monitoramento do MTTF - *Mean Time to Failure* - e da taxa de falha ao longo do tempo. Através da avaliação da confiabilidade é possível analisar os impactos do projeto sobre a performance, manutenibilidade e segurança oferecidos por um produto ou sistema, de modo que não falhe prematuramente, o que poderia gerar grandes gastos de recursos ou indenizações por riscos de vida (VACCARO, 1997).

Essa seção da engenharia que estuda a garantia de uma performance livre de falhas para os produtos e sistemas é definida como Engenharia de Confiabilidade (LUTHRA, 1988). Observa-se que a qualidade não garante, por si só, a confiabilidade. Usualmente, o desempenho ao longo do tempo não é levado em consideração na avaliação da qualidade. Por outro lado, o conceito de confiabilidade está diretamente envolvido com o tempo, partindo do princípio de que haverá um desgaste contínuo com o uso, onde o produto ou sistema passa a ter chances de falha cada vez maiores. A confiabilidade é, portanto, a qualidade de se sustentar ao longo do tempo.

Adaptando de Lloyd e Lipow (1984) e Halpern (1978), a confiabilidade envolve quatro elementos:

- i. Probabilidade:** a confiabilidade é mensurável podendo ser decomposta por uma fração ou porcentagem, assim, aplicam-se as ferramentas estatísticas e matemáticas.
- ii. Tempo de operação:** a confiabilidade depende do tempo. Ademais, um produto pode ter um tempo de missão previamente especificado. O tempo de vida útil de um equipamento pode ser definido a partir de sua Confiabilidade e vice-versa.
- iii. Desempenho:** um produto pode estar operacional, mas, ao longo do tempo, deixar gradativamente de cumprir as funções para o qual foi designado. Isto configura não somente uma falha, mas a falta de Confiabilidade.
- iv. Condições de operação:** a confiabilidade do produto ou sistema deve ser avaliada sobre determinadas condições estabelecidas de operação.

A confiabilidade possui medidas comumente utilizadas na literatura para uma unidade. Unidade pode designar um componente, subsistema ou sistema (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009). As medidas de confiabilidade supracitadas são: (i) a função confiabilidade $R(t)$; (ii) a função densidade de risco $h(t)$; (iii) a função acumulada de risco $H(t)$; (iv) a função densidade de probabilidade $f(t)$; (v) a função probabilidade de falha $F(t)$; (vi) o tempo médio até a falha - MTTF (*Mean Time To Failure*) para equipamentos não reparáveis; (viii) o tempo médio entre falhas – MTBF (*Mean Time Between Failure*); e (viii) o tempo médio de reparo – MTTR (*Mean Time To Repair*) dos equipamentos reparáveis.

Ainda no âmbito do cálculo da confiabilidade de componentes ou sistemas, sendo a confiabilidade uma função probabilística, convém a utilização de distribuições de probabilidade para que se possa fazer um estudo quantitativo. A distribuição exponencial utilizada neste trabalho além de muito difundida pela simplicidade de aplicação é a que melhor representa os sistemas elétricos, enquanto a Weibull é uma das distribuições mais conhecidas e aplicadas em sistemas mecânicos, uma vez que permite maior flexibilidade na descrição de processos aleatórios (ELSAYED, 1996; FOGLIATTO e RIBEIRO, 2009).

Para a distribuição exponencial, tem-se as seguintes equações, onde λ representa a taxa de falha:

$$h(t) = \lambda \quad \text{eq(1)}$$

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad \text{eq(2)}$$

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad \text{eq(3)}$$

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad \text{eq(4)}$$

Para a distribuição Weibull, tem-se as seguintes equações, onde γ representa o parâmetro de forma e θ representa o parâmetro de escala:

$$h(t) = \frac{\gamma}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\gamma-1} \quad \text{eq(5)}$$

$$f(t) = \frac{\gamma}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\gamma-1} e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\gamma} \quad \text{eq(6)}$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\gamma} \quad \text{eq(7)}$$

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\gamma} \quad \text{eq(8)}$$

Adaptando de Fogliatto e Ribeiro (2009), as análises de confiabilidade deste trabalho pressupõem que os componentes operam de forma binária, ou ele está funcionando ou não, ainda que tal suposição binária não descreva corretamente a forma de operação do componente, ela geralmente é necessária para possibilitar os cálculos. Também se supõem que a distribuição de probabilidade de falha é conhecida, tal que no tempo t de interesse, sua confiabilidade pode ser determinada.

Outro conceito importante para abordar é o da disponibilidade – *A (Availability)*, e a indisponibilidade – *U (Unavailability)*, o conceito de disponibilidade de um equipamento pressupõe períodos de operação e reparo não-desprezíveis, onde a disponibilidade é expressa pela razão entre o tempo que o equipamento permaneceu disponível e a soma do tempo que o equipamento permaneceu no estado disponível e indisponível. Um equipamento disponível é um equipamento operando ou apto a operar, caso o equipamento esteja em manutenção ou inoperante, ele é considerado indisponível.

Para Fogliatto e Ribeiro (2009) a disponibilidade é um dos principais indicadores de confiabilidade utilizados em programas de manutenção. A disponibilidade e indisponibilidade podem ser escritas como:

$$A = \frac{MTTF}{MTTF+MTTR} = \frac{\mu}{\mu+\lambda} \quad \text{eq(9)}$$

$$U = \frac{MTTR}{MTTR+MTTF} = \frac{\lambda}{\lambda+\mu} \quad \text{eq(10)}$$

Onde λ representa a taxa de falha e μ representa a taxa de reparo.

2.2 Manutenção de Sistemas

Manutenção é o conjunto de ações e recursos aplicados aos ativos para mantê-los nas condições de desempenho de fábrica e de projeto, visando garantir a consecução de suas funções dentro dos parâmetros de disponibilidade e confiabilidade de um equipamento ou sistema Mirshawra e Olmedo (1993). Adicionalmente, para Lafraia (2001), aumentar a confiabilidade do equipamento é função do plano de manutenção.

A Manutenção Centrada na Confiabilidade representa uma evolução da manutenção tradicional, sua metodologia sistemática de otimização da manutenção visa reduzir os custos da manutenção através do foco nos equipamentos cujas funções são mais importantes para o sistema, evitando ou removendo tarefas de manutenção que não são estritamente necessárias. (MOUBRAY 2001).

Kardec e Nascif (2009) tratam ainda do caráter estratégico da atividade de manutenção, de modo que para exercer um papel estratégico, a Manutenção precisa estar voltada para os resultados empresariais da organização. É preciso, sobretudo, deixar de ser apenas eficiente para se tornar eficaz; ou seja, não basta, apenas, reparar o equipamento ou a instalação o rápido quanto possível, mas é preciso, principalmente, manter a função do equipamento disponível para a operação, reduzindo a probabilidade de uma parada de produção não planejada.

Para Lafraia (2001), os indicadores de desempenho de manutenção podem direcionar as análises de falha, identificar oportunidades de melhoria nos processos de manutenção bem como referenciar a tomada de decisão. O MTBF indica a frequência de falha de um sistema, um MTBF alto representa uma alta confiabilidade, se após a manutenção o indicador aumentou isso indica aumento na qualidade dos processos de manutenção. O MTTR indica a eficiência na ação corretiva de um processo, ele deve ser o menor possível para evitar a perda de produtividade por indisponibilidade do sistema, menor tempo médio de reparo indica que a manutenção possui respostas rápidas para problemas em seus processos, o que demonstra eficiência.

2.3 Sistemas de Componentes

Para Fogliatto e Ribeiro (2009), sistema é todo o conjunto de componentes interconectados segundo um projeto determinado, Elsayed (1996) complementa que esses componentes são arranjados conforme um desenho específico de modo a realizar funções

desejadas com desempenho e confiabilidade aceitáveis. Segundo May e Tung (1992), um sistema pode ser composto por vários subsistemas e a confiabilidade de cada sistema depende de como cada componente está interconectado. Fogliatto e Ribeiro (2009) concluem que o tipo e a qualidade dos componentes usados, bem como a forma como estão arranjos influem diretamente no desempenho do sistema por eles composto. Assim, uma vez configurado o sistema, sua confiabilidade pode ser determinada, a confiabilidade de um ou mais componentes ou a topologia do sistema pode ser alterada para atender as especificações de projeto.

O diagrama de blocos ou fluxograma é uma forma padronizada e eficaz para representar os passos lógicos de um determinado processo ou sistema, o bloco de função representa um componente ou subsistema elementar, as interações entre os componentes são representadas por entradas e saídas conectadas no bloco por linhas de conexão. Portanto, sua principal função é facilitar a visualização dos passos de um processamento. (OGATA 2000).

Um bloco pode representar um único componente ou um grupo de componentes, mas cada bloco é caracterizado por sua confiabilidade, a forma com a qual os blocos estão conectados, ou seja, a visualização do sistema proporcionada pelo diagrama de blocos descreve através de uma equação matemática a interação dos componentes que compõem o sistema, assim, a confiabilidade resultante desta equação é a confiabilidade do sistema.

Neste trabalho, as interações entre os blocos do sistema podem ser classificadas como série-paralelo, ou seja, é formada por blocos interligados em série ou paralelo. Em um sistema em série, n componentes independentes estão conectados de forma que a falha de qualquer componente resulta na falha do sistema. Para o sistema formado pelo paralelo de n componentes independentes, basta um componente no estado operacional para garantir o funcionamento do sistema, ou seja, o sistema se mantém em operação até que todos os componentes falhem.

Nesta seção, devido à simplicidade de apresentação, optou-se pelo modelo elaborado por May e Tung (1992) para descrever o processo de análise da confiabilidade de sistemas série e paralelo. Para os autores, a soma da função confiabilidade $R(t)$ com a função probabilidade de falha $F(t)$ é um (1) ou 100%, em outras palavras, se para um tempo t o equipamento apresentar probabilidade de falha de 30% (0,3), neste mesmo instante ele possui a confiabilidade de 70% (0,7), ou seja, $R(t) + F(t) = 1$.

No sistema em série composto por n componentes independentes, a confiabilidade $R(t)$ no tempo t , dado que os tempos até a falha seguem uma distribuição exponencial, será:

$$R_s(t) = R_1(t) * R_2(t) * R_3(t) * \dots * R_n(t) \quad \text{eq(11)}$$

$$R_s(t) = e^{-\lambda_1 t} * e^{-\lambda_2 t} * e^{-\lambda_3 t} * \dots * e^{-\lambda_n t} \quad \text{eq(12)}$$

$$R_s(t) = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_n)t} \quad \text{eq(13)}$$

Nota-se que em um sistema em série, se a taxa de falha λ de todos os componentes tenderem a zero, a confiabilidade do sistema tenderá a 100%, contudo, basta que a taxa de falha λ de um dos componentes do sistema tenda a infinito para que a confiabilidade do sistema tenda a zero.

Para o sistema em paralelo composto por n componentes independentes, a confiabilidade $R(t)$ no tempo t , dado que os tempos até a falha seguem uma distribuição exponencial, pode ser encontrada através de um pequeno arranjo algébrico, se $R(t) + F(t) = 1$, então $R(t) = 1 - F(t)$ e $F(t) = 1 - R(t)$, assim a confiabilidade do sistema pode ser escrita como:

$$R_s(t) = 1 - F_s(t) \quad \text{eq(14)}$$

$$R_s(t) = 1 - [F_1(t) * F_2(t) * F_3(t) * \dots * F_n(t)] \quad \text{eq(15)}$$

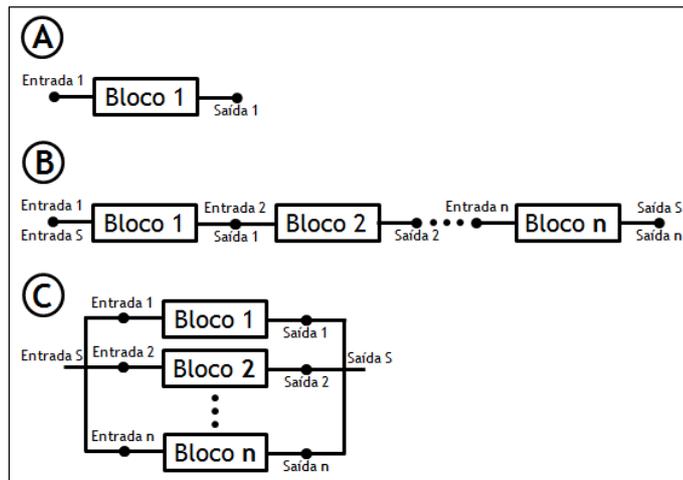
$$R_s(t) = 1 - [(1 - R_1(t)) * (1 - R_2(t)) * (1 - R_3(t)) * \dots * (1 - R_n(t))] \quad \text{eq(16)}$$

$$R_s(t) = 1 - [(1 - e^{-\lambda_1 t}) * (1 - e^{-\lambda_2 t}) * (1 - e^{-\lambda_3 t}) * \dots * (1 - e^{-\lambda_n t})] \quad \text{eq(17)}$$

Conforme supracitado, se a taxa de falha λ de todos os componentes tenderem a zero, a confiabilidade do sistema tenderá a 100%, da mesma forma, basta que a taxa de falha λ de um dos componentes do sistema tenda a zero para que a confiabilidade do sistema tenda a 100%.

A ilustração (A) da Figura 01 apresenta um bloco com sua respectiva entrada e saída, esse bloco pode representar um componente ou um subsistema. A ilustração (B) apresenta o diagrama de um sistema em série, neste caso, a entrada do sistema é a mesma entrada do primeiro componente, aqui representado pelo bloco 1 e a saída do sistema é a mesma saída do componente n . A ilustração (C) apresenta o diagrama de um sistema em paralelo, neste, tanto a entrada quanto a saída do sistema é a mesma para todos os n componentes do sistema.

Figura 1 - Ilustração de sistemas



Fonte: Autor (2020)

2.4 Modelos de Sistemas

Segundo Harrel (2002), a construção de modelos ou modelagem de sistemas, está presente em quase todos os estudos, seu uso auxilia para um melhor entendimento dos processos e das interações do sistema. Para Cougo (1997), o modelo é a representação abstrata e simplificada de um sistema real, com a qual se pode explicar ou testar o seu comportamento, em seu todo ou em partes.

Para O'kane, Spenceley e Taylor (2000), os modelos de simulação transformaram-se em uma das técnicas mais populares utilizadas para fazer análises de sistemas complexos. Os autores afirmam que a simulação é o ato de assemelhar-se um procedimento real em menor tempo e custo, concedendo um melhor estudo do que se pode ocorrer e de como corrigir erros que causariam grandes gastos.

Os modelos têm como propósito, analisar, descrever ou explicar mercados financeiros, princípios de engenharia, comportamentos físicos ou biológicos, dentre outros, em geral, visa prever o comportamento destes fenômenos ou processos. Simulação é um processo de experimentação com um modelo para determinar como o modelo vai responder a mudanças, portanto, a simulação é notada como uma ferramenta para auxiliar na resolução de problemas (HARREL, 2002).

Ainda para Harrel (2002), uma vez que o problema e os objetivos foram determinados, a simulação poderá ter sua estrutura definida. A acuracidade dos dados utilizados irá refletir na exatidão dos resultados, por isso, dados e informações que serviram de suporte para os

objetivos do estudo são importantes e devem destacar a relação existente entre o modelo e o propósito pelo qual foi construído.

As opiniões de O'kane, Spenceley e Taylor (2000) e Harrel (2002) convergem no sentido de que, problemas modelados no passado possuíam poucos elementos e eram limitadas as habilidades dos pesquisadores em lidar com um volume de cálculos, que cresciam à medida que mais elementos eram adicionados ao modelo. Com o surgimento de ferramentas computacionais capazes de lidarem com quantidades praticamente infinitas de cálculo, esse problema foi sanado e tornaram os modelos atuais mais precisos e com menores custos em sua execução.

De acordo com Ribeiro (1995), simulação é a tentativa de reprodução do mundo real através de um modelo a partir de um conjunto de hipóteses. A simulação tem como vantagem, o baixo tempo de resposta razoavelmente segura, entretanto, requer o esforço de especialistas para uma modelagem correta do sistema exigindo conhecimento do sistema, bem como de cada unidade que compõe o sistema.

Também é um consenso entre estes autores que a simulação não é uma réplica exata do sistema, mesmo que haja computadores capazes de manipular todos os detalhes que afetam cada elemento do sistema, o tempo e custos empregados pelos pesquisadores nos detalhes para criarem o modelo perfeito não justificam os resultados. Desta forma, foram definidas as etapas básicas para a simulação como: (i) coleta de dados: Informações detalhadas do fenômeno a ser observado na simulação resultam em um modelo preciso; (ii) desenvolvimento do modelo: O modelo deve iniciar como uma abstração conceitual do sistema e à medida que se desenvolve em detalhamento, sua interação com os eventos são delineadas; (iii) Verificação e validação: etapa em que se define o tempo de simulação e a executa com dados conhecidos de entrada e saída, analisando se a resposta do modelo condiz com o esperado. Essa etapa geralmente envolve todos que fazem parte do sistema estudado para assegurar que o sistema simulado terá condições de ser aplicado; (iv) análise dos resultados: Através de uma metodologia, realiza-se a análise da resposta deste modelo as diversas entradas, definindo as alternativas que atingem os melhores resultados; e (v) implementação: Etapa que inicia na simulação e coloca em prática o estudo realizado.

2.5 Resiliência

A resiliência é utilizada em diferentes áreas, entretanto, observa-se que os conceitos apontam para uma mesma direção, convergindo para uma mesma ideia. A resiliência pode ser vista como: física, psicológica ou fisiológica. A física está relacionada à capacidade de resistência de um material, sendo definida como a capacidade que tem um corpo de recuperar sua forma original depois de sofrer uma pressão (PINHEIRO, 2004). A psicológica, segundo Yunes (2001) e Rutter (1985), trata a resiliência como a capacidade universal que permite a uma pessoa ou um grupo, a possibilidade de prevenir, minimizar ou superar os efeitos nocivos de adversidades, saindo não necessariamente ileso, mas fortalecido ou até mesmo transformado. Com relação ao fisiológico, a resiliência pode ser considerada como a capacidade de um indivíduo resistir a uma determinada doença, com ajuda medicamentosa ou energias originárias da sua própria força (TAVARES, 2001).

Dentro dos estudos da Engenharia de Sistemas Cognitivos, a Engenharia de Resiliência, surge visando superar algumas limitações das abordagens existentes para a avaliação do risco e da segurança em um sistema (HOLLNAGEL; WOODS; LEVESON, 2001). De forma complementar, Le Coze e Pettersen (2008) afirmam que a resiliência tem surgido rapidamente como uma abordagem a ser considerada em relação à forma de como entender e gerenciar a segurança e vulnerabilidade em sistemas sócio técnicos.

Conforme supracitado, resiliência é a habilidade do sistema impedir falhas ou adaptar-se às circunstâncias a fim manter o controle sobre uma propriedade do sistema (LEVESON, 2006). Neste sentido, a utilização de simulação computacional na ER tem se tornado um grande aliado para gestão da segurança dos sistemas complexos. A utilização dessa técnica possibilita a visualização das possibilidades de cenários de operação sobre as quais se tem pouca ou mesmo nenhuma informação (ANDRADE, 1989), facilitando aos especialistas a elaboração de planos de ação para atender a casos críticos, e auxiliando na tomada de decisões (PEGDEN, 1990).

2.6 Método de Simulação de Monte Carlo

Com nome proveniente da famosa roleta de Monte Carlo, no Principado de Mônaco, onde no período da Segunda Guerra Mundial serviu de ferramenta de pesquisa para o desenvolvimento da bomba atômica, a Simulação Sequencial de Monte Carlo é uma ferramenta capaz de reproduzir a evolução cronológica do sistema através da amostragem de

sequências estocásticas de estados do sistema (SILVA et al., 2010). Essas sequências são simuladas considerando o modelo probabilístico operacional de disponibilidade do equipamento, da topologia, e das capacidades de recalque das bombas.

O Método de Monte Carlo é definido por Hammersley e Handscomb (1964) como sendo “a parte da matemática experimental que está preocupada em experiências com números aleatórios”. A simulação probabilística teve sua origem no Método de Monte Carlo (MMC) com simulações de fenômenos aleatórios, introduzindo a análise de riscos, incorporando as variáveis ambientais e, conseqüentemente, os elementos de incerteza inerentes (NASCIMENTO; ZUCCHI, 1997). Ainda de acordo com Escudero (1973), para resolver um problema através do MMC, são utilizados séries de tentativas aleatórias e a precisão do resultado depende, em geral, do número de tentativas. Principalmente no caso de configurações complexas, de acordo com Ribeiro (1995), o Método de Monte Carlo traz o benefício de produzir soluções bastante aproximadas da solução analítica exata, mas a um custo computacional significativamente menor.

De acordo com Lustosa, Ponte e Dominas (2004), para executar o Método de Monte Carlo, existem algumas fases básicas que devem ser seguidas: (i) definição das variáveis envolvidas com base em dados passados ou em estimativas subjetivas dos especialistas; (ii) identificação das distribuições de probabilidades das variáveis aleatórias relevantes para o estudo; (iii) construção das distribuições de probabilidade acumuladas para cada uma das variáveis definidas; (iv) definição dos intervalos dos números aleatórios para cada uma das variáveis; (v) geração de números aleatórios, e (vi) simulação dos experimentos.

As fases apresentadas por Lustosa, Ponte e Dominas (2004) condizem em grande parte com Andrade (1989), que as classifica como: (i) formulação do modelo, com a modelagem das relações entre as variáveis do problema; (ii) a coleta de dados; (iii) identificação das variáveis aleatórias que serão simuladas e suas respectivas distribuições de probabilidades; (iv) formulação do problema; (v) avaliação do modelo; e (vi) realização dos experimentos de simulação.

Este trabalho utiliza o MMC para simular e analisar o sistema de drenagem da BP em duas perspectivas, a primeira tem como objetivo destacar quais são os equipamentos críticos do sistema, a análise destes equipamentos críticos podem destacar um mau dimensionamento do projeto além de direcionar onde devem ser aplicados maiores esforços para a melhoria do sistema. Para efeito de validação, esta simulação será comparada com o resultado da simulação executada no *software PROSIS™*, *software* este, já consolidado no mercado.

A segunda perspectiva tem foco na confiabilidade do sistema de drenagem da BP ao longo do tempo, onde o conjunto de ferramentas já conceituadas de confiabilidade é utilizado para implementar as simulações do MMC. Nestas simulações são aplicadas variações nos parâmetros de falha e reparo (MTTF, MTBF e MTTR). Como resultado, os piores possíveis casos de operação são analisados, além do comportamento deste sistema de drenagem ao longo do tempo. Este processo permite realizar análise da resiliência do sistema, quantificando a robustez ou a capacidade que uma determinada configuração do sistema de drenagem tem em atender sua percolação, além de corrigir possíveis falhas de projeto ou de operação que ele apresente.

A confiabilidade do sistema de drenagem é derivada da topologia do sistema e da estatística de falha dos equipamentos que o compõem. Uma vez que os registros de falhas nas tubulações, cabeamentos de alimentação elétrica, válvulas e acessórios são praticamente nulos, a abordagem é realizada supondo que não há problemas nestes equipamentos, sendo consideradas perfeitamente confiáveis e sem restrições de capacidade.

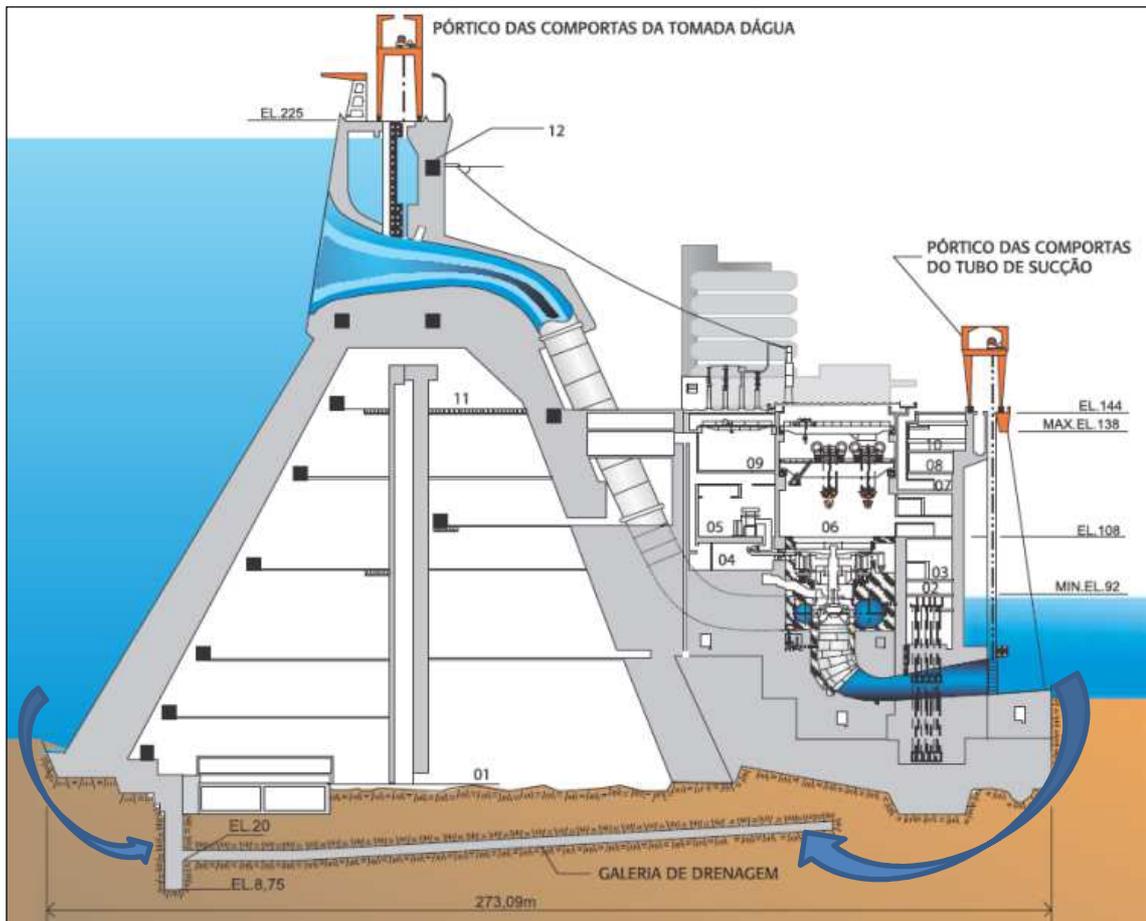
3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

3.1 Barragem Principal

A barragem da IB é segmentada em três partes denominadas: estrutura de terra, enrocamento e concreto. Essa segmentação reduz o custo da construção da barragem sem agregar risco a sua finalidade, pois cada uma dessas estruturas está sujeita a níveis de coluna de água diferentes. A barragem de concreto, denominada como Barragem Principal (BP), objeto deste estudo é a estrutura mais robusta e serve para obter o máximo desnível da barragem para operação das turbinas. Na parte superior da Barragem Principal, estão situadas as tomadas de água, estruturas com comportas que permitem que a água, passando por elas e pelos condutos forçados, alcance a caixa espiral, onde faz a turbina girar.

Conforme ilustrado na Figura 02, o nível da barragem de concreto, ou seja, da Barragem Principal é inferior ao nível jusante, portanto, necessita de um sistema de drenagem para manter as cotas inferiores desta estrutura que abrigam equipamentos de segurança e monitoramento livres de inundações. Esse sistema deve operar em condições normais, durante ou após a ocorrência de um acidente, de maneira a garantir a segurança dos funcionários, do meio ambiente e pessoas que estejam na área de influência à jusante da barragem. Por outro lado, a barragem de terra e de enrocamento estão posicionadas fisicamente a um nível superior ao da jusante. Deste modo, a água de percolação segue por gravidade até o canal a jusante. As diferentes estruturas que compõem a Barragem de Itaipu podem ser observados na figura 4.

Figura 2 - Corte transversal da barragem de Itaipu Binacional



Fonte: Adaptado de Arquivo Técnico Itaipu Binacional (2018)

3.2 Vazões de Infiltração pelas Fundações e Concreto

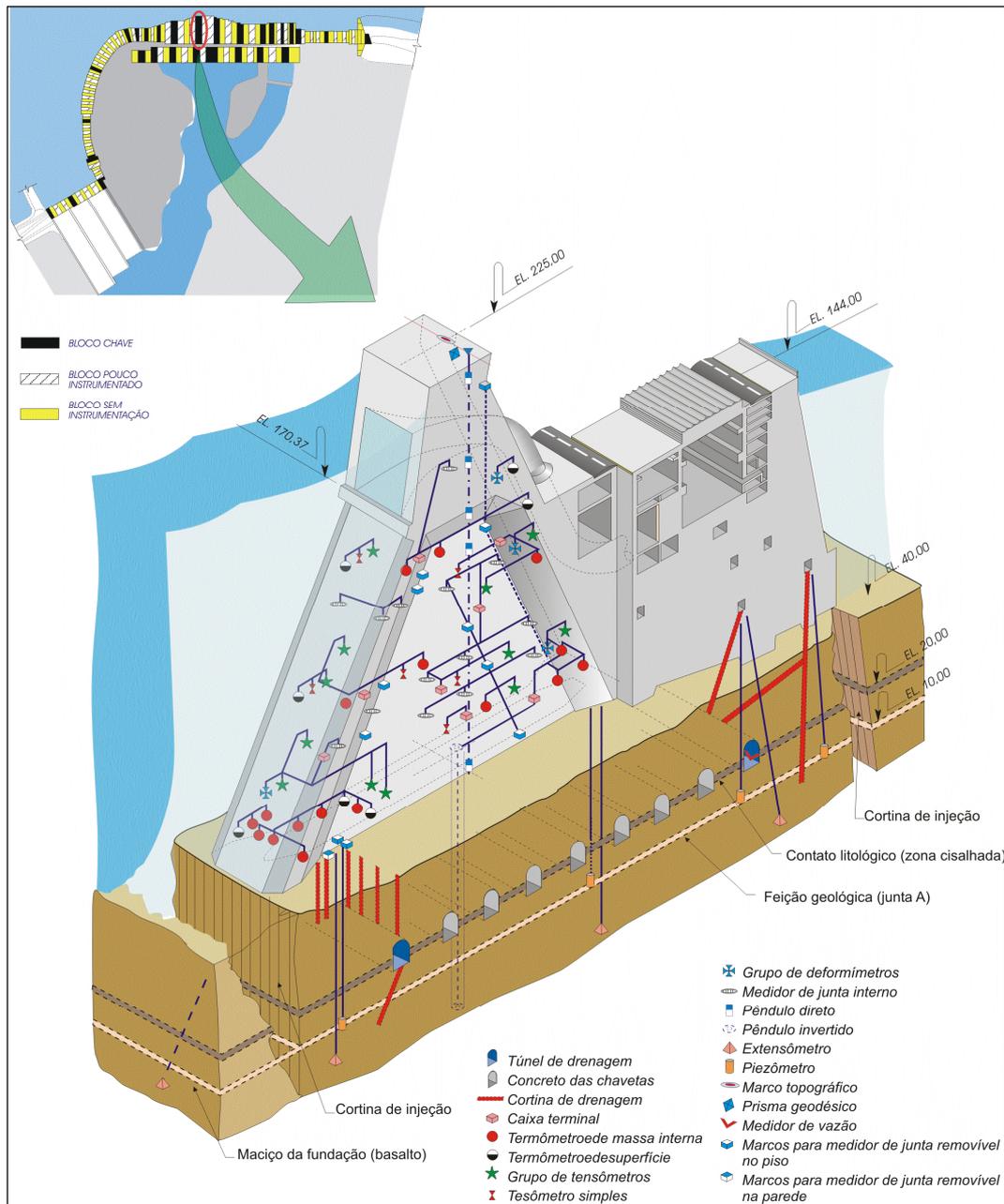
O sistema de drenagem de Itaipu tem a finalidade de aliviar as subpressões, pressões neutras e conduzir através das galerias a água das infiltrações, que ocorrem pelas estruturas e suas fundações, até poços coletores e estações de bombeamento. Ao longo do caminho percorrido pela água é realizado o monitoramento de vazões para detectar possíveis anomalias.

Segundo Patias (2015) a supervisão do sistema de drenagem é de fundamental importância, pois a deficiência da drenagem pode causar aumento de subpressão nas fundações, com implicações para a segurança da estrutura. Ainda segundo a autora, os derrames basálticos da fundação da usina de Itaipu são pouco permeáveis, no entanto, apresentam zonas com alto grau de fraturamento, especialmente no sentido horizontal,

algumas abrangem toda a área da barragem. Através destas feições e do contato entre diferentes materiais se dá grande parte das infiltrações, preferencialmente nas juntas geológicas, contatos entre derrames e contato da estrutura com a fundação (PATIAS, 2015).

Essas infiltrações são monitoradas através dos medidores de vazão, equipamentos que compõem a instrumentação de auscultação das estruturas civis. A auscultação é o conjunto de formas de observação do comportamento da barragem e fundações, para controlar suas condições de segurança, o projeto de auscultação da BP busca a garantia da segurança da barragem com economia, facilidade de instalação e manutenção da instrumentação. Os blocos mais instrumentados, denominados blocos chave, foram selecionados levando em conta altura, posição, tipo, representatividade de um trecho e fundação. A Figura 03 ilustra um bloco chave da BP de ITAIPU com a indicação dos instrumentos embutidos no concreto e fundações da barragem.

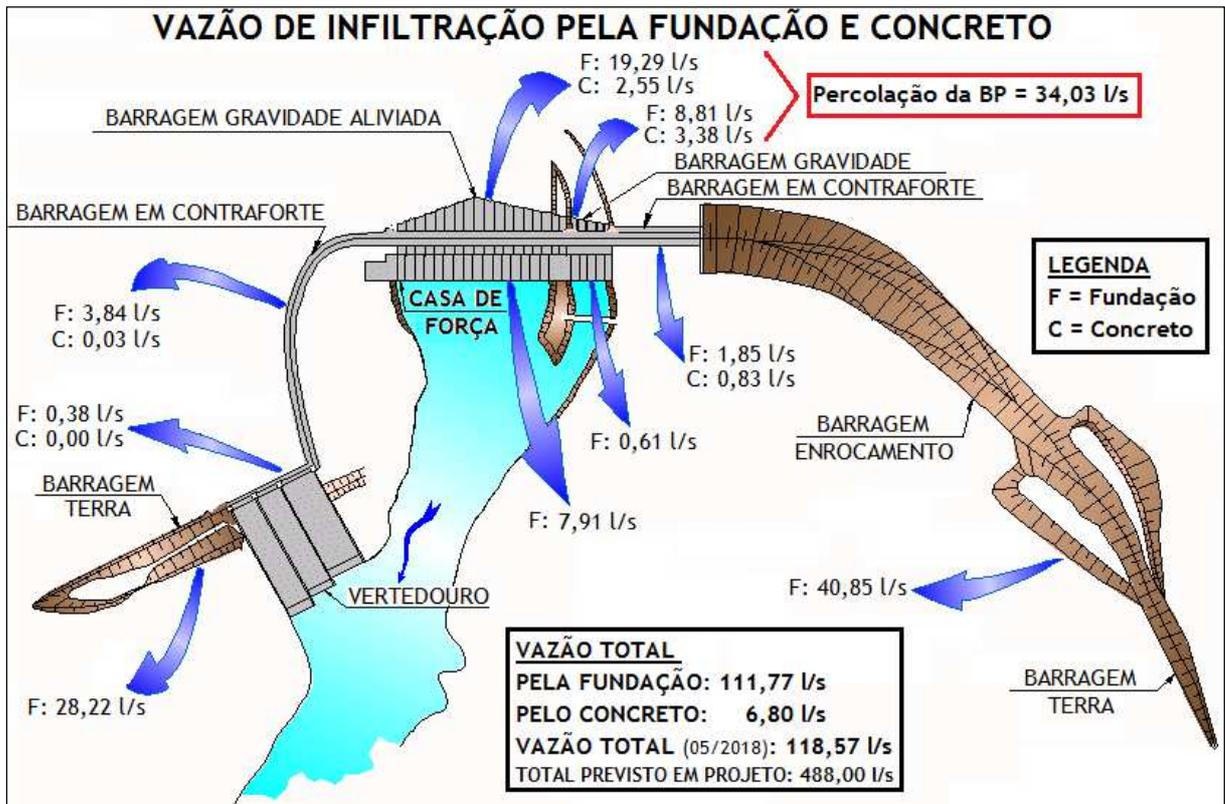
Figura 3 – Bloco de instrumentação



Fonte: Arquivo Técnico Itaipu Binacional (2020)

O volume de percolação para fins de dimensionamento do sistema de drenagem previsto em projeto para a BP é de 250 l/s, a Figura 04 apresenta os valores registrados de percolação em maio de 2018 pela fundação e estruturas de concreto de toda barragem. A percolação da barragem principal é definida pela soma da percolação da barragem de gravidade aliviada e da barragem de gravidade, ou seja, é constituída pela percolação de 28,10 l/s para as fundações e 5,93 l/s para o concreto, totalizando uma percolação de 34,03 l/s na área da BP que é objeto deste estudo.

Figura 4 – Vazão de infiltração pela fundação e concreto

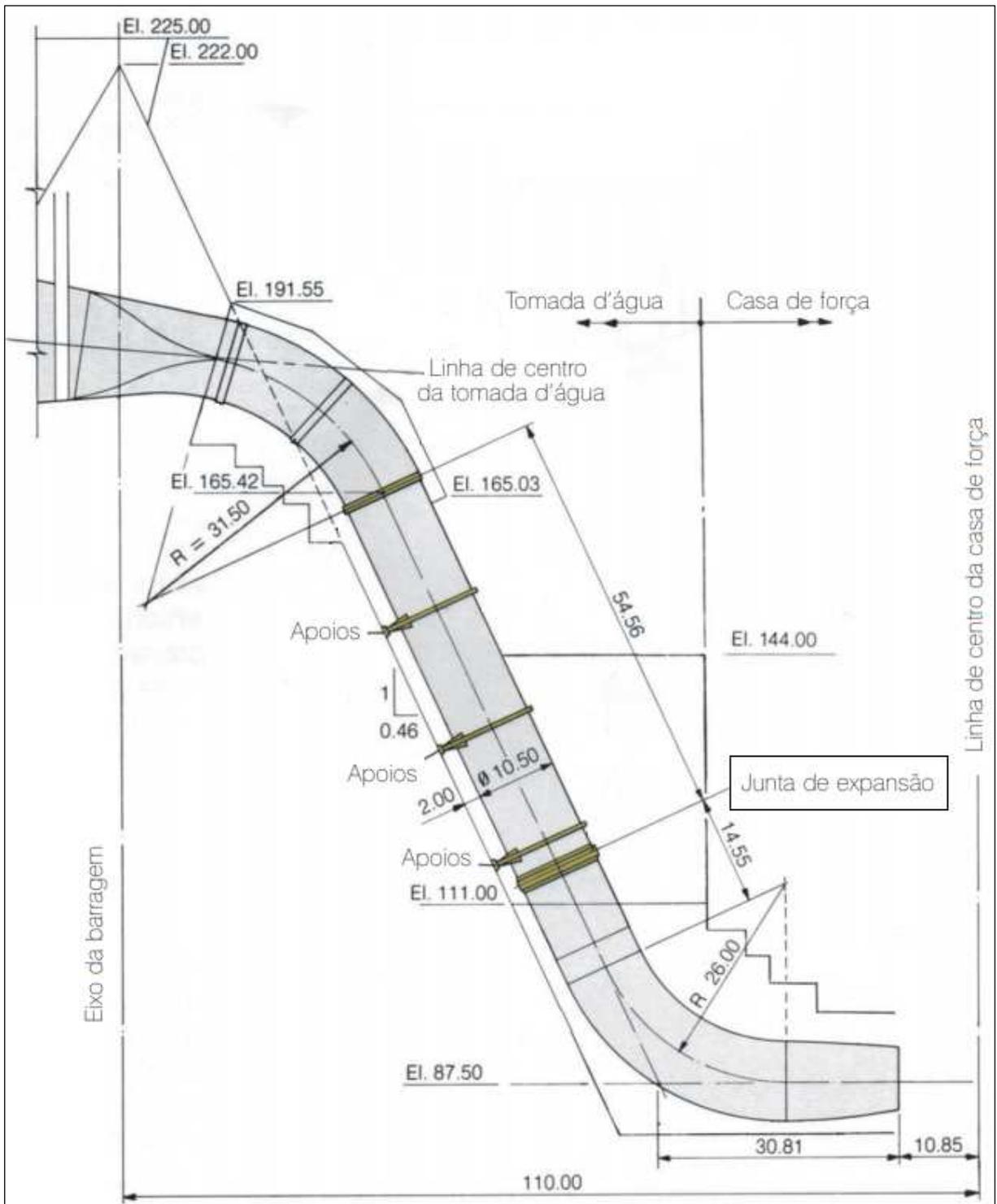


Fonte: Adaptado de Arquivo Técnico Itaipu Binacional (2018)

3.3 Junta de Expansão do Conduto Forçado

O conduto forçado apresentado na Figura 05 tem a função de conduzir a água do reservatório até a turbina da unidade geradora, no caso da ITAIPU, ele é composto por chapas de aço soldadas com diâmetro interno uniforme de 10,5m, a curva superior do conduto, com raio de 31,5m e comprimento de 32,9m, está ancorada na barragem e embutida em concreto. Um trecho reto de 47,41m fica exposto, localizado na face de jusante da barragem, sua extremidade inferior liga-se com a curva inferior por uma junta de expansão projetada para acomodar a expansão térmica e qualquer movimento entre a casa de força e a barragem, que são estruturas independentes.

Figura 5 – Conduto forçado

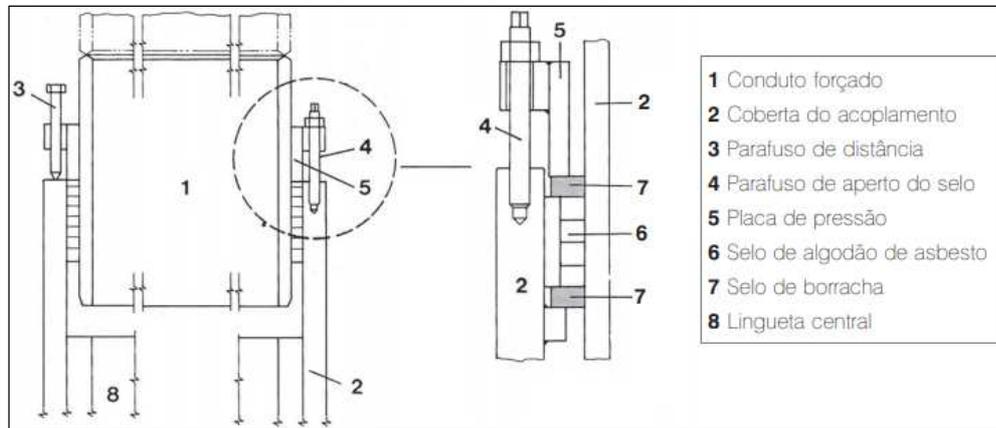


Fonte: Adaptado de Arquivo Técnico Itaipu Binacional (2020)

A Figura 06 apresenta detalhes da junta de expansão, a junta foi projetada para um movimento axial de ± 30 mm e radial de ± 4 mm. A vedação é obtida por anéis de borracha em ambas as partes da junta, comprimidos por anéis de selo ajustados por cento e onze parafusos de aperto do selo. Contudo, pequenos vazamentos podem ocorrer devido ao

desgaste dos anéis de borracha e do deslocamento tanto radial quanto axial, esses vazamentos são direcionados até os poços de drenagem da BP. Em condições normais de operação, o vazamento na junta de expansão é desconsiderado, uma vez que seu volume é insignificante.

Figura 6 – Detalhes da junta de expansão



Fonte: Adaptado de Arquivo Técnico Itaipu Binacional (2020)

Para efeito de análise, será considerado o rompimento de seis parafusos de aperto do selo, reduzindo a pressão da vedação na área de rompimento e gerando um vazamento máximo teórico de 46 l/s, este volume de vazão adicional será considerado nos estudos. A vazão máxima teórica foi definida pela seguinte equação:

$$Q_{max} = A_R * k * \sqrt{2 * g * h_{max}} = 46 \text{ l/s}$$

$$A_R = \left(\frac{\pi * D_e^2}{4} \right) - \left(\frac{\pi * D_i^2}{4} \right) \cong 0,2$$

Onde:

Q_{max} = Vazão máxima teórica (m^3/s);

A_R = Área da abertura resultante (m^2);

g = Força da gravidade $\cong 9,8$ (m/s^2);

h = Metros de coluna de água entre a junta e o nível montante 105,1 ($\text{m}_{\text{H}_2\text{O}}$);

k = Fator de redução por perda de pressão da vedação $\cong 0,005$;

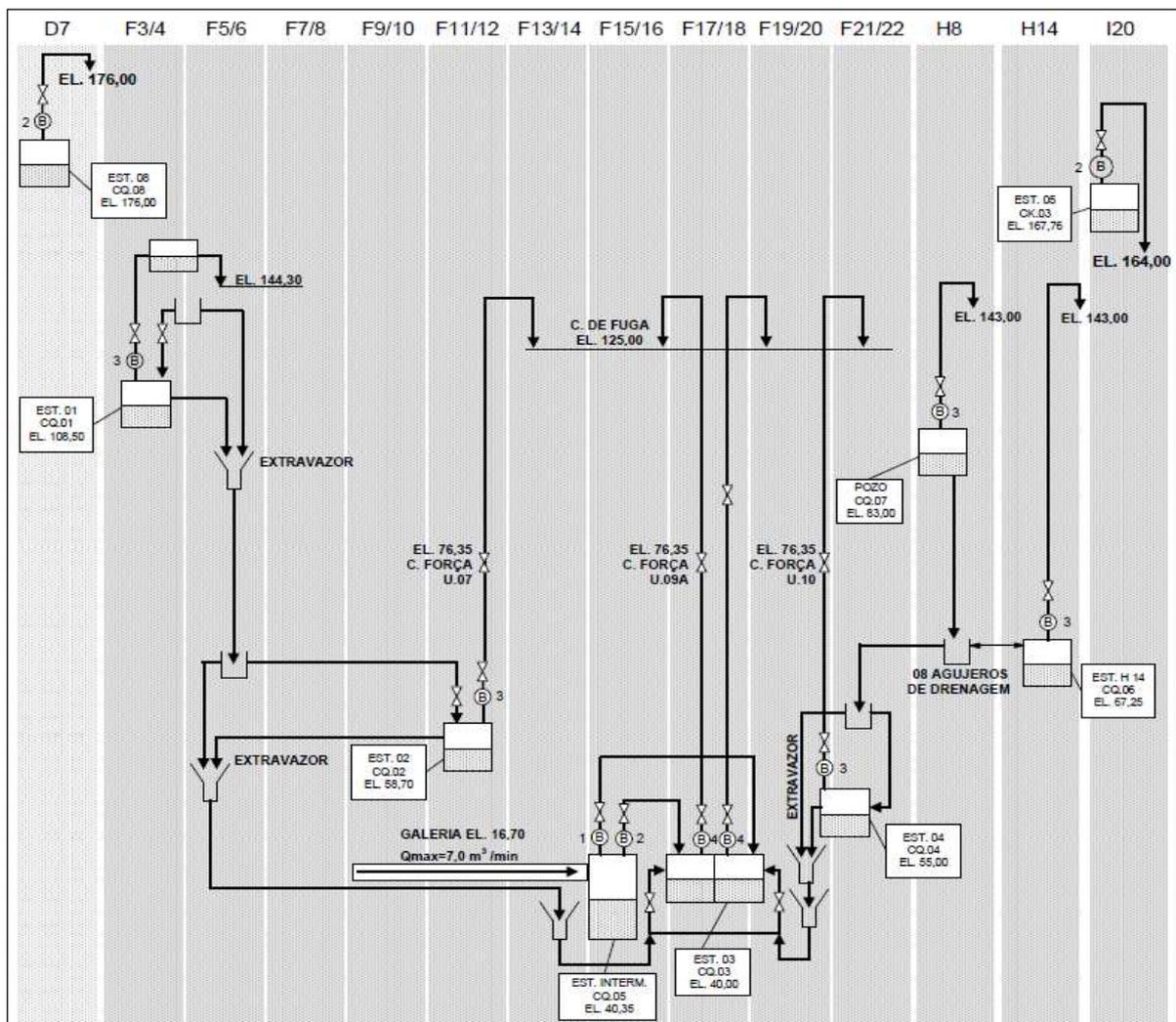
D_e = Diâmetro da abertura externa 10,597 (m);

D_i = Diâmetro da abertura interna 10,585 (m).

3.4 Estações de drenagem

A BP é composta por nove estações de drenagem, a Figura 07 apresenta o arranjo físico das estações de drenagem, a distribuição delas ao longo dos blocos de concreto que compõem a BP, bloco F3/4 a bloco H14, a elevação da estação em relação ao nível do mar, El. 40,00m a El. 108,5m, a elevação do recalque, El. 125,00m a El. 144,30m, a quantidade de bombas por estação de drenagem, apresentada por um círculo com a letra B em seu interior e o número de bombas ao lado, e a nomenclatura adotada para as estações de drenagem, sendo: estação 01 - CQ01; estação 02 - CQ02; estação 03 - CQ03; estação 04 - CQ04; estação H14 - CQ06; e poço - CQ07. A estação intermediária - CQ05 e as estações de drenagem CQ08 e CK03, não farão parte deste objeto de estudo.

Figura 7 – Arranjo físico das estações de drenagem



Fonte: Adaptado de Arquivo Técnico Itaipu Binacional (2018)

Com relação aos poços ilustrados na Figura 07, a tabela 01 abaixo apresenta dentre outras informações, as características específicas de recalque e descarga das bombas de drenagem.

Tabela 1 – Características das bombas de drenagem

Poço	Nº do Bloco	Nº de bombas	Recalque (m)	Descarga (l/s)
CQ01	F 3/4 – F 5/6	3	51	35
CQ02	F 11/12 – F 13/14	3	93	55
CQ03	F 15/16 – F 17/18	8	113	55
CQ04	F 19/20 – F 21/22	3	95	59
CQ06	H 14	3	94	53
CQ07	H 8	3	75	30

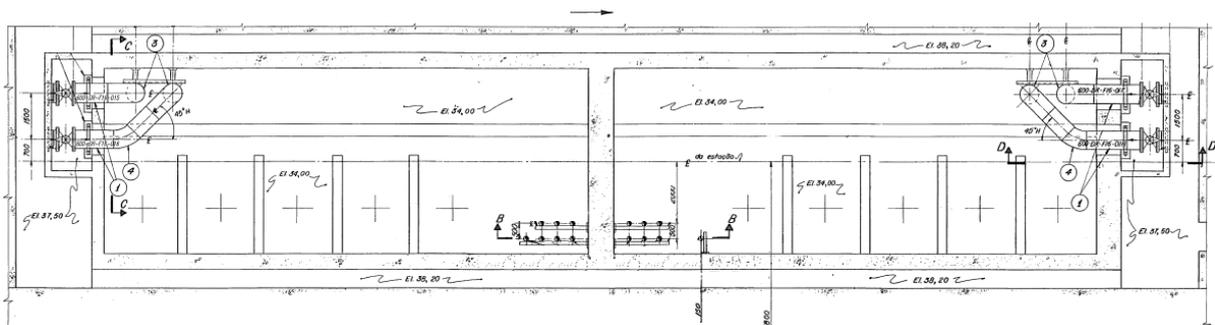
Fonte: Adaptado de Arquivo Técnico Itaipu Binacional (2020)

3.5 Poço de drenagem CQ03

O poço de drenagem CQ03 é o único poço da barragem principal que possui uma divisória em seu interior, essa divisória foi prevista para possibilitar a manutenção civil no interior deste poço. Durante manutenção dos demais poços, por gravidade a água é direcionada para o próximo poço, sendo o poço CQ03 o ultimo, portanto, essa divisória isola a parte montante da parte jusante do poço, cada uma das partes conta com quatro motobombas (MB) e válvulas de manobra que possibilitam o direcionamento da água de percolação.

A Figura 8 abaixo ilustra o poço CQ03, esse poço é composto por duas partes com área de 96 m², o fundo do poço está situado na cota 34 m, e a parte superior da tubulação de entrada de água de percolação está situada na cota 38,4 m, desde modo, o poço apresenta um volume útil total de 844,8 m³. O volume dos demais poços de drenagem não farão parte do modelo, portanto, não serão abordados neste estudo.

Figura 8 - Estrutura civil do poço CQ03.



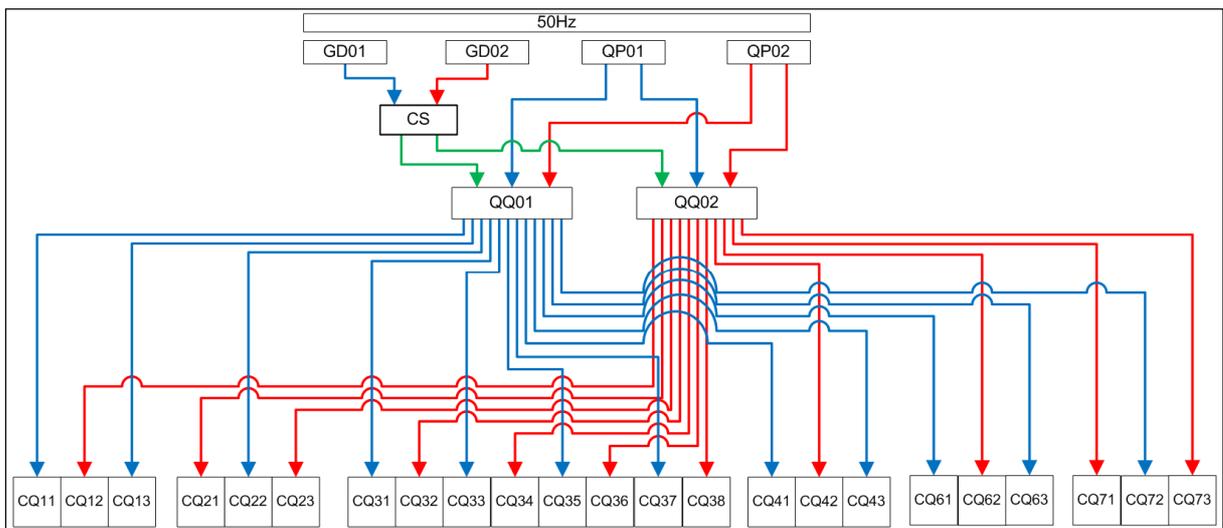
Fonte: Adaptado de Arquivo Técnico Itaipu Binacional (2020)

3.6 Alimentação elétrica

A Usina Hidrelétrica de Itaipu possui dois sistemas elétricos independentes, ambos constituídos por dez unidades geradoras de 700MW, onde um sistema elétrico denominado como Setor 50Hz opera com frequência elétrica de 50Hz e outro, denominado Setor 60Hz, opera na frequência elétrica de 60Hz. Esses sistemas geram redundância na alimentação das cargas elétricas consideradas essenciais para o correto funcionamento da planta. As estações de drenagem da BP fogem a essa regra, sua alimentação elétrica é efetuada principalmente pelo setor de 50Hz, as estações CQ06 e CQ07 são as únicas alimentadas pelo setor de 60Hz.

Para efeito de estudo, a confiabilidade das unidades geradoras que alimentam esse setor não será abordada, uma vez que o objetivo é avaliar o Sistema de Drenagem da BP e não a disponibilidade de geração, além disso, haja vista a semelhança na alimentação elétrica dos setores 50Hz e 60Hz, será suposto que as estações de drenagem CQ06 e CQ07 também são alimentados pelo setor de 50Hz, conforme apresentado na Figura 09 abaixo.

Figura 9 – Alimentação elétrica das estações de drenagem



Fonte: Autor (2020)

As estações de drenagem são compostas por pelo menos três conjuntos motobomba, a falha em um conjunto motobomba não indisponibiliza a estação de drenagem, cada conjunto motobomba é alimentado eletricamente pelo seu quadro de carga, assim, a falha em um quadro de carga indisponibiliza apenas o seu conjunto motobomba. O quadro de carga por sua vez, é alimentado ou pelo quadro de distribuição QQ01 (linha azul) ou pelo quadro de distribuição QQ02 (linha vermelha), deste modo, na falta de um dos quadros QQ é garantida a operação de 50% do sistema de drenagem.

Os quadros de distribuição QQ podem receber alimentação elétrica proveniente dos quadros principais QP01 ou QP02, tanto o QP01 quanto o QP02 pode alimentar ambos os quadros QQ, portanto, são redundantes. Os quadros principais possuem como fonte as Unidades Geradoras de 700MW, aqui consideradas como fonte ininterrupta. Na falta dos quadros principais, a alimentação dos quadros de distribuição QQ pode ser efetuada pelo quadro de alimentação de emergência CS (linha verde), gerando assim uma terceira redundância (QP01, QP02 e CS) para alimentar os quadros de distribuição QQ. A alimentação do quadro de emergência CS é efetuada por dois geradores a diesel de emergência de 5,25MVA cada, e qualquer um dos geradores que estiverem operando pode suprir a alimentação do quadro de emergência CS.

Para preservar os dados empresariais, os dados estatísticos de falha dos equipamentos reais foram acrescidos de um ruído branco, tal que, a significância da análise que compõem o sistema de drenagem não é alterada. Os levantamentos estatísticos utilizam dados do SOM – Sistema de Operação e Manutenção, este sistema lista, com seus respectivos códigos de localização e de identificação, os equipamentos instalados na Central Hidrelétrica de Itaipu, sobre os quais se deseja manter um controle permanente. Para maior facilidade de controle, estes equipamentos estão agrupados em Conjuntos, Unidades e Subunidades de Manutenção.

Código de localização: É o agrupamento dos códigos identificadores do Conjunto, Unidade e Subunidade de Manutenção e do número sequencial do equipamento dentro da subunidade.

Conjunto de Unidades de Manutenção: É uma família de Unidades de Manutenção com características básicas comuns, é representado por uma letra do alfabeto.

Unidade de Manutenção: É um conjunto de equipamentos agrupados com o intuito de racionalizar os trabalhos de manutenção e minimizar as indisponibilidades operativas, é representada por um código numérico de dois dígitos, que acompanha a letra identificadora do Conjunto a que pertence.

Subunidade de Manutenção: É um conjunto de equipamentos, estruturas ou sistemas que, dentro da Unidade de Manutenção, desempenha uma função definida, é representada por uma letra do alfabeto logo a seguir dos códigos indicativos do Conjunto e Unidade de Manutenção a que pertence.

Equipamento: É um conjunto de peças, componentes, dispositivos ou circuitos capazes de desempenhar uma ou mais funções requeridas. Uma vez definido o Conjunto, a Unidade e a Subunidade de Manutenção ao qual o equipamento ficará subordinado, cada

equipamento recebe um código numérico, composto por dois dígitos, que indicará a posição sequencial do mesmo dentro da Subunidade de Manutenção.

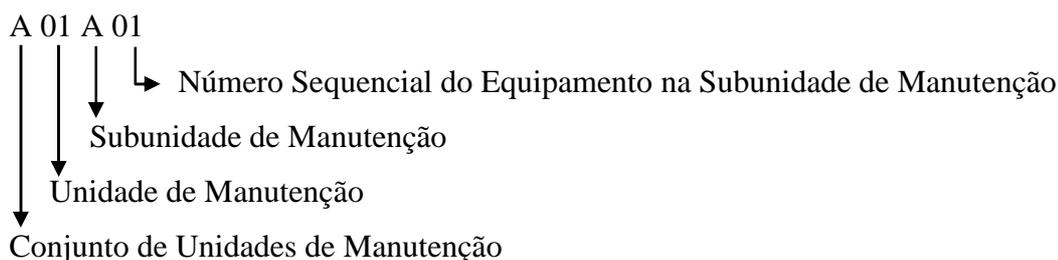
Ex.:

A – Unidades Geradoras de 50 Hz.

A 06 – Unidade Geradora U06.

A 06 B – Turbina da Unidade U06.

A 06 B 10 – Motobomba N°1 50 Hz de drenagem da tampa da turbina.



No Anexo 1 é apresentado o código de localização e a descrição dos equipamentos utilizados neste estudo, dois destes equipamentos são representados até sua subunidade e cinco até sua unidade, os demais equipamentos são representados até seu número sequencial.

3.7 Modelo da Barragem Principal

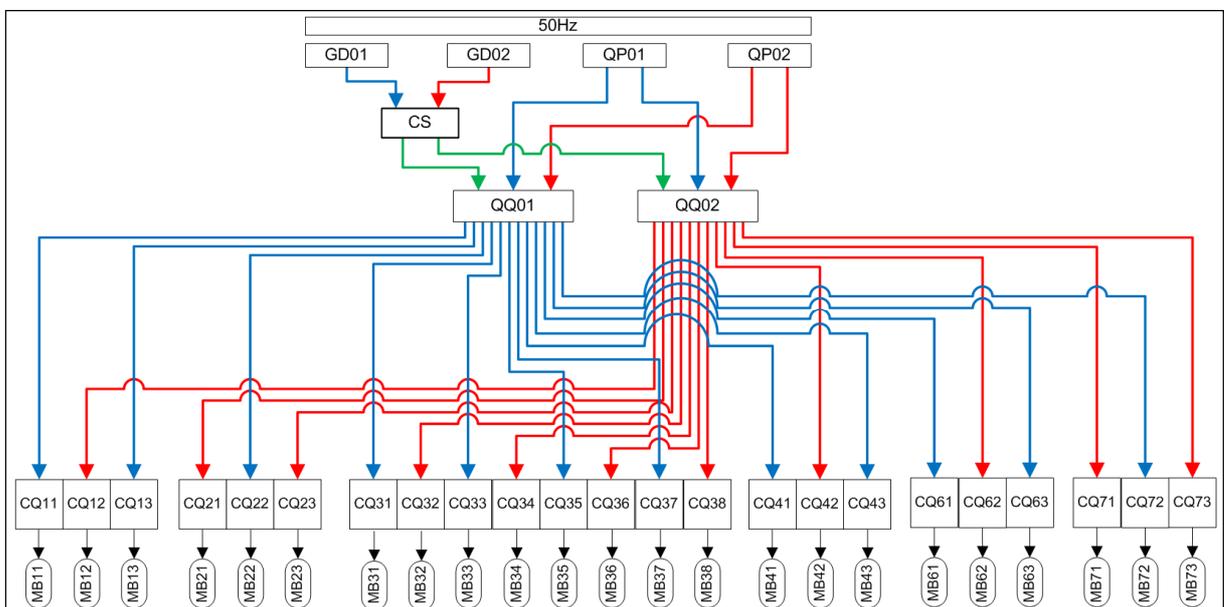
Para a Barragem Principal, cinco parâmetros foram considerados na modelagem, sendo: (i) a BP foi dividida em três seções, margem direita (CQ01 e CQ02), leito do rio (CQ03) e margem esquerda (CQ04, CQ06 e CQ07); (ii) o valor adotado de percolação da BP é de 34 l/s, sendo esse dividido igualmente para cada uma das seções; (iii) a indisponibilidade do poço CQ05 com conseqüente inundação na galeria da elevação 16,7m não compromete os equipamentos de auscultação; (iv) será considerado um aumento de 100% de infiltração na área de interesse devido a falhas ocultas nos derrames basálticos da fundação ou nas zonas com alto grau de faturamento que também será dividida entre as seções, e; (v) será considerada a existência de um aumento de afluência de 46 l/s devido a falha na junta de expansão que segue diretamente ao poço do leito do rio.

Dada à vazão nominal de percolação, são inseridas restrições nos componentes da alimentação elétrica e/ou nas motobombas de drenagem, estabelecendo assim diferentes topologias de sistema. Através do MMC é efetuada uma análise por espaço de estados dos equipamentos, verificado se a configuração dada de alimentação e motobombas disponíveis atende à função objetivo.

3.8 Modelo do Sistema de Drenagem

O modelo do sistema de drenagem pode ser representado pela topologia da alimentação elétrica incluindo as bombas de drenagem, esta representação é ilustrada na Figura 10. Para facilitar o equacionamento da função objetivo, os equipamentos que alimentam eletricamente os quadros QQ irão compor a primeira parte do modelo, aqui nomeada de ENERGIA, os demais equipamentos irão compor a segunda parte nomeada de DRENAGEM.

Figura 10 – Modelo do sistema de drenagem



Fonte: Autor (2020)

Tanto para função ENERGIA quanto para os equipamentos que a compõem, apenas dois estados são considerados: Operando ou Falha. Existem três caminhos para a alimentação QP01, QP02 e CS, contudo, não basta que o CS esteja no estado Operando para alimentar eletricamente os quadros QQ, necessariamente um dos geradores a diesel de emergência também deve estar no estado Operando, deste modo, a função ENERGIA pode ser descrita por:

$$\text{ENERGIA} = \text{QP01} + \text{QP02} + [\text{CS} * (\text{GD01} + \text{GD02})].$$

Conforme supracitado no item 3.7, para melhor descrever o modelo do sistema, a drenagem da BP foi dividida em três seções, direita, leito do rio e esquerda, deste modo, a função DRENAGEM também seguirá este padrão e será descrita como a soma da capacidade de drenagem em cada uma destas três áreas. Por gravidade, a água de percolação que surgem

nas duas bordas direita e esquerda, caso não sejam bombeadas, seguem para o leito do rio e devem ser bombeadas pelo poço CQ03.

A alimentação da drenagem conforme apresentado na Figura 09, está intercalada entre QQ01 e QQ02, agregando as informações de capacidade de bombeamento apresentada na Tabela 01 (30, 35, 53,55 e 59 l/s) e fazendo o uso da topologia ilustrada na Figura 10, podemos descrever as drenagens como:

Drenagem Direita (l/s) = QQ01 * [(CQ11 * MB11 * 35) + (CQ13 * MB13 * 35) + (CQ22 * MB22 * 55)] + QQ02 * [(CQ12 * MB12 * 35) + (CQ21 * MB21 * 55) + (CQ23 * MB23 * 55)].

Drenagem Esquerda (l/s) = QQ01 * [(CQ41 * MB41 * 59) + (CQ43 * MB43 * 59) + (CQ61 * MB61 * 53) (CQ63 * MB63 * 53) + (CQ72 * MB72 * 30)] + QQ02 * [(CQ42 * MB42 * 59) + (CQ62 * MB62 * 53) + (CQ71 * MB71 * 30) + (CQ73 * MB73 * 30)].

Drenagem do Leito do Rio (l/s) = QQ01 * [(CQ31 * MB31 * 55) + (CQ33 * MB33 * 55) + (CQ35 * MB35 * 55) (CQ37 * MB37 * 55)] + QQ02 * [(CQ32 * MB32 * 55) + (CQ34 * MB34 * 55) + (CQ36 * MB36 * 55) + (CQ38 * MB38 * 55)].

Uma vez que a percolação é contínua e foi considerada dividida nas três áreas, cada área deve ser capaz de bombear seu montante, caso o volume de bombeamento da drenagem direita e/ou esquerda seja menor que a percolação, a drenagem do leito do rio deve realizar o bombeamento de toda água resultante. A drenagem leito do rio também será responsável por executar a drenagem da água proveniente da junta de expansão. Dito isso, pode-se escrever a função DRENAGEM como:

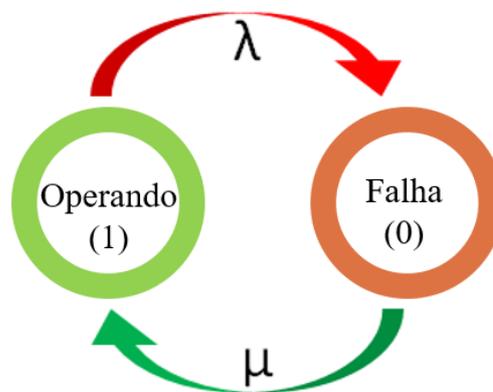
DRENAGEM = [(**Drenagem Direita** - Percolação Direita) + (**Drenagem Esquerda** - Percolação Esquerda) + (**Drenagem do Leito do Rio** - Percolação Leito do Rio - Vazão junta de expansão)].

A função objetivo do Sistema de Drenagem pode ser representada pelo produto da função Energia com a função Drenagem. Um valor positivo da função objetivo representa capacidade de bombeamento do Sistema de Drenagem maior do que a vazão afluente do sistema, portanto, será classificada como Sucesso ou Operacional, caso a capacidade de bombeamento seja menor que a afluência do sistema, ela será classificada como Insucesso ou Falha.

3.9 Modelo de Operação dos equipamentos

O modelo de Markov representa um processo estocástico onde os eventos não ocorrem de maneira simultânea e o estado futuro independe de seu passado, dado que seu valor presente é conhecido (RUBINSTEIN; KROESE, 2008). Conforme apresentado na Figura 11, o modelo está relacionado com o comportamento estocástico especificado pela taxa de falha λ e taxa de reparo μ . Conhecendo os parâmetros estocásticos λ e μ , dos equipamentos, é possível calcular as probabilidades de operação de cada equipamento durante o processo de simulação.

Figura 11 - Modelo de Markov a dois estados.



Fonte: Adaptado de Santos.

Os parâmetros estocásticos podem ser interpretados como taxas de transição, ou seja, como o número de vezes que ocorreu uma transição para determinado estado, dividido pelo tempo total que o componente esteve neste estado (BILLINTON; ALLAN, 1996).

O ciclo estocástico de falha/reparação de um determinado componente segundo o modelo de Markov a dois estados tem sua capacidade máxima disponibilizada quando este se encontra no estado Operando ou disponível. No entanto, quando este se encontra no estado Falha ou indisponível, sua capacidade é zero.

3.10 Confiabilidade dos Componentes

As curvas de confiabilidade dos componentes do sistema foram modeladas em três momentos com o auxílio do *software* PROCONF™ que possuem em seu módulo de análise diversos modelos probabilísticos: (i) cálculo do MTTF dos quadros elétricos, (ii) cálculo do MTBF dos grupos geradores de emergência, e (iii) cálculo do MTBF dos conjuntos

motobombas. Os dados estatísticos de 58.440 horas foram utilizados para determinar a confiabilidade dos equipamentos, como modelo matemático utilizou-se a distribuição exponencial com taxa de falha constante, portanto, para o estudo de caso foi adotado como parâmetro de localização o valor de zero hora. Os dados estatísticos de taxa de falha, taxa de reparo, disponibilidade e a indisponibilidade dos equipamentos estão apresentadas no Apêndice A. Com o auxílio do *software* PROCONF™, foram determinadas as curvas de confiabilidade e o tempo médio até a falha dos equipamentos.

Segundo Fogliatto e Ribeiro (2009), o modelo matemático de distribuição Weibull possui uma melhor representação para equipamentos mecânicos, contudo, devido possivelmente a natureza mecânica dos motores marítimos utilizados nestes grupos geradores, os resultados dos modelos de distribuição Weibull e Exponencial foram semelhantes, deste modo, optou-se pela distribuição exponencial uma vez que facilitaria os cálculos e as simulações de Monte Carlo.

Para os conjuntos motobombas, a bomba e o motor possuem códigos de localização distintos, permitindo a extração da confiabilidade de forma independente para cada equipamento, contudo, para este estudo, a bomba e o motor foram considerados como um único equipamento, adotando-se distribuição exponencial com taxa de falha constante.

4 APLICAÇÃO DO METODO DE MONTE CARLO PARA ANÁLISES

Neste capítulo, o sistema de drenagem da BP será modelado com o propósito de encontrar possíveis debilidades do sistema, calcular a probabilidade de falha e o potencial impacto de falhas. Aplicando os conceitos de Engenharia de Resiliência na análise dos resultados destas simulações, pretende-se mitigar riscos e amortecer impactos dos eventos imprevisíveis.

A modelagem contempla os equipamentos do Sistema de Drenagem, adotando um modelo em dois estágios de falha/reparação para estes equipamentos, cujo tempo de residência em um determinado estado segue uma distribuição de probabilidade exponencial com taxas de transição constantes. A capacidade de trabalho máxima é obtida quando o sistema se encontra no estado operacional, e é zero quando se encontra no estado falha (BILLINTON; ALLAN, 1996). Para o modelo falha/reparação adotado, serão utilizados os dados estatísticos dos equipamentos para determinar a sua disponibilidade e, com base nesta informação, definir se o equipamento está operando ou não.

Para as simulações de Monte Carlo não sequenciais, a metodologia consiste em amostrar aleatoriamente uma quantidade suficiente de estados dos sistemas através do uso da sua respectiva distribuição de probabilidade (ROSA, 2011). Por meio de uma apropriada função teste para cada estado do sistema, são estimados os índices de confiabilidade.

As etapas do método não sequencial podem ser descritas como: (i) amostrar o estado de cada componente do sistema baseado na sua respectiva distribuição de probabilidade; (ii) a partir do resultado da função objetivo efetuar os cálculos dos índices de confiabilidade. Este processo se repete até que se atinja o critério de convergência.

As simulações de Monte Carlo, cujos estados do sistema avançam simultaneamente com o passar do tempo, são denominadas de sequenciais e baseiam-se na amostragem da distribuição de probabilidade da duração dos estados dos componentes (ROSA, 2009). Essas simulações são utilizadas para simular o processo estocástico do sistema de operação através do uso de distribuições de probabilidades, associadas com a taxa falha λ e a taxa de reparo μ de cada componente do sistema.

Considerando a função objetivo $F(x^k)$, onde x^k é o vetor de estados do sistema, no período k , e $F(x^k)$ é a função desempenho para calcular os índices de confiabilidade do período sobre a sequência x^k , a partir do sorteio aleatório de N estados do sistema pode-se determinar o valor médio da função desempenho:

$$E[F] = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N F(x^k) \quad \text{eq(18)}$$

Seja $\tilde{E}[F]$ a estimativa do valor esperado $E[F]$ e N os períodos simulados. Dado que $F(x^k)$ é uma variável aleatória, dar-se por entendido que o valor médio pode ser uma variável aleatória com variância dada por:

$$V(\tilde{E}[F]) = \frac{V(F)}{N} \quad \text{eq(19)}$$

Onde $V(F)$ é a variância da função $F(x)$

A incerteza da estimativa do valor médio $\tilde{E}[F]$ pode ser representada pelo coeficiente de variação β dado por:

$$\beta = \frac{\sqrt{V(\tilde{E}[F])}}{\tilde{E}[F]} \quad \text{eq(20)}$$

Adaptando de Rosa (2009) as etapas da simulação de Monte Carlo sequencial podem ser descritas como:

- (i) Definir período máximo de simulação ou critério de convergência e amostrar o estado inicial de cada componente baseado na sua distribuição de probabilidade;
- (ii) Obedecendo a uma distribuição exponencial, amostrar a duração dos estados de sucesso e falha dados respectivamente por:

$$T_i^{Operando} = -\frac{1}{\lambda_i} \ln(U_i) \quad \text{eq(21)}$$

$$T_i^{Falha} = -\frac{1}{\mu_i} \ln(U_i) \quad \text{eq(22)}$$

Onde U_i é um número aleatório uniformemente distribuído no intervalo $[0,1]$, λ_i e μ_i a taxa de falha e reparo do i -ésimo componente.

- (iii) Atualizar o tempo de simulação de acordo com o estado de transição do sistema em x^k e calcular a função desempenho $F(x^k)$;
- (iv) Se $F(x^k)$ for um sucesso, retornar à (iii), se falha, estime as funções de teste para o cálculo dos índices e avalie o critério de convergência;
- (v) Identifique o componente x_i^k de troca, altere o estado deste componente para x_{troca}^{k+1} , calcule o tempo de permanência do componente no novo estado, mantenha o estado do restante dos componentes x_i^{k+1} ;

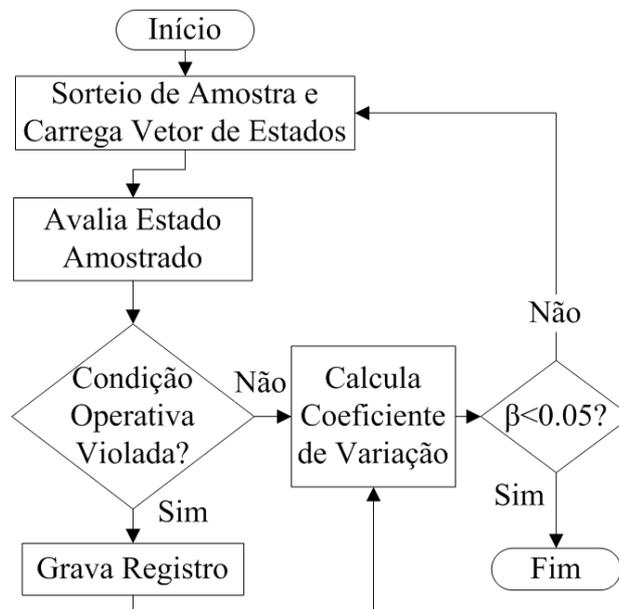
4.1 Classificação de Ponto Crítico do Sistema de Drenagem

O MMC será utilizado para identificar possíveis pontos críticos no sistema de drenagem. O objetivo principal é destacar quais são os equipamentos críticos do sistema, a análise dos resultados pode destacar um mau dimensionamento do projeto além de direcionar

onde devem ser aplicados maiores esforços para a melhoria do sistema. Para efeito de validação, esta simulação será comparada com o resultado da simulação executada no *software PROSIS™*, software este, já consolidado no mercado.

Para Fogliatto e Ribeiro (2009), a importância de um componente em um sistema é determinada pela: (i) confiabilidade no momento da análise; e (ii) sua posição no sistema. Partindo deste pressuposto, as informações estatísticas de confiabilidade e a posição do equipamento com relação à topologia do sistema são consideradas. Desta forma o algoritmo genérico proposto é apresentado na Figura 12. Uma breve descrição dos principais blocos deste fluxograma é apresentada a seguir.

Figura 12 – Fluxograma do Algoritmo I



Fonte: Autor (2020)

Em *Sorteio de Amostras e Carrega Vetor de Estados*, por amostragem de Monte Carlo, é gerado um valor aleatório uniformemente distribuído entre zero e um para cada equipamento do sistema. Esse valor é comparado com o valor de indisponibilidade do respectivo equipamento, se o valor aleatório for menor que a indisponibilidade, o equipamento é considerado em falha e, portanto, indisponível, caso contrário será considerado operando ou disponível. Este processo se repete para todos os equipamentos que compõem o sistema.

Definido o estado dos equipamentos do sistema, na etapa *Avalia Estado Amostrado* é verificado se a capacidade de bombeamento do sistema de drenagem dada a atual topologia, atende as demandas impostas de vazão. Em *Condição Operativa Violada?* é verificado se os limites operativos são violados, caso seja violado, em *Grava Registro* a informação do estado

dos componentes é armazenada para uma posterior análise, caso contrário, apenas os dados estatísticos são armazenados. Uma das principais vantagens do MMC é que o número de amostras necessárias para estimar os índices não depende do número de estados do sistema, contudo, possui a restrição de tempo computacional para estimar as probabilidades de eventos do tipo cisne negro¹, ou quando se deseja intervalos de confiança estreitos. A etapa *Calcula Coeficiente de Variação* processa os dados estatísticos e calcula o coeficiente de variação, posteriormente, em $\beta > 0,05$? é avaliada se a convergência está dentro dos parâmetros de 95% de confiança sugeridos por Rosa (2009). Se os parâmetros não foram alcançados, uma nova amostragem é gerada e o processo se repete, quando o parâmetro é satisfeito, o processo é finalizado.

4.2 Confiabilidade do Sistema de Drenagem

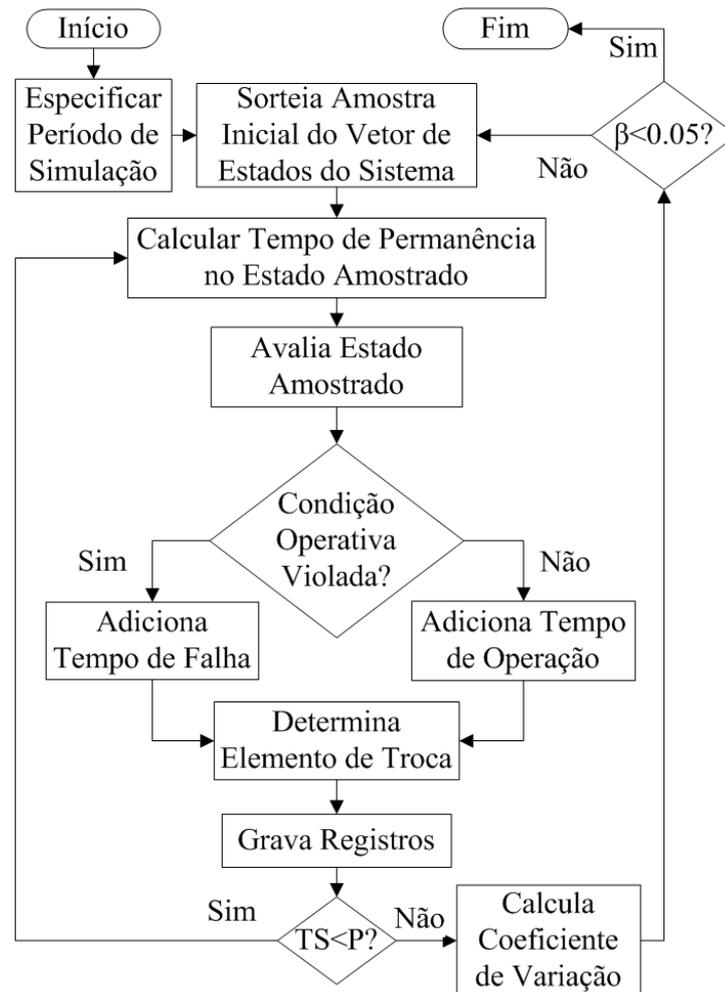
O algoritmo apresentado anteriormente possui uma formulação não sequencial, assim sendo, o estado de cada equipamento será sorteado de acordo com sua disponibilidade, seus estados são inseridos na função desempenho $F(x)$, e é verificado se o resultado da função desempenho do Sistema se encontrava dentro da zona de sucesso ou zona de falha. Este processo é executado até que o coeficiente de variação β atinja o valor de interesse.

Nesta seção, é proposta uma análise com formulação sequencial, ou seja, cronológica, contudo, as simulações seguem mantendo as regras do modelo a dois estados estocástico de Markov, ou seja, os eventos não ocorrem de maneira simultânea e o sistema não possui memória, portanto, os dados estatísticos de confiabilidade são considerados constantes ao longo do tempo.

O algoritmo genérico proposto é apresentado na Figura 13. Uma breve descrição dos principais blocos deste fluxograma é apresentada a seguir.

¹ A Teoria do Cisne Negro foi concebida por Nassim Nicholas Taleb para explicar: Um acontecimento de impacto desproporcionado ou um evento raro aparentemente inverossímil, para lá das expectativas normais históricas, científicas, financeiras ou tecnológicas.

Figura 13 – Fluxograma do Algoritmo II



Fonte: Autor (2020)

Para a execução da simulação, em *Especificar Período de Simulação*, deve ser definido o período da simulação sequencial em horas, por exemplo, para períodos de simulação de um ano, configura-se: 8760h. A etapa *Sorteia Amostra Inicial do Vetor de Estados do Sistema*, é amostrado um valor inicial do vetor conforme explicado em *Sorteio de Amostras e Carrega Vetor de Estados* do Algoritmo I.

Em *Calcula Tempo de Permanência no Estado Amostrado*, é executado o cálculo da função de densidade acumulativa (CDF) do sistema dado por:

$$CDF = \log U \cdot \frac{-1}{\sum_1^n \delta_i} \quad \text{eq(8)}$$

Onde U é um número aleatório uniformemente distribuído no intervalo $[0,1]$ e δ_i representa a taxa de falha ou de reparo do i -ésimo componente que compõe x^k :

Em *Condição Operativa Violada?*, é verificado se os limites operativos são violados, caso seja violado, o tempo do sistema em falha é acumulado, caso contrário, o tempo do

sistema em regime normal de operação é acumulado. Em *Determina Elemento de Troca*, é definido qual será o próximo equipamento a mudar de estado.

As ocorrências nas quais os limites operativos são violados, é necessário realimentar as informações estatísticas do sistema, essa ação é executada em *Grava Registros*. É verificado se o tempo de simulação (TS) já atingiu o valor definido de período de simulação (P) na etapa $TS < P?$, caso o tempo de simulação seja menor que o período especificado, é calculado um novo CDF do sistema e o processo se repete, caso contrário, em *Calcula Coeficiente de Variação* são processados os dados estatísticos e calculado o coeficiente de variação, esse processo é executado até que o coeficiente de variação β atingisse o valor determinado. Se os parâmetros não foram alcançados, um novo período se inicia e o processo se repete, quando o parâmetro é satisfeito, o processo é finalizado.

5 RESULTADO E DISCUSSÃO

O nível de risco que um indivíduo tolera, depende do benefício ganho ao assumi-lo. Tolerável não significa aceitável: implica nos limites máximos de aceitabilidade, enquanto aceitável implica numa aceitação voluntária. Tolerar um risco não significa que ele seja desprezível a ponto de ser ignorado, mas que é necessário mantê-lo sobre constante revisão e reduzi-lo ainda mais, se for técnica e economicamente possível.

Neste capítulo, são abordados os resultados das simulações propostas conforme ordem introduzida no capítulo anterior. Os resultados das simulações serão analisados com foco na engenharia de resiliência, e como resultado, almeja-se identificar se o risco operacional se encontra dentro de níveis aceitáveis, além de apontar as futuras ações a serem tomadas para aumentar a confiabilidade do Sistema de Drenagem.

Avaliar o comportamento do sistema de drenagem frente a uma condição crítica extrema oferece aos gestores, a possibilidade de prevenir, minimizar ou superar os efeitos nocivos de adversidades alicerçadas na capacidade de resposta deste sistema. Deste modo, para todo período de simulação, será considerada a existência simultânea de dois eventos indesejáveis.

Uma falha na rocha basáltica que dobra o volume de afluentes derivados da percolação e uma falha na junta de expansão de uma unidade geradora situada próxima ao centro da barragem, juntos os dois eventos indesejáveis aumentam em 2,35 vezes o volume de água normal de percolação. Cabe salientar que a possibilidade de ocorrência de qualquer um destes eventos é pequena e desde a concepção da barragem, nunca se registrou a existência de um evento indesejável dessa natureza.

No Apêndice B são apresentados os algoritmos implementados no *software MatlabTM*.

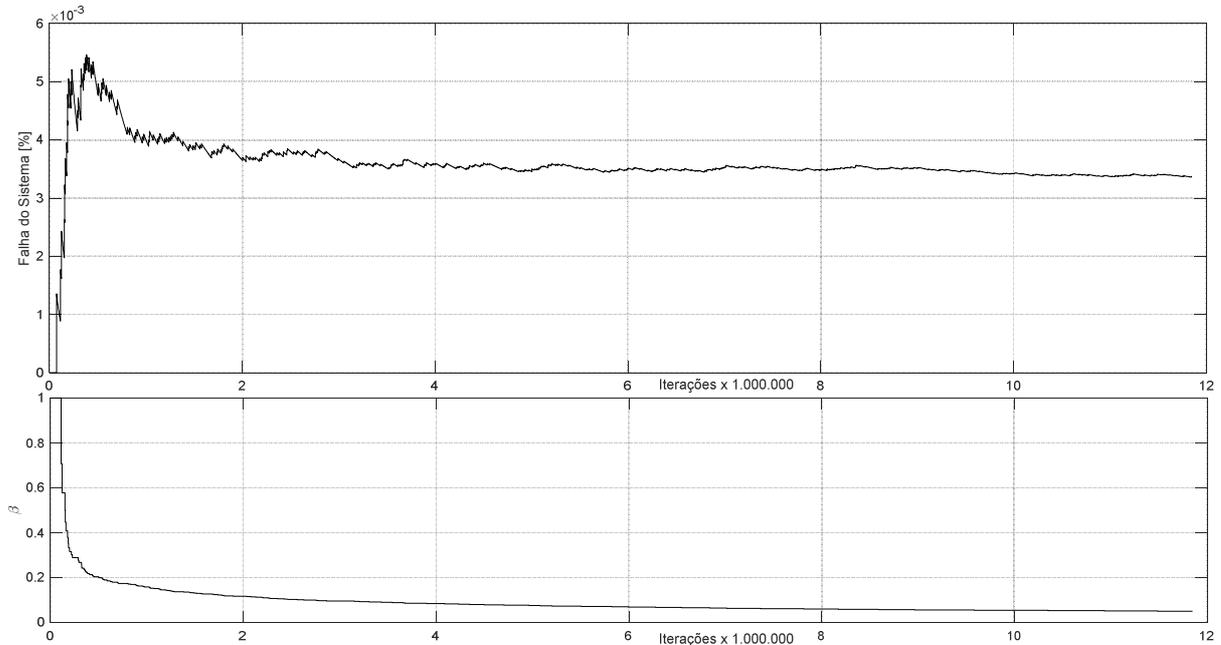
5.1 Determinação dos Pontos Críticos do Sistema

Para verificar o impacto que a indisponibilidade dos equipamentos possui no sistema de drenagem, não são consideradas as manutenções dos equipamentos.

A Figura 14 apresenta a probabilidade de falhas do sistema que representa a razão entre as topologias avaliadas que apresentaram falhas pelo total de testes realizado e o critério de convergência β . Trata-se do resultado da simulação para determinação dos equipamentos críticos levando em consideração a topologia do sistema e os dados estatísticos de

confiabilidade dos equipamentos. A probabilidade de falhas do sistema de drenagem converge para 0,00337% após 11,8 milhões de iterações quando atinge o critério de convergência de 0,05. Esse resultado é interpretado tanto pelo autor quanto pelos especialistas do sistema de drenagem como um excelente resultado.

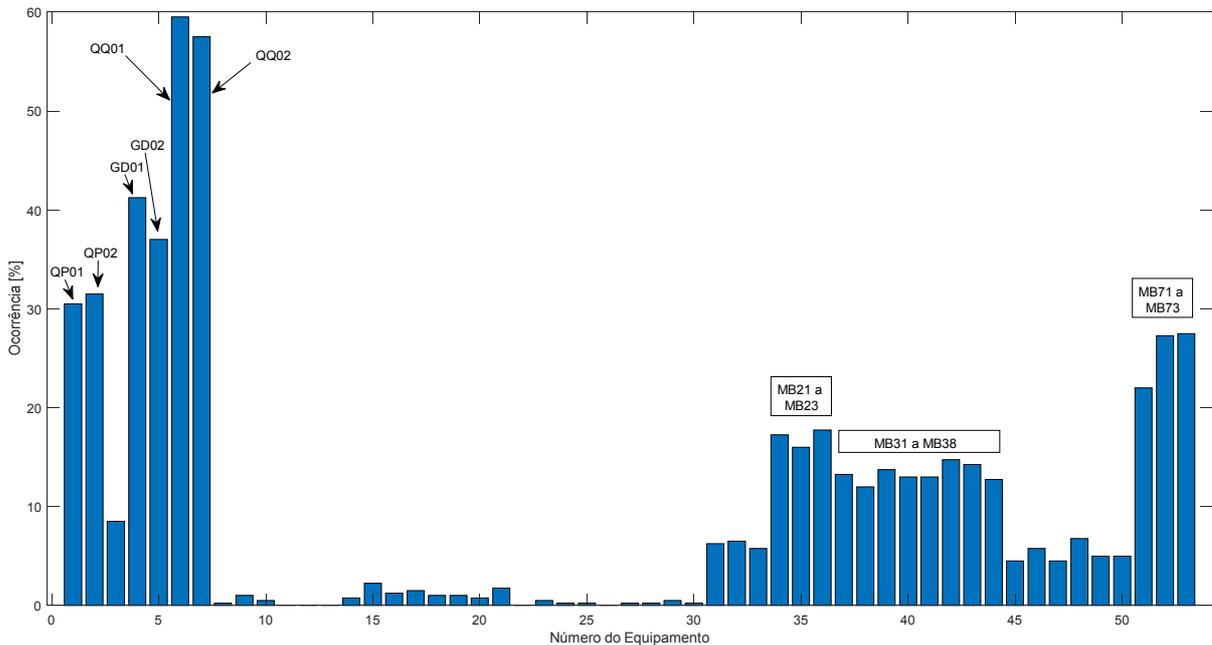
Figura 14 – Probabilidade de falha do sistema e convergência β . Caso 1.



Fonte: Autor (2020).

A Figura 15 apresenta o percentual de ocorrência do equipamento no registro de falha, ou seja, ele é a relação entre a quantidade de vezes que o equipamento apresentou falha pelo total de falhas do sistema quando se avalia os vetores em que a função desempenho apresentou resultado insatisfatório. Nela os quadros de alimentação QQ01 e QQ02, equipamentos seis e sete respectivamente, apresentam um percentual de ocorrência de aproximadamente 60%, destacando-se em relação aos demais. Esse resultado é proveniente de dois fatores: confiabilidade individual relativamente menor e, principalmente, devido à dependência da topologia do sistema de drenagem em relação a esses componentes. A participação de ocorrência dos geradores a diesel de emergência GD01 e GD02, e das fontes principais de alimentação QP01 e QP02, expressa a importância que a alimentação elétrica possui na topologia do sistema de drenagem. Com relação as motobombas, a participação nas ocorrências se deve principalmente aos dados estatísticos de confiabilidade desses equipamentos.

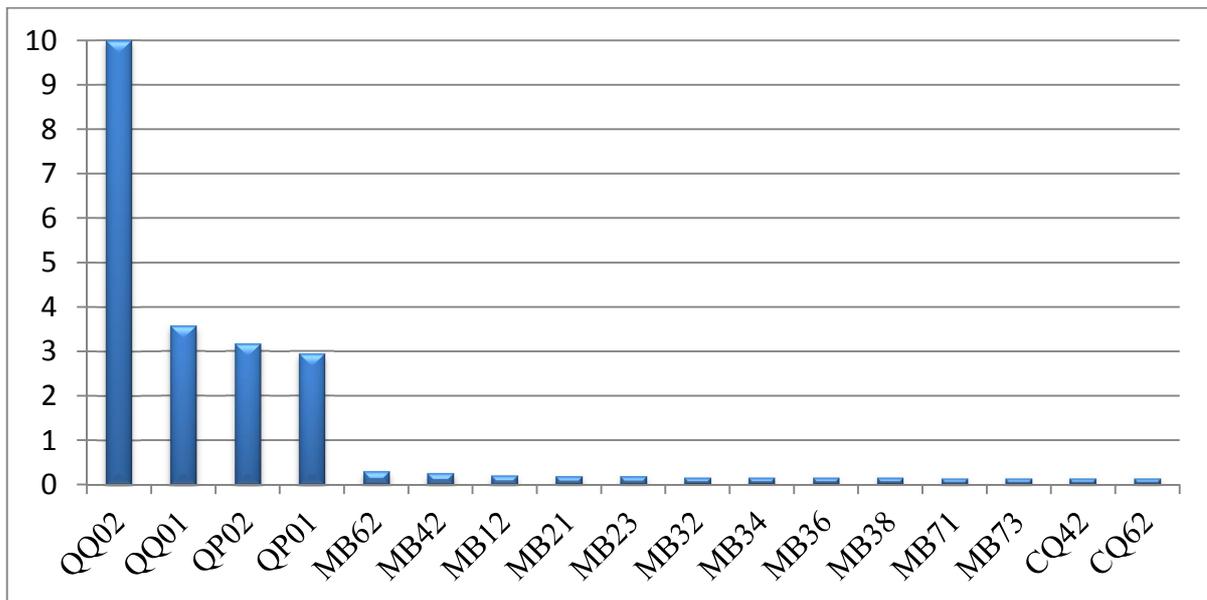
Figura 15 – Percentual de ocorrência dos equipamentos nas falhas do sistema.



Fonte: Autor (2020)

Para efeito de comparação e validação de resultados, o Sistema de Drenagem foi implementado no *software* PROSIS™. As informações estatísticas de taxa de falha dos componentes e a topologia do sistema alimentaram o *software*, como resultado, o PROSIS™, apresenta a seguinte análise da confiabilidade do Sistema Drenagem: confiabilidade de 90% - $t_{10} = 377,2$ horas, confiabilidade de 50% - $t_{50} = 1007$ horas, ou seja, considerando t_{50} a mediana, caso não seja realizada manutenção em nenhum componente do sistema de drenagem, o sistema apresentará uma falha catastrófica a cada 1007h, ou aproximadamente 42 dias. O gráfico de inferência resultante está apresentado na Figura 16 abaixo, nele é possível observar que os resultados do método proposto são semelhantes aos encontrados pelo uso do *software* PROSIS™. Os resultados das simulações na qual o sistema é continuamente reparado serão apresentados no item 5.2.

Figura 16 – Impacto da confiabilidade do sistema.

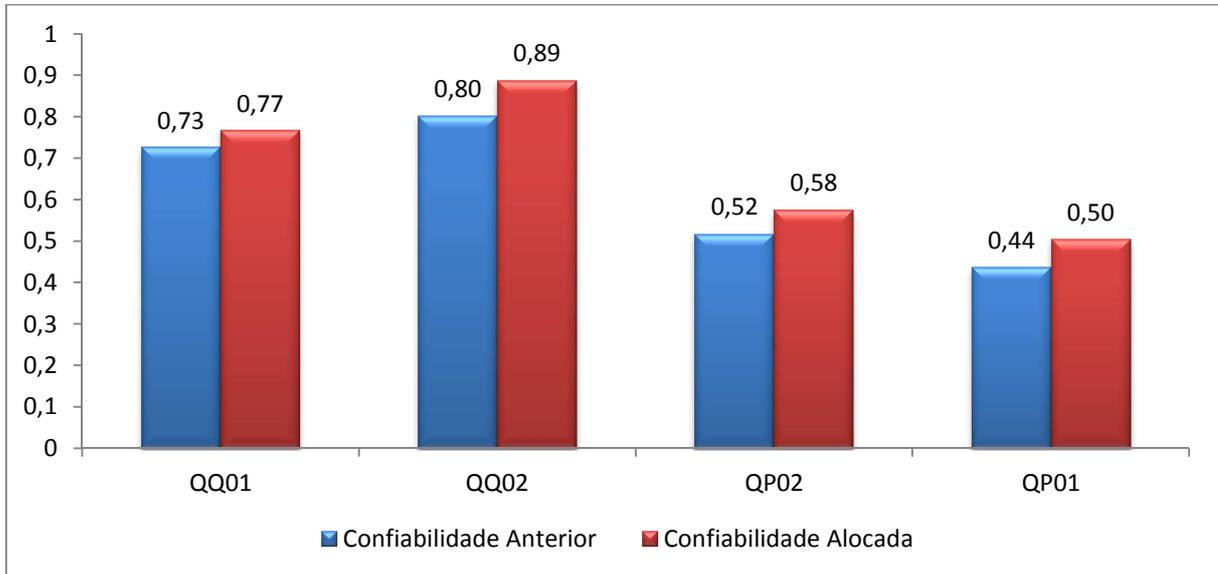


Fonte: Autor (2020)

O Gráfico de inferência, apresentado na escala de 0 a 10, considera o impacto sobre a confiabilidade do sistema quando se melhora a confiabilidade de um componente em um $\Delta R(t)$. É possível observar que o maior ganho na confiabilidade do sistema é obtido ao melhorar a confiabilidade do quadro elétrico QQ02 - peso 10. Os quadros QQ01, QP02 e QP01 apresentam os seguintes pesos: 3,5, 3,1, e 2,9 respectivamente, valores também significativos. Outros treze equipamentos possuem peso maior que 0,1, destes, onze são motobombas e dois são quadros de alimentação elétrica.

A distribuição de confiabilidade t_{10} do Sistema de Drenagem em 377,2 horas corresponde a uma confiabilidade de 90%, mas ao estipular uma meta de confiabilidade para o sistema de drenagem de 95,0%, segundo os parâmetros de mínimo esforço e mínimo custo e considerando o custo da implementação da melhoria igual para todos os equipamentos, observa-se que a alocação da confiabilidade também está direcionada para os quadros elétricos QQ01, QQ02, QP02 e QP01. Essa informação adicional apresentada pelo *software PROSIS™* é ilustrada no gráfico apresentado na Figura 17 abaixo.

Figura 17 – Alocação da confiabilidade para alcançar confiabilidade de 95% associada a 377,2 horas de operação sem reparos.



Fonte: Autor (2020)

5.2 Determinação da Confiabilidade do Sistema de Drenagem

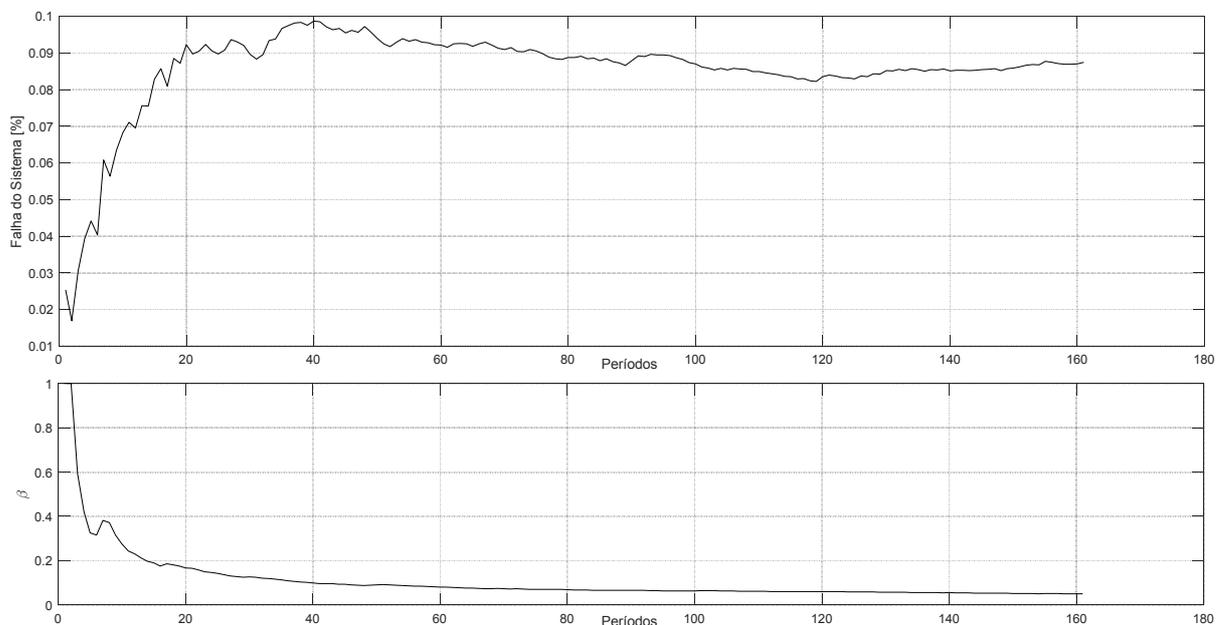
A modelagem do Algoritmo I é dita não sequencial, deste modo, não se verificava a interação entre os equipamentos e não se empregava informações relacionadas com o tempo médio de reparo, ou seja, eram consideradas somente no cálculo da disponibilidade não sendo diretamente empregadas. Para determinar a confiabilidade do sistema com formulação sequencial, o Algoritmo II faz uso de três variáveis, a indisponibilidade para determinar o estado inicial, a taxa de falha para determinar o tempo de operação e taxa de reparo para determinar o tempo de reparo. Ao utilizar a taxa de reparo dos equipamentos, a análise passa a observar também a eficiência das ações corretiva dos equipamentos.

A Figura 18 apresenta a probabilidade de falhas do sistema e a convergência β . Cada período de análise possui uma janela de 10 anos, ou seja, 87.600 horas, foram contabilizadas 2.345.779 mudanças de estado dos equipamentos durante a análise de 162 períodos até atingir o critério de convergência, registrando uma probabilidade de falhas do sistema de drenagem próximo a 0,0874%. Como o Algoritmo I utiliza apenas os dados de disponibilidade para mapear o equipamento crítico e esses valores de disponibilidade são considerados bons, e o Algoritmo II utiliza a disponibilidade para encontrar o vetor inicial de estados e com o decorrer do tempo, avalia a condição do sistema considerando pelo menos uma falha em cada equipamento devido ao período de dez anos adotado para simulação, o resultado da

probabilidade de falha do Algoritmo I se apresenta inferior ao do Algoritmo II. Esse resultado é aceitável, uma vez que as avaliações foram realizadas considerando durante todo período de dez anos de simulação a existência de falha tanto na rocha basáltica quanto na junta de expansão do conduto forçado, além de serem desconsiderados os volumes dos poços de drenagem CQ01, CQ02, CQ04, CQ06 e CQ07. O resultado das simulações para níveis críticos de operação apoia as análises para um sistema mais resiliente.

Neste tipo de simulação, espera-se uma participação regular dos equipamentos nos registros de falha, visto que, a probabilidade de falha do equipamento aumenta ao longo do tempo, quando se trabalha com uma janela de 87.600 horas, por menor que seja a taxa do equipamento, ele irá falhar e será reparado uma ou mais vezes.

Figura 18 – Probabilidade de falha do sistema e convergência β . Caso 2.

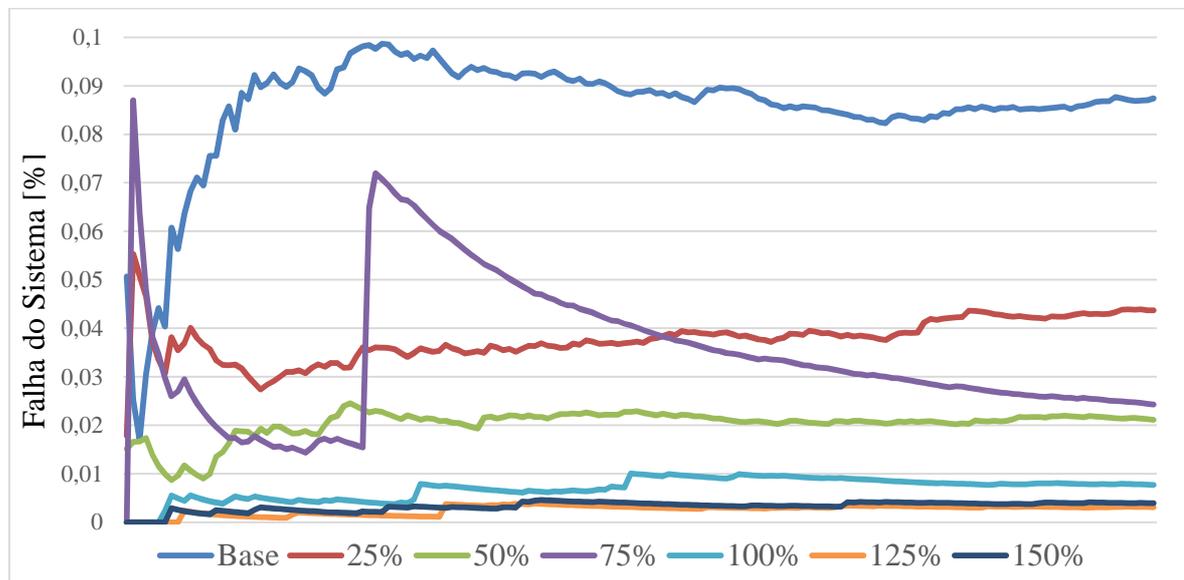


Fonte: Autor (2020)

Com o intuito de verificar o impacto que a eficiência da manutenção representa no sistema de drenagem, outras simulações foram realizadas alterando a taxa de reparo com incremento de 25%, 50%, 75%, 100%, 125% e 150%. De forma análoga, efetua-se a mesma análise alterando-se a taxa de falha com incremento de 50% e decréscimo de 10%, 25%, 50%, 75% e 95%. Adotou-se o caso apresentado na Figura 18 como caso base para ambas às análises. As variações não ocorrem de forma simultânea, ou seja, não será verificado o acoplamento entre essas variáveis. Para facilitar a comparação entre esses casos, optou-se por adotar um número fixo de períodos, a quantidade de períodos necessária para atingir a convergência para o caso base foi de 162 períodos, portanto, esse será a quantidade de períodos a ser adotada para todas as simulações destas análises.

A figura 19 ilustra a variação da probabilidade de falhas do sistema quando alterada a taxa de reparo dos equipamentos. Observa-se que ao aumentar a taxa de reparo em 25%, reduzindo o tempo com a manutenção dos equipamentos que compõem o sistema de drenagem da barragem principal, é possível reduzir a probabilidade de falhas do sistema de 0,0874% para 0,0436%, ou seja, uma redução de aproximadamente 50% do percentual de falhas. A curva do gráfico que representa a taxa de reparo de 75%, apresentou em sua trigésima sétima interação uma falha simultânea nos equipamentos críticos, isso gerou um salto na probabilidade de falha do sistema, mesmo assim, ao final de 162 períodos de análise, a curva de taxa de reparo de 75% atingiu um valor esperado.

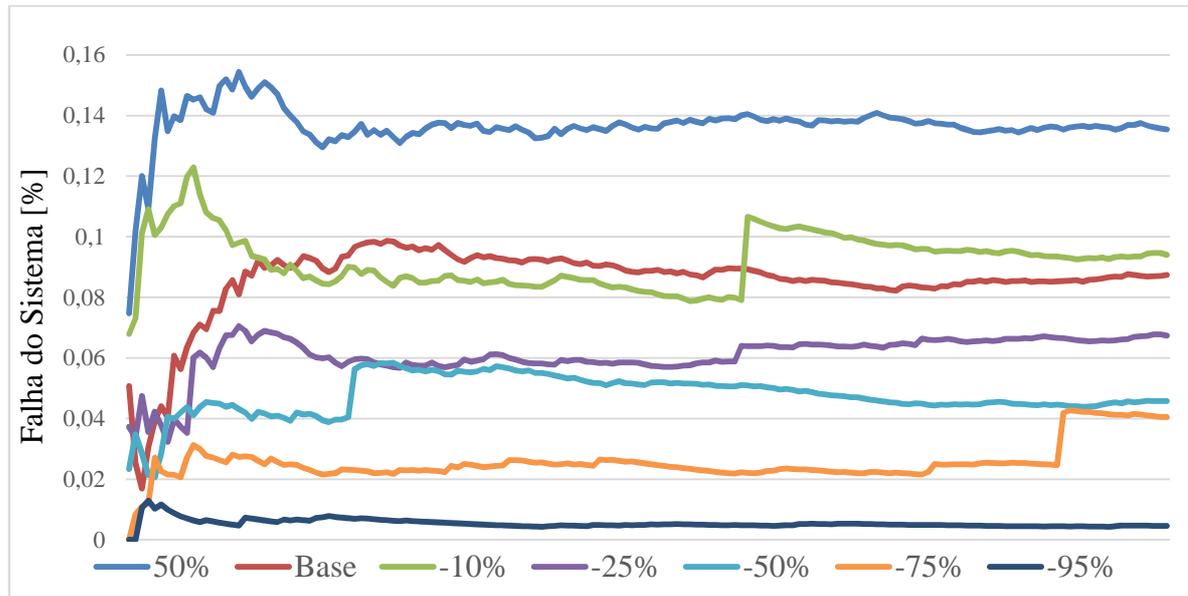
Figura 19 - Impacto da variação na taxa de reparo.



Fonte: Autor (2020)

A figura 20 ilustra a variação do percentual de falhas do sistema quando alterada a taxa de falha dos equipamentos. Observa-se que ao reduzir a taxa de falha dos equipamentos, melhorando a qualidade dos componentes e peças dos equipamentos, é possível reduzir o percentual de falhas do sistema, contudo, os ganhos não são tão relevantes quanto os ganhos gerados ao melhorar a eficiência da manutenção dos equipamentos.

Figura 20 - Impacto da variação na taxa de falha.



Fonte: Autor (2020)

Conforme esperado, os resultados evidenciam que uma redução na taxa de falha ou um aumento na taxa de reparo aumentam a confiabilidade do sistema, outra evidência destacada é que a probabilidade de falha do sistema tem mais sensibilidade a variações na taxa de reparo. Apoiando a importância de uma manutenção eficiente em sistemas cujos equipamentos apresentam uma alta taxa de disponibilidade.

Com o intuito de avaliar a resposta do sistema de drenagem para uma alteração na topologia do sistema, parte das cargas do quadro QQ01 e QQ02 foram alimentadas pelo QQ01.1 e pelo QQ02.1, observe que não foi criada uma redundância na alimentação e sim uma divisão de cargas que facilita principalmente manobras operacionais e a manutenção dos quadros.

Conforme observado na figura 21, trata-se de uma solução de baixo investimento e de fácil implementação. Nesta simulação, se manteve as condições extremas de percolação adotadas, para esta simulação adotou-se o valor de 0,1 para o critério de convergência β , essa alteração foi necessária uma vez que a alteração na topologia reduziu muito a probabilidade de falhas e portanto, o tempo de simulação para um β igual a 0,05% se tornou impraticável com o recurso computacional utilizado: Notebook Dell core I7 de 2,7GHz e memória de 8Gb DDR3.

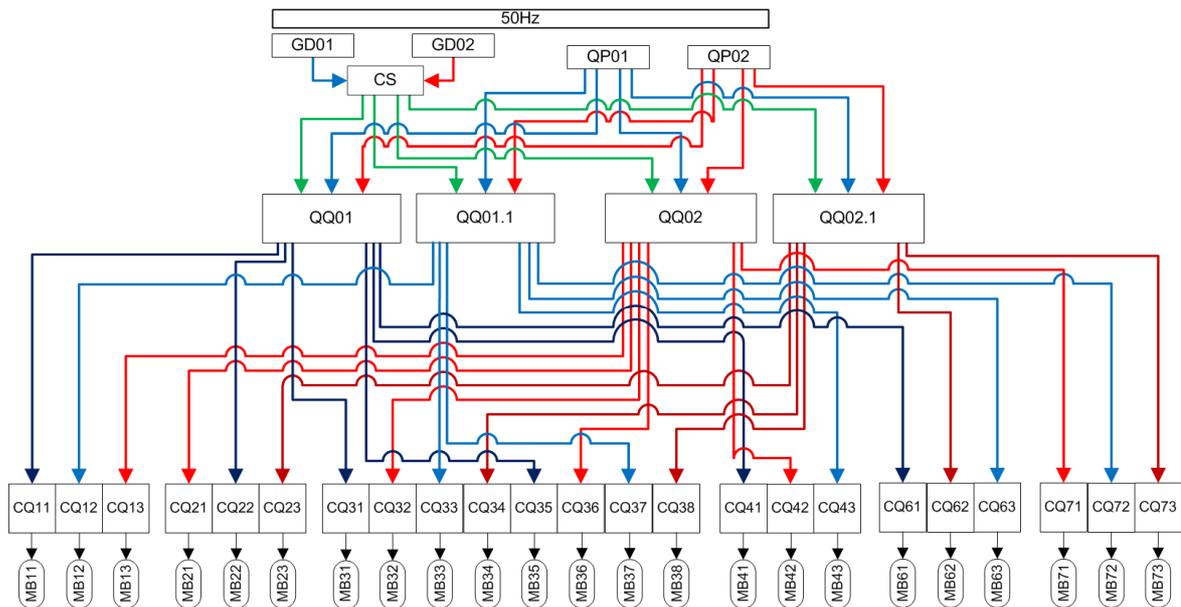
A função DRENAGEM é descrita como:

$$\text{Drenagem Direita (l/s)} = \text{QQ01} * [(\text{CQ11} * \text{MB11} * 35) + (\text{CQ22} * \text{MB22} * 55)] + \text{QQ01.1} * \text{CQ12} * \text{MB12} * 35 + \text{QQ02} * [(\text{CQ13} * \text{MB13} * 35) + (\text{CQ21} * \text{MB21} * 55)] + \text{QQ02.1} * \text{CQ23} * \text{MB23} * 55.$$

Drenagem Esquerda (l/s) = $QQ01 * [(CQ41 * MB41 * 59) + (CQ61 * MB61 * 53)]$
 $+ QQ02 * [(CQ42 * MB42 * 59) + (CQ71 * MB71 * 30)] + QQ01.1 * [(CQ43 * MB43 * 59)$
 $+ (CQ63 * MB63 * 53) + (CQ72 * MB72 * 30)] + QQ02.1 * [(CQ62 * MB62 * 53) + (CQ73$
 $* MB73 * 30)].$

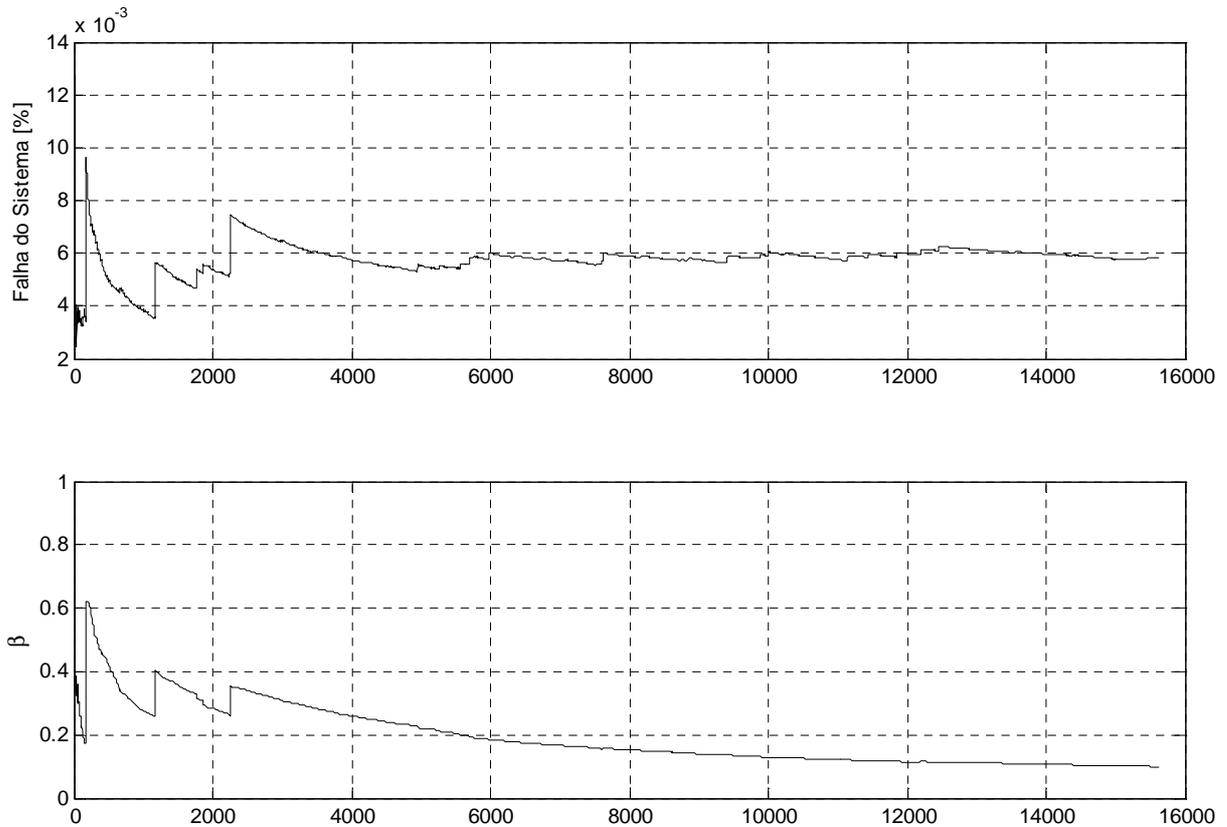
Drenagem do Leito do Rio (l/s) = $QQ01 * [(CQ31 * MB31 * 55) + (CQ35 * MB35$
 $* 55)] + QQ02 * [(CQ32 * MB32 * 55) + (CQ36 * MB36 * 55)] + QQ01.1 * [(CQ33 * MB33$
 $* 55) + (CQ37 * MB37 * 55)] + QQ02.1 * [(CQ34 * MB34 * 55) + (CQ38 * MB38 * 55)].$

Figura 21 – Mudança proposta na topologia do sistema de drenagem



Fonte: Autor (2020)

Conforme pode ser observado na Figura 22, a alteração na topologia do Sistema de Drenagem reduziu significativamente a probabilidade de falhas do sistema para 0,00583%. Avaliando os resultados, a alteração na topologia se apresenta como uma ótima opção, com relação aos custos, ela possui um custo maior do que a alternativa de aumentar a eficiência da manutenção e um custo menor se comparado a alternativa de aumento de confiabilidade dos equipamentos, uma vez que aumentar a confiabilidade de equipamentos que já apresentam alta confiabilidade, além de consumirem grandes recursos não trariam grandes ganhos.

Figura 22 – Percentual de falha do sistema e convergência β . Caso 3.

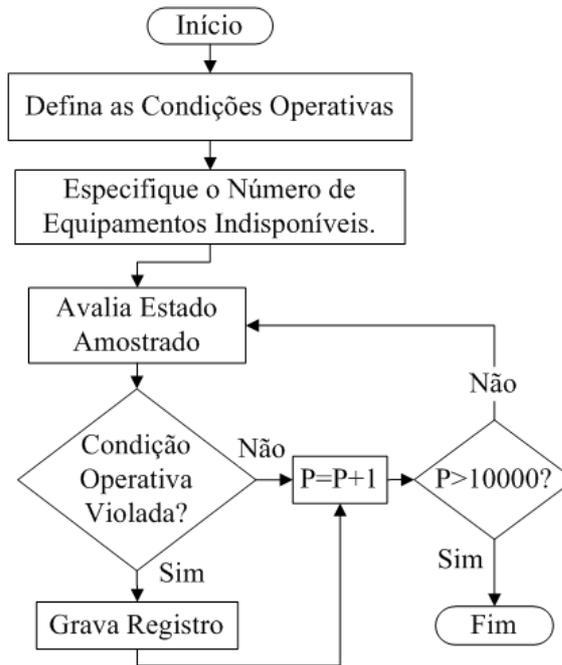
Fonte: Autor (2020)

5.3 Aplicativo de Análise Probabilística de Equipamento Crítico

A análise da topologia do sistema apresentou boa eficiência em detecção de deficiências no projeto com baixo consumo de recursos de informática. Esse fato evidencia a oportunidade de desenvolvimento de um aplicativo para sistema android capaz de reproduzir pequenos sistemas críticos denominado SAPEC – Sistema de Análise Probabilística de Equipamento Crítico. O aplicativo está disponível de forma preliminar no endereço: <https://sapec.netlify.app/#>, assim que concluído seu registro junto a UFRGS o mesmo estará disponível no *play store*.

O Algoritmo III apresentado de forma genérica na Figura 23 é proposto para avaliar possíveis pontos críticos em sistema considerando exclusivamente a topologia do sistema. Uma breve descrição dos principais blocos do fluxograma que compreende esse aplicativo é apresentada a seguir.

Figura 23 – Fluxograma do Algoritmo III



Fonte: Autor (2020)

Conhecendo a topologia do sistema de interesse, é possível avaliar se a resposta desse sistema é aceitável ou não para uma determinada porcentagem de equipamentos indisponíveis. No bloco *Defina as Condições Operativas* o analista determina o número de equipamentos que o sistema possui e define a função objetivo deste sistema através da conexão entre os componentes que compõem o sistema, além de estabelecer a restrição operativa do sistema.

No bloco *Especifique o Número de Equipamentos Indisponíveis* o analista seleciona a quantidade de equipamentos que serão considerados indisponíveis para os cálculos. Em *Avalia Estado Amostrado*, por amostragem de Monte Carlo, a quantidade de indisponibilidade selecionada é sorteada através de uma distribuição uniforme entre os equipamentos que compõem o sistema.

No bloco *Condição Operativa Violada?*, é verificado se as condições operativas estabelecidas pela atual topologia e considerando os equipamentos indisponíveis é capaz de atender a restrição estabelecida. Caso positivo, o registro é armazenado e o processo se repete até completar o número de interações selecionadas pelo analista. Em Modo padrão são realizadas 10.000 iterações.

Ao acessar o aplicativo, o analista pode definir no menu *Parâmetros Gerais* a quantidade de simulações que ele deseja executar, como tratam-se de análises probabilísticas,

quanto maior for o número de simulações, maior será a precisão do resultado, contudo, é importante salientar que mais simulações necessitam mais recursos computacionais. Neste menu também deve ser definido a quantidade de equipamentos que estarão em falha, ou seja, indisponíveis e a restrição do sistema. A Figura 24 apresenta uma ilustração do menu Parâmetros Gerais.

Figura 24 – Parâmetros Gerais

SAPEC

1 - Parâmetros Gerais 2 - Diagrama 3 - Resultados

Parametrize aqui suas configurações para a simulação

Número de Simulações

10000

Número de vezes em que a simulação será executada.

Falha em equipamentos

6

Número de equipamentos com falha a cada simulação

Restrição

115

Restrição utilizada na simulação

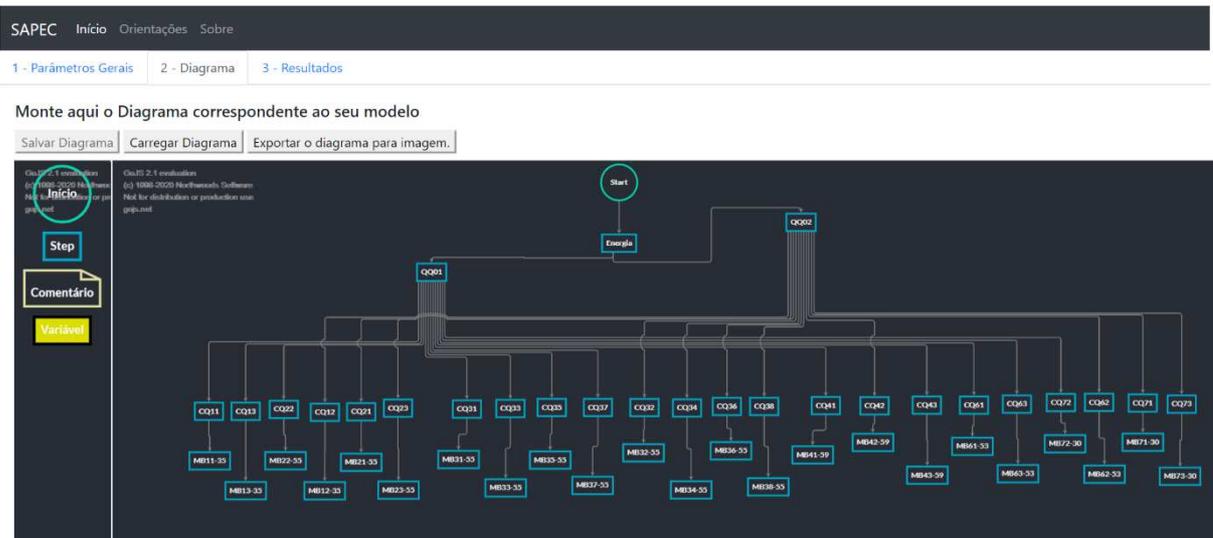
Salvar

Fonte: Autor (2020)

No menu Diagrama apresentado na Figura 25, é possível efetuar a modelagem do sistema que se deseja avaliar. O analista seleciona os blocos do menu à direita, arrasta para a posição desejada e edita os blocos conforme sua necessidade. O sistema deve possuir um único bloco circular de Início onde os blocos retangulares serão conectados. Os blocos retangulares denominados STEP, representam os equipamentos do sistema e seguem o seguinte padrão: NOME - VALOR; onde o nome representa o nome daquele equipamento ou código utilizado para representar o equipamento, o valor colocado após o hífen representará um multiplicador para esse equipamento, o valor multiplicador padrão é 1 (um).

Uma vez configurados os blocos, o analista pode conectar os blocos em série ou em paralelo, ele deve clicar no bloco e arrastar a linha até o bloco que deseja realizar a conexão. Essas conexões vão definir a função desempenho do sistema.

Figura 25 – Diagrama



Fonte: Autor (2020)

No menu Resultados apresentado na Figura 26, ao clicar em criar fórmula, é gerada a função desempenho do sistema de acordo com as configurações e conexões realizadas entre os blocos.

Figura 26 – Resultados – Criar fórmula



Fonte: Autor (2020)

Ao selecionar a opção cálculo, o sistema executa a quantidade de simulações configurada e registra o estado de todos os equipamentos sempre que o resultado da função desempenho não for satisfatório, ou seja, as condições operativas foram violadas. A Figura 27 ilustra o percentual de participação dos equipamentos nos registros de falha de forma gráfica. Em geral, os equipamentos que possuem a maior participação são os equipamentos mais sensíveis para o sistema, ou seja, esses equipamentos devem ser considerados críticos e a topologia do sistema deve ser alterada para garantir que a participação dos equipamentos seja a mais distribuída possível.

Figura 27 – Resultados - Calcular



Fonte: Autor (2020)

6 CONCLUSÃO

Esta dissertação apresentou um estudo de caso no qual foram aplicados os conceitos de engenharia de confiabilidade, juntamente com o Método Monte Carlo, para encontrar possíveis fragilidades no sistema de drenagem da barragem principal da usina hidrelétrica de Itaipu Binacional. Primeiro, uma abordagem não sequencial baseada em simulação de Monte Carlo foi usada para identificar equipamentos críticos dentro do sistema de drenagem. Em seguida, uma simulação sequencial de Monte Carlo foi usada para avaliar a confiabilidade do sistema de drenagem em sua topologia atual, considerando dados históricos reais do conjunto de equipamentos. Também foram realizados testes de sensibilidade para verificar o impacto da redução da taxa de falha e melhoria da eficiência de manutenção dos equipamentos.

Com base na simulação de uma condição crítica de um vazamento basáltico na estrutura da barragem, juntamente com uma falha em uma junta de expansão de um conduto de unidade geradora, caracterizando uma situação que aumentaria significativamente o volume de água no sistema, os painéis elétricos que fornecem a energia para o sistema de drenagem, QQ01 e QQ02, apresentam-se como os equipamentos críticos do sistema. Nesta condição crítica, a probabilidade de falha do sistema de drenagem é de aproximadamente 0,0874%.

Com relação à robustez do sistema, os resultados da simulação indicam que reduzir a taxa de falhas melhorando a qualidade dos materiais que compõem os equipamentos, ou até mesmo substituindo esses equipamentos, não gera ganhos significativos uma vez que melhorar a taxa de falhas em - 25% traz uma redução na probabilidade de falhas do sistema de 23%, em contrapartida, ao aumentar a eficiência da ação corretiva aumentando a taxa de reparo em 25%, é verificada uma queda significativa na probabilidade de falha do sistema de drenagem de 50%. Paralelamente, observou-se que uma mudança na topologia da fonte de alimentação reduz aproximadamente 15 vezes a probabilidade de falha do sistema, além de trazer ganhos significativos em confiabilidade, aumenta a flexibilidade e reduzi os riscos operacionais.

Neste contexto, ações estão sendo tomadas para melhorar a confiabilidade do sistema de drenagem da barragem nos três parâmetros avaliados. Para reduzir a taxa de falha e aumentar a taxa de reparo das motobombas, está sendo realizada a modernização destes equipamentos, através da alteração nos processos de lubrificação, alteração no tipo de material utilizado na usinagem dos equipamentos, dentre outros.

A modernização também conta com a substituição de comandos mecânicos por digitais, ampliação no número de alarmes e monitoramento de variáveis, aquisição de material sobressalente, aliados a alteração dos procedimentos de inspeção e manutenção, pretende-se reduzir significativamente as taxas de reparo desse sistema. E por fim, será alterada a topologia do sistema para quatro quadros de alimentação QQ.

O estudo da confiabilidade deste sistema crítico deve ser interpretado apenas como ponto de partida para que, em um futuro, uma efetiva gestão de segurança operacional desses sistemas críticos seja resiliente, de maneira específica, pode-se citar algumas sugestões para trabalhos que sigam esta mesma linha de estudo:

- 1) Ampliar o modelo para compreender as rotinas de inspeção em fases incipientes, e estudar outras possíveis contingências, partindo das variabilidades definidas neste estudo, a fim de corroborar os resultados quanto a flexibilidade deste tipo de sistema;
- 2) Efetuar uma análise nos mesmos moldes para o sistema de drenagem da casa de força da Itaipu Binacional;
- 3) Desenvolver um indicador de segurança operacional utilizando dados disponíveis da planta para monitorar em tempo real a saúde do sistema de drenagem da barragem principal.

7 REFERÊNCIAS

- ANDRADE, E. L. Introdução à Pesquisa Operacional – Métodos e Modelos para a Análise de Decisão. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Ed., 1989.
- AGENCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. Segurança de Barragens - ANA. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Páginas/serviços/cadastrados/cnbarragens.aspx>>. Acesso em: 20 fev. 2020.
- BILLINTON, R.; ALLAN, R. N. Reliability Evaluation of Power Systems. New York: Plenum Press, 1996.
- CHRISTOPHER, M.; PECK, H. Building the resilient supply chain. *International Journal of Logistics Management*, v.15, n.2, p.1-14, 2004.
- COOK, Richard; RENDER, Marta; WOODS, David. (2000). Gaps in the continuity of care and progress on patient safety. *BMJ (Clinical research ed.)*. 320. 791-4.
- COUGO, P. Modelagem conceitual e projeto de banco de dados. Rio de Janeiro: CAMPUS, 1997.
- ELSAYED, E.A. Reliability engineering. Reading, MA: Addison Wesley Longman, 1996.
- ESCUADERO, L. F. La simulación en la empresa. Barraincúa: Deusto, 1973.
- FIKSEL, J. Sustainability and Resilience: Toward a Systems Approach. *Sustainability: Science, Practice, & Policy*, v.2, n.2, p.1-8, 2006.
- FOGLIATTO, F. S; RIBEIRO, J. L. D. Confiabilidade e Manutenção Industrial. São Paulo: Campus - Elsevier, 2009.
- GIL, Antônio Carlos. Como elaborar projetos de pesquisa. 4º ed. São Paulo: Atlas, 2002. 176p.
- GUIMARÃES, V. U. Modelagem para análise da confiabilidade de produtos em garantia. 2002. 92 f. Dissertação (Mestrado em Administração) – Escola de Administração, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- HASSAN, J.; KHAN, F. “Risk-based asset integrity indicators,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 25, no. 3, pp. 544–554, 2012.

- HALPERN, S. The assurance sciences. An introduction to quality control and reliability Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1978.
- HAMMERSLEY, J.M; HANDSCOMB, D. C. Monte Carlo methods. London: Methuen, 1964.
- HARREL. Charles R. et al. Simulação: otimizando sistemas 2. ed. São Paulo: IMAM, 2002.
- HOLLNAGEL, E. “Resilience - the Challenge of the Unstable,” in Resilience Engineering: Concepts and Precepts, 1st ed., E. Hollnagel, N. G. Leveson, and D. D. Woods, Eds. Hampshire: Ashgate, 2006, p. 397.
- HUAI-ZHI, Su; ZHI-PING, Wen. Intelligent Early – Warning System Of Dam Safety. Proceedings of the Fourth International Conference on Machine Learning and Cybernetics. 2005, Guangzhou: 18-21.
- ITAIPU BINACIONAL, “Perfil Institucional | Visão,” 2019. [Online]. Disponível em: <https://www.itaipu.gov.br/institucional/visao>. [Acesso em: 10-Nov-2019].
- ITAIPU BINACIONAL, Relatório Final de Projeto da Central Hidrelétrica de Itaipu,. Foz do Iguaçu: Itaipu, 1997.
- KARDEC, A.; NASCIF J. Manutenção: função estratégica. 3ª edição. Rio de Janeiro: Qualitymark: Petrobrás, 2009. 384 p.
- LAFRAIA, João Ricardo Barusso. Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade. Rio de Janeiro: Qualitymark: Petrobrás, 2001, 372p.
- LEVESON, N. “A new accident model for engineering safer systems” Safety Science, n 42, v. 4, pp. 237–270, 2006.
- LE COZE, J. C; PETTERSEN, K. Is resilience engineering realist or constructivist? In: E. Rigaud; E. Hollnagel; F. Pieri (Eds.) Third Symposium on Resilience Engineering. Juan les-Pins, France, Oct. 28-30, 2008.
- LLOYD, D. K.; LIPOW M. Reliability: management methods and mathematics. Milwaukee: The American Society for Quality Control, 1984.
- LUSTOSA, P. R. B.; PONTE, V. M. R.; DOMINAS, W. R. Simulação. In: CORRAR, L. J; THEÓPHILO, C. R. (Coord.). Pesquisa operacional para decisão em contabilidade e administração: contabilometria. São Paulo: Atlas, 2004. P. 242-284.
- LUTHRA, P. Reliability: What it means. Reliability Review, v. 8, p. 10,16, September, 1988.

MAY, LARRY W. e TUNG, YEOU KOUNG. *Hydrosystems engineering & management*. McGraw-Hill 1992.

MOUBRAY, J. *Manutenção Centrada em Confiabilidade (Reliability-Centered Maintenance – RCM)*. Trad. Kleber Siqueira. São Paulo: Aladon, 2000.

NASCIMENTO, A. M.; ZUCCHI, A. L. *Modelos de simulação*. São Paulo, Universidade de São Paulo, 1997. 40 p. Monografia – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

NIERADKA, I.P. *Sistema de monitoramento da instrumentação de segurança: um estudo de caso considerando a usina de Itaipu*. Dissertação (Mestrado em Engenharia elétrica e computação) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Foz do Iguaçu, 2016.

O’KANE, J.f; SPENCELEY, J.r; TAYLOR, R. *Simulation as an essential tool for advanced manufacturing technology problems*. *Journal Of Materials Processing Technology*, [s.l.], v. 107, n. 1-3, p.412-424, nov. 2000. Elsevier BV.

OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno – 3ª Edição*, p.52, 2000, Prentice-Hall.

PATIAS, J.; *Vazões de infiltração através da barragem de ITAIPU*. XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens, 2015.

PEGDEN et al. *Introduction to simulation using SIMAN*. São Paulo: Ed. McGraw Hill, 1990.

PINHEIRO, D. P. N. *A resiliência em discussão*. *Psicologia em Estudo*, 9, p.67-75; 2004.

TAVARES, J. *A resiliência na sociedade emergente*. Em Tavares J. (Org.) *Resiliência e educação*, São Paulo: Cortez, p. 43-75, 2001.

REIMAN, T.; OEDEWALD, P., “*Framework for evaluating safety critical organizations*” In: *The 17th Congress of the International Ergonomics Association, 2009, Beijing. Proceedings of The 17th Congress of the International Ergonomics Association, 2009*.

RIBEIRO, J. L. D. *FMEA e FTA no diagnóstico e melhoria de produtos e processos*. Notas de Aula. PPGEP, UFRGS. Porto Alegre, RS, 1995b.

ROSA, M. A. *Agent-based Technology Applied to Power Systems Reliability*:.Tese. PORTO: [s.n.], 2009.

ROSA, M. A. et al. *A Hybrid Approach to Investigating the Distributional Aspects Associated with Reliability System Indices*. *IEEE*, p. 19, 2011.

RUBINSTEIN, R.; KROESE, D. Simulation and the Monte Carlo Method. [S.l.]: A John Wiley & Sons, Inc., publication, 2008.

RUTTER, M. Resilience in the Face of adversity: protective factors and resistance to psychiatric disorder. *British Journal of Psychiatry*, 147, p. 589 - 611, 1985.

SILVA, A. M. L., REINALDI A. G. F., WARLLEY S. S. and LUIZ A. F. M. “Reliability assessment of time-dependent systems via quasi-sequential Monte Carlo simulation.” 2010 IEEE 11th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (2010): 697-702.

VACCARO, G. L. R. Modelagem e Análise da confiabilidade de sistemas. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

YUNES, M. A. M. A questão triplamente controversa da resiliência em famílias de baixa renda. [Tese de Doutorado], Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, 2001.

8 ANEXOS

8.1 CÓDIGOS DE LOCALIZAÇÃO

	Cód. Loc.	Descrição
CQ-01	J82A01	BOMBA BDR-F04-001
	J82A02	BOMBA BDR-F04-002
	J82A03	BOMBA BDR-F04-003
	J82A11	CCM CQ-01
	J82A13	MOTOR N1 50 HZ DA BOMBA BDR-F04-001
	J82A14	MOTOR N2 50 HZ DA BOMBA BDR-F04-002
	J82A15	MOTOR N3 50 HZ DA BOMBA BDR-F04-003
CQ-02	J83A01	BOMBA BDR-F12-001
	J83A02	BOMBA BDR-F12-002
	J83A03	BOMBA BDR-F12-003
	J83A11	CCM CQ-02
	J83A13	MOTOR N1 50 HZ DA BOMBA BDR-F12-001
	J83A14	MOTOR N2 50 HZ DA BOMBA BDR-F12-002
	J83A15	MOTOR N3 50 HZ DA BOMBA BDR-F12-003
CQ-03	J84A01	BOMBA BDR-F16-001
	J84A02	BOMBA BDR-F16-002
	J84A03	BOMBA BDR-F16-003
	J84A04	BOMBA BDR-F16-004
	J84A05	BOMBA BDR-F16-005
	J84A06	BOMBA BDR-F16-006
	J84A07	BOMBA BDR-F16-007
	J84A08	BOMBA BDR-F16-008
	J84A11	CCM CQ-03
	J84A13	MOTOR N01 50 HZ DA BOMBA BDR-F16-001
	J84A14	MOTOR N02 50 HZ DA BOMBA BDR-F16-002
	J84A15	MOTOR N03 50 HZ DA BOMBA BDR-F16-003
	J84A16	MOTOR N04 50 HZ DA BOMBA BDR-F16-004
	J84A17	MOTOR N05 50 HZ DA BOMBA BDR-F16-005
J84A18	MOTOR N06 50 HZ DA BOMBA BDR-F16-006	
J84A19	MOTOR N07 50 HZ DA BOMBA BDR-F16-007	
J84A20	MOTOR N08 50 HZ DA BOMBA BDR-F16-008	
CQ-04	J85A01	BOMBA BDR-F20-001
	J85A02	BOMBA BDR-F20-002
	J85A03	BOMBA BDR-F20-003
	J85A11	CCM CQ-04
	J85A13	MOTOR N1 50 HZ DA BOMBA BDR-F20-001

	J85A14	MOTOR N2 50 HZ DA BOMBA BDR-F20-002
	J85A15	MOTOR N3 50 HZ DA BOMBA BDR-F20-003
CQ-05	J86A01	BOMBA BDR-F16-011
	J86A02	BOMBA BDR-F16-012
	J86A03	BOMBA BDR-F16-013
	J86A10	CCM CQ-05A
	J86A11	CCM CQ-05
	J86A13	MOTOR N1 50 HZ DA BOMBA BDR-F16-011
	J86A14	MOTOR N2 50 HZ DA BOMBA BDR-F16-012
	J86A15	MOTOR N3 50 HZ DA BOMBA BDR-F16-013
CQ-06	K82A01	BOMBA BDR-H14-001
	K82A02	BOMBA BDR-H14-002
	K82A03	BOMBA BDR-H14-003
	K82A11	CCM CQ-06
	K82A13	MOTOR N1 60 HZ DA BOMBA BDR-H14-001
	K82A14	MOTOR N2 60 HZ DA BOMBA BDR-H14-002
	K82A15	MOTOR N3 60 HZ DA BOMBA BDR-H14-003
CQ-07	K80A01	BOMBA BDR-9994
	K80A02	BOMBA BDR-9995
	K80A03	BOMBA BDR-9996
	K80A11	CCM CQ-07
	K80A13	MOTOR N1 60 HZ DA BOMBA BDR-9994
	K80A14	MOTOR N2 60 HZ DA BOMBA BDR-9995
	K80A15	MOTOR N3 60 HZ DA BOMBA BDR-9996
GD	J05***	GRUPO GERADOR DIESEL DE EMERGENCIA 50 HZ GD01
	J06***	GRUPO GERADOR DIESEL DE EMERGENCIA 50 HZ GD02
QP	J12A**	QUADRO PRINCIPAL DE DISTRIBUICAO 13,8 KV QP-01
	J13A**	QUADRO PRINCIPAL DE DISTRIBUICAO 13,8 KV QP-02
CS	J14***	QUADRO DISTRIB 13,8 KV 50 HZ DOS GERADORES EMERG
QQ	J20***	QUADRO DISTRIB 460 V 50 HZ BOMBAS DREN QQ-01
	J20***	QUADRO DISTRIB 460 V 50 HZ BOMBAS DREN QQ-01

Fonte: Adaptado de Arquivo Técnico Itaipu Binacional (2020)

9 APÊNDICE

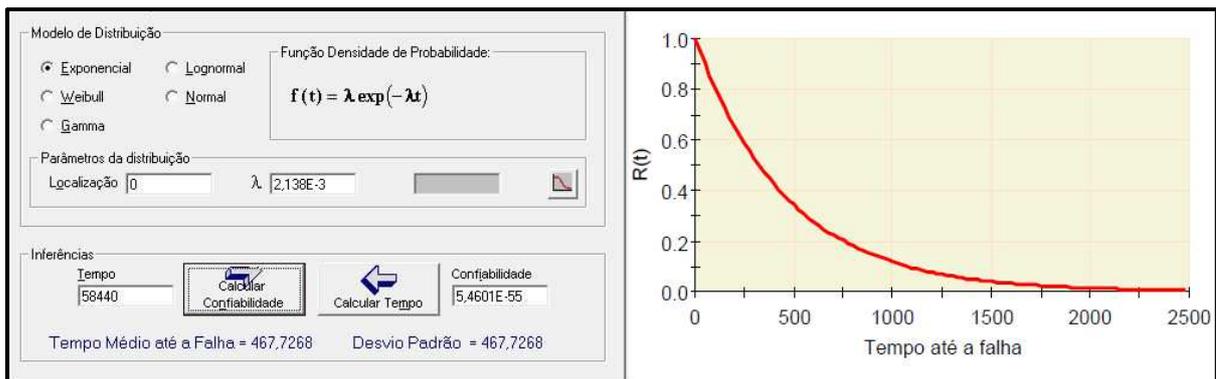
9.1 A - Dados Estatísticos

Dados estatísticos do QP01.

Equipamento (período de análise 58440 h)	Quadro de Distribuição Principal QP01
Código de Localização	J12A**
Autorizações de Trabalho (quantidade)	123
Duração das Autorizações de Trabalho (h)	902,91
Tempo de Equipamento Disponível (h)	57537,09
Taxa de falha λ	2,138E-03
Taxa de reparo μ	1,362E-01
Disponibilidade A	9,845E-01
Indisponibilidade U	1,545E-02
Tempo médio até a falha (h)	467,72
Confiabilidade R(t)	5,4601E-55

Fonte: Autor (2020)

Curva de confiabilidade do QP01



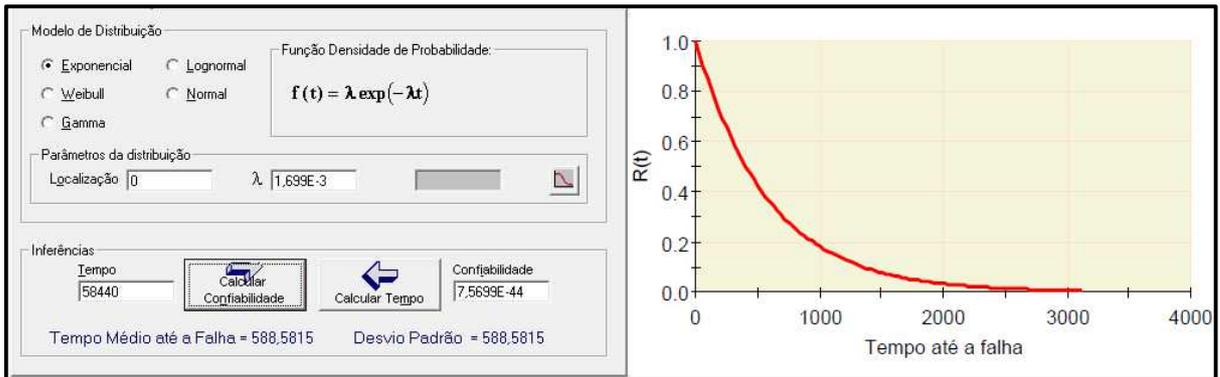
Fonte: Autor (2020)

Dados estatísticos do QP02.

Equipamento (período de análise 58440 h)	Quadro de Distribuição Principal QP02
Código de Localização	J13A**
Autorizações de Trabalho (quantidade)	98
Duração das Autorizações de Trabalho (h)	759,3
Tempo de Equipamento Disponível (h)	57680,7
Taxa de falha λ	1,699E-03
Taxa de reparo μ	1,291E-01
Disponibilidade A	9,870E-01
Indisponibilidade U	1,299E-02
Tempo médio até a falha (h)	588,58
Confiabilidade R(t)	7,5699E-44

Fonte: Autor (2020)

Curva de confiabilidade do QP02



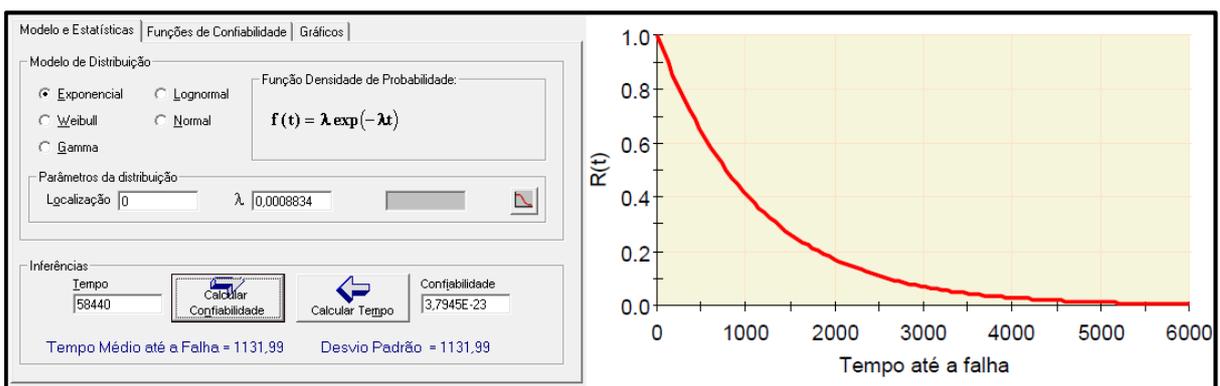
Fonte: Autor (2020)

Dados estatísticos do CS01.

Equipamento (período de análise 58440 h)	Quadro de Distribuição Principal CS01
Código de Localização	J14***
Autorizações de Trabalho (quantidade)	71
Duração das Autorizações de Trabalho (h)	708,2
Tempo de Equipamento Disponível (h)	57731,8
Taxa de falha λ	1,23E-03
Taxa de reparo μ	1,003E-1
Disponibilidade A	9,879E-01
Indisponibilidade U	1,212E-02
Tempo médio até a falha (h)	1131,99
Confiabilidade R(t)	3,7945E-23

Fonte: Autor (2020)

Curva de confiabilidade do CS01



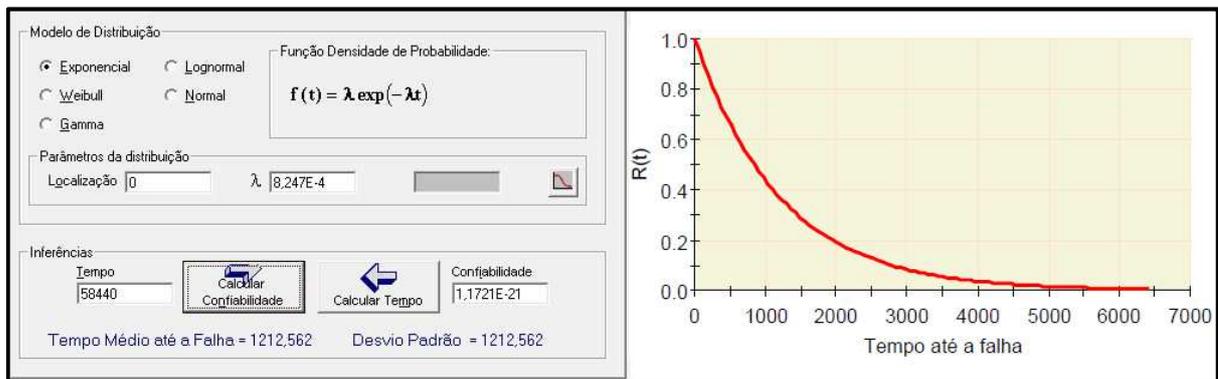
Fonte: Autor (2020)

Dados estatísticos do QQ01.

Equipamento (período de análise 58440 h)	Quadro de Distribuição Principal QQ01
Código de Localização	J20***
Autorizações de Trabalho (quantidade)	48
Duração das Autorizações de Trabalho (h)	238,91
Tempo de Equipamento Disponível (h)	58201,09
Taxa de falha λ	8,247E-04
Taxa de reparo μ	2,009E-01
Disponibilidade A	9,959E-01
Indisponibilidade U	4,088E-03
Tempo médio até a falha (h)	1212,56
Confiabilidade R(t)	1,1721E-21

Fonte: Autor (2020)

Curva de confiabilidade do QQ01



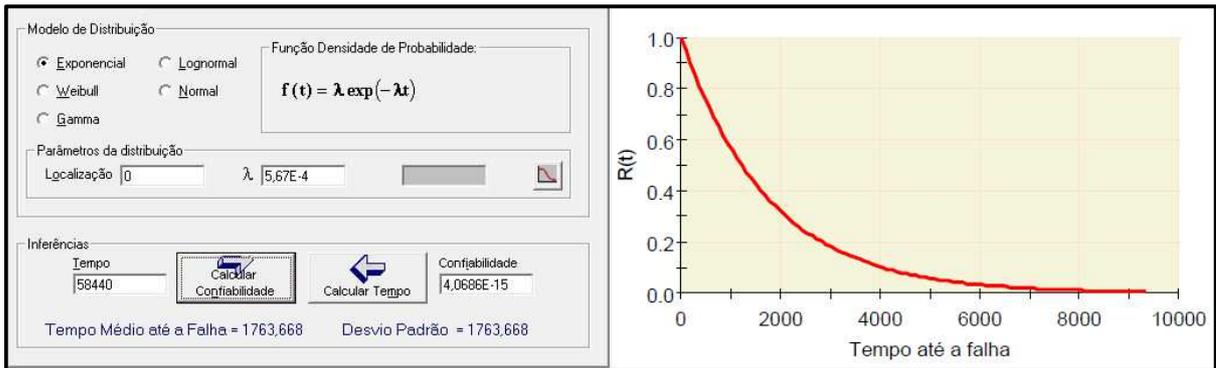
Fonte: Autor (2020)

Dados estatísticos do QQ02.

Equipamento (período de análise 58440 h)	Quadro de Distribuição Principal QQ02
Código de Localização	J21***
Autorizações de Trabalho (quantidade)	33
Duração das Autorizações de Trabalho (h)	235,15
Tempo de Equipamento Disponível (h)	58204,85
Taxa de falha λ	5,670E-04
Taxa de reparo μ	1,403E-01
Disponibilidade A	9,960E-01
Indisponibilidade U	4,024E-03
Tempo médio até a falha (h)	1763,67
Confiabilidade R(t)	4,0686E-15

Fonte: Autor (2020)

Curva de confiabilidade do QQ02



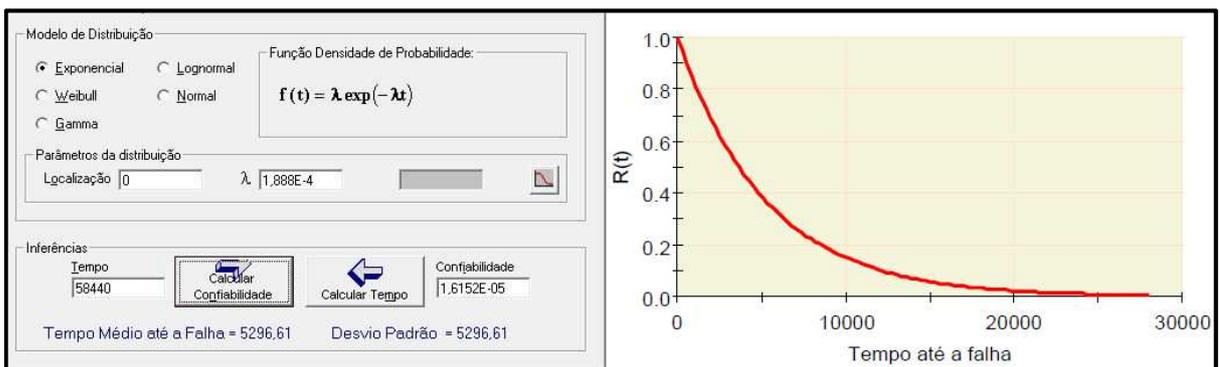
Fonte: Autor (2020)

Dados estatísticos do CQ01.

Equipamento (período de análise 58440 h)	Centro de Controle de Motores CCM CQ1
Código de Localização	J82A11
Autorizações de Trabalho (quantidade)	11
Duração das Autorizações de Trabalho (h)	165,12
Tempo de Equipamento Disponível (h)	58274,88
Taxa de falha λ	1,888E-04
Taxa de reparo μ	6,662E-02
Disponibilidade A	9,972E-01
Indisponibilidade U	2,825E-03
Tempo médio até a falha (h)	5296,61
Confiabilidade R(t)	1,6152E-05

Fonte: Autor (2020)

Curva de confiabilidade do CQ01



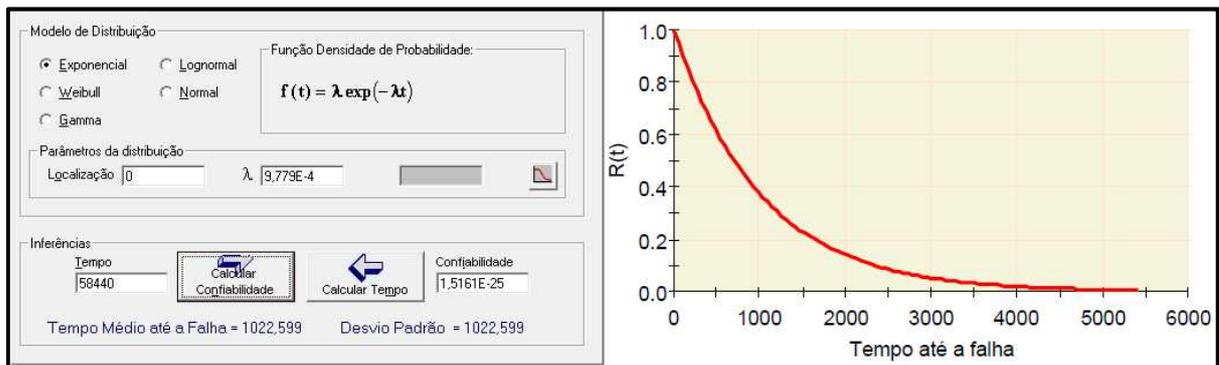
Fonte: Autor (2020)

Dados estatísticos do MB11 a MB13.

Equipamento (período de análise 58440 h)	Motobombas MB11 a MB13
Código de Localização	J82A**
Intervenções (quantidade)	28
Duração estimada das Intervenções (h)	1876
Tempo de Equipamento Disponível (h)	28633,5
Taxa de falha λ	9,779E-04
Taxa de reparo μ	1,493E-02
Disponibilidade A	9,385E-01
Indisponibilidade U	6,149E-02
Tempo médio até a falha (h)	1022,60
Confiabilidade R(t)	1,5161E-25

Fonte: Autor (2020)

Curva de confiabilidade do MB11 a MB13.



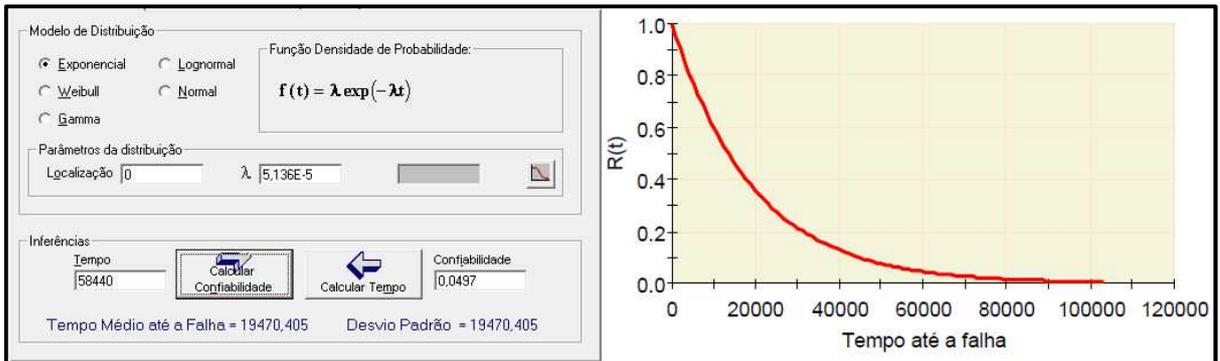
Fonte: Autor (2020)

Dados estatísticos do CQ02.

Equipamento (período de análise 58440 h)	Centro de Controle de Motores CCM CQ2
Código de Localização	J83A11
Autorizações de Trabalho (quantidade)	3
Duração das Autorizações de Trabalho (h)	25,66
Tempo de Equipamento Disponível (h)	58414,34
Taxa de falha λ	5,136E-05
Taxa de reparo μ	1,169E-01
Disponibilidade A	9,996E-01
Indisponibilidade U	4,391E-04
Tempo médio até a falha (h)	19470,40
Confiabilidade R(t)	0,0497

Fonte: Autor (2020)

Curva de confiabilidade do CQ02



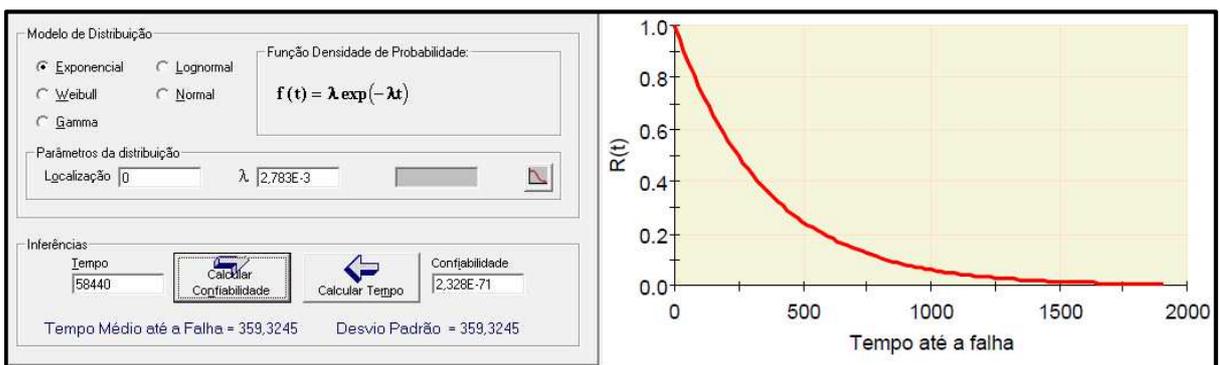
Fonte: Autor (2020)

Dados estatísticos do MB21 a MB23.

Equipamento (período de análise 58440 h)	Motobombas MB21 a MB23
Código de Localização	J83A**
Intervenções (quantidade)	20
Duração estimada das Intervenções (h)	1340
Tempo de Equipamento Disponível (h)	7187,32
Taxa de falha λ	2,783E-03
Taxa de reparo μ	1,493E-02
Disponibilidade A	8,429E-01
Indisponibilidade U	1,571E-01
Tempo médio até a falha (h)	359,32
Confiabilidade R(t)	2,328E-71

Fonte: Autor (2020)

Curva de confiabilidade do MB21 a MB23.



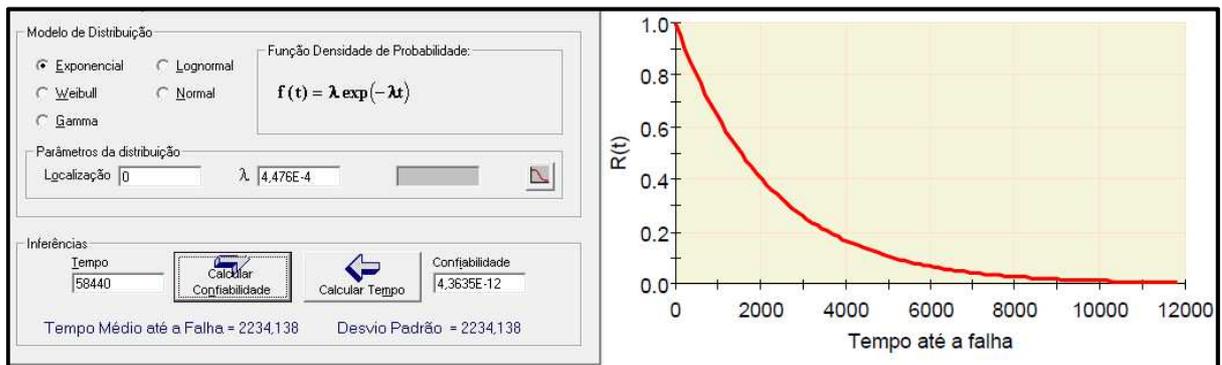
Fonte: Autor (2020)

Dados estatísticos do CQ03.

Equipamento (período de análise 58440 h)	Centro de Controle de Motores CCM CQ3
Código de Localização	J84A11
Autorizações de Trabalho (quantidade)	26
Duração das Autorizações de Trabalho (h)	350,35
Tempo de Equipamento Disponível (h)	58089,65
Taxa de falha λ	4,476E-04
Taxa de reparo μ	7,421E-02
Disponibilidade A	9,940E-01
Indisponibilidade U	5,995E-03
Tempo médio até a falha (h)	2234,13
Confiabilidade R(t)	4,3635E-12

Fonte: Autor (2020)

Curva de confiabilidade do CQ03



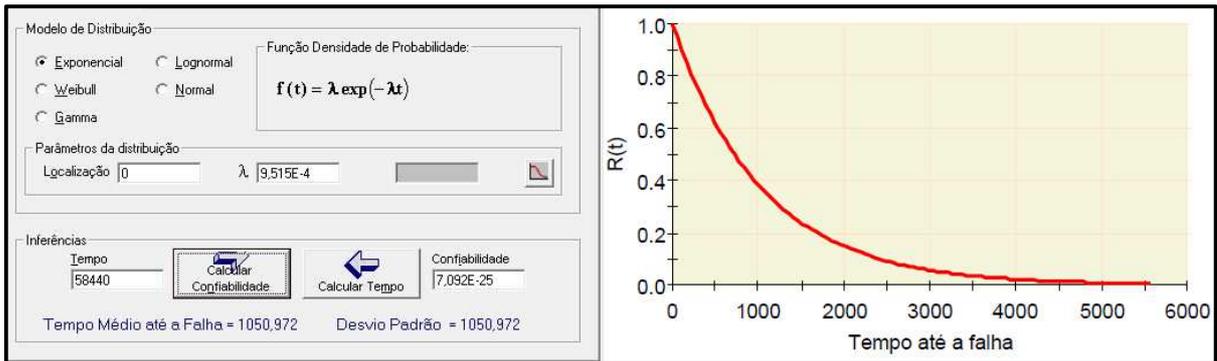
Fonte: Autor (2020)

Dados estatísticos do MB31 a MB38.

Equipamento (período de análise 58440 h)	Motobombas MB31 a MB38
Código de Localização	J84A**
Intervenções (quantidade)	74
Duração estimada das Intervenções (h)	4958
Tempo de Equipamento Disponível (h)	77769
Taxa de falha λ	9,515E-04
Taxa de reparo μ	1,493E-02
Disponibilidade A	9,401E-01
Indisponibilidade U	5,993E-02
Tempo médio até a falha (h)	1050,97
Confiabilidade R(t)	7,092E-25

Fonte: Autor (2020)

Curva de confiabilidade do MB31 a MB38.



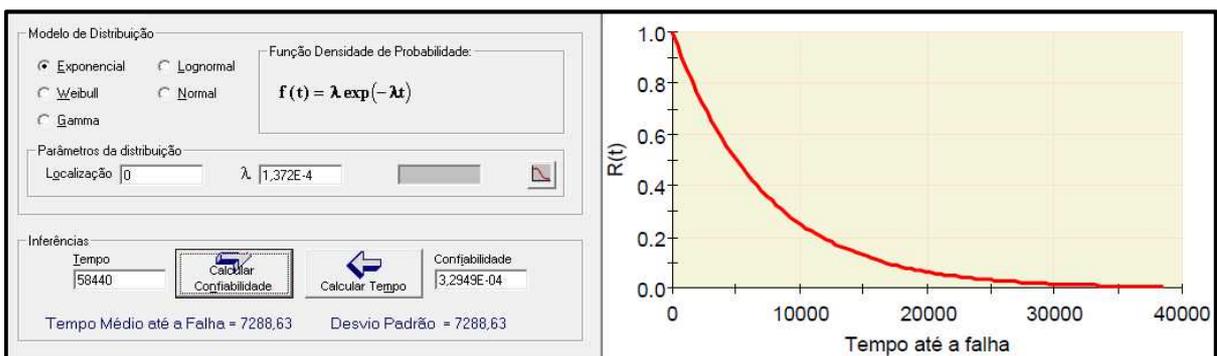
Fonte: Autor (2020)

Dados estatísticos do CQ04.

Equipamento (período de análise 58440 h)	Centro de Controle de Motores CCM CQ4
Código de Localização	J85A11
Autorizações de Trabalho (quantidade)	8
Duração das Autorizações de Trabalho (h)	117,36
Tempo de Equipamento Disponível (h)	58322,64
Taxa de falha λ	1,372E-04
Taxa de reparo μ	6,817E-02
Disponibilidade A	9,980E-01
Indisponibilidade U	2,008E-03
Tempo médio até a falha (h)	7288,63
Confiabilidade R(t)	3,2949E-04

Fonte: Autor (2020)

Curva de confiabilidade do CQ04



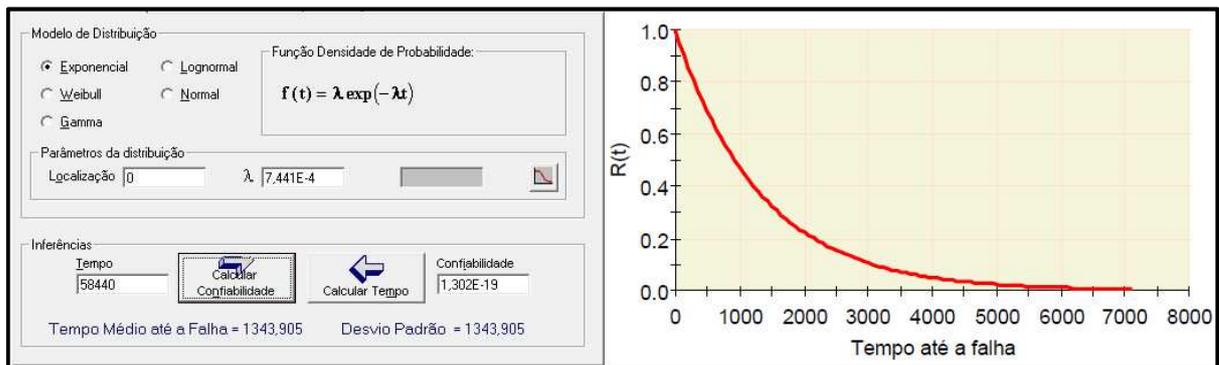
Fonte: Autor (2020)

Dados estatísticos do MB41 a MB43.

Equipamento (período de análise 58440 h)	Motobombas MB41 a MB43
Código de Localização	J85A**
Intervenções (quantidade)	28
Duração estimada das Intervenções (h)	1876
Tempo de Equipamento Disponível (h)	37629,5
Taxa de falha λ	7,441E-04
Taxa de reparo μ	1,493E-02
Disponibilidade A	9,525E-01
Indisponibilidade U	4,749E-02
Tempo médio até a falha (h)	1343,90
Confiabilidade R(t)	1,302E-19

Fonte: Autor (2020)

Curva de confiabilidade do MB41 a MB43.



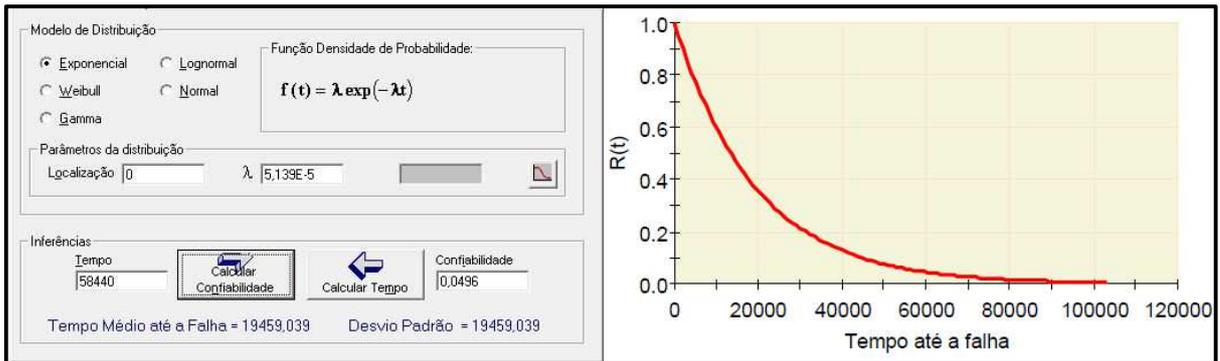
Fonte: Autor (2020)

Dados estatísticos do CQ06.

Equipamento (período de análise 58440 h)	Centro de Controle de Motores CCM CQ6
Código de Localização	K82A11
Autorizações de Trabalho (quantidade)	3
Duração das Autorizações de Trabalho (h)	59,05
Tempo de Equipamento Disponível (h)	58380,95
Taxa de falha λ	5,139E-05
Taxa de reparo μ	5,080E-02
Disponibilidade A	9,990E-01
Indisponibilidade U	1,010E-03
Tempo médio até a falha (h)	19459,04
Confiabilidade R(t)	0,0496

Fonte: Autor (2020)

Curva de confiabilidade do CQ06



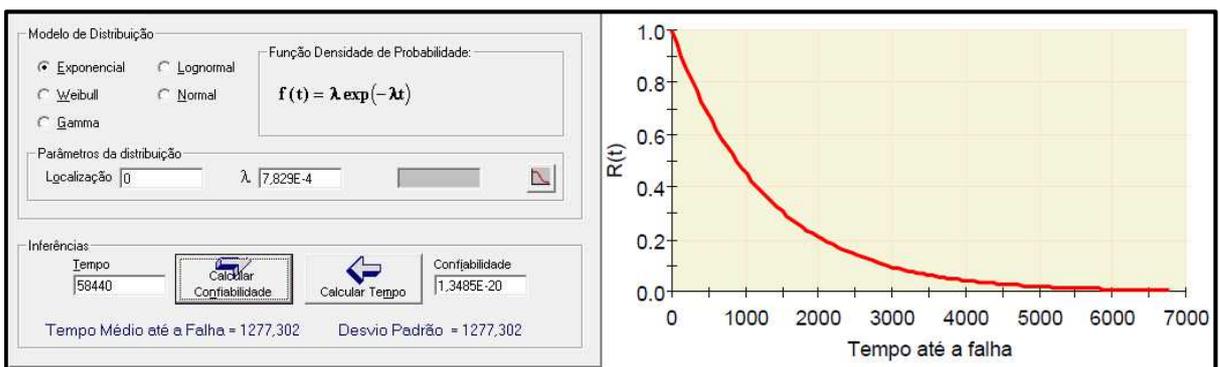
Fonte: Autor (2020)

Dados estatísticos do MB61 a MB63.

Equipamento (período de análise 58440 h)	Motobombas MB61 a MB63
Código de Localização	K82A**
Intervenções (quantidade)	25
Duração estimada das Intervenções (h)	1675
Tempo de Equipamento Disponível (h)	31932
Taxa de falha λ	7,829E-04
Taxa de reparo μ	1,493E-02
Disponibilidade A	9,502E-01
Indisponibilidade U	4,984E-02
Tempo médio até a falha (h)	1277,30
Confiabilidade R(t)	1,3485E-20

Fonte: Autor (2020)

Curva de confiabilidade do MB61 a MB63.



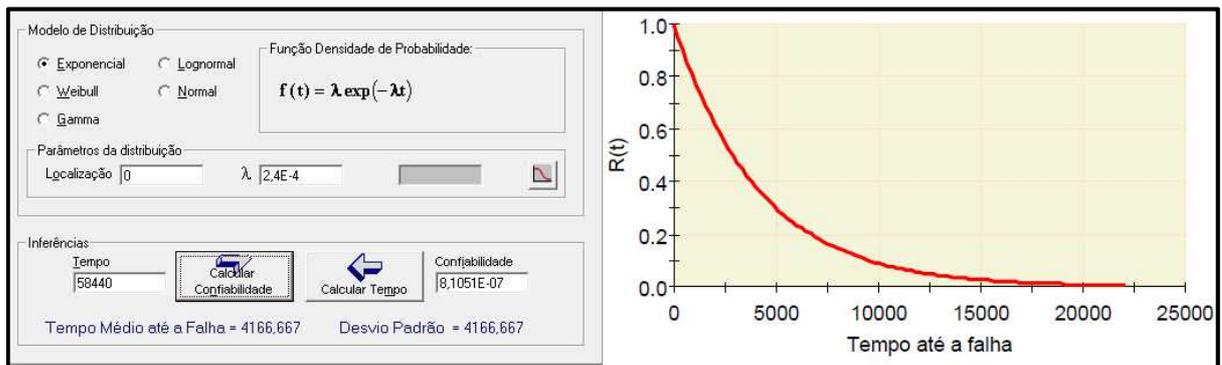
Fonte: Autor (2020)

Dados estatísticos do CQ07.

Equipamento (período de análise 58440 h)	Centro de Controle de Motores CCM CQ7
Código de Localização	K80A11
Autorizações de Trabalho (quantidade)	14
Duração das Autorizações de Trabalho (h)	95,36
Tempo de Equipamento Disponível (h)	58344,64
Taxa de falha λ	2,400E-04
Taxa de reparo μ	1,468E-01
Disponibilidade A	9,984E-01
Indisponibilidade U	1,632E-03
Tempo médio até a falha (h)	4166,66
Confiabilidade R(t)	8,1051E-07

Fonte: Autor (2020)

Curva de confiabilidade do CQ07



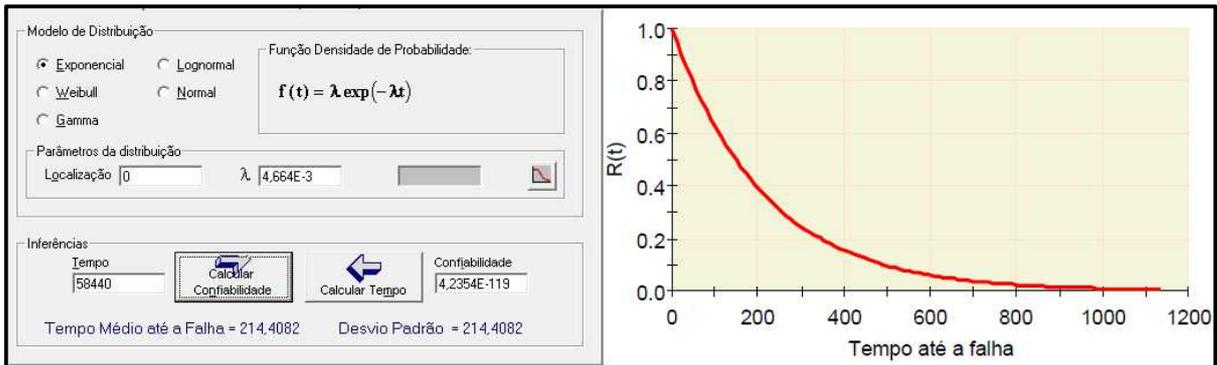
Fonte: Autor (2020)

Dados estatísticos do MB71 a MB73.

Equipamento (período de análise 58440 h)	Motobombas MB71 a MB73
Código de Localização	K80A **
Intervenções (quantidade)	28
Duração estimada das Intervenções (h)	1876
Tempo de Equipamento Disponível (h)	6003,9
Taxa de falha λ	4,664E-03
Taxa de reparo μ	1,493E-02
Disponibilidade A	7,619E-01
Indisponibilidade U	2,381E-01
Tempo médio até a falha (h)	214,40
Confiabilidade R(t)	4,2354E-119

Fonte: Autor (2020)

Curva de confiabilidade do MB71 a MB73.



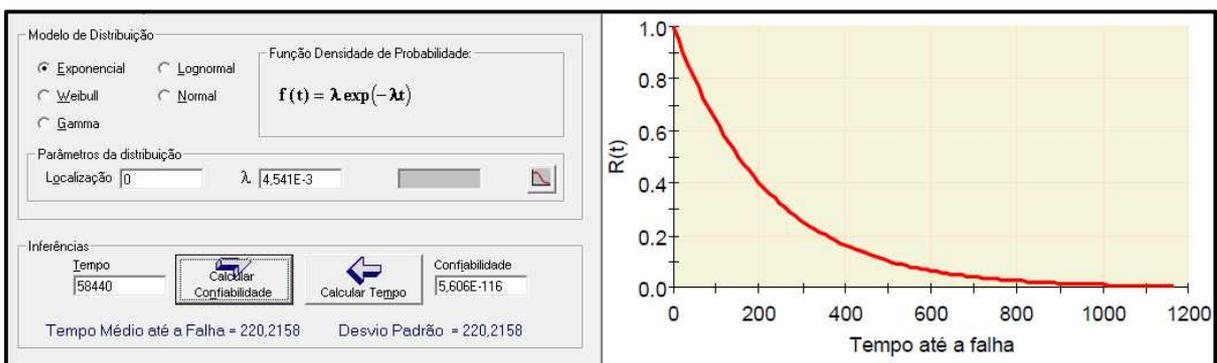
Fonte: Autor (2020)

Dados estatísticos do GD01.

Equipamento (período de análise 58440 h)	Gerador a Diesel de Emergência GD01
Código de Localização	J05**
Autorizações de Trabalho (quantidade)	218
Duração das Autorizações de Trabalho (h)	10434,23
Tempo de Equipamento Disponível (h)	48005,77
Taxa de falha λ	4,541E-03
Taxa de reparo μ	2,089E-02
Disponibilidade A	8,215E-01
Indisponibilidade U	1,785E-01
Tempo médio até a falha (h)	220,21
Confiabilidade R(t)	5,606E-116

Fonte: Autor (2020)

Curva de confiabilidade do GD01



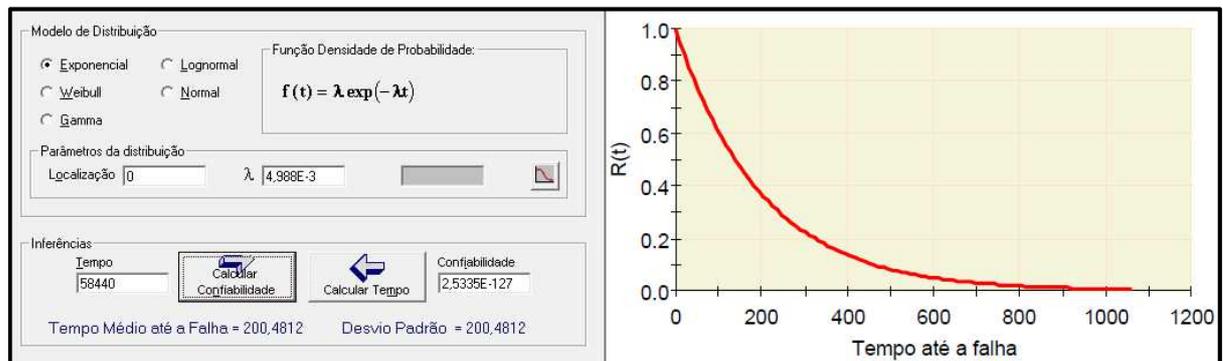
Fonte: Autor (2020)

Dados estatísticos do GD02.

Equipamento (período de análise 58440 h)	Gerador a Diesel de Emergência GD02
Código de Localização	J06**
Autorizações de Trabalho (quantidade)	235
Duração das Autorizações de Trabalho (h)	11329,79
Tempo de Equipamento Disponível (h)	47110,21
Taxa de falha λ	4,988E-03
Taxa de reparo μ	2,074E-02
Disponibilidade A	8,061E-01
Indisponibilidade U	1,939E-01
Tempo médio até a falha (h)	200,48
Confiabilidade R(t)	2,5335E-127

Fonte: Autor (2020)

Curva de confiabilidade do GD02



Fonte: Autor (2020)

9.2 B - Algoritmos

9.2.1 Algoritmo para Determinação do Equipamento Crítico - MC_DEC

```

clear all
clc
format long
rand('state',1)
tic

% Equacionamento para função Objetivo
%
% [QP1      QP2      CS1      GD1      GD2      QQ1
QQ2      CQ11     CQ12     CQ13     CQ21     CQ22     CQ23     CQ31
CQ32     CQ33     CQ34     CQ35     CQ36     CQ37     CQ38     CQ41
CQ42     CQ43     CQ61     CQ62     CQ63     CQ71     CQ72     CQ73
MB11     MB12     MB13     MB21     MB22     MB23     MB31     MB32
MB33     MB34     MB35     MB36     MB37     MB38     MB41     MB42
MB43     MB61     MB62     MB63     MB71     MB72     MB73];
%
% eq=[1      2      3      4      5      6
7      8      9      10     11     12     13     14
15     16     17     18     19     20     21     22
23     24     25     26     27     28     29     30
31     32     33     34     35     36     37     38
39     40     41     42     43     44     45     46
47     48     49     50     51     52     53 ];
Indisponibilidade=[1.545e-2 1.299e-2 1.212e-2 1.785e-1 1.939e-1
4.088e-3 4.024e-3 2.825e-3 2.825e-3 2.825e-3 4.391e-4 4.391e-4
4.391e-4 5.995e-3 5.995e-3 5.995e-3 5.995e-3 5.995e-3 5.995e-3
5.995e-3 5.995e-3 2.008e-3 2.008e-3 2.008e-3 1.010e-3 1.010e-3
1.010e-3 1.632e-3 1.632e-3 1.632e-3 6.149e-2 6.149e-2 6.149e-2
1.571e-1 1.571e-1 1.571e-1 5.993e-2 5.993e-2 5.993e-2 5.993e-2
5.993e-2 5.993e-2 5.993e-2 5.993e-2 4.749e-2 4.749e-2 4.749e-2
4.984e-2 4.984e-2 4.984e-2 2.381e-1 2.381e-1 2.381e-1];

%ENERGIA=QP1+QP2+CS*(GD1+GD2)
%ENERGIA=eq(1)+eq(2)+eq(3)*(eq(4)+eq(5));
%Drenagem Direita=QQ.01 *((CQ11 * MB11 *35)+(CQ13 *MB13
*35)+(CQ22 *MB22 *55))+QQ.02 *((CQ12 *MB12 *35)+(CQ21
*MB21 *55)+(CQ23 *MB23 *55))
%
DD=eq(6)*((eq(8)*eq(31)*35)+(eq(10)*eq(33)*35)+(eq(12)*eq(35)*55))+e
q(7)*((eq(9)*eq(32)*35)+(eq(11)*eq(34)*55)+(eq(13)*eq(36)*55));
%DrenagemEsquerda=QQ.01 *((CQ41 *MB41 *59)+(CQ43 *MB43
*59)+(CQ61 *MB61 *53)+(CQ63 *MB63 *53)+(CQ72 *MB72
*30)]+QQ.02 *[(CQ42 *MB42 *59)+(CQ62 *MB62 *53)+(CQ71
*MB71 *30)+(CQ73 *MB73 *30)]
%
DE=eq(6)*((eq(22)*eq(45)*59)+(eq(24)*eq(47)*59)+(eq(25)*eq(48)*53)+(
eq(27)*eq(50)*53)+(eq(29)*eq(52)*30))+eq(7)*((eq(23)*eq(46)*59)+(eq(
26)*eq(47)*53)+(eq(28)*eq(51)*30)+(eq(30)*eq(53)*30))
%DrenagemLeitoRio=QQ.01 *[(CQ31 * MB31 *55)+(CQ33 *MB33
*55)+(CQ35 *MB35 *55)+(CQ37 *MB37 *55)]+QQ.02 * [(CQ32
*MB32 *55)+(CQ34 *MB34 *55)+(CQ36 *MB36 *55)+(CQ38
*MB38 *55)].

```

```

%
DLR=eq(6)*((eq(14)*eq(37)*55)+(eq(16)*eq(39)*55)+(eq(18)*eq(41)*55)+
(eq(20)*eq(43)*55))+eq(7)*((eq(15)*eq(38)*55)+(eq(17)*eq(40)*55)+(eq
(19)*eq(42)*55)+(eq(21)*eq(44)*55));

NE=53;      %numero de elementos do vetor
TL=100;     %total de linhas
k=0;       %contador da posição do vetor beta e percentual de falha
CHx=1;     %contador da posição do vetor H(x)
ka=0;
bbeta=1;
VE=22.68;   %1/3 da vazão normal de 34(l/s) + 100% = 34+34=22.68
(l/s)
VC=68.68;  %1/3 da vazão normal de 34(l/s) + 100% + Falha junta
expansão = 22.68+46=68.68 (l/s)
VD=22.68;  %1/3 da vazão normal de 34(l/s) + 100% = 34+34=22.68
(l/s)
Vetor_bbeta(1)=1;
Vetor_PercFalha(1)=1;
H=0;       %Função Objetivo 0=satisfeito; 1=insatisfeito
SomaH=0;   %Soma das vezes que os limites operativos foram
violados (calculo BETA)
SomaH2=0;  %Quadrado da soma (calculo BETA)
NI=0;     %Numero de interações
MHx=[];   %Matriz com as funções de transferencia que geraram a
falha
vetor=rand(TL,NE); % Geração randômica das falhas
eq=zeros(1,NE);

while (bbeta>0.1) %Critério de convergência

    for i=1:TL

        for j=1:NE
            if vetor(i,j)<(Indisponibilidade(j))
                eq(j)=0;
            else
                eq(j)=1;
            end
        end

        %Função Objetivo
        ENERGIA=boolean(eq(1)+eq(2)+eq(3)*(eq(4)+eq(5)));

        DD=ENERGIA*eq(6)*((eq(8)*eq(31)*35)+(eq(10)*eq(33)*35)+(eq(12)*eq(35)
)*55))+ENERGIA*eq(7)*((eq(9)*eq(32)*35)+(eq(11)*eq(34)*55)+(eq(13)*e
q(36)*55));

        DE=ENERGIA*eq(6)*((eq(22)*eq(45)*59)+(eq(24)*eq(47)*59)+(eq(25)*eq(4
8)*53)+(eq(27)*eq(50)*53)+(eq(29)*eq(52)*30))+ENERGIA*eq(7)*((eq(23)
)*eq(46)*59)+(eq(26)*eq(47)*53)+(eq(28)*eq(51)*30)+(eq(30)*eq(53)*30)
);

        DLR=ENERGIA*eq(6)*((eq(14)*eq(37)*55)+(eq(16)*eq(39)*55)+(eq(18)*eq(

```

```
41)*55)+(eq(20)*eq(43)*55))+ENERGIA*eq(7)*((eq(15)*eq(38)*55)+(eq(17)
)*eq(40)*55)+(eq(19)*eq(42)*55)+(eq(21)*eq(44)*55));
```

```
%Validação das condições de contorno
```

```
BBDir=DD-VD;
```

```
BBEsq=DE-VE;
```

```
BBLR=DLR-VC;
```

```
if BBEsq>0
```

```
    if BBDir>0
```

```
        if BBLR<0
```

```
            H=1;
```

```
            k=k+1;
```

```
        else
```

```
            H=0;
```

```
        end
```

```
    else
```

```
        if (BBLR+BBDir)<0
```

```
            H=1;
```

```
            k=k+1;
```

```
        else
```

```
            H=0;
```

```
        end
```

```
    end
```

```
else
```

```
    if BBDir>0
```

```
        if (BBEsq+BBLR)<0
```

```
            H=1;
```

```
            k=k+1;
```

```
        else
```

```
            H=0;
```

```
        end
```

```
    else
```

```
        if (BBEsq+BBLR+BBDir)<0
```

```
            H=1;
```

```
            k=k+1;
```

```
        else
```

```
            H=0;
```

```
        end
```

```
    end
```

```
end
```

```
if H==1
```

```
    MHx(CHx,:)=eq(:)';
```

```
    CHx=CHx+1;
```

```
end
```

```
NI=NI+1;
```

```
SomaH=SomaH+H;
```

```
SomaH2=SomaH2+H^2;
```

```
end
```

```
PercFalha=(SomaH/NI);
```

```
if SomaH~=0
```

```
    bheta=sqrt(((NI*SomaH2)/(SomaH*SomaH))-1)/(NI-1)
```

```
%coeficiente de variação
```

```

end
ka=ka+1;
Vetor_bheta(ka)=bheta;
Vetor_PercFalha(ka)=PercFalha*100;

vetor=rand(TL,NE);
end

%Para plotagem do grafico de barras
SV=size(MHx);
SVF=zeros(1,SV(2));

for i=1:SV(1)
    for j=1:SV(2)
        SVF(j)=SVF(j)+MHx(i,j);
    end
end
for i=1:SV(2)
    SVFP(i)=(1-(SVF(i)/SomaH))*100;
end

subplot(3,1,1)
plot(Vetor_bheta(2:end))
subplot(3,1,2)
plot(Vetor_PercFalha(2:end))
TotalFalha=SomaH
Percentual_de_Falha=(TotalFalha/NI)*100
NI
subplot(3,1,3)
bar(SVFP)
toc

```

9.2.2 Algoritmo Sequencial - MC_SEQ

```

clear all
clc
format long
tic
rand('state',1)

% Dados estatísticos dos equipamentos
%
%      [QP1      QP2      CS1      GD1      GD2      QQ1
QQ2      CQ11      CQ12      CQ13      CQ21      CQ22      CQ23      CQ31
CQ32      CQ33      CQ34      CQ35      CQ36      CQ37      CQ38      CQ41
CQ42      CQ43      CQ61      CQ62      CQ63      CQ71      CQ72      CQ73
MB11      MB12      MB13      MB21      MB22      MB23      MB31      MB32
MB33      MB34      MB35      MB36      MB37      MB38      MB41      MB42
MB43      MB61      MB62      MB63      MB71      MB72      MB73];
%
%      eq=[ 1      2      3      4      5      6
7      8      9      10      11      12      13      14
15      16      17      18      19      20      21      22
23      24      25      26      27      28      29      30

```

```

31      32      33      34      35      36      37      38
39      40      41      42      43      44      45      46
47      48      49      50      51      52      53];
Indisponibilidade=[1.545e-2 1.299e-2 1.212e-2 1.785e-1 1.939e-1
4.088e-3 4.024e-3 2.825e-3 2.825e-3 2.825e-3 4.391e-4 4.391e-4
4.391e-4 5.995e-3 5.995e-3 5.995e-3 5.995e-3 5.995e-3 5.995e-3
5.995e-3 5.995e-3 2.008e-3 2.008e-3 2.008e-3 1.010e-3 1.010e-3
1.010e-3 1.632e-3 1.632e-3 1.632e-3 1.632e-3 6.149e-2 6.149e-2 6.149e-2
1.571e-1 1.571e-1 1.571e-1 5.993e-2 5.993e-2 5.993e-2 5.993e-2
5.993e-2 5.993e-2 5.993e-2 5.993e-2 4.749e-2 4.749e-2 4.749e-2
4.984e-2 4.984e-2 4.984e-2 2.381e-1 2.381e-1 2.381e-1];
TXFalha=[2.138e-3 1.699e-3 1.230e-3 4.541e-3 4.988e-3
8.247e-4 5.670e-4 1.888e-4 1.888e-4 1.888e-4 5.136e-5 5.136e-5
5.136e-5 4.476e-4 4.476e-4 4.476e-4 4.476e-4 4.476e-4 4.476e-4
4.476e-4 4.476e-4 1.372e-4 1.372e-4 1.372e-3 5.139e-5 5.139e-5
5.139e-5 2.400e-4 2.400e-4 2.400e-4 9.779e-4 9.779e-4 9.779e-4
2.783e-3 2.783e-3 2.783e-3 9.515e-4 9.515e-4 9.515e-4 9.515e-4
9.515e-4 9.515e-4 9.515e-4 9.515e-4 7.441e-4 7.441e-4 7.441e-4
7.829e-4 7.829e-4 7.829e-4 4.664e-3 4.664e-3 4.664e-3];
TXReparo=[1.362e-1 1.291e-1 1.003e-1 2.089e-2 2.074e-2
2.009e-1 1.403e-1 6.662e-2 6.662e-2 6.662e-2 1.169e-1 1.169e-1
1.169e-1 7.421e-2 7.421e-2 7.421e-2 7.421e-2 7.421e-2 7.421e-2
7.421e-2 7.421e-2 6.817e-2 6.817e-2 6.817e-2 5.080e-2 5.080e-2
5.080e-2 1.468e-1 1.468e-1 1.468e-1 1.493e-2 1.493e-2 1.493e-2
1.493e-2 1.493e-2 1.493e-2 1.493e-2 1.493e-2 1.493e-2 1.493e-2
1.493e-2 1.493e-2 1.493e-2 1.493e-2 1.493e-2 1.493e-2];

% Equacionamento para função Objetivo
%ENERGIA=QP1+QP2+CS*(GD1+GD2)
%ENERGIA=eq(1)+eq(2)+eq(3)*(eq(4)+eq(5));
%Drenagem Direita=QQ.01 *((CQ11 * MB11 *35)+(CQ13 *MB13
*35)+(CQ22 *MB22 *55))+QQ.02 *((CQ12 *MB12 *35)+(CQ21
*MB21 *55)+(CQ23 *MB23 *55))
%
DD=eq(6)*((eq(8)*eq(31)*35)+(eq(10)*eq(33)*35)+(eq(12)*eq(35)*55))+e
q(7)*((eq(9)*eq(32)*35)+(eq(11)*eq(34)*55)+(eq(13)*eq(36)*55));
%DrenagemEsquerda=QQ.01 *((CQ41 *MB41 *59)+(CQ43 *MB43
*59)+(CQ61 *MB61 *53)+(CQ63 *MB63 *53)+(CQ72 *MB72
*30))+QQ.02 *((CQ42 *MB42 *59)+(CQ62 *MB62 *53)+(CQ71
*MB71 *30)+(CQ73 *MB73 *30)]
%
DE=eq(6)*((eq(22)*eq(45)*59)+(eq(24)*eq(47)*59)+(eq(25)*eq(48)*53)+(
eq(27)*eq(50)*53)+(eq(29)*eq(52)*30))+eq(7)*((eq(23)*eq(46)*59)+(eq(
26)*eq(47)*53)+(eq(28)*eq(51)*30)+(eq(30)*eq(53)*30))
%DrenagemLeitoRio=QQ.01 *((CQ31 * MB31 *55)+(CQ33 *MB33
*55)+(CQ35 *MB35 *55)+(CQ37 *MB37 *55))+QQ.02 *((CQ32
*MB32 *55)+(CQ34 *MB34 *55)+(CQ36 *MB36 *55)+(CQ38
*MB38 *55)]];
%
DLR=eq(6)*((eq(14)*eq(37)*55)+(eq(16)*eq(39)*55)+(eq(18)*eq(41)*55)+
(eq(20)*eq(43)*55))+eq(7)*((eq(15)*eq(38)*55)+(eq(17)*eq(40)*55)+(eq
(19)*eq(42)*55)+(eq(21)*eq(44)*55));

Corte=0;

```

```

CDDF=0;

NE=53; %numero de elementos do vetor
k=0;    %contador da posição do vetor beta e percentual de falha em
função do período
bbeta=1;
VE=22.68; %1/3 da vazão normal de 34(l/s) + 100% = (34+34)/3=22.68
(l/s)
VC=68.68; %1/3 da vazão normal de 34(l/s) + 100% + Falha junta
expansão = 22.68+46=68.68 (l/s)
VD=22.68; %1/3 da vazão normal de 34(l/s) + 100% = 22.68 (l/s)
peso=[]; %Vetor Peso do Sistema, contém o peso individual de cada
componente
Vetor_bbeta(1)=1;
Vetor_PercFalha(1)=1;
Vetor_Probabilidade=[]; %Utilizado para definir qual será o proximo
equipamento a mudar de estado
H=[]; %Função Objetivo 0=satisfeito; 1=insatisfeito
TempoHO=0; %Tempo em horas no estado Operando
TempoHF=0; %Tempo em horas no estado em Falha
SomaH=0; %Soma das vezes que os limites operativos foram
violados (calculo BETA)
SomaH2=0; %Quadrado da soma (calculo BETA)

VP=16; %Tempo necessário para encher o poço CQ03

periodo=87600 %definição do período em horas 24h(1 dia) 720h (1
mês) 8760h (1 ano) OBS: Não usar periodo curto para contornar a
falha devido ao tamanho variavel de periodos TempoHO+TempoHF dif
periodo setado

eq=zeros(1, NE);
ME=0; %Quantidade de mudança de estados

while (bbeta>0.1)

    %Carrega primeiro vetor
    VetorInicial=rand(1,NE);
    for i=1:1:NE

        if VetorInicial(i)>Indisponibilidade(i)
            eq(i)=1;
            peso(i)=(TXFalha(i));

        else
            eq(i)=0;
            peso(i)=(TXReparo(i));

        end

    end
    TempoHO=0;
    TempoHF=0;
    corte=0;

```

```

while corte<1    %(TempoHO+TempoHF)<periodo

    % CDF - Função de Densidade Acumulativa do Sistema
    Sigma=sum(peso);    % Sigma do sistema
    CDF=(log(rand))*(-1/Sigma);

    if (TempoHO+TempoHF+CDF)>periodo    % mantém o período
de análise sempre com o mesmo tamanho

        Resto=(TempoHO+TempoHF+CDF-periodo);
        CDF=CDF-Resto;
        corte=1;
    end

    %Função Objetivo
    ENERGIA=boolean(eq(1)+eq(2)+eq(3)*(eq(4)+eq(5)));

    DD=ENERGIA*eq(6)*((eq(8)*eq(31)*35)+(eq(10)*eq(33)*35)+(eq(12)*eq(35)
)*55))+ENERGIA*eq(7)*((eq(9)*eq(32)*35)+(eq(11)*eq(34)*55)+(eq(13)*e
q(36)*55));

    DE=ENERGIA*eq(6)*((eq(22)*eq(45)*59)+(eq(24)*eq(47)*59)+(eq(25)*eq(4
8)*53)+(eq(27)*eq(50)*53)+(eq(29)*eq(52)*30))+ENERGIA*eq(7)*((eq(23)
)*eq(46)*59)+(eq(26)*eq(47)*53)+(eq(28)*eq(51)*30)+(eq(30)*eq(53)*30)
);

    DLR=ENERGIA*eq(6)*((eq(14)*eq(37)*55)+(eq(16)*eq(39)*55)+(eq(18)*eq(
41)*55)+(eq(20)*eq(43)*55))+ENERGIA*eq(7)*((eq(15)*eq(38)*55)+(eq(17)
)*eq(40)*55)+(eq(19)*eq(42)*55)+(eq(21)*eq(44)*55));

    BBesq=DE-VE;    %Volume bombeado margem esquerda
    BBDir=DD-VD;    %Volume bombeado margem direita
    BBLR=DLR-VC;    %Volume bombeado leito do rio

    % Verificação das condições de contorno
    if BBesq>0
        if BBDir>0
            if BBLR<0
                H=1;

            else
                H=0;
            end
        else
            if (BBLR+BBDir)<0
                H=1;

            else
                H=0;
            end
        end
    else
        if BBDir>0
            if (BBesq+BBLR)<0

```

```

        H=1;

        else
            H=0;
        end
    else
        if (BBEsq+BBLR+BBDDir)<0
            H=1;

            else
                H=0;
            end
        end
    end

    end

    if H==1          %em caso de falha
        CDFF=CDFF+CDF; %acumula o tempo da falha

    else            %em caso de sucesso
        if CDFF>VP  %se as falhas superam o volume do
poço
            TempoHF=TempoHF+CDFF;      %soma o tempo em falha
            CDFF=0;                      %zera tempo em falha
        end
        TempoHO=TempoHO+CDF+CDFF;      %acumula tempo em operação
e adiciona o tempo em que a falha não superou o volume do poço
        CDFF=0;                          %zera tempo em falha
    end

    %Definição aleatória da posição do proximo equipamento a
mudar de estado
    Vetor_Probabilidade=cumsum(peso/Sigma);

    Posicao=find(cumsum(Vetor_Probabilidade)>rand,1,'first');

    %Muda o estado do equipamento selecionado e carrega novo
peso
    if eq(Posicao)==1
        eq(Posicao)=0;
        peso(Posicao)=(TXReparo(Posicao));
        ME=ME+1;
    else
        eq(Posicao)=1;
        peso(Posicao)=(TXFalha(Posicao));
        ME=ME+1;
    end
end

k=k+1;
Taxa_de_Falha_periodo=TempoHF/periodo;
SomaH=SomaH+Taxa_de_Falha_periodo;
SomaH2=SomaH2+Taxa_de_Falha_periodo^2;

if k>1

```

```

        bbeta=sqrt(((k*SomaH2)/(SomaH*SomaH))-1)/(k-1))
%coeficiente de variação
    end

    Percentual_de_Falha_total=(SomaH/k)*100
    Vetor_bbeta(k)=bbeta;
    Vetor_PercFalha(k)=Percentual_de_Falha_total;

end

subplot(2,1,1)
plot(Vetor_PercFalha(2:end))
%title('Percentual de falha do sistema')
subplot(2,1,2)
plot(Vetor_bbeta(2:end))
%title('Critério de convergência')

k
ME
toc

```

9.2.3 Algoritmo Sequencial com Iterações Fixa- MC_SEQ_TF

```

clear all
clc
format long
tic
rand('state',1)

% Dados estatísticos dos equipamentos
%
% [QP1      QP2      CS1      GD1      GD2      QQ1
QQ2      CQ11      CQ12      CQ13      CQ21      CQ22      CQ23      CQ31
CQ32      CQ33      CQ34      CQ35      CQ36      CQ37      CQ38      CQ41
CQ42      CQ43      CQ61      CQ62      CQ63      CQ71      CQ72      CQ73
MB11      MB12      MB13      MB21      MB22      MB23      MB31      MB32
MB33      MB34      MB35      MB36      MB37      MB38      MB41      MB42
MB43      MB61      MB62      MB63      MB71      MB72      MB73];
%
% eq=[1      2      3      4      5      6
7      8      9      10      11      12      13      14
15      16      17      18      19      20      21      22
23      24      25      26      27      28      29      30
31      32      33      34      35      36      37      38
39      40      41      42      43      44      45      46
47      48      49      50      51      52      53];
Indisponibilidade=[1.545e-2 1.299e-2 1.212e-2 1.785e-1 1.939e-1
4.088e-3 4.024e-3 2.825e-3 2.825e-3 2.825e-3 4.391e-4 4.391e-4
4.391e-4 5.995e-3 5.995e-3 5.995e-3 5.995e-3 5.995e-3 5.995e-3
5.995e-3 5.995e-3 2.008e-3 2.008e-3 2.008e-3 1.010e-3 1.010e-3
1.010e-3 1.632e-3 1.632e-3 1.632e-3 6.149e-2 6.149e-2 6.149e-2
1.571e-1 1.571e-1 1.571e-1 5.993e-2 5.993e-2 5.993e-2 5.993e-2

```

```

5.993e-2 5.993e-2 5.993e-2 5.993e-2 4.749e-2 4.749e-2 4.749e-2
4.984e-2 4.984e-2 4.984e-2 2.381e-1 2.381e-1 2.381e-1];
    TXFalha=[2.138e-3 1.699e-3 1.230e-3 4.541e-3 4.988e-3
8.247e-4 5.670e-4 1.888e-4 1.888e-4 1.888e-4 5.136e-5 5.136e-5
5.136e-5 4.476e-4 4.476e-4 4.476e-4 4.476e-4 4.476e-4 4.476e-4
4.476e-4 4.476e-4 1.372e-4 1.372e-4 1.372e-3 5.139e-5 5.139e-5
5.139e-5 2.400e-4 2.400e-4 2.400e-4 9.779e-4 9.779e-4 9.779e-4
2.783e-3 2.783e-3 2.783e-3 9.515e-4 9.515e-4 9.515e-4 9.515e-4
9.515e-4 9.515e-4 9.515e-4 9.515e-4 7.441e-4 7.441e-4 7.441e-4
7.829e-4 7.829e-4 7.829e-4 4.664e-3 4.664e-3 4.664e-3];
    TXReparo=[1.362e-1 1.291e-1 1.003e-1 2.089e-2 2.074e-2
2.009e-1 1.403e-1 6.662e-2 6.662e-2 6.662e-2 1.169e-1 1.169e-1
1.169e-1 7.421e-2 7.421e-2 7.421e-2 7.421e-2 7.421e-2 7.421e-2
7.421e-2 7.421e-2 6.817e-2 6.817e-2 6.817e-2 5.080e-2 5.080e-2
5.080e-2 1.468e-1 1.468e-1 1.468e-1 1.493e-2 1.493e-2 1.493e-2
1.493e-2 1.493e-2 1.493e-2 1.493e-2 1.493e-2 1.493e-2 1.493e-2
1.493e-2 1.493e-2 1.493e-2 1.493e-2 1.493e-2 1.493e-2];

% Equacionamento para função Objetivo
%ENERGIA=QP1+QP2+CS*(GD1+GD2)
%ENERGIA=eq(1)+eq(2)+eq(3)*(eq(4)+eq(5));
%Drenagem Direita=QQ.01 *((CQ11 * MB11 *35)+(CQ13 *MB13
*35)+(CQ22 *MB22 *55))+QQ.02 *((CQ12 *MB12 *35)+(CQ21
*MB21 *55)+(CQ23 *MB23 *55))
%
DD=eq(6)*((eq(8)*eq(31)*35)+(eq(10)*eq(33)*35)+(eq(12)*eq(35)*55))+e
q(7)*((eq(9)*eq(32)*35)+(eq(11)*eq(34)*55)+(eq(13)*eq(36)*55));
%DrenagemEsquerda=QQ.01 *((CQ41 *MB41 *59)+(CQ43 *MB43
*59)+(CQ61 *MB61 *53)+(CQ63 *MB63 *53)+(CQ72 *MB72
*30))+QQ.02 *[(CQ42 *MB42 *59)+(CQ62 *MB62 *53)+(CQ71
*MB71 *30)+(CQ73 *MB73 *30)]
%
DE=eq(6)*((eq(22)*eq(45)*59)+(eq(24)*eq(47)*59)+(eq(25)*eq(48)*53)+(
eq(27)*eq(50)*53)+(eq(29)*eq(52)*30))+eq(7)*((eq(23)*eq(46)*59)+(eq(
26)*eq(47)*53)+(eq(28)*eq(51)*30)+(eq(30)*eq(53)*30))
%DrenagemLeitoRio=QQ.01 *[(CQ31 * MB31 *55)+(CQ33 *MB33
*55)+(CQ35 *MB35 *55)+(CQ37 *MB37 *55)]+QQ.02 * [(CQ32
*MB32 *55)+(CQ34 *MB34 *55)+(CQ36 *MB36 *55)+(CQ38
*MB38 *55)]}.
%
DLR=eq(6)*((eq(14)*eq(37)*55)+(eq(16)*eq(39)*55)+(eq(18)*eq(41)*55)+
(eq(20)*eq(43)*55))+eq(7)*((eq(15)*eq(38)*55)+(eq(17)*eq(40)*55)+(eq
(19)*eq(42)*55)+(eq(21)*eq(44)*55));

Corte=0;
CDFF=0;

NE=53; %numero de elementos do vetor
k=0; %contador da posição do vetor beta e percentual de falha em
função do período

VE=22.68; %1/3 da vazão normal de 34,03(l/s) + 100% =
(34,03+34,03)/3=22,68 (l/s)

```

```

VC=68.68;    %1/3 da vazão normal de 34,03(l/s) + 100% + Falha junta
expansão = 22,68+46=68,68 (l/s)
VD=22.68;    %1/3 da vazão normal de 34,03(l/s) + 100% = 22,68 (l/s)
peso=[];     %Vetor Peso do Sistema, contém o peso individual de cada
componente

Vetor_PercFalha(1)=1;
Vetor_Probabilidade=[]; %Utilizado para definir qual será o proximo
equipamento a mudar de estado
H=[];        %Função Objetivo 0=satisfeito; 1=insatisfeito
TempoHO=0;   %Tempo em horas no estado Operando
TempoHF=0;   %Tempo em horas no estado em Falha
SomaH=0;     %Soma das vezes que os limites operativos foram
violados (calculado BETA)

VP=12.24;    %Tempo necessário para encher o poço CQ03

periodo=87600 %definição do período em horas 24h(1 dia) 720h (1
mês) 8760h (1 ano) OBS: Não usar periodo curto para contornar a
falha devido ao tamanho variavel de periodos TempoHO+TempoHF dif
periodo setado

%Pesos
MI=1.0;
LAM=1.0;

eq=zeros(1, NE);
ME=0; %Quantidade de mudança de estados

while (k<100)

    %Carrega primeiro vetor
    VetorInicial=rand(1,NE);
    for i=1:1:NE

        if VetorInicial(i)>Indisponibilidade(i)
            eq(i)=1;
            peso(i)=(LAM*TXFalha(i));

        else
            eq(i)=0;
            peso(i)=(MI*TXReparo(i));

        end
    end
    TempoHO=0;
    TempoHF=0;
    corte=0;

    while corte<1    %(TempoHO+TempoHF)<periodo

        % CDF - Função de Densidade Acumulativa do Sistema
        Sigma=sum(peso); % Sigma do sistema
        CDF=(log(rand))*(-1/Sigma);
    end
end

```

```

        if (TempoHO+TempoHF+CDF)>periodo      % mantém o período
de análise sempre com o mesmo tamanho

        Resto=(TempoHO+TempoHF+CDF-periodo);
        CDF=CDF-Resto;
        corte=1;
        end

        %Função Objetivo
        ENERGIA=boolean(eq(1)+eq(2)+eq(3)*(eq(4)+eq(5)));

        DD=ENERGIA*eq(6)*((eq(8)*eq(31)*35)+(eq(10)*eq(33)*35)+(eq(12)*eq(35)
)*55))+ENERGIA*eq(7)*((eq(9)*eq(32)*35)+(eq(11)*eq(34)*55)+(eq(13)*e
q(36)*55));

        DE=ENERGIA*eq(6)*((eq(22)*eq(45)*59)+(eq(24)*eq(47)*59)+(eq(25)*eq(4
8)*53)+(eq(27)*eq(50)*53)+(eq(29)*eq(52)*30))+ENERGIA*eq(7)*((eq(23)
)*eq(46)*59)+(eq(26)*eq(47)*53)+(eq(28)*eq(51)*30)+(eq(30)*eq(53)*30
);

        DLR=ENERGIA*eq(6)*((eq(14)*eq(37)*55)+(eq(16)*eq(39)*55)+(eq(18)*eq(
41)*55)+(eq(20)*eq(43)*55))+ENERGIA*eq(7)*((eq(15)*eq(38)*55)+(eq(17)
)*eq(40)*55)+(eq(19)*eq(42)*55)+(eq(21)*eq(44)*55));

        BBesq=DE-VE; %Volume bombeado margem esquerda
        BBDir=DD-VD; %Volume bombeado margem direita
        BBLR=DLR-VC; %Volume bombeado leito do rio

        % Verificação das condições de contorno
        if BBesq>0
            if BBDir>0
                if BBLR<0
                    H=1;

                else
                    H=0;
                end
            else
                if (BBLR+BBDir)<0
                    H=1;

                else
                    H=0;
                end
            end
        else
            if BBDir>0
                if (BBesq+BBLR)<0
                    H=1;

                else
                    H=0;
                end
            else

```

```

        if (BBEsq+BBLR+BBDir)<0
            H=1;

        else
            H=0;
        end
    end
end

if H==1          %em caso de falha
    CDFF=CDFF+CDF; %acumula o tempo da falha

else            %em caso de sucesso
    if CDFF>VP  %se as falhas superam o volume do
poço
        TempoHF=TempoHF+CDFF;      %soma o tempo em falha
        CDFF=0;                    %zera tempo em falha
    end
    TempoHO=TempoHO+CDF+CDFF;      %acumula tempo em operação
e adiciona o tempo em que a falha não superou o volume do poço
    CDFF=0;                          %zera tempo em falha
    end

    %Definição aleatória da posição do proximo equipamento a
mudar de estado
    Vetor_Probabilidade=cumsum(peso/Sigma);

Posicao=find(cumsum(Vetor_Probabilidade)>rand,1,'first');

%Muda o estado do equipamento selecionado e carrega novo
peso
    if eq(Posicao)==1
        eq(Posicao)=0;
        peso(Posicao)=(MI*TXReparo(Posicao));
        ME=ME+1;
    else
        eq(Posicao)=1;
        peso(Posicao)=(LAM*TXFalha(Posicao));
        ME=ME+1;
    end
end

k=k+1;
Taxa_de_Falha_periodo=TempoHF/periodo;
SomaH=SomaH+Taxa_de_Falha_periodo;

Percentual_de_Falha_total=(SomaH/k)*100

Vetor_PercFalha(k)=Percentual_de_Falha_total;

end

plot(Vetor_PercFalha(2:end))

```

k
ME
toc

9.2.4 Algoritmo sequencial para quatro QQ - MC_DEC_4QQ

```
clear all
clc
format long
tic
rand('state',1)

% Dados estatísticos dos equipamentos
%
%      [QP1      QP2      CS1      GD1      GD2      QQ1
QQ2      CQ11      CQ12      CQ13      CQ21      CQ22      CQ23      CQ31
CQ32      CQ33      CQ34      CQ35      CQ36      CQ37      CQ38      CQ41
CQ42      CQ43      CQ61      CQ62      CQ63      CQ71      CQ72      CQ73
MB11      MB12      MB13      MB21      MB22      MB23      MB31      MB32
MB33      MB34      MB35      MB36      MB37      MB38      MB41      MB42
MB43      MB61      MB62      MB63      MB71      MB72      MB73      QQ11
QQ21]];
%
%      eq=[1      2      3      4      5      6
7      8      9      10      11      12      13      14
15      16      17      18      19      20      21      22
23      24      25      26      27      28      29      30
31      32      33      34      35      36      37      38
39      40      41      42      43      44      45      46
47      48      49      50      51      52      53      54
55];
Indisponibilidade=[1.545e-2 1.299e-2 1.212e-2 1.785e-1 1.939e-1
4.088e-3 4.024e-3 2.825e-3 2.825e-3 2.825e-3 4.391e-4 4.391e-4
4.391e-4 5.995e-3 5.995e-3 5.995e-3 5.995e-3 5.995e-3 5.995e-3
5.995e-3 5.995e-3 2.008e-3 2.008e-3 2.008e-3 1.010e-3 1.010e-3
1.010e-3 1.632e-3 1.632e-3 1.632e-3 6.149e-2 6.149e-2 6.149e-2
1.571e-1 1.571e-1 1.571e-1 5.993e-2 5.993e-2 5.993e-2 5.993e-2
5.993e-2 5.993e-2 5.993e-2 5.993e-2 4.749e-2 4.749e-2 4.749e-2
4.984e-2 4.984e-2 4.984e-2 2.381e-1 2.381e-1 2.381e-1 4.088e-3
4.024e-3];
TXFalha=[2.138e-3 1.699e-3 1.230e-3 4.541e-3 4.988e-3
8.247e-4 5.670e-4 1.888e-4 1.888e-4 1.888e-4 5.136e-5 5.136e-5
5.136e-5 4.476e-4 4.476e-4 4.476e-4 4.476e-4 4.476e-4 4.476e-4
4.476e-4 4.476e-4 1.372e-4 1.372e-4 1.372e-3 5.139e-5 5.139e-5
5.139e-5 2.400e-4 2.400e-4 2.400e-4 9.779e-4 9.779e-4 9.779e-4
2.783e-3 2.783e-3 2.783e-3 9.515e-4 9.515e-4 9.515e-4 9.515e-4
9.515e-4 9.515e-4 9.515e-4 9.515e-4 7.441e-4 7.441e-4 7.441e-4
7.829e-4 7.829e-4 7.829e-4 4.664e-3 4.664e-3 4.664e-3 8.247e-4
5.670e-4];
TXReparo=[1.362e-1 1.291e-1 1.003e-1 2.089e-2 2.074e-2
2.009e-1 1.403e-1 6.662e-2 6.662e-2 6.662e-2 1.169e-1 1.169e-1
1.169e-1 7.421e-2 7.421e-2 7.421e-2 7.421e-2 7.421e-2 7.421e-2
```

```

7.421e-2 7.421e-2 6.817e-2 6.817e-2 6.817e-2 5.080e-2 5.080e-2
5.080e-2 1.468e-1 1.468e-1 1.468e-1 1.493e-2 1.493e-2 1.493e-2
1.493e-2 1.493e-2 1.493e-2 1.493e-2 1.493e-2 1.493e-2 1.493e-2
1.493e-2 1.493e-2 1.493e-2 1.493e-2 1.493e-2 1.493e-2 1.493e-2
1.493e-2 1.493e-2 1.493e-2 1.493e-2 1.493e-2 1.493e-2 2.009e-1
1.403e-1];

```

```
% Equacionamento para função Objetivo
```

```
%ENERGIA=QP1+QP2+CS*(GD1+GD2);
```

```
%ENERGIA=eq(1)+eq(2)+eq(3)*(eq(4)+eq(5));
```

```
%Drenagem Direita = QQ01*((CQ11 * B11 * 35)+(CQ22 * B22
*55))+QQ01.1*CQ12 *B12 *35+QQ02 * ((CQ13 * B13 * 35)+(CQ21 * B21
*55))+QQ02.1*CQ23 * B23 *55;
```

```
%
```

```
DD=eq(6)*((eq(8)*eq(31)*35)+(eq(12)*eq(35)*55))+eq(54)*eq(9)*eq(32)*
35+eq(7)*((eq(10)*eq(33)*35)+(eq(11)*eq(34)*55))+eq(55)*eq(13)*eq(36
)*55;
```

```
%DrenagemEsquerda=QQ01 *((CQ41 * B41 * 59)+(CQ61 * B61 * 53))+QQ02
*((CQ42 * B42 * 59)+(CQ71* B71*30))+QQ01.1*((CQ43 * B43
*59)+(CQ63 * B63 * 53)+(CQ72 * B72 * 30))+QQ02.1*((CQ62 * B62 *
53)+(CQ73 * B73 * 30))
```

```
%
```

```
DE=eq(6)*((eq(22)*eq(45)*59)+(eq(25)*eq(48)*53))+eq(7)*((eq(23)*eq(4
6)*59)+(eq(28)*eq(51)*30))+eq(54)*((eq(24)*eq(47)*59)+(eq(27)*eq(50)
*53)+(eq(29)*eq(52)*30))+eq(55)*((eq(26)*eq(49)*53)+(eq(30)*eq(53)*3
0));
```

```
%DrenagemLeitoRio=QQ01 * ((CQ31 * B31 * 55)+(CQ35 * B35 * 55)) +QQ02
*((CQ32 * B32 * 55)+(CQ36 * B36 * 55))+QQ01.1*((CQ33 * B33 * 55)
+(CQ37 * B37 * 55))+QQ02.1*((CQ34 * B34 * 55) + (CQ38 * B38 * 55))
```

```
%
```

```
DLR=eq(6)*((eq(14)*eq(37)*55)+(eq(18)*eq(41)*55))+eq(7)*((eq(15)*eq(
38)*55)+(eq(19)*eq(42)*55))+eq(54)*((eq(16)*eq(39)*55)+(eq(20)*eq(43
)*55))+eq(55)*((eq(17)*eq(40)*55)+(eq(21)*eq(44)*55));
```

```
Corte=0;
```

```
NE=55; %numero de elementos do vetor
```

```
k=0; %contador da posição do vetor beta e percentual de falha em
função do período
```

```
bbeta=1;
```

```
VE=22.68; %1/3 da vazão normal de (34(l/s) + 100%)/3 =
(34+34)/3=22.68 (l/s)
```

```
VC=68.68; %1/3 da vazão normal de (34(l/s) + 100%)/3 + Falha junta
expansão = 23+46=68.68 (l/s)
```

```
VD=22.68; %1/3 da vazão normal de (34(l/s) + 100%)/3 =
(34+34)/3=22.68 (l/s)
```

```
peso=[]; %Vetor Peso do Sistema, contém o peso individual de cada
componente
```

```
Vetor_bbeta(1)=1;
```

```
Vetor_PercFalha(1)=1;
```

```
Vetor_Probabilidade=[]; %Utilizado para definir qual será o proximo
equipamento a mudar de estado
```

```
H=[]; %Função Objetivo 0=satisfeito; 1=insatisfeito
```

```
TempoHO=0; %Tempo em horas no estado Operando
```

```
TempoHF=0; %Tempo em horas no estado em Falha
```

```

SomaH=0;      %Soma das vezes que os limites operativos foram
violados (calculado BETA)
SomaH2=0;     %Quadrado da soma (calculado BETA)

VP=12.3;     %Tempo necessário para encher o poço CQ03

periodo=87600 %definição do período em horas 24h(1 dia) 720h (1
mês) 8760h (1 ano) OBS: Não usar periodo curto para contornar a
falha devido ao tamanho variavel de periodos TempoHO+TempoHF dif
periodo setado

eq=zeros(1, NE);
ME=0; %Quantidade de mudança de estados

while (bbeta>0.1)

    %Carrega primeiro vetor
    VetorInicial=rand(1,NE);
    for i=1:1:NE

        if VetorInicial(i)>Indisponibilidade(i)
            eq(i)=1;
            peso(i)=(TXFalha(i));

        else
            eq(i)=0;
            peso(i)=(TXReparo(i));

        end
    end
    TempoHO=0;
    TempoHF=0;
    corte=0;

    while corte<1    %(TempoHO+TempoHF)<periodo

        % CDF - Função de Densidade Acumulativa do Sistema
        Sigma=sum(peso); % Sigma do sistema
        CDF=(log(rand))*(-1/Sigma);

        if (TempoHO+TempoHF+CDF)>periodo    % mantém o período
de análise sempre com o mesmo tamanho

            Resto=(TempoHO+TempoHF+CDF-periodo);
            CDF=CDF-Resto;
            corte=1;
        end

        %Função Objetivo
        ENERGIA=boolean(eq(1)+eq(2)+eq(3)*(eq(4)+eq(5)));

        DD=ENERGIA*eq(6)*((eq(8)*eq(31)*35)+(eq(12)*eq(35)*55))+ENERGIA*eq(5
4)*eq(9)*eq(32)*35+ENERGIA*eq(7)*((eq(10)*eq(33)*35)+(eq(11)*eq(34)*
55))+ENERGIA*eq(55)*eq(13)*eq(36)*55;

```

```
DE=ENERGIA*eq(6)*((eq(22)*eq(45)*59)+(eq(25)*eq(48)*53))+ENERGIA*eq(
7)*((eq(23)*eq(46)*59)+(eq(28)*eq(51)*30))+ENERGIA*eq(54)*((eq(24)*e
q(47)*59)+(eq(27)*eq(50)*53)+(eq(29)*eq(52)*30))+ENERGIA*eq(55)*((eq
(26)*eq(49)*53)+(eq(30)*eq(53)*30));
```

```
DLR=ENERGIA*eq(6)*((eq(14)*eq(37)*55)+(eq(18)*eq(41)*55))+ENERGIA*eq
(7)*((eq(15)*eq(38)*55)+(eq(19)*eq(42)*55))+ENERGIA*eq(54)*((eq(16)*
eq(39)*55)+(eq(20)*eq(43)*55))+ENERGIA*eq(55)*((eq(17)*eq(40)*55)+(e
q(21)*eq(44)*55));
```

```
BBEsq=DE-VE; %Volume bombeado margem esquerda
BBDir=DD-VD; %Volume bombeado margem direita
BBLR=DLR-VC; %Volume bombeado leito do rio
```

```
% Verificação das condições de contorno
```

```
if BBEsq>0
```

```
    if BBDir>0
```

```
        if BBLR<0
```

```
            H=1;
```

```
        else
```

```
            H=0;
```

```
        end
```

```
    else
```

```
        if (BBLR+BBDir)<0
```

```
            H=1;
```

```
        else
```

```
            H=0;
```

```
        end
```

```
    end
```

```
else
```

```
    if BBDir>0
```

```
        if (BBEsq+BBLR)<0
```

```
            H=1;
```

```
        else
```

```
            H=0;
```

```
        end
```

```
    else
```

```
        if (BBEsq+BBLR+BBDir)<0
```

```
            H=1;
```

```
        else
```

```
            H=0;
```

```
        end
```

```
    end
```

```
end
```

```
if H==1
```

```
    %em caso de falha
```

```
    CDFE=CDFE+CDF; %acumula o tempo da falha
```

```
else
```

```
    %em caso de sucesso
```

```

                                if CDFFF>VP      %se as falhas superam o volume do
poço
                                TempoHF=TempoHF+CDFFF;      %soma o tempo em falha
                                CDFFF=0;                  %zera tempo em falha
                                end
                                TempoHO=TempoHO+CDF+CDFFF;      %acumula tempo em operação
e adiciona o tempo em que a falha não superou o volume do poço
                                CDFFF=0;                  %zera tempo em falha
                                end

                                %Definição aleatória da posição do proximo equipamento a
mudar de estado
                                Vetor_Probabilidade=cumsum(peso/Sigma);

Posicao=find(cumsum(Vetor_Probabilidade)>rand,1,'first');

                                %Muda o estado do equipamento selecionado e carrega novo
peso
                                if eq(Posicao)==1
                                    eq(Posicao)=0;
                                    peso(Posicao)=(TXReparo(Posicao));
                                    ME=ME+1;
                                else
                                    eq(Posicao)=1;
                                    peso(Posicao)=(TXFalha(Posicao));
                                    ME=ME+1;
                                end
                                end

                                k=k+1;
                                Taxa_de_Falha_periodo=TempoHF/(TempoHO+TempoHF);
                                SomaH=SomaH+Taxa_de_Falha_periodo;
                                SomaH2=SomaH2+Taxa_de_Falha_periodo^2;

                                if k>1
                                    bbeta=sqrt(((k*SomaH2)/(SomaH*SomaH))-1)/(k-1)
%coeficiente de variação
                                end

                                Percentual_de_Falha_total=(SomaH/k)*100
                                Vetor_bbeta(k)=bbeta;
                                Vetor_PercFalha(k)=(SomaH/k)*100;

                                end

                                subplot(2,1,1)
                                plot(Vetor_PercFalha(2:end))
                                subplot(2,1,2)
                                plot(Vetor_bbeta(2:end))

                                k
                                ME
                                toc

```