



GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO - GSE

METODOLOGIA DE ANÁLISE DE FALHAS E CAUSA RAIZ APLICADA A UM DISJUNTOR DE ALTA TENSÃO

**MARIO AUGUSTO CAETANO DOS SANTOS(1);CRHISTIAN CARRERAS RÍOS(2);JEFERSON TOYAMA(3);JOSE WAGNER BRAIDOTTI JUNIOR(4);FELIPE RAMOS BRAIDOTTI(5);JULIA PATRICIA DA ROSA BAGGIO(6)
ITAIPU BINACIONAL(1,2,3);BRAIDOTTI ENGENHARIA(4,5);UNIOESTE CAMPUS FOZ DO IGUAÇU(6)**

RESUMO

Este trabalho apresenta a aplicação da metodologia de Análise de Falhas e Causa Raiz em um disjuntor de alta tensão de 245 kV, com mecanismo de operação pneumático, presente na Subestação Margem Direita da Itaipu Binacional. Após identificar-se a necessidade de melhorar a disponibilidade deste ativo, seguiu-se com aplicação de metodologia através das etapas de brainstorming, Ishikawa, definição de causa raiz pela técnica dos Porquês e elaboração de plano de ação (5W2H). Definiu-se também os indicadores (KPI's) de indisponibilidade forçada para avaliar a efetividade do plano de ação. Os resultados estão sendo monitorados para confirmar a efetividade da metodologia.

PALAVRAS-CHAVE

Disjuntor, Análise de Falha, Causa Raiz, Disponibilidade, KPI.

1.0 INTRODUÇÃO

Os disjuntores de alta tensão são, segundo FRONTIN (1), equipamentos fundamentais em qualquer subestação do sistema elétrico de potência, pois garantem a exequibilidade de manobras e, antes de tudo, a interrupção de correntes de curto-circuito. Falhas de disjuntores podem ter consequências severas, sejam no âmbito econômico, ambiental e de segurança das pessoas, justificando a necessidade de um acompanhamento de desempenho e manutenção eficaz. No entanto, conforme ITO (2), ao mesmo tempo em que a demanda do sistema elétrico aumenta e com ela a exigência de maior disponibilidade, tem-se o envelhecimento dos ativos, os quais por vezes seguem operando além de sua vida útil regulatória.

Neste contexto desafiador, é fundamental que as gerências de manutenção das concessionárias de energia elétrica adotem estratégias bem definidas e assertivas para manter a operação dos ativos com um nível adequado de disponibilidade e a um custo compatível com as receitas auferidas, promovendo inclusive o adiamento ou planejamento de longo prazo para investimentos vultuosos na substituição destes ativos.

Na Subestação Margem Direita (SEMD) da Central Hidrelétrica de Itaipu (ITAIPU) existem vários modelos de disjuntores de alta tensão em operação, destacando-se o modelo G (245 kV) com acionamento pneumático e extinção a gás hexafluoreto de enxofre (SF₆), conforme apresentado na Figura 1.



FIGURA 1 – Disjuntor modelo G, instalado na SEMD

O disjuntor modelo G é composto por três sistemas:

- Parte ativa, composta por coluna isolante e câmaras de extinção;
- Mecanismo de acionamento pneumático, tendo como principal elemento a eletroválvula de comando;
- Estação de ar comprimido, composta por compressor, reservatório e painel de controle.

A eletroválvula de comando tem por objetivo receber os comandos de abertura e fechamento, advindos dos circuitos de proteção e controle da subestação, convertendo-os em comandos pneumáticos direcionados ao pistão atuador principal do disjuntor, cumprindo uma função de válvula piloto (ver Figura 2).

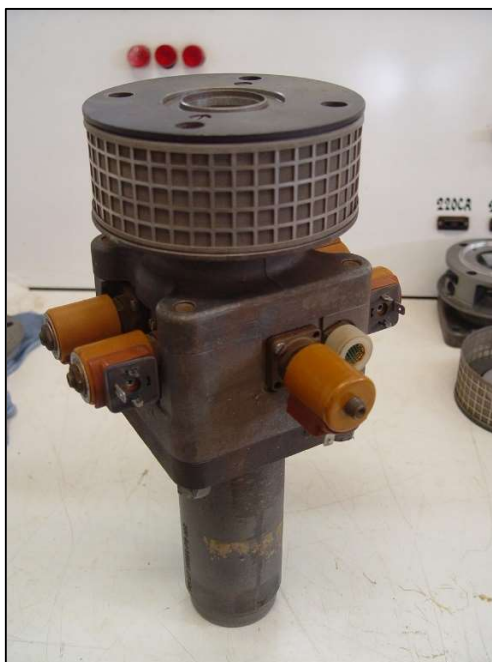


FIGURA 2 – Eletroválvula disjuntor modelo G

Este disjuntor, com fabricação no início da década de 80, apesar de sua forma construtiva robusta, vem apresentando um índice de falhas e defeitos crescentes nos últimos anos (ver Figura 3), acarretando maior dispêndio com intervenções e redução da confiabilidade do sistema de transmissão de energia elétrica.

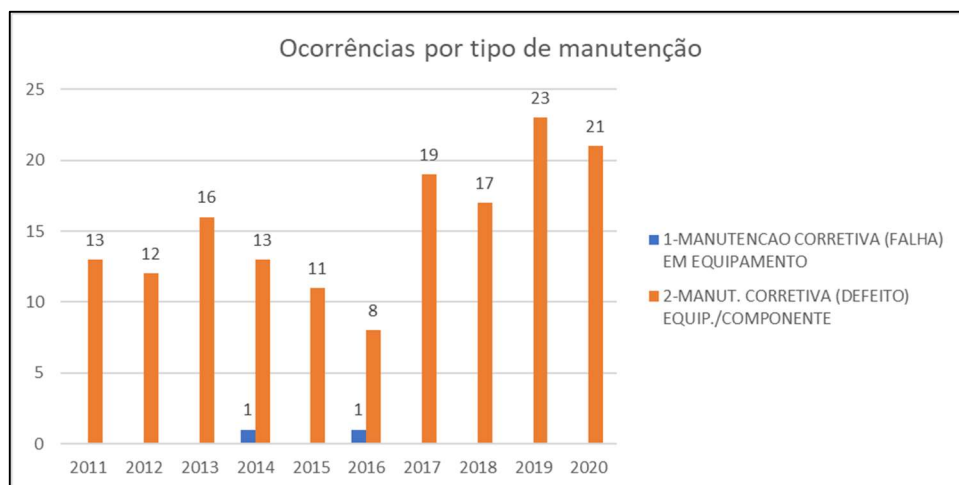


FIGURA 3 – Número de ocorrências de falhas e defeitos no disjuntor G

Para entender como as falhas e defeitos ocorrem e para melhorar a disponibilidade e segurança operacional deste ativo, uma proposta de estudo baseada na metodologia de Análise de Falhas e Causa Raiz foi desenvolvida e é apresentada neste trabalho. A metodologia conta com sete etapas, cada uma com seu propósito específico para conduzir ao entendimento da causa raiz. Deve-se ressaltar que as etapas e ferramentas utilizadas no projeto são consolidadas no mercado internacional, conforme NUNES (3). Entretanto, a metodologia visa integrar de forma sistemática cada uma delas, fazendo o trabalho ter fases bem definidas, segundo proposto por BRAIDOTTI JUNIOR (4).

2.0 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

2.1 Análise da viabilidade do estudo

Antes de aplicar a metodologia, foi necessário realizar uma avaliação do evento alvo do estudo por meio do “Gatilho de Decisão para Aplicação de Análise de Falha”. Esse gatilho é composto por critérios que, ao terem seus resultados combinados, apresentam a viabilidade do estudo do evento para uma Análise de Falha e Causa Raiz. A Tabela 1 mostra esses critérios e os resultados de cada um deles para uma ocorrência de perda de ar comprimido pela eletroválvula do disjuntor G56A em 02 de novembro de 2020.

TABELA 1

Critério	Valores	Resultado	Justificativa
Criticidade Funcional	“A”, “B” ou “C”	B	A falha afetou a confiabilidade do setor de 220 kV da SEMD
Impacto	“Segurança”, “Meio Ambiente”, “Disponibilidade”, “Qualidade”, “Nenhum”	Disponibilidade	A falha teve impacto na disponibilidade do disjuntor, uma vez que a ocorrência o impediu de cumprir sua função
Reincidência (vezes)	“Não recorrente”, “1 vez”, “2 vezes” ou “mais que 2 vezes”	Mais que 2 vezes	Houve reincidência maior que 2 vezes nos últimos 6 meses
Período decorrente da Falha anterior:	“1 a 3 semanas”, “1 a 6 meses”, “maior que 6 meses”	3 meses	A falha anterior ocorreu 13 semanas antes, ou seja, dentro da janela de 1 a 6 meses
Resultado da avaliação	“Processo Corretivo”, “Análise de Falha” ou “Estudo de Engenharia”	Análise de Falha	Conforme a classificação, seguir-se-á com a Análise de Falha

Como a tabela mostra, é sugerido que o estudo seja conduzido por um processo de Análise de Falhas. Dessa forma, as outras fases do estudo foram implantadas, a começar pela Análise Preliminar da Ocorrência (APO).

2.2 Análise preliminar da ocorrência

A APO é utilizada para que o grupo de estudos se aprofunde nos conceitos relacionados ao evento em estudo e deve ser conduzida pelo facilitador do grupo de Análise de Falhas de Causa Raiz. As informações obtidas durante a elaboração da APO são mostradas na Tabela 2.

TABELA 2

Responsável pela análise	Mario Augusto Caetano dos Santos
Data da análise	05/05/2021
É a primeira vez que ocorre o problema?	Sim () / Não (X)
O problema apresentou sintomas anteriores?	Sim () / Não (X)
O equipamento possui plano de inspeção operacional cadastrado?	Sim (X) / Não ()
Quem foi o responsável pela última inspeção operacional?	Operador de turno
Data da última inspeção operacional	30/10/2020
A inspeção operacional ocorreu no prazo determinado?	Sim (X) / Não ()
Encontrou-se anomalia?	Sim () / Não (X)
O plano de inspeção operacional precisa de revisão?	Sim (X) / Não ()
Existe plano de manutenção para o equipamento?	Sim (X) / Não ()
Data da última manutenção preventiva	04/12/2019
A preventiva foi realizada no prazo estabelecido?	Sim () / Não (X)
O plano de preventiva necessita ser revisado?	Sim (X) / Não ()
Existe plano de preditiva para o local da ocorrência de anomalia?	Sim (X) / Não ()
A anomalia ocasionou parada de produção/transmissão?	Sim () / Não (X)

Com base nas informações apresentadas, pode-se perceber que essa falha já ocorreu no disjuntor anteriormente e, embora ele possua planos de inspeção, de manutenção preditiva e de manutenção preventiva (sendo que esse último não foi efetuado no período programado face restrições do sistema elétrico), é recomendada a atualização e revisão de seu conteúdo.

2.3 Análise de Falha e Causa Raiz

A Análise de Falha e Causa Raiz conduzida neste projeto contou com 5 etapas: (i) Brainstorming, (ii) segregação por Diagrama de Ishikawa, (iii) priorização de atividades pela técnica GUT, (iv) análise de causas raízes pela técnica dos “porquês” e (v) elaboração do plano de ação (5W2H). Na sequência cada uma dessas etapas será brevemente explicada e os seus respectivos resultados serão apresentados.

2.3.1 Brainstorming

A etapa de Brainstorming consistiu na geração de ideias e discussão sobre possíveis fenômenos relacionados ao evento que foram levados em conta pela equipe técnica que realizou o estudo. Os tópicos mais relevantes expressos no Brainstorming seguem abaixo:

- A ocorrência se deu durante manobra de fechamento, na qual a eletroválvula não completou seu curso, ocasionando a perda total de ar comprimido;
- Foi utilizada uma eletroválvula reparada no evento, a qual tivera suas vedações substituídas por novas advindas do estoque;
- Quando da revisão de eletroválvulas, utiliza-se graxa Renolite para a montagem, que apesar de não constar no manual do disjuntor, foi enviada juntamente com o último lote de vedações originais adquiridas em 2010.

- Durante as revisões de eletroválvulas a equipe de manutenção realiza inspeções visuais nos componentes, não havendo um histórico registrado de anormalidades encontradas;
- As eletroválvulas revisadas são testadas em bancada, para verificar o correto funcionamento e a inexistência de perdas de ar comprimido;
- A equipe de operação da subestação realiza semanalmente inspeções nos disjuntores, inclusive com suporte de um detector ultrassônico de perdas de ar comprimido, o que já possibilitou a detecção prematura de vazamento de ar em eletroválvula;

2.3.2 Diagrama de Ishikawa

A partir das informações obtidas no Brainstorming, o Diagrama de Ishikawa pode ser utilizado para organizar as ideias em grupos que relacionam os Modos de Falhas extraídos do estudo em seis grupos bem definidos: (i) Material, (ii) Máquina, (iii) Meio ambiente, (iv) Mão-de-obra, (v) Método e (vi) Medida. A Figura 4 mostra o diagrama de Ishikawa desenhado para o projeto.

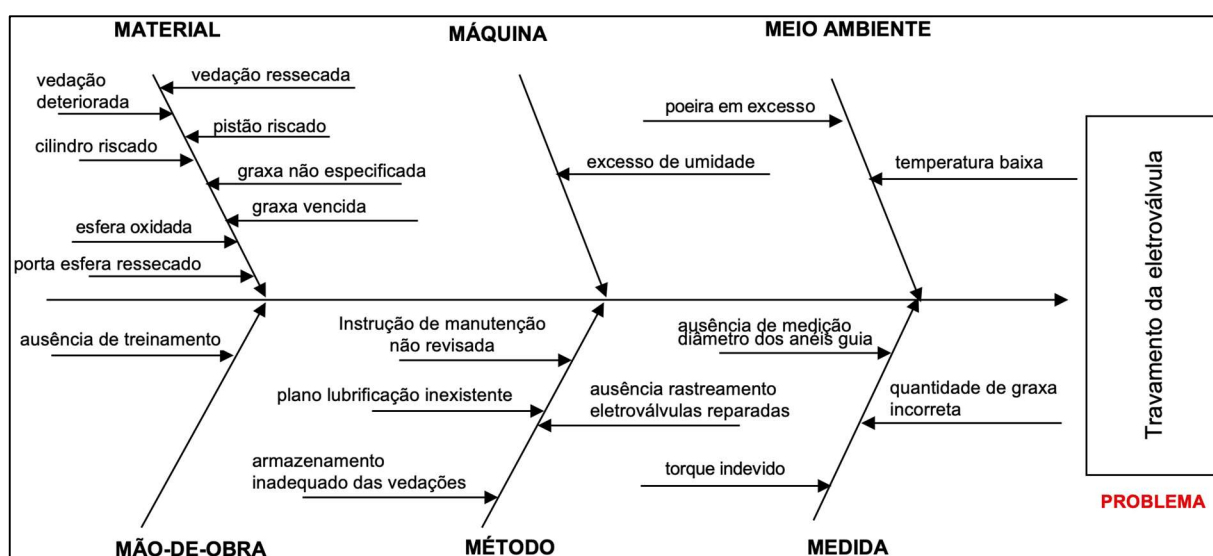


FIGURA 4 – Diagrama de Ishikawa aplicado ao projeto

2.3.3 GUT

Uma vez que os Modos de Falhas foram separados por categorias no Diagrama de Ishikawa, têm-se os subsídios para realizar a classificação de priorização, com vistas a focar-se nos Modos de Falhas de maior impacto para a disponibilidade e segurança do disjuntor. Para isso, optou-se no projeto pela utilização da técnica GUT.

Essa técnica classifica a magnitude do ocorrido (ou possível de ocorrer) em três critérios: (i) Gravidade; (ii) Urgência e (iii) Tendência (daí deriva seu acrônimo GUT). O resultado para cada item analisado é a multiplicação entre as notas de cada critério.

A Tabela 3 apresenta os cinco Modos de Falha que apresentaram maior score final, os quais foram então submetidos à próxima etapa (técnica dos “Porquês”).

TABELA 3

Item	Modo de Falha	G	U	T	GUT Final	Pareto
1	Vedação deteriorada	5	5	5	125	1°
3	Esfera oxidada	5	5	2	50	2°
2	Vedação ressecada	4	5	2	40	3°
10	Plano de lubrificação inexistente	3	4	3	36	4°
11	Armazenamento inadequado das vedações	4	3	3	36	5°

2.3.4 Porquês

Os Modos de Falhas classificados como prioritários na etapa anterior foram submetidos à avaliação da técnica dos “Porquês” para extrair-se as causas raízes da falha representada pelo evento em estudo. Assim, para cada um dos cinco itens da Tabela 3 foram feitas perguntas de forma sequencial até chegar-se ao ponto em que foi viável para a equipe técnica do projeto propor ações de melhoria, tanto no disjuntor quanto no processo de manutenção. A Tabela 4 mostra, para cada Modo de Falha, quais foram as respostas da análise e quantos “porquês” foram necessários para se chegar a uma causa raiz tangível.

TABELA 4

Pareto	Análise dos Porquês			
	POR QUÊ?	POR QUÊ?	POR QUÊ?	POR QUÊ?
1	Montagem/ manuseio incorreto	Instrução de Manutenção desatualizada / Falta treinamento	Não foi criada demanda para a Engenharia de Manutenção	Falta de metodologia de análise de falhas
2	Lubrificação inadequada	Ausência de plano de lubrificação	Não contemplado na Instrução de Manutenção e treinamento	Engenharia de Manutenção não inseriu as recomendações do manual do disjuntor
3	Atinge o fim de vida útil	Falta de troca preventiva	O manual do disjuntor prevê apenas a troca das vedações a cada 10 anos ou 5000 operações	
4	Instrução de Manutenção e Plano de Manutenção não contemplam	Engenharia de Manutenção não inseriu as recomendações do manual do disjuntor		
5	Estão armazenadas em local inadequado	A forma de armazenamento não está descrita no SAP	Engenharia de Manutenção não repassou informações p/ equipe de Gestão de Materiais	

2.3.5 Plano de Ação (5W2H)

Para cada causa raiz identificada na etapa anterior, foi elaborado um plano de ação baseado na estratégia do 5W2H, *What* (O que), *Why* (Por quê), *Who* (Quem), *Where* (Onde), *When* (Quando), *How Much* (Quanto) e *How* (Como). A Tabela 5 apresenta o Plano de Ação traçado para enfrentamento dos Modos de Falha.

TABELA 5

Modo de Falha	O QUE?	POR QUÊ?	QUEM?	ONDE?	QUANDO?	QUANTO?	COMO?
Vedação deteriorada	Atualizar Instrução de Manutenção (IM)	Melhorar o manuseio das vedações no momento da montagem da eletroválvula	Equipe de Manutenção e Engenharia de Manutenção	Oficina da Equipe	13 a 17 de setembro de 2021	20 H x h	Análise da IM atual e 2 reuniões para revisão
Vedação deteriorada	Realiza treinamento	Aprimorar a aplicação dos procedimentos pelos profissionais envolvidos nas revisões das eletroválvulas	Equipe de Manutenção	Oficina da Equipe	04 a 15 de outubro de 2021	32 H x h	Abordagem teórica e prática

Esfera oxidada	Referenciar-se a atualização da IM						
Vedação ressecada	Atualizar a Planilha de Inspeção e Controle (PIC)	Evitar que as vedações da eletroválvula ultrapassem o tempo ou limite de operações recomendado pelo manual do disjuntor	Engenharia de Manutenção	Edifício de Produção	20 a 24 de setembro de 2021	16 H x h	Emitir revisão da PIC no sistema SAM
Plano de lubrificação inexistente	Referenciar-se a atualização da IM						
Armazenamento inadequado das vedações	Diligenciar a forma de armazenamento no almoxarifado e tomar ações corretivas	Para garantir que as vedações estejam armazenadas conforme as recomendações do fabricante	Equipe de Manutenção	Oficina da Equipe e Almoxarifado	20 a 24 de setembro de 2021	20 H x h	Atualizar junto a área de Materiais as condições de armazenamento de cada código de vedação

3.0 RESULTADOS

A partir da execução do Plano de Ação, iniciou-se um período de acompanhamento de um ano, ou seja, com término previsto para o último trimestre de 2022, no qual se verificará a efetividade das ações tomadas no tocante a redução das falhas e defeitos do disjuntor modelo G. Para tanto, escolheu-se o mesmo disjuntor G56A cuja ocorrência foi utilizada para o gatilho de decisão (item 2.1). Cabe ressaltar que este disjuntor é o que apresenta a maior indisponibilidade forçada dentro todos os seus pares, cujos valores calculados com base no equacionamento proposto por BRAIDOTTI JÚNIOR (5) são os seguintes: 0,55% para 2020 e 0,69% para 2021 (este último calculado até dia 16/11/2021).

Assim, com base neste indicador de desempenho (KPI – *Key Performance Indicator*) tem-se como estabelecer uma base de avaliação da efetividade do Plano de Ação adotado, comparando-se a indisponibilidade forçada que será calculada ao final de 2022 com estas apresentadas no parágrafo anterior. Isso caracteriza-se inclusive como uma espécie de ciclo PDCA (Planejar, Desenvolver, Checar, Agir), onde pode-se rever o Plano de Ação adotado caso o mesmo mostre-se não efetivo.

4.0 CONCLUSÕES

Os desafios enfrentados pelas concessionárias de energia na gestão de seus ativos têm fomentado a busca por metodologias alternativas que possibilitem a maximização da disponibilidade mesmo diante do aumento da idade média operacional dos equipamentos.

A ITAIPU, ao deparar-se com o aumento da indisponibilidade forçada de um modelo de disjuntor de seu parque de ativos, viu a oportunidade de desenvolver um projeto piloto de Análise de Falhas e Causa Raiz. As ferramentas utilizadas dentro da metodologia já são consagradas na literatura internacional de gestão de manutenção, sendo a utilização conjunta delas o fator de inovação para o projeto em tela. Fato igualmente relevante é a aplicação desta metodologia no âmbito dos ativos de sistemas de transmissão de energia elétrica, extrapolando os campos de aplicação tradicionalmente focados nas indústrias de transformação.

Embora os resultados efetivos da metodologia só possam ser avaliados no final de 2022, pode-se pontuar alguns benefícios já obtidos a partir do projeto:

- Sistematização e padronização do processo de análise de falha;
- Estabelecimento do foco nas falhas potenciais e não nas falhas funcionais, com maior efetividade na melhoria dos KPI's;
- Fomento à melhoria contínua dos processos de gestão de ativos, inclusive revisão dos planos e instruções de manutenção;

- Criação de um histórico organizado sobre as falhas potenciais e funcionais, constituindo-se um rico banco de dados para as equipes de manutenção, e mesmo de projeto, quando da elaboração de especificações técnicas para aquisição de novos equipamentos;
- Melhoria da autoestima das equipes de manutenção e operação, as quais adquirem um forte senso de pertencimento ao processo de gestão de ativos como um todo.

Dada a simplicidade da metodologia e os potenciais de resultados, acredita-se que a mesma possa ser extensivamente aplicada no setor elétrico de potência, tornando-a uma ferramenta sistematizada na gestão dos ativos, podendo ser incorporada na rotina de análise de ocorrências e notas técnicas, inclusive com possibilidade de informatização.

BIBLIOGRAFIA

- (1) FRONTIN, S. O. *et al.* Equipamentos de Alta Tensão – Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas; Teixeira – Brasil.
- (2) ITO, H. Switching Equipment; CIGRÉ Green Books; Springer – Suíça.
- (3) NUNES, E. L. Saberes da Manutenção: uma visão sistêmica; Editora UFPR – Brasil.
- (4) BRAIDOTTI JÚNIOR, J. W. A falha não é uma opção; Ciência Moderna – Brasil.
- (5) BRAIDOTTI JÚNIOR, J. W. A governança da Manutenção na obtenção de resultados sustentáveis; Ciência Moderna – Brasil.

DADOS BIOGRÁFICOS



(1) MARIO AUGUSTO CAETANO DOS SANTOS

Técnico em Eletrotécnica pelo CTISM - UFSM, Engenheiro Eletricista pela UNIDERP-ANHANGUERA Campo Grande/MS, Pós-graduado em Gerência de Manutenção pela UTFPR e Mestre em Desenvolvimento de Tecnologia pelos Institutos LACTEC. Experiência de 23 anos no setor elétrico brasileiro, atuando na área de manutenção das empresas AES SUL (1998-2002), ELETROBRÁS-ELETROSUL (2002 - 2011). Desde 2011 está na ITAIPU BINACIONAL, onde atualmente trabalha na Engenharia de Manutenção com foco em equipamentos de alta tensão.

(2) CRHISTIAN CARRERAS RÍOS

Ingeniero Electromecánico de la Universidad Nacional de Asunción (Paraguay)- Ex Docente de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Asunción (Paraguay) en las Cátedras de Máquinas eléctricas y Sistemas eléctricos de Potencia- Experiencia en elaboración de proyectos de subestaciones eléctricas para la Administración Nacional de Electricidad - ANDE (Paraguay)- Experiencia en ingeniería de mantenimiento eléctrico de Líneas de transmisión y subestaciones eléctricas para la ITAIPU BINACIONAL (Brasil-Paraguay)

(3) JEFERSON TOYAMA

Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná em 2006 e Mestre em Metrologia Científica e Industrial pela Universidade Federal de Santa Catarina em 2009. Especialista em Gerência de Manutenção pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná em 2019. Desde 2012 trabalha na Itaipu Binacional.

(4) JOSE WAGNER BRAIDOTTI JUNIOR

Eng. José Wagner Braidotti Junior, CAMA, Engenheiro Mecânico Pleno (FEI) 36 anos de experiência, Engenheiro de Segurança do Trabalho (FAAP), Pós-graduação em Administração de Empresas (FAAP), Economia (São Judas), Engenharia de Manutenção Industrial (Mauá), Gerenciamento e Auditoria de Manutenção em Bruxelas – Bélgica, Avaliação dos Processos de Manutenção em Erlangen – Alemanha, MBA de Gerenciamento de Projetos, na FGV, Certified Asset Management Assessor (CAMA), pela WPIAM, Autor de 4 livros “A Falha não é uma Opção” (2013) “A Governança da Manutenção na Obtenção de Resultados Sustentáveis” (2016) “Entendendo a Gestão de Ativos (ISO-55001) na Prática” (2020) “A Anatomia do PPCM” (2021)

(5) FELIPE RAMOS BRAIDOTTI

Engenheiro Mecânico (FEI) - 2017Mestrando em Engenharia Mecatrônica com ênfase em Indústria 4.0 (USP) - 2018Gerenciamento de Projetos Competitivos (State University of New York) – 2018, Machine Learning pela Udacity (2018) e Washington University - 2020Autor do Livro: “Entendendo a Gestão de Ativos (ISO-55001) na Prática2020Autor do Livro: “Anatomia do PPCM2021Desenvolvedor do Programa POAF (Programa da Gestão de Obsolescência dos Ativos Físicos)Corpo docente da Abraman no curso LCC Engenheiro de Manutenção e Projetos na LIPSON Cosméticos Ltda. - 2017/2020Certified Asset Management Assessor – CAMA pela WPIAM - 2020

(6) JULIA PATRICIA DA ROSA BAGGIO

Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, participou de projetos de extensão voluntários na Universidade, sendo um deles, em parceria com a Duke University, na Carolina do Norte. Atualmente atua como estagiária da Divisão de Engenharia de Manutenção Elétrica na Itaipu Binacional e como vice presidente do ramo estudantil IEEE na UNIOESTE.