



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO E SISTEMAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Victor Bergamin Biazi

**Elaboração do Projeto Executivo da Infraestrutura de Cabeamento da Rede de
Tecnologia da Automação para a Atualização Tecnológica da Usina Hidrelétrica
de Itaipu Binacional**

Florianópolis
2026

Victor Bergamin Biazi

Elaboração do Projeto Executivo da Infraestrutura de Cabeamento da Rede de Tecnologia da Automação para a Atualização Tecnológica da Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional

Relatório final da disciplina DAS5511 (Projeto de Fim de Curso) como Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Santa Catarina em Florianópolis.

Orientador: Prof. Hector Bessa Silveira, Dr.

Supervisor: Ronni Márcio Campaner, Eng.

Florianópolis

2026

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Biazi, Victor Bergamin

Elaboração do Projeto Executivo da Infraestrutura de
Cabeamento da Rede de Tecnologia da Automação para a
Atualização Tecnológica da Usina Hidrelétrica de Itaipu
Binacional / Victor Bergamin Biazi ; orientador, Hector
Bessa Silveira, coorientador, Ronni Márcio Campaner, 2026.
124 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia de Controle e Automação,
Florianópolis, 2026.

Inclui referências.

1. Engenharia de Controle e Automação. 2. Redes
Industriais. 3. Cabeamento Estruturado. 4. Infraestrutura
de Comunicação. 5. Projeto Executivo de Engenharia. I.
Silveira, Hector Bessa. II. Campaner, Ronni Márcio. III.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia de Controle e Automação. IV. Título.

Victor Bergamin Biazzi

Elaboração do Projeto Executivo da Infraestrutura de Cabeamento da Rede de Tecnologia da Automação para a Atualização Tecnológica da Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina DAS5511 (Projeto de Fim de Curso) e aprovada em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

Florianópolis, 3 de julho de 2026.

Prof. Marcelo de Lellis Costa de Oliveira, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Hector Bessa Silveira, Dr.
Orientador
UFSC/CTC/EAS



Documento assinado digitalmente
Hector Bessa Silveira
Data: 13/07/2026 11:19:49-0300
CPF: ***.846.519-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Ronni Márcio Campaner, Eng.
Supervisor
Nova Engevix



Documento assinado digitalmente
RONNI MARCIO CAMPANER
Data: 13/07/2026 11:03:41-0300
CPF: ***.439.399-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Rodrigo Lange, Dr.
Avaliador
IFRS

Prof. Ubirajara Franco Moreno, Dr.
Presidente da Banca
UFSC/CTC/EAS

Dedico este trabalho aos meus amados pais.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, em primeiro lugar, aos meus pais Marilene e Vilmar, por terem me proporcionado a oportunidade de cursar uma graduação e pelo apoio e suporte nessa trajetória. Nos momentos difíceis ofereceram palavras de amor, confiaram em mim e me incentivaram a seguir até o fim.

Ao meu irmão, Eduardo, agradeço por me motivar a continuar. Mesmo de longe, sempre expressou palavras de carinho e força.

Sou muito grato à minha noiva, Marina. Foi quem esteve ao meu lado todos os dias, dando conselhos, apoiando minhas decisões, sendo suporte em todos os momentos. Seu incentivo, amor e cuidado foram essenciais.

Ao meu orientador, Professor Hector, agradeço pelas palavras de incentivo e de reflexão, que foram muito importantes para que eu chegasse até aqui. Acreditou no meu potencial e também me fez acreditar.

Ao meu supervisor, Ronni, expressei minha sincera gratidão pela confiança depositada em meu trabalho. Ao me atribuir atividades de grande responsabilidade e apoiar minhas decisões técnicas, contribuiu de forma decisiva para minha formação profissional.

Agradeço à Nova Engevix pela oportunidade de trabalhar e elaborar meu PFC em um grande projeto, e aos meus colegas de departamento pelo suporte desde o primeiro dia. Foram essenciais para minha evolução profissional.

Também sou grato pelos meus amigos de Chapecó e de Florianópolis. Sempre estiveram presentes, compartilhando bons momentos e tornando essa trajetória mais leve.

Por fim, gostaria de agradecer à minha psicóloga, Milena, que me ajudou a acreditar que isso seria possível e apresentou as ferramentas que me permitiram chegar até aqui.

“Porque somos engenheiros, acredita-se então que a beleza não nos preocupa em nossas construções e que, ao mesmo tempo em que buscamos fazê-las sólidas e duráveis, não nos esforçamos para torná-las elegantes? As verdadeiras condições da força não são sempre conformes às condições secretas da harmonia?”
(Eiffel, 1887)

DECLARAÇÃO DE PUBLICIDADE

Florianópolis, 3 de julho de 2026.

Na condição de representante da Nova Engevix na qual o presente trabalho foi realizado, declaro não haver ressalvas quanto ao aspecto de sigilo ou propriedade intelectual sobre as informações contidas neste documento, que impeçam a sua publicação por parte da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) para acesso pelo público em geral, incluindo a sua disponibilização *online* no Repositório Institucional da Biblioteca Universitária da UFSC. Além disso, declaro ciência de que o autor, na condição de estudante da UFSC, é obrigado a depositar este documento, por se tratar de um Trabalho de Conclusão de Curso, no referido Repositório Institucional, em atendimento à Resolução Normativa nº 126/2019/CUn.

Por estar de acordo com esses termos, subscrevo-me abaixo.



Documento assinado digitalmente

RONNI MARCIO CAMPANER

Data: 13/07/2026 11:02:34-0300

CPF: ***.439.399-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Ronni Marcio Campaner

Nova Engevix

RESUMO

Este trabalho foi desenvolvido no contexto do estágio realizado na empresa Nova Engvix Engenharia e Projetos S.A., como parte do Projeto de Atualização Tecnológica da Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional. Com duração estimada de 14 anos e valor contratado superior a 670 milhões de dólares, esse empreendimento tem como objetivo modernizar os sistemas responsáveis pela operação da usina, a qual é responsável por gerar cerca de 7% e 87% da energia elétrica total consumida no Brasil e no Paraguai, respectivamente, constituindo um dos maiores projetos de atualização tecnológica do setor elétrico mundial. A empresa atua no setor de engenharia consultiva, desenvolvendo projetos para os segmentos de energia, infraestrutura e indústria. O presente trabalho concentrou-se na Rede de Tecnologia da Automação (RTA), sistema responsável por prover a infraestrutura de comunicação necessária à integração dos diversos sistemas industriais em operação da Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional. O problema abordado refere-se à necessidade de elaboração dos documentos executivos de engenharia que viabilizam a implantação da infraestrutura de cabeamento da RTA na Casa de Força. A solução proposta consistiu na especificação técnica de listas de cabos e no desenvolvimento de memórias de cálculo destinadas ao dimensionamento de cabos. O trabalho foi realizado no âmbito do Projeto Executivo da RTA, etapa de engenharia responsável pelo detalhamento construtivo da solução concebida nas fases de Projeto Básico e Projeto Básico Consolidado. A metodologia adotada envolveu o estudo das especificações técnicas e dos documentos produzidos nas etapas anteriores do projeto, a definição das interligações entre equipamentos, a análise tridimensional dos percursos de cabeamento, o cadastramento das informações em banco de dados corporativo e a elaboração da documentação técnica com auxílio de ferramentas computacionais de engenharia. O desenvolvimento do trabalho exigiu a integração de informações provenientes de diferentes disciplinas de projeto e a consolidação de dados relacionados a uma infraestrutura composta por 351 Access Points (APs), 30 Unidades Terminais de Automação (UTAs), mais de 1.000 cabos, mais de 600 interligações e aproximadamente 150 km de cabeamento distribuídos ao longo da Casa de Força. Como resultado, foram produzidos e emitidos 74 documentos executivos de engenharia, compreendendo listas de cabos destinadas à implantação da infraestrutura em campo e memórias de cálculo utilizadas para validação técnica das soluções adotadas. Os documentos desenvolvidos encontram-se em processo de aprovação e constituem parte fundamental do Projeto Executivo da RTA, fornecendo as informações necessárias para execução da infraestrutura de comunicação e contribuindo diretamente para a viabilização da modernização tecnológica da usina, com impactos na confiabilidade operacional, na organização da infraestrutura e na capacidade de expansão futura dos sistemas industriais da Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional.

Palavras-chave: Redes industriais. Cabeamento estruturado. Infraestrutura de comunicação. Automação industrial. Projeto de engenharia.

ABSTRACT

This work was developed in the context of an internship carried out at Nova Engevix Engenharia e Projetos S.A., as part of the Technological Modernization Project of the Itaipu Binacional Hydroelectric Power Plant. With an estimated duration of 14 years and a contract value exceeding US\$670 million, this project aims to modernize the systems responsible for the operation of the power plant, which generates approximately 7% and 87% of the total electricity consumed in Brazil and Paraguay, respectively, making it one of the largest technological modernization projects in the global electric power sector. The company operates in the consulting engineering field, developing projects for the energy, infrastructure, and industrial sectors. This work focused on the Automation Technology Network (RTA), the system responsible for providing the communication infrastructure required to integrate the various industrial systems operating at the Itaipu Binacional Hydroelectric Power Plant. The problem addressed concerns the preparation of executive engineering documents required to enable the implementation of the RTA cabling infrastructure in the Powerhouse. The proposed solution consisted of the technical specification of cable lists and the development of calculation reports for cable sizing. The work was carried out within the scope of the RTA Detailed Engineering Design, the engineering phase responsible for the complete construction detailing of the solution conceived during the Basic Design and Consolidated Basic Design stages. The adopted methodology involved the study of technical specifications and documents produced in previous project stages, the definition of interconnections between equipment, three-dimensional analysis of cable routing, registration of engineering information in a corporate database, and the preparation of technical documentation using engineering software tools. The development of the work required the integration of information from different engineering disciplines and the consolidation of data related to an infrastructure comprising 351 Access Points (APs), 30 Automation Terminal Units (UTAs), more than 1,000 cables, more than 600 interconnections, and approximately 150 km of cabling distributed throughout the Powerhouse. As a result, 74 executive engineering documents were prepared and issued, including cable lists for field installation and calculation reports used to technically validate the adopted solutions. The documents produced are currently under the approval process and constitute an essential part of the RTA Detailed Engineering Design, providing the information required for the implementation of the communication infrastructure and directly contributing to the technological modernization of the power plant, with positive impacts on operational reliability, infrastructure organization, and the future expansion capability of the industrial systems at the Itaipu Binacional Hydroelectric Power Plant.

Key-words: Industrial networks. Structured cabling. Communication infrastructure. Industrial automation. Engineering design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Pirâmide de Automação conforme o padrão ISA (2010).	24
Figura 2 – Exemplos de construção de cabos de par trançado.	29
Figura 3 – Fibra óptica.	30
Figura 4 – Estrutura da Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional.	42
Figura 5 – Arquitetura da RTA.	46
Figura 6 – UTAs.	49
Figura 7 – RA.	50
Figura 8 – APs.	51
Figura 9 – PTO.	51
Figura 10 – PTM.	52
Figura 11 – PDE.	53
Figura 12 – Fluxograma da metodologia proposta.	57
Figura 13 – Banco de dados.	58
Figura 14 – Recorte da planilha de associação de UTAs e APs.	61
Figura 15 – Desenho de Associação entre UTAs e APs da Casa de Força. . . .	62
Figura 16 – Recorte do DLDP da Casa de Força 50 Hz.	63
Figura 17 – Exemplo de lista de cabos.	68
Figura 18 – Etapas de elaboração das LCUs.	70
Figura 19 – Exemplo de cadastro de cabo na LMUC.	75
Figura 20 – Exemplo de corte de visualização do modelo tridimensional no Revit Viewer.	78
Figura 21 – Backbone Óptico.	83
Figura 22 – Recorte da planilha e dimensionamento de cabos de força.	89
Figura 23 – Recorte de uma memória de cálculo.	93
Figura 24 – Recorte de uma memória de cálculo.	94
Figura 25 – Fluxograma do processo de GED.	98
Figura 26 – Exemplo de lista de cabos (1/4 - contracapa). A capa e alguns ele- mentos foram omitidos por questões de sigilo.	109
Figura 27 – Exemplo de lista de cabos (2/4 - referências). Alguns elementos foram omitidos por questões de sigilo.	109
Figura 28 – Exemplo de lista de cabos (3/4 - lista de cabos). Alguns elementos foram omitidos por questões de sigilo.	110
Figura 29 – Exemplo de lista de cabos (4/4 - lista de cabos). Alguns elementos foram omitidos por questões de sigilo.	110
Figura 30 – Exemplo de memória de cálculo de dimensionamento de cabos (1/9 - contracapa). A capa e alguns elementos foram omitidos por questões de sigilo.	112

Figura 31 – Exemplo de memória de cálculo de dimensionamento de cabos (2/9 - sumário). Alguns elementos foram omitidos por questões de sigilo.	113
Figura 32 – Exemplo de memória de cálculo de dimensionamento de cabos (3/9 - capítulos 1, 2 e 3). Alguns elementos foram omitidos por questões de sigilo.	114
Figura 33 – Exemplo de memória de cálculo de dimensionamento de cabos (4/9 - capítulos 4 e 5). Alguns elementos foram omitidos por questões de sigilo.	115
Figura 34 – Exemplo de memória de cálculo de dimensionamento de cabos (5/9 - capítulo 5). Alguns elementos foram omitidos por questões de sigilo.	116
Figura 35 – Exemplo de memória de cálculo de dimensionamento de cabos (6/9 - capítulo 5). Alguns elementos foram omitidos por questões de sigilo.	117
Figura 36 – Exemplo de memória de cálculo de dimensionamento de cabos (7/9 - capítulo 5). Alguns elementos foram omitidos por questões de sigilo.	118
Figura 37 – Exemplo de memória de cálculo de dimensionamento de cabos (8/9 - capítulos 5 e 6). Alguns elementos foram omitidos por questões de sigilo.	119
Figura 38 – Exemplo de memória de cálculo de dimensionamento de cabos (9/9 - capítulo 6). Alguns elementos foram omitidos por questões de sigilo.	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 2 – Tipos de cabos para as conexões de Acesso LAN.	73
Tabela 3 – Tipos de cabos para as conexões de uplink.	84
Tabela 4 – Tipos de cabos para as conexões de backbone.	84
Tabela 5 – Tipos de cabos para as conexões de alimentação.	91
Tabela 6 – Estágio dos documentos elaborados, ao término do trabalho.	100

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AP	Access Point
APs	Access Points
CCVC	Critério de Codificação de Vias e Cabos Elétricos e Ópticos
CMI	Consórcio Modernização de Itaipu
CPE	Critérios de Projetos Elétricos
CRBCE	Critérios e Requisitos Básicos de Cabeamento Estruturado
DAUA	Desenho de Associação entre UTAs e APs
DLDP	Diagrama de Localização e Distribuição de PDEs
DLDPs	Diagramas de Localização e Distribuição de PDEs
DLUAs	Desenhos de Localização de UTAs e APs
E	Escritório
ETCCR	Especificação Técnica de Equipamentos e Sistemas do Controle Centralizado
EVTE	Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica
GED	Gestão e Emissão dos Documentos
LCP	Lista de Cabos dos Painéis de Distribuição de Tensão Estabilizada
LCPs	Listas de Cabos dos Painéis de Distribuição de Tensão Estabilizada
LCRA	Lista de Cabos dos Racks Abertos do Backbone Óptico
LCRAs	Listas de Cabos dos Racks Abertos do Backbone Óptico
LCU	Lista de Cabos das Unidades Terminais de Automação
LCUs	Listas de Cabos das Unidades Terminais de Automação
LMUC	Lista de Materiais de Uso Contínuo
LR	Industrial Long Range
MCDC	Memória de Cálculo de Dimensionamento dos Cabos
MCDCs	Memórias de Cálculo de Dimensionamento dos Cabos
MR	Industrial Medium Range
PAUA	Planilha de Associação de UTAs e APs
PB	Projeto Básico
PDE	Painel de Distribuição de Tensão Estabilizada
PDEs	Painéis de Distribuição de Tensão Estabilizada
PE	Projeto Executivo
PFC	Projeto de Fim de Curso
PoE	Power over Ethernet
PTM	Ponto de Terminação Metálica
PTMs	Pontos de Terminação Metálica
PTO	Ponto de Terminação Óptica
PTOs	Pontos de Terminação Óptica

RA	Rack Aberto do Backbone Óptico
RAs	Racks Abertos do Backbone Óptico
RTA	Rede de Tecnologia da Automação e Sistemas de Comunicação
UTA	Unidade Terminal de Automação
UTAs	Unidades Terminais de Automação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1	REDES INDUSTRIAIS	22
2.1.1	Determinismo e Restrições de Tempo Real	23
2.1.2	Arquitetura Hierárquica e Modelo Purdue	23
2.1.3	Disponibilidade, Tolerância a Falhas e Integração entre TI e TO	24
2.2	CABEAMENTO ESTRUTURADO EM AMBIENTES INDUSTRIAIS	25
2.2.1	Conceito de Cabeamento Estruturado	26
2.2.2	Classificação MICE	27
2.2.3	Backbone e Cabeamento Horizontal	28
2.2.4	Par Trançado	28
2.2.5	Fibra Óptica	30
2.2.6	Comparação entre as Tecnologias	31
2.3	ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DE PROJETOS DE ENGENHARIA	32
2.3.1	Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica	32
2.3.2	Estudo Preliminar	33
2.3.3	Anteprojeto	33
2.3.4	Projeto Básico (PB)	33
2.3.5	Projeto Executivo (PE)	34
2.4	DOCUMENTAÇÃO EXECUTIVA PARA IMPLANTAÇÃO DE INFRAESTRUTURAS DE CABEAMENTO	34
2.4.1	Listas de Cabos	35
2.4.2	Memórias de Cálculo	35
2.4.3	Desenhos de Localização	36
2.5	DIMENSIONAMENTO DE CIRCUITOS DE BAIXA TENSÃO	36
2.5.1	Capacidade de Condução de Corrente	37
2.5.2	Queda de Tensão	38
2.5.3	Proteção Contra Sobrecorrentes	39
2.5.4	Seleção da Seção dos Condutores	39
3	A REDE DE TECNOLOGIA DA AUTOMAÇÃO E SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO (RTA) DO PLANO DE ATUALIZAÇÃO TECNOLÓGICA DA USINA HIDRELÉTRICA DE ITAIPU BINACIONAL	41
3.1	USINA HIDRELÉTRICA DE ITAIPU BINACIONAL	41
3.2	HOLDING NOVA PARTICIPAÇÕES	43
3.3	PLANO DE ATUALIZAÇÃO TECNOLÓGICA	44
3.4	REDE DE TECNOLOGIA DA AUTOMAÇÃO E SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO (RTA)	45

3.4.1	Arquitetura da RTA	45
3.4.2	Equipamentos da RTA	48
3.4.3	Alimentação da RTA	52
3.5	PROJETO EXECUTIVO DE CABEAMENTO DA RTA	54
3.5.1	Etapas do Projeto	54
3.5.2	Listas de Cabos	55
3.5.3	Memórias de Cálculo de Dimensionamento de Cabos	55
4	ELABORAÇÃO DO PROJETO EXECUTIVO DE CABEAMENTO DA RTA	56
4.1	METODOLOGIA PROPOSTA	56
4.1.1	Banco de dados	57
4.1.2	Estudo dos Documentos Base e Referências	59
4.1.3	Elaboração dos Documentos	63
4.1.4	Gestão e Emissão dos Documentos	64
4.2	REQUISITOS TÉCNICOS DE PROJETO	65
4.3	LISTAS DE CABOS	66
4.3.1	Estrutura das Listas de Cabos	67
4.3.2	CrITÉRIOS de Organização das Listas de Cabos	69
4.3.3	Listas de Cabos das UTAs	69
4.3.3.1	Levantamento, Estudo e Organização das Informações do Projeto	70
4.3.3.2	Cadastro de Siglas e Equipamentos	71
4.3.3.3	Definição dos Tipos de Cabos	72
4.3.3.4	Codificação dos Cabos	73
4.3.3.5	Cadastro dos Cabos	74
4.3.3.6	Definição de Percursos e Comprimentos	76
4.3.3.7	Cadastro das Vias de Cabos	79
4.3.3.8	Cadastro do Cabeamento	79
4.3.3.9	Geração das Listas de Cabos	80
4.3.4	Listas de Cabos dos Racks Abertos do Backbone Óptico	82
4.3.5	Listas de Cabos dos PDEs	85
4.3.5.1	Levantamento, Estudo e Organização das Informações de Projeto	86
4.3.5.2	Definição da Formação dos Circuitos	87
4.3.5.3	Dimensionamento dos Cabos	89
4.3.5.4	Definição dos cabos para cada interligação	91
4.4	MEMÓRIAS DE CÁLCULO DE DIMENSIONAMENTO DOS CABOS	92
4.4.1	Elaboração das Memórias de Cálculo	92
4.4.2	CrITÉRIOS de Dimensionamento dos Cabos	94
4.5	GESTÃO E EMISSÃO DOS DOCUMENTOS	97
4.5.1	Fluxo de Gestão de Documentos	97

4.6	ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS	99
5	CONCLUSÃO	103
	REFERÊNCIAS	106
	APÊNDICE A – LISTA DE CABOS	109
	APÊNDICE B – MEMÓRIA DE CÁLCULO	112
	APÊNDICE C – LISTA DE DOCUMENTOS ELABORADOS	121

1 INTRODUÇÃO

Entre as décadas de 1960 e 1980, o Brasil realizou um amplo processo de expansão de sua infraestrutura de geração de energia elétrica por meio da construção de grandes usinas hidrelétricas. Esses empreendimentos foram fundamentais para sustentar o crescimento industrial e urbano do país, incorporando tecnologias de automação, supervisão e controle que representavam o estado da arte da engenharia da época. Embora já existissem sistemas supervisórios e redes industriais capazes de integrar equipamentos e processos, as arquiteturas então utilizadas eram predominantemente baseadas em soluções proprietárias, com menor capacidade de integração quando comparadas às tecnologias atualmente disponíveis.

Nas décadas seguintes, a evolução da tecnologia da informação, dos sistemas de automação e das telecomunicações transformou os requisitos operacionais das instalações industriais. Sistemas originalmente concebidos para operar de forma relativamente independente passaram a demandar conectividade, integração de dados em tempo real, compartilhamento de informações entre diferentes níveis hierárquicos e maior capacidade de expansão.

Nesse contexto, a modernização de grandes instalações de geração de energia passou a envolver a reestruturação completa das arquiteturas de automação, supervisão, controle e comunicação, deixando de ser limitada à substituição de equipamentos obsoletos. Dessa forma, a infraestrutura de comunicação assume grande importância em ambientes industriais críticos, onde a indisponibilidade dos sistemas de rede pode comprometer a operação da planta (ITAIPU Binacional, 2017; NIST, 2015).

A Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional, reconhecida entre as maiores usinas hidrelétricas do mundo em capacidade instalada e geração de energia, representa bem esse cenário. A usina, responsável por gerar cerca de 7% e 87% da energia elétrica total consumida no Brasil e no Paraguai, respectivamente, passa atualmente por um amplo Plano de Atualização Tecnológica, destinado à modernização dos sistemas responsáveis pelo monitoramento, controle e supervisão da planta, projeto no qual está inserido este Projeto de Fim de Curso (PFC). Esse processo de modernização ocorre em uma instalação composta por uma casa de força que abriga 20 unidades geradoras responsáveis pela conversão da energia hidráulica em energia elétrica, operando nos sistemas de 50 Hz e 60 Hz. Além disso, abrange diversas estruturas complementares, como vertedouro, subestações, barragens de concreto, enrocamento e terra, totalizando aproximadamente 7.719 metros de extensão (ITAIPU Binacional, 2022, 2026).

Nesse ambiente industrial complexo, o denominado Plano de Atualização Tecnológica constitui um projeto de longo prazo, com duração estimada de aproximadamente 14 anos, cujo objetivo é substituir e modernizar os sistemas de controle, proteção, su-

pervisão, automação e serviços auxiliares de Itaipu Binacional. Para viabilizar um empreendimento dessa magnitude, o desenvolvimento do referido projeto foi estruturado em diferentes fases de engenharia. O Estudo Preliminar é responsável pela análise inicial das necessidades do empreendimento e pela definição das alternativas técnicas. O Projeto Básico (PB) estabelece os requisitos funcionais, arquiteturas, diretrizes gerais da solução, compatibiliza as definições desenvolvidas pelas diferentes disciplinas e consolida as informações necessárias para o detalhamento posterior. Por fim, o Projeto Executivo (PE) representa o mais elevado nível de detalhamento da engenharia, reunindo desenhos construtivos, listas de materiais, listas de cabos, memórias de cálculo, especificações de instalação e demais documentos necessários para a execução em campo.

Dentro desse contexto, a Nova Engevix Engenharia e Projetos S.A., empresa na qual o PFC foi realizado, possui responsabilidade pelo desenvolvimento da infraestrutura necessária para instalação dos novos sistemas elétricos e de telecomunicações previstos na modernização, atuando tanto no PB quanto no PE. Dentre os equipamentos contemplados, encontram-se painéis elétricos de baixa e média tensão, transformadores, grupos geradores a diesel, racks de telecomunicações, pontos de acesso sem fio, sistemas de cabeamento estruturado e infraestrutura de backbone óptico.

Dentre os diversos subsistemas contemplados pela Atualização Tecnológica, destaca-se a Rede de Tecnologia da Automação e Sistemas de Comunicação (RTA). A RTA consiste em uma plataforma integrada de comunicação e processamento de dados destinada a suportar a implementação de sistemas e serviços voltados às necessidades operacionais da usina, incluindo aplicações de monitoramento, supervisão, diagnóstico e suporte à operação. Sua função é fornecer a infraestrutura de comunicação necessária para integração dos diversos sistemas que compõem a arquitetura de automação da instalação (ITAIPU Binacional, 2017).

A necessidade de implantação da RTA está relacionada às limitações da infraestrutura atualmente existente. Ao longo dos anos, os sistemas de comunicação passaram a apresentar restrições associadas à cobertura, capacidade de transmissão, integração entre plataformas e potencial de expansão. Essas limitações impactam a eficiência, a disponibilidade dos sistemas e a capacidade de incorporação de novas tecnologias. Diante desse cenário, tornou-se necessária a implementação de uma nova infraestrutura capaz de atender aos requisitos de comunicação da usina (ITAIPU Binacional, 2017).

A RTA é composta por centenas de equipamentos distribuídos ao longo de toda a instalação industrial, incluindo pontos de acesso sem fio, pontos de terminação óptica, switches, racks e demais elementos de rede. A interligação desses equipamentos exige dezenas de quilômetros de cabeamento estruturado e backbone óptico, responsável por conectar diferentes setores da usina em uma arquitetura de comunicação.

Considerando as dimensões da planta industrial, a quantidade de equipamentos envolvidos e as grandes distâncias entre os pontos de instalação, o desenvolvimento da infraestrutura da RTA representa um desafio significativo de engenharia. Além da complexidade associada aos percursos dos cabos, o projeto deve considerar restrições construtivas, interferências com outros sistemas, coexistência com equipamentos elétricos de potência e requisitos de disponibilidade e confiabilidade.

Dessa forma, este PFC está inserido no contexto do PE da RTA com foco nas atividades relacionadas ao desenvolvimento da infraestrutura necessária para viabilizar sua implantação. O trabalho concentra-se na elaboração de documentos executivos de engenharia que servirão de base para a implementação física da rede e para a consolidação da modernização tecnológica proposta para a usina.

Os principais documentos executivos abordados no presente trabalho são as listas de cabos e as memórias de cálculo de dimensionamento de cabos. As listas de cabos reúnem as informações técnicas de um conjunto de cabos agrupados de forma lógica, especificando sua identificação, origem, destino, características construtivas, percurso e comprimento, de modo a subsidiar as atividades de aquisição de materiais, instalação e manutenção dos cabos. As memórias de cálculo de dimensionamento de cabos são os documentos responsáveis por justificar tecnicamente a seleção dos condutores empregados nos circuitos de alimentação elétrica, demonstrando, por meio de cálculos fundamentados em normas técnicas e nos critérios do empreendimento, o atendimento aos requisitos de capacidade de condução de corrente, queda de tensão e suportabilidade a curto-circuito.

O objetivo geral deste trabalho é elaborar o PE de cabeamento da RTA da Casa de Força da Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional, no que se refere às atividades de responsabilidade do autor, desenvolvidas no âmbito da Nova Engevix Engenharia e Projetos S.A.

Como objetivos específicos, busca-se:

- Fazer o levantamento dos requisitos técnicos envolvidos no PE da RTA;
- Elaborar e emitir os documentos executivos de engenharia que compõem o escopo de cabeamento do PE da RTA para a Casa de Força, sendo:
 - 30 Listas de Cabos das Unidades Terminais de Automação (LCUs);
 - 30 Listas de Cabos dos Painéis de Distribuição de Tensão Estabilizada (LCPs);
 - 5 Listas de Cabos dos Racks Abertos do Backbone Óptico (LCRA's);
 - 9 Memórias de Cálculo de Dimensionamento dos Cabos (MDCs).
- Obter aprovação dos documentos do PE pelo Consórcio Modernização de Itaipu (CMI);

- Obter aprovação dos documentos do PE por Itaipu Binacional.

O desenvolvimento deste trabalho fundamentou-se na análise das especificações técnicas e dos documentos produzidos nas etapas anteriores do projeto. A elaboração da documentação executiva envolveu a interpretação dos modelos tridimensionais da Casa de Força por meio do software de projeto Revit Viewer, a definição das interligações entre equipamentos, o dimensionamento dos circuitos de alimentação, a organização das informações em um banco de dados relacional corporativo e a utilização de plataformas de gestão eletrônica de documentos para circulação, verificação e emissão. Todas as atividades foram conduzidas em conformidade com os critérios de projeto, as normas e os padrões estabelecidos para o empreendimento. Além disso, os documentos foram submetidos aos processos de validação adotados pela Nova Engevix, contribuindo para a consistência das informações apresentadas.

Como resultado, foram elaborados e emitidos documentos executivos de engenharia destinados à implantação da infraestrutura de cabeamento da RTA. Diversos desses documentos obtiveram parecer favorável na primeira etapa do processo de aprovação, demonstrando a aderência da documentação aos critérios de projeto e aos procedimentos de qualidade adotados.

A elaboração adequada do PE influencia diretamente a operação da RTA ao longo de toda a sua vida útil. Um projeto consistente reduz a necessidade de alterações na infraestrutura após sua implantação, evitando substituições de cabos, modificações de percursos e intervenções em vias já ocupadas. Este PFC apresenta potencial para atingir esse objetivo ao fornecer uma base confiável para a execução da infraestrutura em campo, contribuindo para sua operação, manutenção e expansão ao longo das próximas décadas.

O presente documento está estruturado da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta a Fundamentação Teórica, com conceitos de redes industriais, cabeamento estruturado, etapas de projeto, documentação executiva e dimensionamento de circuitos; o Capítulo 3 descreve a RTA, o contexto do empreendimento e detalhes sobre a empresa onde foi realizado o PFC; o Capítulo 4 detalha as atividades desenvolvidas durante a elaboração do PE e apresenta os resultados; e o Capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho, suas contribuições para o projeto e as perspectivas de continuidade.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os conceitos e referências normativas que servem de base para o desenvolvimento deste trabalho. Como o projeto envolve atividades relacionadas à infraestrutura de comunicação, à documentação técnica de engenharia e ao dimensionamento de circuitos de baixa tensão, torna-se necessário compreender os princípios que orientam tais assuntos e os critérios utilizados para elaboração dos documentos de projeto.

A Seção 2.1 aborda os conceitos fundamentais das redes industriais, incluindo requisitos de determinismo, restrições de tempo real, arquiteturas hierárquicas e aspectos relacionados à disponibilidade e à integração entre Tecnologia da Informação (TI) e Tecnologia Operacional (TO). Na sequência, a Seção 2.2 discute os princípios do cabeamento estruturado aplicado a ambientes industriais, contemplando a organização da infraestrutura física de comunicação, os conceitos de backbone e cabeamento horizontal, os critérios de classificação ambiental e as principais tecnologias empregadas na camada física, com destaque para os cabos de par trançado e fibra óptica. Em seguida, a Seção 2.3 descreve as etapas de desenvolvimento de projetos de engenharia e os principais documentos produzidos ao longo de seu ciclo de vida, abrangendo o Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica (EVTE), o Estudo Preliminar, o Anteprojeto, o Projeto Básico e o Projeto Executivo. A Seção 2.4 apresenta os conceitos relacionados à documentação executiva, incluindo listas de cabos, memórias de cálculo e desenhos de localização. Por fim, a Seção 2.5 reúne os fundamentos do dimensionamento de circuitos de baixa tensão com base nos critérios estabelecidos pela ABNT NBR 5410, abordando capacidade de condução de corrente, queda de tensão, fatores de correção e proteção contra sobrecorrentes, conceitos que fundamentam as memórias de cálculo desenvolvidas neste trabalho.

2.1 REDES INDUSTRIAIS

As redes industriais fornecem a infraestrutura de comunicação necessária para a troca de informações entre dispositivos de campo, sistemas de controle e sistemas de supervisão. Inseridas no contexto dos Sistemas de Controle Industrial, elas conectam sensores, atuadores, controladores lógicos programáveis (CLPs) e sistemas supervisórios, permitindo o monitoramento e a operação dos processos industriais. Redes corporativas convencionais têm como principal objetivo o transporte e o compartilhamento de informações. Redes industriais, por sua vez, são projetadas para atender aos requisitos operacionais do processo e às restrições impostas pelo ambiente físico onde estão instaladas (NIST, 2015).

Disponibilidade, previsibilidade e tolerância a falhas são requisitos essenciais nesse tipo de aplicação. Em ambientes de Tecnologia da Informação (TI, do inglês

Information Technology – IT), interrupções de comunicação normalmente podem ser mitigadas por mecanismos de redundância ou por procedimentos operacionais. Em ambientes de Tecnologia Operacional (TO, do inglês *Operational Technology* – OT), uma falha de comunicação pode interromper o processo produtivo, causar indisponibilidade de sistemas ou provocar danos a equipamentos (NIST, 2015).

2.1.1 Determinismo e Restrições de Tempo Real

O determinismo é uma das principais características das redes industriais. Esse conceito representa a capacidade da rede de garantir que uma mensagem seja transmitida e recebida dentro de um intervalo de tempo conhecido e previsível, com baixa variação de latência (Stallings, 2014). Em aplicações de tempo real, atrasos excessivos ou variações no tempo de entrega das mensagens (*jitter*) podem comprometer o desempenho dos sistemas de controle e afetar a operação do processo.

As aplicações industriais apresentam diferentes requisitos temporais. Sistemas classificados como *hard real-time* exigem que os tempos máximos de resposta sejam rigorosamente respeitados, pois o descumprimento desses limites pode resultar em falhas críticas ou condições inseguras de operação. Em sistemas *soft real-time*, atrasos ocasionais podem ser tolerados, embora provoquem degradação de desempenho (Stallings, 2014). Dessa forma, a infraestrutura de comunicação deve limitar a latência e reduzir o *jitter* de acordo com as exigências de cada aplicação.

O comportamento temporal da rede depende não apenas da capacidade de transmissão dos equipamentos, mas também da forma como a infraestrutura é projetada. A topologia adotada, a segmentação da rede e a distribuição dos dispositivos influenciam diretamente os tempos de resposta observados durante a operação. Em aplicações industriais, não basta que a latência média seja reduzida. Os atrasos de comunicação devem permanecer dentro de limites previsíveis e consistentes ao longo do tempo.

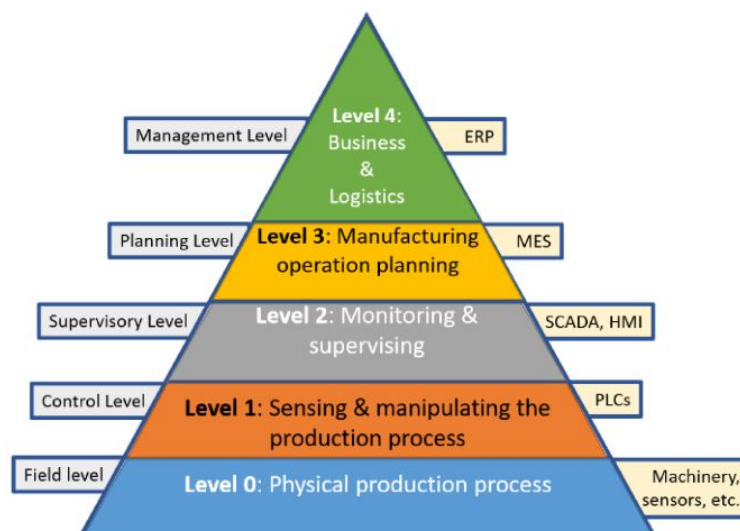
Os requisitos de determinismo e disponibilidade influenciam diretamente o projeto da infraestrutura de rede. A escolha dos meios de transmissão, a implementação de redundâncias e a organização dos equipamentos devem considerar não apenas a capacidade de comunicação, mas também a previsibilidade dos tempos de resposta exigida pelo processo industrial.

2.1.2 Arquitetura Hierárquica e Modelo Purdue

As redes industriais normalmente são organizadas de forma hierárquica, distribuindo funções e responsabilidades em diferentes níveis da arquitetura. Um dos modelos mais utilizados para essa organização é o Modelo Purdue (Figura 1), formalizado pelas normas ISA (2010) e IEC (2013). Nesse modelo, a arquitetura é dividida em

camadas que abrangem desde o processo físico (nível 0) até os sistemas corporativos (nível 4) (IEC, 2013).

Figura 1 – Pirâmide de Automação conforme o padrão ISA (2010).



Fonte: (Martinez-Ponce et al., 2021).

Os níveis 0 e 1 concentram os dispositivos diretamente conectados ao processo industrial, como sensores, atuadores e controladores. Nesses níveis estão presentes os requisitos mais rigorosos relacionados ao determinismo e aos tempos de resposta. O nível 2 abriga sistemas supervisórios e interfaces homem-máquina, enquanto os níveis superiores são destinados ao gerenciamento operacional, ao tratamento de informações e à integração com os sistemas corporativos da organização (IEC, 2013).

A divisão da arquitetura em níveis permite separar funções com diferentes requisitos de desempenho, disponibilidade e criticidade. Essa organização reduz a propagação de falhas entre camadas e facilita a implementação de mecanismos de segurança e controle. Sob a perspectiva da infraestrutura de rede, o Modelo Purdue também auxilia na definição da distribuição dos equipamentos, na segmentação da comunicação e na implementação de redundâncias compatíveis com os requisitos de cada nível da arquitetura.

2.1.3 Disponibilidade, Tolerância a Falhas e Integração entre TI e TO

A disponibilidade é um requisito fundamental em redes industriais, pois a comunicação está diretamente relacionada à operação dos sistemas de controle. A indisponibilidade de um equipamento ou segmento da rede pode comprometer a supervisão do processo ou impedir a atuação adequada dos sistemas de automação. Por esse motivo, projetos de redes industriais frequentemente incorporam mecanismos de redundância física e lógica, além de caminhos alternativos de comunicação, com o objetivo de redu-

zir os impactos causados por falhas de equipamentos ou meios de transmissão (NIST, 2015).

A integração entre ambientes de Tecnologia da Informação (TI) e Tecnologia Operacional (TO) tem se tornado cada vez mais comum em sistemas industriais. Essa integração permite ampliar o compartilhamento de informações entre sistemas corporativos e sistemas de controle, favorecendo atividades de monitoramento, análise de dados e suporte à tomada de decisão. Entretanto, a interconexão desses ambientes também introduz desafios relacionados à disponibilidade, segurança e gerenciamento da infraestrutura (NIST, 2015).

Redes de TI são tradicionalmente projetadas com foco em flexibilidade, escalabilidade e compartilhamento de informações. Redes de TO priorizam estabilidade operacional, determinismo e disponibilidade. Quando esses ambientes passam a operar de forma integrada, eventos originados na rede corporativa, como congestionamentos, falhas de servidores ou atualizações não planejadas, podem afetar sistemas industriais que possuem baixa tolerância a interrupções (NIST, 2015).

A integração entre TI e TO também amplia a superfície de exposição a ameaças cibernéticas. Problemas relacionados à integridade, disponibilidade ou confidencialidade das informações podem produzir impactos que ultrapassam o ambiente digital e afetam diretamente a operação do processo industrial. Além disso, a arquitetura da rede torna-se mais complexa, pois requisitos distintos passam a coexistir na mesma infraestrutura. Enquanto aplicações de TO exigem previsibilidade temporal e alta disponibilidade, aplicações de TI normalmente priorizam flexibilidade e facilidade de integração. Essa combinação exige uma arquitetura bem segmentada e mecanismos adequados de controle e proteção (NIST, 2015).

2.2 CABEAMENTO ESTRUTURADO EM AMBIENTES INDUSTRIAIS

A camada física de telecomunicações constitui a base da infraestrutura de comunicação utilizada em redes industriais. Todos os serviços de rede e aplicações implementados nas camadas superiores dependem do correto funcionamento dessa infraestrutura para operar adequadamente. Por esse motivo, falhas nos elementos físicos da rede podem afetar simultaneamente diversos sistemas e comprometer a disponibilidade das operações industriais.

Sob a perspectiva da engenharia de confiabilidade, a disponibilidade de um sistema está relacionada à razão entre o tempo médio entre falhas (*Mean Time Between Failures* – MTBF) e o tempo médio para reparo (*Mean Time To Repair* – MTTR). Dessa forma, a infraestrutura de cabeamento influencia a frequência com que falhas podem ocorrer e o tempo necessário para sua identificação, localização e correção (Ebeling, 2010).

Em instalações industriais críticas, onde a continuidade operacional é um requi-

sito fundamental, o projeto da infraestrutura física é muito importante para confiabilidade do sistema. Problemas relacionados à organização do cabeamento, identificação dos circuitos ou documentação da instalação podem aumentar o MTTR durante atividades de manutenção e recuperação de falhas, reduzindo a disponibilidade global da rede.

As normas ANSI/TIA (2012a) e ISO/IEC (2017) estabelecem diretrizes para o projeto de sistemas de cabeamento em ambientes industriais, contemplando requisitos relacionados ao desempenho elétrico, à robustez mecânica e à organização da infraestrutura. Esses documentos reconhecem que o meio físico de comunicação deve ser projetado de forma adequada para atender às condições operacionais do ambiente industrial e reduzir riscos associados à operação e manutenção da rede (ANSI/TIA, 2012a; ISO/IEC, 2017).

2.2.1 Conceito de Cabeamento Estruturado

O cabeamento estruturado é um sistema padronizado de infraestrutura de telecomunicações composto por cabos, conectores, painéis de conexão e elementos de organização física. Sua arquitetura é organizada de forma hierárquica e independente dos equipamentos ativos conectados à rede. Essa separação permite que a infraestrutura passiva permaneça em operação por períodos significativamente maiores que os equipamentos eletrônicos que utilizam o sistema. Entre esses equipamentos estão switches, roteadores, pontos de acesso sem fio, controladores industriais e estações de operação, responsáveis pelo processamento, encaminhamento e gerenciamento das comunicações da rede (ANSI/TIA, 2018).

Os equipamentos ativos normalmente acompanham a evolução tecnológica e tendem a ser substituídos diversas vezes ao longo da vida útil da instalação. A infraestrutura de cabeamento, por outro lado, costuma permanecer instalada por décadas. Por esse motivo, decisões tomadas durante a fase de projeto, como a definição da capacidade da infraestrutura ou a escolha da categoria dos cabos, podem influenciar diretamente a capacidade de expansão da rede e os custos associados a futuras modernizações (ANSI/TIA, 2018).

A padronização da infraestrutura também envolve critérios de identificação, rotulagem, organização em painéis de conexão e definição das rotas de cabeamento. Esses elementos facilitam a rastreabilidade dos circuitos e tornam as atividades de operação e manutenção mais previsíveis. Em instalações industriais de grande porte, a ausência desses padrões pode aumentar o tempo necessário para localizar falhas, executar intervenções ou validar alterações na infraestrutura, impactando o MTTR (ANSI/TIA, 2012b).

O cabeamento estruturado vai além da organização física dos cabos e equipamentos. A aplicação de padrões de identificação, documentação e organização

contribui para reduzir erros operacionais e aumentar a confiabilidade da infraestrutura de comunicação ao longo de seu ciclo de vida (ANSI/TIA, 2012b).

2.2.2 Classificação MICE

A seleção dos componentes utilizados em sistemas de cabeamento industrial depende dos requisitos de comunicação da aplicação e das condições ambientais às quais a infraestrutura será submetida. Para auxiliar essa avaliação, as normas ANSI/TIA (2012a) e ISO/IEC (2017) utilizam a classificação MICE, acrônimo para Mechanical, Ingress, Climatic/Chemical e Electromagnetic.

Esse modelo classifica o ambiente de instalação segundo quatro categorias de influência. O parâmetro *Mechanical* (M) está relacionado à exposição a impactos, vibrações e esforços mecânicos. O parâmetro *Ingress* (I) considera a presença de poeira, líquidos e outros agentes capazes de penetrar nos componentes da infraestrutura. O parâmetro *Climatic/Chemical* (C) avalia fatores como temperatura, umidade e exposição a substâncias químicas. Por fim, o parâmetro *Electromagnetic* (E) está associado à presença de interferências eletromagnéticas geradas por equipamentos elétricos e eletrônicos (ANSI/TIA, 2012a; ISO/IEC, 2017).

Para cada um desses quatro fatores ambientais, as normas atribuem um índice numérico de severidade que varia de 1 a 3, descrevendo a intensidade do estresse mecânico ou ambiental presente no local:

- Nível 1 (Comercial): Refere-se a ambientes controlados, típicos de escritórios ou salas de servidores protegidas, onde os esforços e interferências são mínimos;
- Nível 2 (Industrial Leve): Aplica-se a áreas de transição, almoxarifados ou indústrias leves, caracterizadas por automação discreta e estresse moderado;
- Nível 3 (Industrial Pesado): Corresponde ao chão de fábrica de indústrias pesadas ou subestações, locais sujeitos a severas vibrações, lavagens com jatos d'água, corrosão química e forte acoplamento eletromagnético (ANSI/TIA, 2012a; ISO/IEC, 2017).

A combinação desses fatores resulta em uma matriz de severidade específica para cada área da instalação, representada na forma $M_x I_y C_z E_w$ (onde os subíndices correspondem aos níveis de 1 a 3). Essa abordagem fornece critérios para a seleção de cabos, conectores, invólucros e demais componentes da infraestrutura física. Dessa forma, o engenheiro de projetos pode especificar proteções direcionadas, evitando tanto o subdimensionamento quanto o superdimensionamento da rede, e assegurando que a escolha dos materiais atenda às restrições operacionais às quais a instalação estará sujeita.

2.2.3 Backbone e Cabeamento Horizontal

A infraestrutura de cabeamento estruturado é normalmente dividida em subsistemas com funções distintas. Entre eles, destacam-se o backbone e o cabeamento horizontal. O backbone, também denominado cabeamento primário, é responsável pela interligação entre salas técnicas, centros de controle e demais pontos de distribuição da rede. Por concentrar o tráfego proveniente de diferentes segmentos da infraestrutura, esse subsistema exerce papel central na comunicação entre as diversas áreas da instalação (ANSI/TIA, 2018).

O cabeamento horizontal conecta os equipamentos finais à infraestrutura principal da rede. Sensores, atuadores, controladores e demais dispositivos de campo utilizam esse subsistema para acessar os recursos de comunicação disponíveis. Uma falha nesse trecho normalmente afeta um conjunto limitado de equipamentos, mas pode comprometer diretamente a operação dos processos associados a esses dispositivos (ANSI/TIA, 2018).

Os impactos provocados por falhas variam de acordo com o subsistema afetado. Interrupções no backbone podem comprometer simultaneamente múltiplas áreas da instalação, enquanto falhas no cabeamento horizontal tendem a permanecer restritas aos equipamentos conectados ao segmento afetado. Em função dessa criticidade, projetos de redes industriais frequentemente utilizam mecanismos de redundância no backbone para aumentar a disponibilidade da infraestrutura e reduzir os efeitos decorrentes da perda de um caminho de comunicação (Stallings, 2014).

A separação entre backbone e cabeamento horizontal também contribui para a organização e expansão da rede. Essa divisão facilita a incorporação de novos equipamentos e áreas operacionais sem a necessidade de alterações significativas na infraestrutura existente. Por esse motivo, a definição da arquitetura de cabeamento deve considerar não apenas requisitos de distância e capacidade de transmissão, mas também aspectos relacionados à disponibilidade, manutenção e crescimento futuro da instalação (ANSI/TIA, 2018).

2.2.4 Par Trançado

O par trançado é um dos meios de transmissão mais utilizados em redes de comunicação de dados. Sua construção é baseada em pares de condutores de cobre trançados entre si, configuração que reduz a influência de interferências eletromagnéticas externas e minimiza a diafonia entre pares adjacentes. O desempenho desse meio físico é definido por parâmetros como atenuação, diafonia e largura de banda, os quais são utilizados para classificar os cabos nas diferentes categorias estabelecidas pela norma ANSI/TIA (2018) (Stallings, 2014).

Os cabos de par trançado também podem ser classificados de acordo com o

nível de blindagem empregado em sua construção. Os cabos UTP (*Unshielded Twisted Pair*) não utilizam blindagem adicional contra interferências eletromagnéticas. Já configurações como F/UTP (*Foiled Unshielded Twisted Pair*) e S/FTP (*Shielded Foiled Twisted Pair*) incorporam camadas metálicas destinadas a reduzir a suscetibilidade a ruídos externos.

Na Figura 2a, pode ser visualizado um exemplo de cabo sem blindagem, do tipo UTP. A Figura 2b apresenta um exemplo de cabo do tipo S/FTP, com uma camada metálica individual para cada par trançado e uma camada metálica em torno de todos os cabos.

Figura 2 – Exemplos de construção de cabos de par trançado.



Fonte: (QSFPTEK, 2023).

Em ambientes industriais, a definição do tipo de cabo deve considerar fatores como o nível de interferência eletromagnética existente, a proximidade com circuitos de potência e as condições de instalação. Ambientes sujeitos a elevados níveis de ruído elétrico normalmente exigem soluções com maior grau de blindagem para preservar a integridade dos sinais transmitidos (ANSI/TIA, 2018).

Além da transmissão de dados, o par trançado pode ser utilizado para alimentar eletricamente dispositivos conectados à rede por meio da tecnologia Power over Ethernet (PoE). Padronizada pela família IEEE 802.3, essa tecnologia permite que dados e energia elétrica sejam transmitidos simultaneamente pelo mesmo cabo, eliminando a necessidade de alimentação local em diversos tipos de equipamentos (IEEE, 2018).

A utilização de PoE é comum em dispositivos como pontos de acesso sem fio, câmeras IP, telefones VoIP e outros equipamentos de rede. Em aplicações industriais, essa característica pode simplificar a infraestrutura de instalação e reduzir a quantidade de circuitos elétricos dedicados necessários para alimentação dos dispositivos de campo (IEEE, 2018).

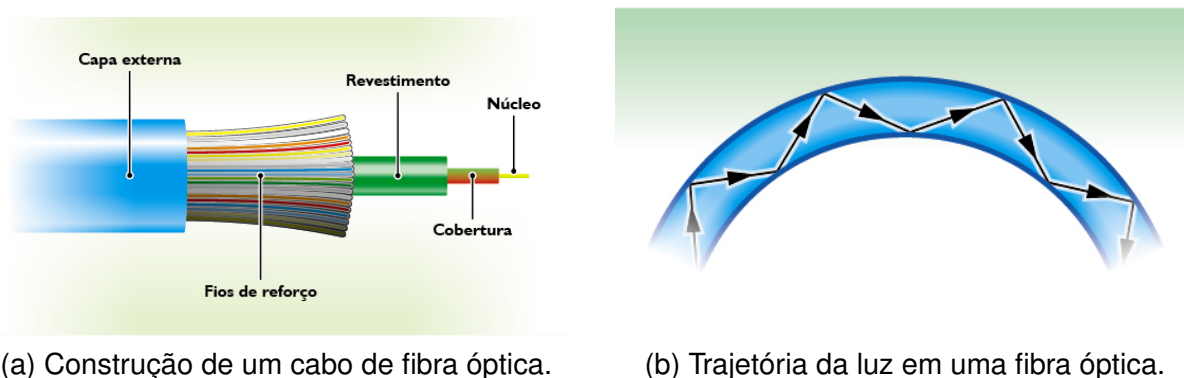
Embora apresente vantagens relacionadas ao custo, facilidade de instalação e ampla disponibilidade de equipamentos compatíveis, o par trançado possui limitações de alcance e maior suscetibilidade a interferências quando comparado a meios ópticos. Por esse motivo, sua aplicação deve considerar as características do ambiente e os requisitos operacionais da rede em que será utilizado.

2.2.5 Fibra Óptica

A fibra óptica é um meio físico de transmissão que utiliza sinais luminosos para transportar informações. Sua estrutura é formada por fibras dielétricas, normalmente produzidas em sílica ou materiais poliméricos, nas quais a propagação da luz ocorre por meio do fenômeno da reflexão interna total. Como não há condução elétrica ao longo do meio de transmissão, a fibra óptica apresenta imunidade a interferências eletromagnéticas e baixas perdas de sinal, características que permitem a transmissão de dados em longas distâncias e com elevadas taxas de comunicação (Stallings, 2014).

A Figura 3a apresenta a construção de um cabo de fibra óptica, composto por: uma capa externa, fios de reforço, revestimento e cobertura, para proteção contra esforços mecânicos; e o núcleo, responsável pelo transporte da luz. Na Figura 3b, pode ser visualizada a trajetória da luz no núcleo de um cabo de fibra óptica.

Figura 3 – Fibra óptica.



(a) Construção de um cabo de fibra óptica.

(b) Trajetória da luz em uma fibra óptica.

Fonte: (IMD/UFRN, s.d.).

As fibras ópticas podem ser classificadas em monomodo ou multimodo de acordo com a quantidade de modos de propagação da luz permitidos em seu núcleo. Os modos de propagação correspondem aos diferentes caminhos que o sinal luminoso pode percorrer ao longo da fibra. Fibras monomodo possuem núcleo de menor diâmetro e permitem a propagação de um único modo de luz, reduzindo os efeitos de dispersão e favorecendo transmissões de longa distância. Fibras multimodo apresentam núcleo de maior diâmetro e permitem a propagação simultânea de múltiplos modos de luz, sendo mais comuns em enlaces de menor extensão devido ao aumento da dispersão modal (Stallings, 2014).

A imunidade a interferências eletromagnéticas e a ausência de condução elétrica tornam a fibra óptica menos suscetível aos efeitos de surtos, diferenças de potencial entre equipamentos e descargas atmosféricas. Essas características favorecem sua utilização em enlaces de backbone e em interligações consideradas críticas para a operação da rede (Stallings, 2014).

A instalação e manutenção de sistemas ópticos exigem procedimentos específicos e maior qualificação técnica quando comparados aos sistemas baseados em par trançado. O núcleo e o revestimento da fibra são sensíveis a esforços mecânicos excessivos, exigindo atenção aos limites de tração e ao raio mínimo de curvatura especificado pelo fabricante. Curvaturas excessivas, deformações ou danos físicos podem aumentar a atenuação do sinal e comprometer o desempenho do enlace.

Atividades como conectorização, fusão e reparo também demandam ferramentas e técnicas especializadas. Por esse motivo, o tempo necessário para diagnóstico e recuperação de falhas pode ser superior ao observado em sistemas metálicos quando não há recursos ou pessoal capacitado para execução dessas atividades (Stallings, 2014).

2.2.6 Comparação entre as Tecnologias

A seleção do meio físico de transmissão deve considerar os requisitos técnicos e operacionais da aplicação. Critérios como distância, imunidade a interferências eletromagnéticas, disponibilidade, capacidade de expansão e custo de implantação influenciam diretamente a escolha entre cabos de par trançado e fibra óptica (Stallings, 2014).

O par trançado apresenta ampla utilização em redes industriais devido à sua facilidade de instalação, compatibilidade com equipamentos Ethernet e suporte à tecnologia Power over Ethernet (PoE). Essa tecnologia permite a transmissão simultânea de dados e energia elétrica pelo mesmo cabo, reduzindo a necessidade de infraestrutura elétrica dedicada para alimentação de dispositivos conectados à rede. Em aplicações industriais, o par trançado é frequentemente utilizado em enlaces de até 100 metros e na conexão de equipamentos como pontos de acesso sem fio, câmeras IP, sensores e outros dispositivos de campo (Stallings, 2014).

A fibra óptica oferece vantagens relacionadas à imunidade a interferências eletromagnéticas, ao maior alcance de transmissão e à elevada capacidade de transporte de dados. Essas características favorecem sua utilização em ambientes com alta concentração de equipamentos elétricos, motores, inversores de frequência e outras fontes de ruído eletromagnético. A tecnologia também é amplamente empregada em enlaces de longa distância e em segmentos de backbone responsáveis pela interligação entre salas técnicas, centros de controle e áreas operacionais da instalação (Stallings, 2014).

Em projetos de redes industriais, a utilização combinada dessas tecnologias é uma prática comum. O par trançado é normalmente empregado na conexão de dispositivos finais e em segmentos horizontais de menor extensão, enquanto a fibra óptica é utilizada em interligações de maior distância ou em trechos cuja disponibilidade e desempenho possuem maior criticidade para a operação da rede (Stallings, 2014).

2.3 ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DE PROJETOS DE ENGENHARIA

O desenvolvimento de projetos de engenharia ocorre de forma progressiva, por meio de etapas sucessivas de definição, análise e detalhamento das soluções propostas. Essa abordagem permite reduzir incertezas ao longo do empreendimento, aumentar a maturidade das informações técnicas produzidas e fornecer subsídios adequados para a tomada de decisão em cada fase do projeto. Segundo a ABNT NBR 16636-1, cada etapa possui objetivos específicos e produtos próprios, que servem de base para o desenvolvimento das etapas subsequentes (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017).

Essa evolução progressiva do nível de maturidade dos projetos não constitui apenas uma boa prática recomendada pelas normas técnicas. A Lei nº 14.133, de 1º de abril de 2021, estabelece uma estrutura semelhante para a contratação de obras e serviços de engenharia pela administração pública, definindo instrumentos como os estudos técnicos preliminares, o PB e o PE como elementos fundamentais para o planejamento e execução dos empreendimentos (Brasil, 2021).

De forma geral, o desenvolvimento de projetos compreende etapas destinadas à avaliação da viabilidade do empreendimento, à concepção da solução, à consolidação dos requisitos técnicos e à elaboração da documentação necessária para sua execução. As principais etapas abordadas nesta seção são o Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica (EVTE), o Estudo Preliminar, o Anteprojeto, o PB e o PE.

2.3.1 Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica

O EVTE corresponde à etapa inicial de análise do empreendimento e tem como objetivo avaliar a viabilidade da solução proposta sob os aspectos técnicos, econômicos, operacionais e, quando aplicável, ambientais. Nessa fase são analisadas alternativas de solução, estimativas preliminares de custos, benefícios esperados, restrições técnicas e fatores de risco que possam influenciar a decisão de prosseguir com o desenvolvimento do projeto (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017).

Os estudos produzidos nessa etapa possuem caráter exploratório e destinam-se principalmente ao suporte das decisões estratégicas relacionadas ao empreendimento. Como o nível de detalhamento ainda é reduzido, as estimativas elaboradas apresentam menor grau de precisão quando comparadas às fases posteriores de desenvolvimento (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017).

A realização do EVTE contribui para a redução de riscos associados ao empreendimento, permitindo identificar antecipadamente limitações técnicas e econômicas que possam comprometer a viabilidade da solução proposta.

2.3.2 Estudo Preliminar

Após a confirmação da viabilidade do empreendimento, inicia-se o desenvolvimento do Estudo Preliminar. Segundo a ABNT NBR 16636-1, essa etapa tem como objetivo consolidar as informações necessárias para compreensão inicial da solução e definição de suas características fundamentais (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017).

Durante o Estudo Preliminar são desenvolvidos arranjos iniciais, concepções funcionais, dimensionamentos preliminares e avaliações técnicas que permitam verificar a adequação da solução aos requisitos estabelecidos. O foco dessa etapa está na definição conceitual do empreendimento e na análise de alternativas capazes de atender às necessidades identificadas.

Embora ainda não apresente nível de detalhamento suficiente para execução, o Estudo Preliminar permite estabelecer uma visão estruturada da solução proposta e fornece subsídios para o desenvolvimento do Anteprojeto.

2.3.3 Anteprojeto

O Anteprojeto corresponde à etapa subsequente ao Estudo Preliminar e tem como finalidade desenvolver e consolidar tecnicamente a solução anteriormente concebida. Nessa fase ocorre o aprofundamento das definições estabelecidas durante os estudos preliminares, com maior nível de detalhamento e melhor caracterização dos elementos que compõem o empreendimento (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017).

De acordo com a ABNT NBR 16636-1, o Anteprojeto deve permitir a compreensão global da solução adotada, contemplando definições técnicas mais consistentes e informações suficientes para subsidiar as etapas posteriores de projeto. Nessa fase são refinados os critérios técnicos, os dimensionamentos e as interfaces entre os diversos elementos do empreendimento (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017).

O Anteprojeto representa um importante marco de maturidade técnica, pois transforma uma concepção preliminar em uma solução tecnicamente estruturada e compatibilizada.

2.3.4 Projeto Básico (PB)

O PB corresponde à etapa em que a solução desenvolvida no Anteprojeto é consolidada com detalhamento suficiente para caracterizar plenamente o empreendimento. Segundo a Lei nº 14.133/2021, o PB deve conter os elementos necessários e suficientes para definir a obra ou serviço, possibilitando a avaliação dos métodos cons-

trutivos, dos custos envolvidos e dos prazos necessários para sua execução (Brasil, 2021).

De forma complementar, a ABNT NBR 16636-1 estabelece que essa etapa deve consolidar os principais critérios técnicos, especificações, requisitos de desempenho e demais informações necessárias para caracterização da solução adotada (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017).

Os documentos produzidos nessa fase normalmente incluem desenhos de engenharia, memoriais descritivos, especificações técnicas e demais elementos necessários para o entendimento completo da solução proposta.

2.3.5 Projeto Executivo (PE)

O PE constitui a etapa final do desenvolvimento do projeto e corresponde ao maior nível de detalhamento técnico do empreendimento. Seu objetivo é fornecer todas as informações necessárias para a execução da solução projetada, contemplando os elementos necessários para fabricação, aquisição, montagem, instalação, construção, testes e comissionamento (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017).

Conforme definido pela Lei nº 14.133/2021, o PE corresponde ao conjunto de elementos necessários e suficientes para execução completa da obra ou serviço, elaborado com base nas definições estabelecidas no PB (Brasil, 2021).

Segundo a ABNT NBR 16636-1, essa etapa deve apresentar detalhamento suficiente para caracterizar todos os elementos do empreendimento, incluindo desenhos executivos, especificações técnicas, listas de materiais, memoriais e demais documentos necessários à sua implementação (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017).

O elevado grau de detalhamento do PE contribui para reduzir ambiguidades de interpretação e minimizar retrabalhos durante a execução das atividades necessárias para implantação da solução projetada.

2.4 DOCUMENTAÇÃO EXECUTIVA PARA IMPLANTAÇÃO DE INFRAESTRUTURAS DE CABEAMENTO

A execução de sistemas industriais depende da disponibilidade de informações técnicas claras, consistentes e padronizadas. Em projetos de engenharia, essas informações são formalizadas por meio da documentação técnica, conjunto de documentos responsáveis por registrar as características da solução projetada, os critérios adotados durante seu desenvolvimento e as informações necessárias para sua implantação, operação e manutenção. A qualidade dessa documentação influencia diretamente a correta execução do empreendimento, a rastreabilidade das decisões de projeto e a redução de inconsistências durante as atividades de campo (Associação Brasileira de

Normas Técnicas, 2016, 2004).

Segundo a ABNT NBR IEC 61082, a documentação técnica constitui um dos principais mecanismos de comunicação entre as diferentes partes envolvidas no ciclo de vida de um sistema eletrotécnico. Por esse motivo, os documentos devem ser elaborados de forma padronizada, garantindo clareza, consistência e uniformidade na representação das informações técnicas (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016).

No contexto de projetos de infraestrutura de comunicação e automação, a documentação executiva é composta por diferentes tipos de documentos destinados a representar aspectos específicos da solução desenvolvida. Entre os documentos mais utilizados destacam-se listas de cabos, memórias de cálculo, desenhos de localização, listas de materiais e diagramas de interligação. Em conjunto, esses documentos fornecem as informações necessárias para aquisição de materiais, execução dos serviços, verificação dos requisitos técnicos e rastreamento das instalações executadas (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016).

2.4.1 Listas de Cabos

As listas de cabos constituem um dos principais documentos utilizados em projetos de infraestrutura de cabeamento. Sua finalidade é registrar de forma organizada todas as interligações previstas entre equipamentos, painéis, racks e pontos de conexão da instalação, servindo como referência para as atividades de montagem, inspeção e manutenção (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016).

Esses documentos normalmente apresentam informações relacionadas à identificação dos cabos, origem, destino, quantidade de vias, tipo construtivo, comprimento estimado, rota de instalação e demais características necessárias para sua correta implementação em campo. A padronização dessas informações contribui para reduzir ambiguidades de interpretação e facilitar a comunicação entre as equipes envolvidas na implantação do empreendimento (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016).

Além de sua função executiva, as listas de cabos desempenham importante papel na rastreabilidade da instalação, permitindo verificar a consistência entre diagramas, desenhos e demais documentos técnicos. Em empreendimentos de grande porte, caracterizados por elevada quantidade de equipamentos e interligações, a correta gestão dessas informações torna-se fundamental para garantir a confiabilidade da infraestrutura implantada.

2.4.2 Memórias de Cálculo

As memórias de cálculo são documentos destinados ao registro dos critérios, premissas, procedimentos e resultados obtidos durante o processo de dimensiona-

mento dos elementos que compõem a instalação. Sua elaboração permite demonstrar que as soluções adotadas atendem aos requisitos técnicos e normativos aplicáveis ao projeto (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004).

De acordo com os princípios estabelecidos pela ABNT NBR 5410, o dimensionamento dos circuitos elétricos deve considerar critérios relacionados à segurança, confiabilidade e desempenho da instalação. Entre os aspectos normalmente avaliados destacam-se a capacidade de condução de corrente dos condutores, os limites admissíveis de queda de tensão, a aplicação de fatores de correção associados à temperatura ambiente e agrupamento de circuitos, bem como os requisitos mínimos estabelecidos para proteção e operação segura da instalação (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004).

Além de documentar os resultados obtidos, as memórias de cálculo fornecem evidências técnicas que permitem verificar a conformidade das soluções adotadas com as premissas de projeto e com os requisitos normativos. Dessa forma, esses documentos desempenham papel fundamental na validação técnica do empreendimento e na rastreabilidade das decisões de engenharia tomadas ao longo do desenvolvimento do projeto.

2.4.3 Desenhos de Localização

Os desenhos de localização têm como objetivo representar graficamente a distribuição física dos equipamentos e elementos da infraestrutura, permitindo visualizar sua disposição espacial e suas interfaces com os demais componentes da instalação (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016).

Esses documentos auxiliam atividades de instalação, inspeção, manutenção e futuras ampliações do sistema, fornecendo informações que facilitam a identificação dos equipamentos em campo e a compreensão da organização física da infraestrutura projetada.

Dessa forma, a documentação executiva não deve ser compreendida apenas como um conjunto de registros administrativos, mas como parte integrante do próprio processo de engenharia. Sua elaboração adequada contribui para garantir a qualidade técnica da solução projetada, reduzir ambiguidades durante a execução e fornecer informações confiáveis para todas as etapas do ciclo de vida da instalação (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016, 2004).

2.5 DIMENSIONAMENTO DE CIRCUITOS DE BAIXA TENSÃO

O dimensionamento de circuitos elétricos de baixa tensão constitui uma das etapas fundamentais do desenvolvimento de projetos elétricos, influenciando diretamente a segurança, a confiabilidade e o desempenho da instalação. Segundo a ABNT

NBR 5410, os condutores devem ser dimensionados de forma a suportar as correntes previstas de operação sem que sejam excedidos os limites térmicos admissíveis, garantindo simultaneamente o atendimento aos requisitos de capacidade de condução de corrente, proteção contra sobrecorrentes e limites máximos de queda de tensão (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004).

De acordo com Mamede Filho (2023), o dimensionamento adequado de condutores não deve considerar apenas a potência das cargas conectadas ao circuito, mas também as condições de instalação, temperatura ambiente, agrupamento de circuitos, dispositivos de proteção e demais fatores capazes de influenciar o comportamento térmico e elétrico da instalação (Mamede Filho, 2023).

2.5.1 Capacidade de Condução de Corrente

A capacidade de condução de corrente corresponde ao valor máximo de corrente que um condutor pode transportar continuamente sem que sua temperatura ultrapasse os limites estabelecidos para o material isolante empregado. Esse critério tem como objetivo preservar a integridade da isolamento, evitar o envelhecimento prematuro dos cabos e garantir condições seguras de operação da instalação (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004).

Os valores de capacidade de condução de corrente fornecidos pelas tabelas da ABNT NBR 5410 são obtidos para condições padronizadas de instalação. Como as condições reais frequentemente diferem dessas condições de referência, torna-se necessária a aplicação de fatores de correção, resultando na capacidade corrigida do condutor.

A capacidade corrigida de condução de corrente do condutor $I_{Z,corr}$ pode ser determinada por:

$$I_{Z,corr} = I_Z \cdot F_T \cdot F_A ,$$

onde:

- $I_{Z,corr}$ é a capacidade corrigida de condução de corrente do condutor [A];
- I_Z é a capacidade nominal de corrente obtida nas tabelas normativas [A];
- F_T é o fator de correção de temperatura;
- F_A é o fator de correção devido ao agrupamento de circuitos.

Para que o condutor seja adequadamente dimensionado, a corrente de projeto do circuito I_B deve satisfazer a condição apresentada a seguir:

$$I_B \leq I_{Z,corr} ,$$

em que:

- I_B é a corrente de projeto do circuito [A];
- $I_{Z,corr}$ é a capacidade corrigida de condução de corrente do condutor [A].

A determinação dos fatores de correção e dos valores de capacidade de corrente depende das características da instalação, incluindo método de instalação, número de condutores carregados, temperatura ambiente e tipo de isolamento utilizado (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004).

2.5.2 Queda de Tensão

Durante a circulação de corrente elétrica pelos condutores ocorre uma redução gradual da tensão disponível ao longo do circuito em função da impedância elétrica dos cabos. Esse fenômeno, denominado queda de tensão, deve permanecer dentro dos limites estabelecidos pela norma para garantir o adequado funcionamento dos equipamentos conectados à instalação (Mamede Filho, 2023).

Para circuitos monofásicos em corrente alternada, a queda de tensão ΔV pode ser estimada por:

$$\Delta V = 2 \cdot I \cdot L \cdot (R \cos \varphi + X \sin \varphi) , \quad (1)$$

onde:

- ΔV é a queda de tensão [V];
- I é a corrente do circuito [A];
- L é o comprimento do circuito [m];
- R é a resistência elétrica do condutor [Ω/m];
- X é a reatância do condutor [Ω/m];
- φ é o ângulo de defasagem da carga.

Para a avaliação percentual da queda de tensão $\Delta V_{\%}$, utiliza-se:

$$\Delta V_{\%} = \frac{\Delta V}{V_n} \times 100 ,$$

onde:

- $\Delta V_{\%}$ é a queda de tensão percentual;
- V_n é a tensão nominal do circuito [V].

Em circuitos alimentados em corrente contínua, situação frequentemente encontrada em sistemas auxiliares industriais, sistemas de automação e redes de comunicação alimentadas por bancos de baterias, a reatância pode ser desprezada e o fator de potência deixa de existir. Nessas condições, a Equação (1) reduz-se à expressão:

$$\Delta V = 2 \cdot I \cdot L \cdot R .$$

A ABNT NBR 5410 estabelece limites máximos admissíveis para a queda de tensão entre a origem da instalação e os pontos de utilização, visando assegurar o correto desempenho dos equipamentos alimentados (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004).

2.5.3 Proteção Contra Sobrecorrentes

Além dos critérios térmicos e de queda de tensão, o dimensionamento dos condutores deve considerar a coordenação adequada entre os cabos e os dispositivos de proteção contra sobrecorrentes. Segundo a ABNT NBR 5410, essa coordenação tem como objetivo garantir que os dispositivos de proteção atuem antes que os condutores sejam submetidos a temperaturas capazes de comprometer sua integridade (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004).

As relações fundamentais para a coordenação contra correntes de sobrecarga são estabelecidas pelos seguintes limitantes:

$$I_B \leq I_N \leq I_{Z,corr} \quad \text{e} \quad I_2 \leq 1,45 \cdot I_{Z,corr} ,$$

onde:

- I_B é a corrente de projeto do circuito [A];
- I_N é a corrente nominal do dispositivo de proteção [A];
- $I_{Z,corr}$ é a capacidade corrigida de condução de corrente do condutor [A];
- I_2 é a corrente de atuação convencional do dispositivo de proteção [A].

O atendimento a esses critérios garante que o dispositivo de proteção seja capaz de conduzir a corrente normal de operação sem atuações indevidas e, simultaneamente, interrompa circuitos em sobrecarga antes que os condutores sofram danos térmicos severos (Mamede Filho, 2023).

2.5.4 Seleção da Seção dos Condutores

A escolha da seção nominal dos condutores deve atender simultaneamente aos critérios de capacidade de condução de corrente, proteção contra sobrecorrentes,

queda de tensão e requisitos mínimos estabelecidos pela ABNT NBR 5410 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004).

Segundo Mamede Filho (2023), o dimensionamento deve ser realizado de forma iterativa, verificando sucessivamente todos os critérios aplicáveis até que seja encontrada uma seção capaz de atender simultaneamente às exigências térmicas, elétricas e operacionais da instalação (Mamede Filho, 2023).

Dessa forma, a seleção dos condutores não deve ser baseada exclusivamente na corrente demandada pela carga. O dimensionamento adequado requer a análise conjunta dos critérios apresentados nas Seção 2.5.1, Equação (1) e Seção 2.5.3, garantindo que a instalação apresente níveis adequados de segurança, desempenho e confiabilidade ao longo de sua vida útil. Os resultados desse processo são normalmente consolidados em memórias de cálculo, documentos responsáveis por registrar as premissas adotadas, os critérios normativos considerados e os resultados obtidos durante o desenvolvimento do projeto.

3 A REDE DE TECNOLOGIA DA AUTOMAÇÃO E SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO (RTA) DO PLANO DE ATUALIZAÇÃO TECNOLÓGICA DA USINA HIDRELÉTRICA DE ITAIPU BINACIONAL

Este capítulo apresenta o problema tratado no presente trabalho, descrevendo o empreendimento, a infraestrutura objeto de estudo e o escopo do PE de cabeamento da RTA. A Seção 3.1 apresenta uma visão geral da Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional, enquanto a Seção 3.2 descreve a atuação da Nova Engevix no empreendimento. A Seção 3.3 contextualiza o Plano de Atualização Tecnológica da usina e a Seção 3.4 apresenta a arquitetura da RTA, seus equipamentos e a infraestrutura de alimentação associada. Por fim, a Seção 3.5 descreve as etapas do PE de cabeamento da RTA, bem como os principais documentos técnicos elaborados durante essa fase do projeto.

3.1 USINA HIDRELÉTRICA DE ITAIPU BINACIONAL

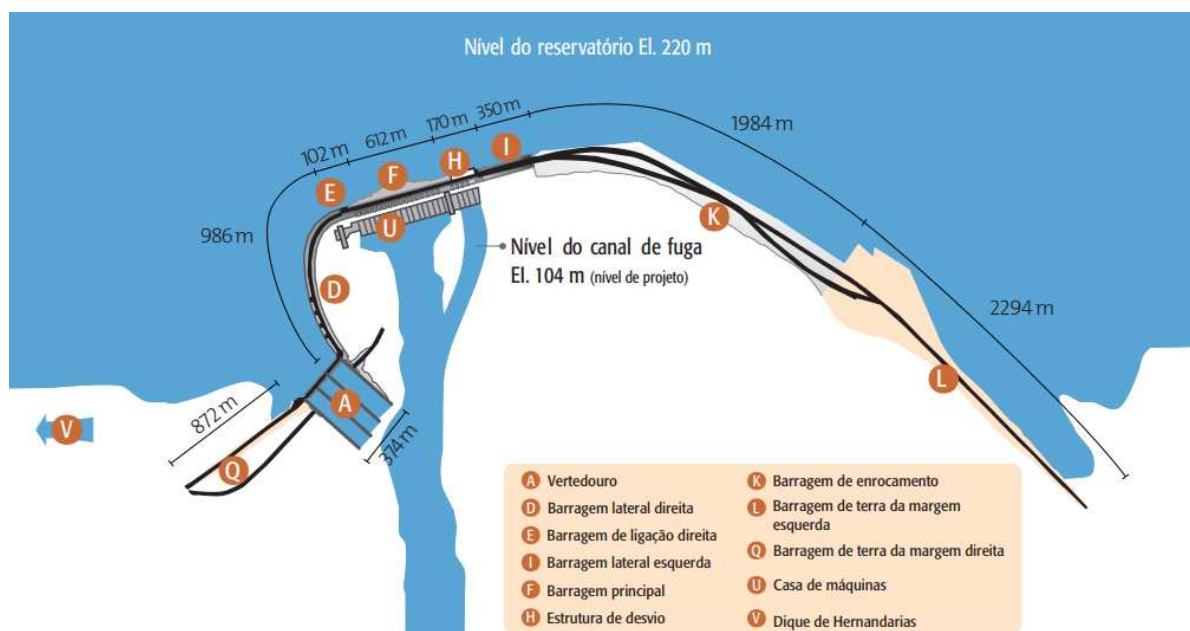
A Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional está localizada no Rio Paraná, na fronteira entre o Brasil e o Paraguai, e figura entre os maiores empreendimentos hidrelétricos do mundo. Sua implantação foi viabilizada pelo Tratado de Itaipu, firmado entre os dois países em 1973, que estabeleceu as bases para o aproveitamento conjunto do potencial hidrelétrico da região. As obras civis tiveram início em 1975 e a primeira unidade geradora entrou em operação em 1984. Desde então, a usina desempenha papel estratégico no atendimento à demanda energética brasileira e paraguaia, fornecendo cerca de 7% e 87% da energia elétrica total consumida por cada país, respectivamente, sendo reconhecida pela elevada confiabilidade operacional e pelos expressivos índices de geração de energia ao longo de sua história (ITAIPU Binacional, 2022, 2026).

A dimensão física do empreendimento evidencia sua elevada complexidade de engenharia. O barramento possui aproximadamente 7719 metros de extensão e altura máxima de 196 metros, sendo composto por trechos em concreto, enrocamento e terra. A Casa de Força abriga 20 unidades geradoras, responsáveis pela conversão da energia hidráulica em energia elétrica nas frequências de 50 Hz e 60 Hz, destinadas ao atendimento dos sistemas elétricos do Paraguai e do Brasil, respectivamente. A Área Industrial da usina compreende, além da Casa de Força, Barragem Principal, Barragem Lateral e Vertedouro. O conjunto dessas instalações caracteriza um empreendimento de grande porte, cuja operação depende da integração contínua entre sistemas elétricos, mecânicos, civis, de automação e de telecomunicações (ITAIPU Binacional, 2022).

A estrutura da usina é apresentada na Figura 4. Destacam-se: Barragem Principal (F) e trechos adjacentes (D, E, H, I), responsáveis pela formação do reservatório e pela tomada d'água; Casa de Força (U), estrutura que abriga as unidades geradoras e os sistemas auxiliares; e Vertedouro (A), estrutura destinada ao controle da vazão

excedente do reservatório.

Figura 4 – Estrutura da Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional.



Fonte: (ITAIPU Binacional, 2022).

A relevância de Itaipu Binacional ultrapassa sua capacidade instalada. A energia produzida pela usina representa parcela significativa do consumo do Paraguai e contribui de forma expressiva para o atendimento da demanda do Sistema Interligado Nacional brasileiro. Em razão dessa importância estratégica, a disponibilidade dos sistemas que compõem a usina é um requisito essencial, uma vez que interrupções operacionais podem produzir impactos técnicos, econômicos e energéticos de grande abrangência (ITAIPU Binacional, 2022).

A operação de uma instalação dessa magnitude depende da integração de milhares de equipamentos distribuídos por diferentes setores da usina, incluindo sistemas de proteção, automação, supervisão, telecomunicações e infraestrutura elétrica. Grande parte desses sistemas foi concebida entre as décadas de 1970 e 1980, utilizando tecnologias compatíveis com os requisitos existentes à época. Entretanto, a evolução dos sistemas industriais, o avanço das tecnologias de comunicação e o aumento das exigências relacionadas à disponibilidade, interoperabilidade e manutenção evidenciaram limitações decorrentes da obsolescência tecnológica desses equipamentos.

Esse cenário motivou a implantação do Plano de Atualização Tecnológica da Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional. Trata-se de um empreendimento de grande porte, desenvolvido ao longo de vários anos e envolvendo investimentos expressivos, cujo objetivo é modernizar os sistemas de automação, supervisão, comunicação e infraestrutura associados à operação da usina. Entre as diversas frentes de atuação do

projeto está a renovação da infraestrutura de comunicação industrial, tema diretamente relacionado ao escopo deste trabalho.

3.2 HOLDING NOVA PARTICIPAÇÕES

A origem da atual holding Nova Participações remonta à fundação da Engevix S.A. – Estudos e Projetos de Engenharia, em 1965. Inicialmente dedicada à engenharia consultiva, a empresa consolidou sua atuação no setor de infraestrutura e participou do desenvolvimento de diversos empreendimentos de geração de energia, incluindo importantes usinas hidrelétricas no Brasil. A partir da década de 1970, ampliou suas atividades para projetos internacionais, destacando-se a participação na Usina Hidrelétrica de Palmar, no Uruguai (Nova Participações S.A., s.d.).

Ao longo de sua trajetória, a empresa incorporou novas tecnologias ao processo de desenvolvimento de projetos e ampliou continuamente sua capacidade técnica. Entre os marcos desse processo estão a adoção de sistemas de projeto assistido por computador (CAD) e a obtenção das certificações ISO 9001, ISO 14001 e OHSAS 18001, tornando-se a primeira empresa brasileira de engenharia consultiva a reunir essas certificações simultaneamente (Nova Participações S.A., s.d.).

Entre 2007 e 2010, a atuação da empresa foi expandida para novos segmentos do setor energético e industrial. Nesse período foram implantadas as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) Esmeralda, no Rio Grande do Sul, e Santa Laura, em Santa Catarina, além da criação da Ecovix, empresa voltada à construção naval para atendimento às demandas da indústria de petróleo e gás (Nova Participações S.A., s.d.).

Atualmente, a Nova Participações S.A. atua como holding e controla empresas voltadas às áreas de engenharia, construção e geração de energia. Entre elas destaca-se a Nova Engevix Engenharia e Projetos S.A., responsável pelo desenvolvimento de estudos, projetos, gerenciamento, supervisão e integração de empreendimentos nos setores de infraestrutura, transportes, saneamento, energia e indústria. A empresa possui escritórios em diferentes regiões do país e participa de projetos de grande porte nos setores público e privado (Nova Participações S.A., s.d.).

No Plano de Atualização Tecnológica da Itaipu Binacional, a Nova Engevix Engenharia integra o CMI e participa do desenvolvimento de diferentes disciplinas de engenharia relacionadas à modernização da usina. Entre essas atividades está a elaboração do PE da RTA, responsável pelo detalhamento da infraestrutura de comunicação necessária à implantação dos novos sistemas de automação e telecomunicações.

O presente trabalho foi desenvolvido nesse contexto, tendo como foco as atividades relacionadas ao desenvolvimento do PE da RTA. O escopo compreende a elaboração da documentação executiva associada à infraestrutura de cabeamento, incluindo desenhos, listas de materiais, listas de cabos e memórias de cálculo utilizados

durante o processo de implantação da rede de comunicação industrial.

3.3 PLANO DE ATUALIZAÇÃO TECNOLÓGICA

A Itaipu Binacional iniciou, em 2022, o maior processo de modernização realizado desde a entrada em operação da usina. Denominado Plano de Atualização Tecnológica, o empreendimento foi concebido para preservar a confiabilidade operacional da instalação nas próximas décadas por meio da substituição e atualização dos sistemas de controle, proteção, supervisão, automação, telecomunicações e serviços auxiliares. O plano possui duração estimada de 14 anos e já reúne aproximadamente US\$ 670 milhões em investimentos contratados, caracterizando um dos maiores projetos de modernização em andamento no setor hidrelétrico mundial. Diferentemente de uma reforma convencional, a atualização tecnológica concentra-se nos sistemas responsáveis pela operação e supervisão da usina, mantendo em serviço equipamentos eletromecânicos de grande porte, como turbinas, rotores e geradores, que permanecem em condições adequadas de operação.

A execução do projeto está sob responsabilidade do CMI, e inclui empresas especializadas em diferentes disciplinas de engenharia, entre elas a Nova Engevix. O plano contempla a modernização dos sistemas das 20 unidades geradoras, da subestação isolada a gás, dos serviços auxiliares, das comportas do vertedouro, da barragem e da Subestação da Margem Direita. Além da substituição de equipamentos obsoletos, o empreendimento prevê a adoção de plataformas digitais de automação, sistemas avançados de monitoramento, recursos de segurança cibernética e novas soluções para operação e manutenção da usina.

Um dos principais desafios desse empreendimento é executar a modernização sem interromper a operação da usina. Para isso, as atividades são realizadas de forma planejada e gradual, permitindo que os sistemas existentes permaneçam em funcionamento enquanto os novos equipamentos e infraestruturas são implantados. Essa característica aumenta significativamente a complexidade técnica do projeto, exigindo elevado nível de coordenação entre as equipes de engenharia, construção, montagem, comissionamento e operação.

Entre as disciplinas contempladas pelo Plano de Atualização Tecnológica está o desenvolvimento da infraestrutura necessária para instalação dos novos sistemas elétricos, de automação e de telecomunicações. Nesse contexto, a Nova Engevix é responsável pela elaboração dos projetos de infraestrutura destinados à implantação de painéis elétricos, transformadores, geradores a diesel, racks de comunicação, Access Points (APs), sistemas de cabeamento estruturado e backbone óptico. Esses projetos fornecem as informações técnicas necessárias para instalação, integração e operação dos novos equipamentos previstos no plano de modernização.

A renovação da infraestrutura de comunicação representa uma das etapas es-

senciais desse processo, pois os novos sistemas de automação dependem de uma rede capaz de atender aos requisitos atuais de disponibilidade, capacidade de transmissão, rastreabilidade e facilidade de manutenção. O desenvolvimento do PE da RTA, objeto do presente documento, está inserido nesse contexto e constitui uma das entregas necessárias para viabilizar a implantação da nova infraestrutura de comunicação da usina.

3.4 REDE DE TECNOLOGIA DA AUTOMAÇÃO E SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO (RTA)

A RTA é um conjunto de infraestruturas de comunicação e processamento de dados que juntas formam uma plataforma destinada a dar suporte à implementação de sistemas e serviços voltados para o atendimento das necessidades dos usuários da Área Industrial de Itaipu Binacional, destacando-se os sistemas de monitoramento e diagnóstico (ITAIPU Binacional, 2017).

A motivação para a RTA está diretamente associada à obsolescência da infraestrutura existente. Com o passar dos anos, os sistemas de comunicação da usina demonstraram limitações em termos de cobertura, desempenho e integração. Essas deficiências impactam a eficiência operacional, a segurança da rede e a capacidade de expansão, comprometendo a resiliência da usina frente às demandas por inovação tecnológica. Assim, tornou-se essencial modernizar a infraestrutura de comunicação, garantindo conectividade de alta performance, segurança, e capacidade de atender às demandas futuras sem interrupções.

3.4.1 Arquitetura da RTA

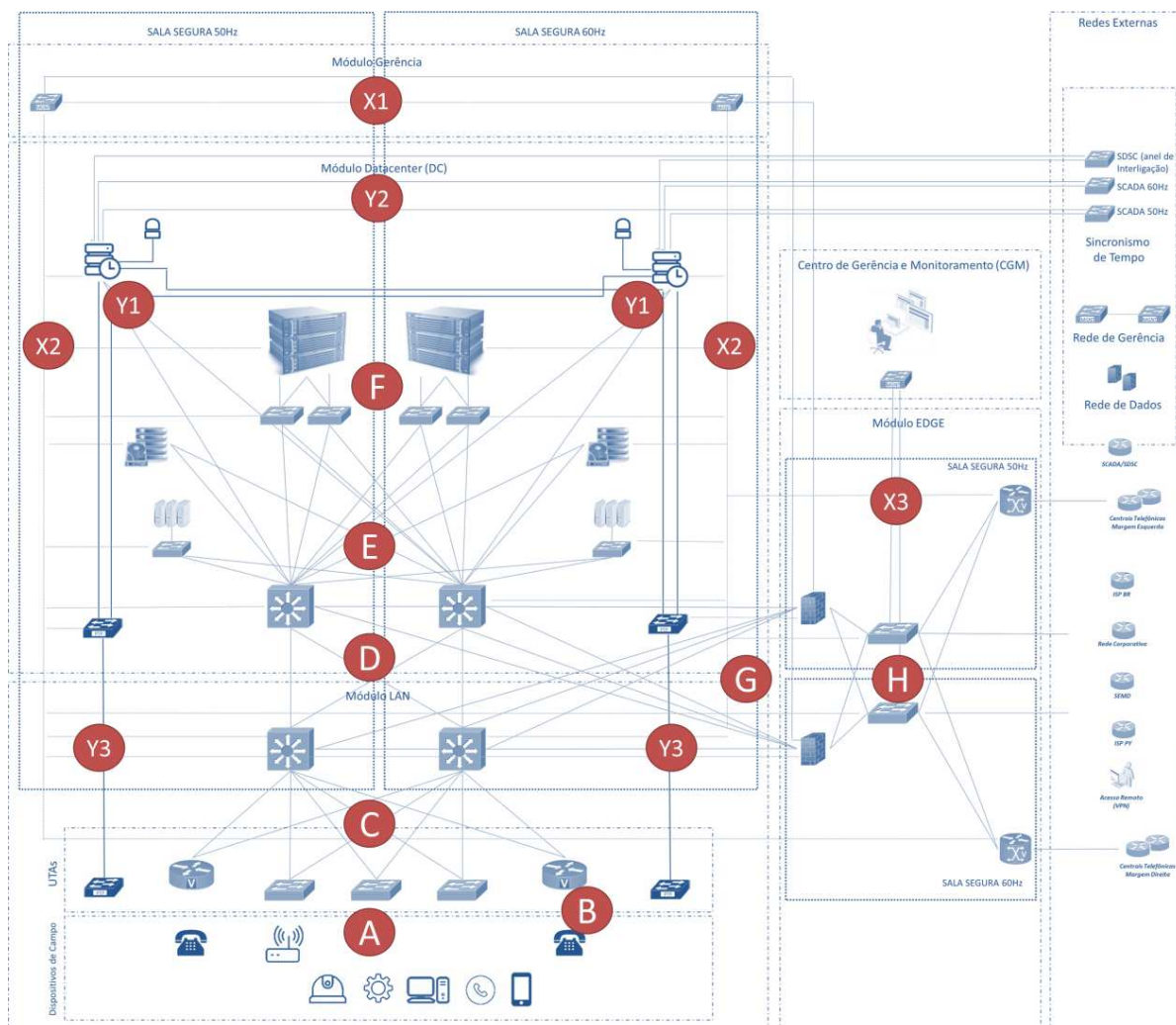
A RTA foi concebida para fornecer a infraestrutura de comunicação da Área Industrial da Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional, suportando os sistemas de monitoramento e diagnóstico, além dos serviços de comunicação utilizados por usuários, equipamentos e sistemas de automação. Seu objetivo é ampliar e modernizar a infraestrutura de comunicações existente, oferecendo uma plataforma com elevada disponibilidade, escalabilidade e segurança, capaz de acompanhar a evolução tecnológica da usina ao longo das próximas décadas (ITAIPU Binacional, 2017).

A arquitetura da RTA adota uma organização modular e hierárquica, na qual as diferentes funções da rede são distribuídas em módulos especializados que atuam de forma integrada. Essa abordagem facilita a expansão da infraestrutura, reduz impactos durante manutenções e permite que novos sistemas sejam incorporados sem comprometer a operação dos serviços existentes (ITAIPU Binacional, 2017).

A arquitetura proposta pode ser visualizada na Figura 5. Os elementos representados pela cor azul são equipamentos de rede, como switches, pontos de acesso e

servidores. Os grandes retângulos externos representam divisões lógicas da RTA. Por fim, as letras representam tipos de conexões entre equipamentos.

Figura 5 – Arquitetura da RTA.



Fonte: (ITAIPU Binacional, 2016).

A arquitetura é composta pelos módulos Datacenter, LAN, EDGE e Gerenciamento, responsáveis, respectivamente, pelo processamento e armazenamento de dados, pela conectividade dos dispositivos finais, pela integração segura com redes externas e pelo gerenciamento da infraestrutura de comunicação (ITAIPU Binacional, 2017).

O módulo Datacenter concentra a capacidade computacional da RTA, hospedando servidores, sistemas de armazenamento, aplicações de automação, monitoramento, telefonia e demais serviços necessários à operação da rede. Sua arquitetura é distribuída entre duas Salas Seguras, localizadas nos setores de 50 Hz e 60 Hz da usina, proporcionando redundância física e elevada disponibilidade aos serviços críticos (ITAIPU Binacional, 2017). As principais interligações relacionadas a esse módulo são as conexões com o módulo LAN, indicadas pela letra D na Figura 5. Essas

associações garantem que os dispositivos do módulo LAN possam distribuir acesso à capacidade computacional dos Datacenters.

O módulo LAN é responsável por disponibilizar conectividade aos usuários e dispositivos distribuídos pela Área Industrial. Sua arquitetura é dividida em duas camadas: Core LAN e Acesso LAN. O Core LAN concentra as funções de roteamento, controle de tráfego, qualidade de serviço, políticas de segurança e interligação com os demais módulos da RTA. Já a camada de Acesso LAN é formada pelas Unidades Terminais de Automação (UTAs), distribuídas ao longo da usina, responsáveis por conectar equipamentos de campo, computadores, telefones IP, câmeras, pontos de acesso sem fio e demais dispositivos finais à infraestrutura de comunicação (ITAIPU Binacional, 2017). A conexão entre Core LAN e Acesso LAN é destacada pela letra C na Figura 5. As conexões entre as UTAs e os equipamentos de campo são indicadas pelas letras A e B.

O módulo EDGE realiza a interface entre a RTA e redes externas, implementando mecanismos de proteção de borda, controle de acesso e segmentação do tráfego. Complementarmente, o módulo de Gerenciamento reúne os sistemas responsáveis pelo monitoramento da infraestrutura, gerenciamento de configuração, supervisão de desempenho, controle de falhas e gerenciamento de segurança, centralizando a administração operacional da rede (ITAIPU Binacional, 2017).

Complementando os módulos funcionais da RTA, o Backbone Óptico constitui a infraestrutura responsável pela interligação física entre os principais pontos de concentração da rede. Essa infraestrutura conecta as Salas Seguras dos setores de 50 Hz e 60 Hz, onde estão instalados os datacenters da usina, às Salas de Comunicações de 50 Hz e 60 Hz e à Sala de Telecomunicações distribuídas pela Área Industrial. Por meio dessa arquitetura, são estabelecidos caminhos ópticos redundantes entre os diferentes segmentos da rede, permitindo a comunicação entre os módulos da RTA e assegurando elevada disponibilidade, alta capacidade de transmissão e continuidade operacional mesmo na ocorrência de falhas em enlaces individuais (ITAIPU Binacional, 2017, 2016).

A dimensão dessa infraestrutura evidencia a complexidade do projeto. A arquitetura da RTA prevê aproximadamente 50 UTAs, cerca de 530 APs distribuídos pela Área Industrial, switches de acesso, switches de núcleo, firewalls, servidores, equipamentos de sincronismo de tempo, sistemas de telefonia IP, monitoramento por vídeo e diversas soluções de gerenciamento e segurança integradas em uma única plataforma de comunicação (ITAIPU Binacional, 2017). Além disso, todos esses equipamentos são interligados por uma extensa infraestrutura de cabeamento estruturado e backbone óptico, responsável por conectar ambientes distribuídos ao longo da Barragem, da Casa de Força, do Vertedouro e das demais instalações industriais da usina.

A especificação técnica da RTA prevê a instalação de aproximadamente 120 qui-

lômetros de cabos ópticos e metálicos, incluindo enlaces de backbone, interligações entre UTAs e datacenters, cabeamento para pontos de acesso sem fio e conexões destinadas aos equipamentos finais. Em diversos trechos, os enlaces ultrapassam centenas de metros de extensão e percorrem galerias, salas técnicas e estruturas industriais distribuídas por toda a usina, impondo desafios significativos ao planejamento das rotas, ao dimensionamento da infraestrutura e à elaboração da documentação executiva (ITAIPU Binacional, 2017).

Nesse contexto, o desenvolvimento do PE de cabeamento estruturado representa uma etapa fundamental para a implantação da RTA. A definição das rotas de cabos, da infraestrutura de suporte, da distribuição dos equipamentos e da documentação técnica deve garantir que toda essa infraestrutura possa ser instalada, operada e mantida de forma segura, organizada e compatível com os requisitos de disponibilidade e expansão estabelecidos para a Atualização Tecnológica da Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional.

3.4.2 Equipamentos da RTA

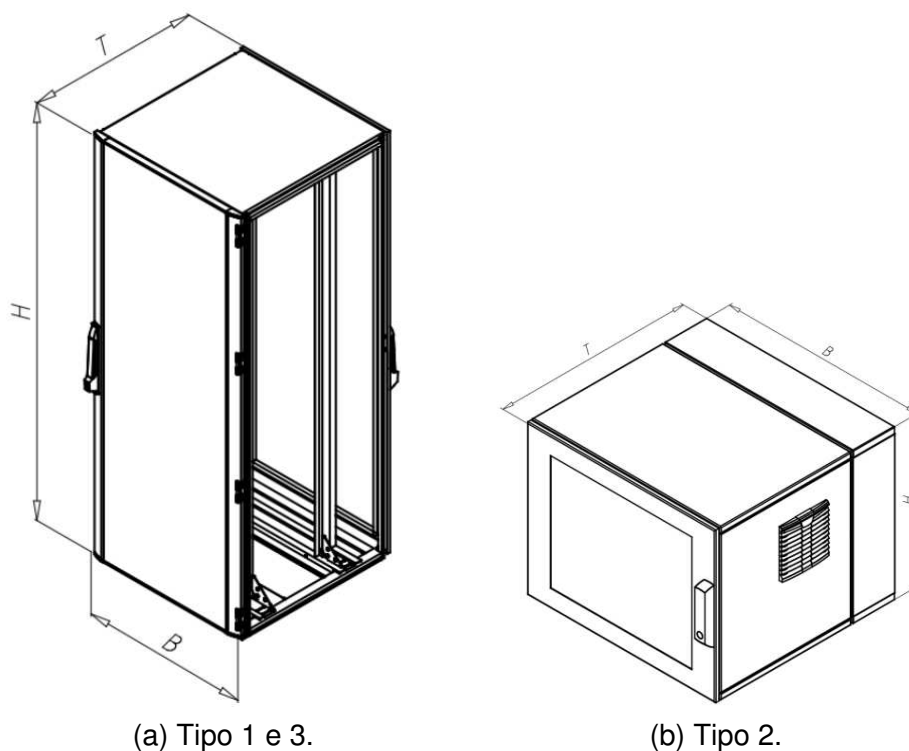
A infraestrutura da RTA é composta por diferentes equipamentos responsáveis pela distribuição da comunicação, concentração dos enlaces, cobertura da rede sem fio e interface entre a infraestrutura de cabeamento e os dispositivos finais. Em conjunto, esses elementos constituem a infraestrutura física necessária para operação dos sistemas de automação, supervisão e telecomunicações previstos na Atualização Tecnológica da Itaipu Binacional. Os principais equipamentos que compõem essa infraestrutura são descritos a seguir.

- **UTAs:** as UTAs constituem os principais pontos de distribuição da camada de Acesso LAN da RTA. Cada unidade abriga switches responsáveis pela conexão dos equipamentos de campo e pela concentração das interligações destinadas aos demais elementos da rede. Independentemente do tipo, todas as UTAs possuem capacidade para 24 portas ópticas e 24 portas metálicas, diferenciando-se principalmente pela aplicação e pela forma de instalação. As UTAs Tipo 1 são destinadas ao atendimento de equipamentos instalados em galerias da usina e são montadas diretamente sobre o piso. As UTAs Tipo 2 destinam-se às áreas administrativas, salas técnicas e escritórios, sendo instaladas em parede e apresentando dimensões reduzidas em relação aos demais modelos. Já as UTAs Tipo 3 possuem instalação sobre o piso e são utilizadas principalmente para atendimento da infraestrutura de telefonia IP, podendo atender simultaneamente equipamentos instalados em galerias, salas e escritórios (ITAIPU Binacional, 2017, 2016).

O modelo de rack das UTAs Tipo 1 e 3 pode ser visualizado na Figura 6a, en-

quanto o das UTAs Tipo 2 pode ser visualizada na Figura 6b. Destaca-se a diferença de tamanho entre os dois modelos, sendo o Tipo 2 um modelo mais compacto, direcionado para locais menores, e os tipos 1 e 3 equipamentos mais robustos, com maior margem para aumento na capacidade de conexões. Ambos são racks metálicos fechados, com suportes internos para fixação de dispositivos de rede.

Figura 6 – UTAs.



(a) Tipo 1 e 3.

Fonte: (Lightera, 2024).

(b) Tipo 2.

Fonte: (Lightera, 2023).

- **Racks Abertos do Backbone Óptico (RAs):** os RAs integram o Backbone Óptico da RTA e concentram as interligações ópticas entre os diferentes segmentos da infraestrutura. A arquitetura prevê dois RAs principais, instalados nas Salas Seguras dos setores de 50 Hz e 60 Hz, responsáveis por concentrar os enlaces provenientes de todas as UTAs da usina, além das interligações com os demais RAs distribuídos pela infraestrutura. Esses equipamentos estabelecem a interface entre o Backbone Óptico e os datacenters, funcionando como elementos centrais da comunicação da rede. Além dos RAs localizados nas Salas Seguras, a arquitetura contempla RAs instalados nas principais salas de comunicação da usina. Esses equipamentos concentram a distribuição local do Backbone Óptico e realizam a interligação entre as diferentes áreas industriais e os datacenters, contribuindo para a organização da infraestrutura e para a implementação dos caminhos redundantes previstos na arquitetura da RTA (ITAIPU Binacional, 2017, 2016).

Um exemplo dos RAs pode ser visualizado na Figura 7. É um rack metálico do tipo aberto, com suportes padronizados para fixação de equipamentos de rede.

Figura 7 – RA.



Fonte: (Lightera, 2025).

- **APs:** os APs são responsáveis por disponibilizar conectividade sem fio aos usuários e dispositivos móveis distribuídos pela Área Industrial. A arquitetura da RTA prevê três modelos de equipamentos, selecionados de acordo com o ambiente de instalação e a área de cobertura requerida. Os APs do tipo Industrial Medium Range (MR) destinam-se a ambientes industriais internos, oferecendo cobertura para áreas de médio alcance. Os equipamentos do tipo Industrial Long Range (LR) são empregados em locais que demandam maior raio de cobertura, normalmente em áreas abertas ou de maiores dimensões. Já os APs do tipo Escritório (E) são utilizados em ambientes administrativos e escritórios, onde as condições ambientais permitem a utilização de equipamentos destinados a aplicações corporativas (ITAIPU Binacional, 2017, 2016).

A Figura 8a apresenta o modelo de Access Point (AP) do tipo MR e LR, e a Figura 8b apresenta o modelo de AP do tipo E. Observa-se que o primeiro modelo apresenta uma estrutura mais reforçada em relação ao segundo. Essa diferença está relacionada às condições ambientais às quais cada um deles será submetido. Os APs do tipo MR e LR ficarão localizados em áreas industriais expostas à poeira e à umidade e, por isso, contam com uma construção mais robusta.

Figura 8 – APs.



(a) Tipo MR e LR.

Fonte: (Cisco Systems, 2021).



(b) Tipo E.

Fonte: (Cisco Systems, 2020).

- **Pontos de Terminação Óptica (PTOs):** os PTOs constituem caixas de terminação óptica instaladas próximas aos APs dos tipos MR e LR. Esses equipamentos realizam a interface entre a infraestrutura óptica proveniente das UTAs, a infraestrutura de alimentação elétrica dos Painéis de Distribuição de Tensão Estabilizada (PDEs) e os respectivos APs, permitindo a terminação, organização e proteção das fibras ópticas utilizadas nesses enlaces. Cada AP dos tipos MR e LR está associado a um Ponto de Terminação Óptica (PTO), instalado na parede em posição adjacente ao equipamento (ITAIPU Binacional, 2017, 2016).

A Figura 9 apresenta o modelo de PTO utilizado na RTA. Esses equipamentos são caixas metálicas que contam com suportes internos para fixação de dispositivos de rede e alimentação direcionados à operação dos APs tipo MR e LR.

Figura 9 – PTO.



Fonte: (Rittal, 2026).

- **Pontos de Terminação Metálica (PTMs):** os PTMs constituem os pontos de terminação metálica da infraestrutura de cabeamento estruturado. Instalados

próximos aos APs do tipo E, esses dispositivos realizam a interface entre o cabeamento metálico proveniente dos switches instalados nas UTAs e o equipamento de rede propriamente dito. Cada AP do tipo E possui um Ponto de Terminação Metálica (PTM) dedicado, permitindo a organização, identificação e manutenção das conexões metálicas da infraestrutura (ITAIPU Binacional, 2017, 2016).

A Figura 10 apresenta o modelo de PTM utilizado na RTA. Esses equipamentos são caixas de plástico com portas metálicas para a conexão dos APs tipo E.

Figura 10 – PTM.



Fonte: (Lightera, 2026).

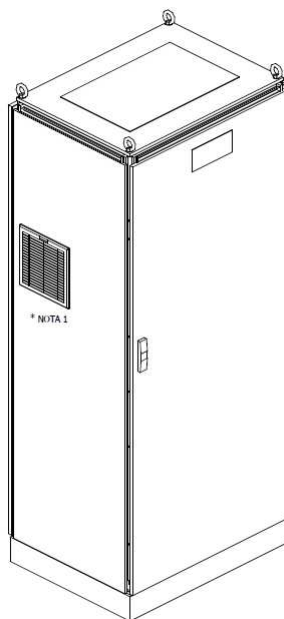
3.4.3 Alimentação da RTA

Além da infraestrutura de comunicação, a RTA dispõe de uma infraestrutura elétrica dedicada, responsável por garantir o fornecimento de energia aos equipamentos da rede. A distribuição de energia da RTA é realizada por meio dos Painel de Distribuição de Tensão Estabilizadas (PDEs), projetados para fornecer tensão estabilizada aos equipamentos distribuídos pela usina.

Cada PDE recebe duas alimentações independentes provenientes de painéis elétricos de iluminação existentes da usina: uma em corrente alternada (220 Vca) e outra em corrente contínua (125 Vcc). Internamente, os PDEs incorporam sistemas de conversão de energia, transformadores de isolamento, dispositivos de proteção contra surtos, disjuntores de distribuição e circuitos de supervisão, garantindo o fornecimento de energia às cargas conectadas (ITAIPU Binacional, 2017). O detalhamento dos sistemas e componentes internos ao PDE não faz parte do escopo do presente documento, mas é importante mencioná-los.

A Figura 11 apresenta o PDE. Esses painéis possuem uma estrutura externa reforçada feita de aço carbono, além de outras especificações que garantem sua operação segura na Área Industrial de Itaipu.

Figura 11 – PDE.



Fonte: (Consórcio Modernização Itaipu, 2025).

Na Casa de Força estão previstos 30 PDEs, distribuídos ao longo das diferentes elevações da usina. Em geral, cada painel atende aos equipamentos instalados em sua região de abrangência, sendo normalmente associado a uma única Unidade Terminal de Automação (UTA). Em situações específicas, um mesmo PDE pode alimentar mais de uma UTA, embora essa configuração seja utilizada apenas em situações específicas onde não existam outro PDE nas proximidades..

Os PDEs são responsáveis por alimentar UTAs, os PTOs e o Rack Aberto do Backbone Óptico (RA) instalado na Sala de Telecomunicações. Os demais RAs, localizados nas Salas Seguras e nas Salas de Comunicações, são alimentados pelos painéis elétricos existentes nessas instalações, não fazendo parte do escopo do projeto de alimentação desenvolvido para a RTA.

Os PTOs desempenham também a função de distribuição da alimentação destinada aos APs dos tipos LR e MR. Nessa configuração, o cabo proveniente do PDE alimenta a fonte interna do PTO, que disponibiliza energia elétrica ao AP.

Para os APs do tipo E, a alimentação é realizada por meio de Power over Ethernet (PoE). Nesse caso, o switch instalado na UTA fornece simultaneamente energia elétrica e comunicação através do cabo de par trançado até o PTM, que funciona como ponto de terminação da infraestrutura metálica. A partir do PTM, o AP é conectado à rede, dispensando a necessidade de alimentação elétrica dedicada no ponto de instalação.

3.5 PROJETO EXECUTIVO DE CABEAMENTO DA RTA

A implantação da infraestrutura de cabeamento da RTA depende do desenvolvimento de um conjunto de documentos técnicos que definem as características construtivas da rede e orientam sua execução em campo. Esses documentos são elaborados ao longo das diferentes etapas do projeto, desde a definição da concepção da infraestrutura até o detalhamento necessário para aquisição de materiais e instalação dos cabos e equipamentos.

Esta seção apresenta as etapas de desenvolvimento do PE de cabeamento da RTA e os principais documentos produzidos durante essa fase, com destaque para as listas de cabos e as memórias de cálculo. Esses documentos constituem o foco deste trabalho e representam a principal documentação utilizada para o detalhamento da infraestrutura de cabeamento prevista para a Atualização Tecnológica da Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional.

3.5.1 Etapas do Projeto

O desenvolvimento do projeto de cabeamento da RTA foi estruturado em etapas, nas quais o nível de detalhamento técnico aumenta progressivamente até a emissão da documentação necessária para execução da instalação. Cada etapa possui objetivos específicos e produz documentos que servem de base para a fase seguinte.

O Estudo Preliminar e o Anteprojeto compõem a fase inicial do projeto, na qual são levantadas as necessidades da infraestrutura de comunicação da Área Industrial da Itaipu Binacional. Nessa etapa são analisadas as características dos ambientes, as restrições construtivas existentes e os requisitos técnicos estabelecidos pelas especificações do empreendimento.

Com base nas definições estabelecidas no Estudo Preliminar, é elaborado o PB. Essa etapa consolida a concepção da rede e define a infraestrutura necessária para sua implantação. São estabelecidas as localizações das UTAs, dos APs, dos PDEs, dos RAs, dos PTMs e dos PTOs, bem como a arquitetura geral do cabeamento estruturado. Também são produzidos documentos conceituais, como os Desenhos de Localização de UTAs e APs (DLUAs) e os Diagramas de Localização e Distribuição de PDEs (DLDPs), que definem a distribuição física dos equipamentos e servem como referência para o detalhamento executivo.

O PE corresponde à etapa de detalhamento do projeto. A partir das definições estabelecidas no PB, são elaborados todos os documentos necessários para aquisição dos materiais, execução da instalação e fiscalização dos serviços. No projeto de cabeamento da RTA, essa etapa contempla o desenvolvimento das LCU's, das LCP's, das LCRA's e das MCDC's. Esses documentos especificam os cabos previstos no projeto, suas origens e destinos, tipos, comprimentos, critérios de identificação e respectivos di-

mensionamentos, permitindo que a implantação seja realizada conforme os requisitos técnicos definidos para a rede.

3.5.2 Listas de Cabos

As listas de cabos constituem um dos principais documentos do PE de cabeamento da RTA. Seu objetivo é definir todas as interligações físicas previstas na infraestrutura da rede, especificando a origem e o destino de cada cabo, seu tipo, identificação, comprimento e demais informações necessárias para instalação e manutenção. Em função das diferentes arquiteturas presentes na RTA, as listas são divididas conforme o subsistema ao qual pertencem.

- **LCUs:** as LCUs descrevem todos os cabos associados a cada UTA. Esse documento contempla as interligações de Acesso LAN, entre os switches instalados na UTA e os equipamentos atendidos por ela, incluindo PTOs e PTMs.
- **LCRAs:** as LCRAs reúnem os cabos pertencentes ao backbone óptico e a camada de CORE LAN da RTA, responsável pela interligação entre os RAs, e com as UTAs.
- **LCPs:** as LCPs relacionam os cabos associados aos PDEs. Esses documentos descrevem as interligações entre os PDEs e os equipamentos alimentados por eles como UTAs, PTOs e RA.

3.5.3 Memórias de Cálculo de Dimensionamento de Cabos

As MDCDs são documentos elaborados com o objetivo de justificar tecnicamente o dimensionamento dos cabos de alimentação elétrica associados aos PDEs. Esses documentos demonstram que os condutores especificados atendem aos critérios estabelecidos pelas normas técnicas e pelos requisitos do empreendimento, garantindo o funcionamento seguro da infraestrutura elétrica da RTA.

Cada memória de cálculo está associada a uma elevação da usina e reúne os cálculos utilizados para definir a seção dos condutores empregados na alimentação dos circuitos elétricos. O dimensionamento considera critérios como capacidade de condução de corrente, queda de tensão e suportabilidade a curto-circuito, assegurando que os cabos selecionados atendam às condições de operação previstas para cada circuito.

Esses documentos permitem verificar a conformidade do projeto, facilitam o processo de análise técnica e constituem um registro das premissas adotadas durante o desenvolvimento do PE.

4 ELABORAÇÃO DO PROJETO EXECUTIVO DE CABEAMENTO DA RTA

A elaboração do PE da infraestrutura de cabeamento da RTA compreendeu um conjunto de atividades voltadas à transformação das definições estabelecidas durante o PB em documentos técnicos aptos para a implantação da rede. Esse processo envolveu o estudo das especificações técnicas do empreendimento, a organização das informações de projeto, o cadastramento dos elementos da infraestrutura em banco de dados corporativo, a definição dos percursos de cabeamento, o dimensionamento dos circuitos de alimentação elétrica e a geração das listas de cabos e memórias de cálculo. Além das atividades de engenharia, o desenvolvimento da documentação também exigiu a adoção dos procedimentos de gestão de documentos estabelecidos para o empreendimento, garantindo rastreabilidade, controle de revisões e conformidade com os requisitos contratuais.

A Seção 4.1 apresenta a metodologia adotada para o desenvolvimento do PE, abrangendo o estudo dos documentos de referência, a utilização do banco de dados corporativo, a elaboração da documentação técnica e o processo de gestão e emissão dos documentos. Em seguida, a Seção 4.2 descreve os principais requisitos técnicos que orientaram o desenvolvimento do projeto. A Seção 4.3 apresenta a estrutura das listas de cabos e os procedimentos empregados para elaboração das Lista de Cabos das Unidades Terminais de Automações (LCUs), das Lista de Cabos dos Racks Abertos do Backbone Ópticos (LCRAs) e das Lista de Cabos dos Painéis de Distribuição de Tensão Estabilizadas (LCPs). Na sequência, a Seção 4.4 descreve o desenvolvimento das MDCs, abordando os critérios de dimensionamento e a organização da documentação técnica correspondente. A Seção 4.5 trata do processo de emissão e aprovação dos documentos. Por fim, a Seção 4.6 apresenta uma síntese das principais atividades desenvolvidas ao longo do capítulo e dos resultados obtidos durante a elaboração do PE da infraestrutura de cabeamento da RTA.

4.1 METODOLOGIA PROPOSTA

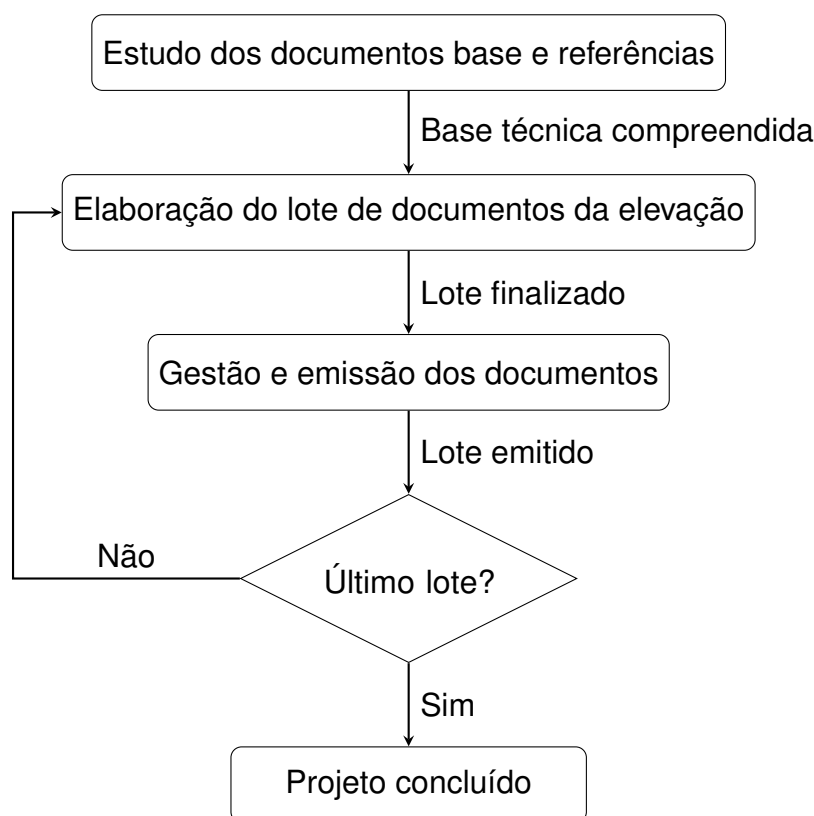
A metodologia proposta para o desenvolvimento deste trabalho foi estruturada em duas etapas principais. A primeira consistiu no estudo das especificações técnicas, normas e documentos produzidos durante o PB, com o objetivo de compreender a arquitetura da RTA, os critérios de projeto e as informações necessárias para o desenvolvimento da documentação executiva. A segunda etapa compreendeu a elaboração e a emissão dos documentos do PE, incluindo as listas de cabos e as memórias de cálculo.

Por questões contratuais, a implantação da infraestrutura da RTA foi planejada para ocorrer de forma progressiva, iniciando pelas elevações inferiores da Casa de Força e avançando gradualmente para as elevações superiores. Em função desse

planejamento, os documentos referentes às elevações inferiores receberam prioridade durante sua elaboração, de modo a atender ao cronograma executivo da obra. O Apêndice C apresenta a lista completa de documentos, classificados de acordo com o índice de prioridade.

Os documentos foram organizados em lotes, sendo cada lote correspondente a uma elevação da Casa de Força. O desenvolvimento teve início pela elevação 57,25 e prosseguiu sucessivamente até a elevação 144,55. Após a conclusão dos documentos de uma determinada elevação, eles eram encaminhados ao processo de Gestão e Emissão dos Documentos (GED). Enquanto esse lote seguia para análise e aprovação, iniciava-se a elaboração dos documentos da elevação seguinte. Esse fluxo, apresentado na Figura 12, foi repetido até a conclusão e emissão do último lote previsto para o projeto.

Figura 12 – Fluxograma da metodologia proposta.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Cada etapa do diagrama acima será descrito em detalhes na sequência.

4.1.1 Banco de dados

A elaboração das listas de cabos foi realizada com auxílio de um banco de dados corporativo desenvolvido pela Nova Engevix para o gerenciamento das informações dos projetos de engenharia. A aplicação é acessada por meio de uma plataforma web

e centraliza os dados utilizados durante o desenvolvimento do projeto, permitindo o cadastro, a atualização e a consulta das informações de forma integrada.

Na Figura 13 é apresentada uma visualização do banco de dados. Nela pode-se observar, na faixa de opções da esquerda, os módulos do sistema, os quais serão descritos ao longo desta seção.

Figura 13 – Banco de dados.

	Tag Referência	Tag Sigla1	Tag Sigla2	Tag Sigla3	Tag Sigla4	Ciclo de Vida	Fase do Projeto	Ordenação	Descrição
	PTO-AP05-UTAI.II	PTO-AP05-UTAI.II				Em Uso	Projetado	2505	Ponto de
	PTO-AP06-UTAI.09	PTO-AP06-UTAI.09				Em Uso	Projetado	2506	Ponto de
	PTO-AP06-UTAI.II	PTO-AP06-UTAI.II				Em Uso	Projetado	2507	Ponto de
	PTO-AP07-UTAI.09	PTO-AP07-UTAI.09				Em Uso	Projetado	2508	Ponto de
	PTO-AP08-UTAI.09	PTO-AP08-UTAI.09				Em Uso	Projetado	2510	Ponto de
	PTO-AP07-UTAI.II	PTO-AP07-UTAI.II				Em Uso	Projetado	2509	Ponto de
	PTO-AP08-UTAI.II	PTO-AP08-UTAI.II				Em Uso	Projetado	2511	Ponto de
	PTO-AP09-UTAI.09	PTO-AP09-UTAI.09				Em Uso	Projetado	2512	Ponto de
	PTO-AP09-UTAI.II	PTO-AP09-UTAI.II				Em Uso	Projetado	2513	Ponto de
	PTO-API0-UTAI.09	PTO-API0-UTAI.09				Em Uso	Projetado	2514	Ponto de
	PTO-API0-UTAI.II	PTO-API0-UTAI.II				Em Uso	Projetado	2515	Ponto de
	PTO-APII-UTAI.09	PTO-APII-UTAI.09				Em Uso	Projetado	2516	Ponto de

Fonte: Banco de dados da Nova Engenix.

O banco de dados é estruturado em módulos interdependentes, nos quais cada conjunto de informações é armazenado de forma organizada e posteriormente relacionado aos demais módulos. Essa estrutura reduz a duplicidade de informações e garante consistência entre os diferentes documentos produzidos ao longo do projeto.

Os registros podem ser realizados diretamente pela interface web ou por meio da importação de arquivos no formato CSV. Nesse segundo caso, os dados são extraídos do banco, editados externamente e posteriormente importados novamente para atualização dos registros.

Os principais módulos utilizados durante o desenvolvimento deste trabalho são apresentados a seguir.

- **Siglas:** responsável pelo cadastro das siglas utilizadas no projeto. Nesse módulo são registrados os identificadores de equipamentos, salas, estruturas, painéis, racks e demais elementos da infraestrutura, formando a base para os demais módulos do banco de dados.
- **Quadros:** contém o cadastro dos equipamentos, incluindo suas tags, localização e informações construtivas. Esse módulo depende do cadastro prévio das respectivas siglas, estabelecendo uma relação direta com o módulo de Siglas.
- **Cabos:** responsável pelo cadastro de todos os cabos previstos no projeto. Para cada cabo são registradas informações como identificação, tipo, código do mate-

rial e características construtivas, permitindo sua posterior associação às interligações da rede.

- **Vias de Cabos:** contém o cadastro das vias utilizadas para passagem dos cabos ao longo da usina. Nesse módulo são registradas as eletrocalhas, eletrodutos, canaletas e demais elementos que compõem os percursos de cabeamento da infraestrutura.
- **Cabeamento:** constitui o principal módulo utilizado na elaboração das listas de cabos. Nele são cadastradas as interligações entre os equipamentos, associando cada conexão a um cabo previamente cadastrado e ao conjunto de vias que compõe seu percurso. Esse módulo integra automaticamente as informações provenientes dos módulos de Quadros, Cabos e Vias de Cabos, formando a estrutura utilizada para geração das listas de cabos.
- **Relatórios:** responsável pela geração dos documentos do projeto. Esse módulo consolida as informações cadastradas no banco de dados e as organiza conforme o padrão de documentos adotado pelo empreendimento, permitindo a exportação das listas de cabos em formatos como PDF e Excel.

Além das informações específicas de cada módulo, todos os registros do banco de dados possuem classificações destinadas ao controle do estado dos elementos ao longo do empreendimento. As principais classificações utilizadas são o **Ciclo de Vida** e a **Fase do Projeto**, aplicadas aos módulos de Siglas, Cabos e Vias de Cabos.

O Ciclo de Vida indica a situação operacional de cada elemento da infraestrutura, podendo assumir os estados Em Uso, Cancelado, A Substituir ou A Retirar. Já a Fase do Projeto identifica a condição do elemento em relação ao empreendimento, sendo classificada como Existente, Projetado ou Provisório.

No escopo deste trabalho, todos os elementos da RTA foram cadastrados com Ciclo de Vida igual a Em Uso e Fase do Projeto igual a Projetado, uma vez que a infraestrutura desenvolvida corresponde a novos equipamentos e novos sistemas previstos na Atualização Tecnológica. As demais classificações são utilizadas em outras disciplinas do empreendimento, nas quais coexistem equipamentos existentes, provisórios e substituídos durante o processo de modernização da usina.

4.1.2 Estudo dos Documentos Base e Referências

O desenvolvimento dos documentos do PE teve início com o estudo das especificações técnicas e dos documentos elaborados durante o PB. Essa etapa teve como objetivo compreender os requisitos do projeto, a arquitetura da RTA, os critérios adotados para a infraestrutura de cabeamento e as definições de localização dos equi-

pamentos. As informações obtidas serviram de base para a elaboração das listas de cabos e das memórias de cálculo.

- **Especificação Técnica de Equipamentos e Sistemas do Controle Centralizado (ETCCR):** a ETCCR (ITAIPU Binacional (2017)) define os requisitos técnicos da RTA, estabelecendo sua arquitetura, os equipamentos que compõem a rede, as funcionalidades previstas para cada subsistema e os critérios gerais de implantação. O estudo desse documento permitiu compreender a organização da infraestrutura de comunicação, a função das UTAs, dos APs, do backbone óptico e dos demais elementos considerados no PE.
- **Critérios e Requisitos Básicos de Cabeamento Estruturado (CRBCE):** o CRBCE (ITAIPU Binacional (2016)) estabelece os critérios de projeto para a infraestrutura de cabeamento estruturado da Área Industrial da Itaipu Binacional. O documento apresenta a arquitetura da RTA, os requisitos mínimos para aplicação de cabos metálicos e ópticos, as características dos ambientes de instalação e as especificações técnicas dos materiais utilizados na implantação da RTA.
- **Critérios de Projetos Elétricos (CPE):** o CPE (Consórcio Modernização de Itaipu (2024)) reúne os critérios adotados no desenvolvimento dos projetos elétricos do empreendimento. Seu estudo permitiu compreender os requisitos aplicáveis ao dimensionamento dos circuitos de alimentação, aos critérios de instalação e às premissas utilizadas para elaboração das memórias de cálculo dos cabos elétricos associados aos PDEs.
- **Critério de Codificação de Vias e Cabos Elétricos e Ópticos (CCVC):** o CCVC (Campaner e Souza (2025)) define o padrão de identificação das vias e dos cabos elétricos e ópticos utilizados no empreendimento. Esse documento estabelece as regras de codificação adotadas em todos os documentos do projeto.
- **Planilha de Associação de UTAs e APs (PAUA):** a PAUA reúne as informações de interligação entre as UTAs e os respectivos APs. Esse documento foi elaborado pelo autor durante o PB, e utilizado para visualizar quais equipamentos são atendidos por cada UTA, servindo como referência para identificação das interligações presentes nas listas de cabos. Um recorte da PAUA pode ser observado na Figura 14, onde cada linha representa um AP e cada coluna representa uma informação atrelada a esse equipamento.

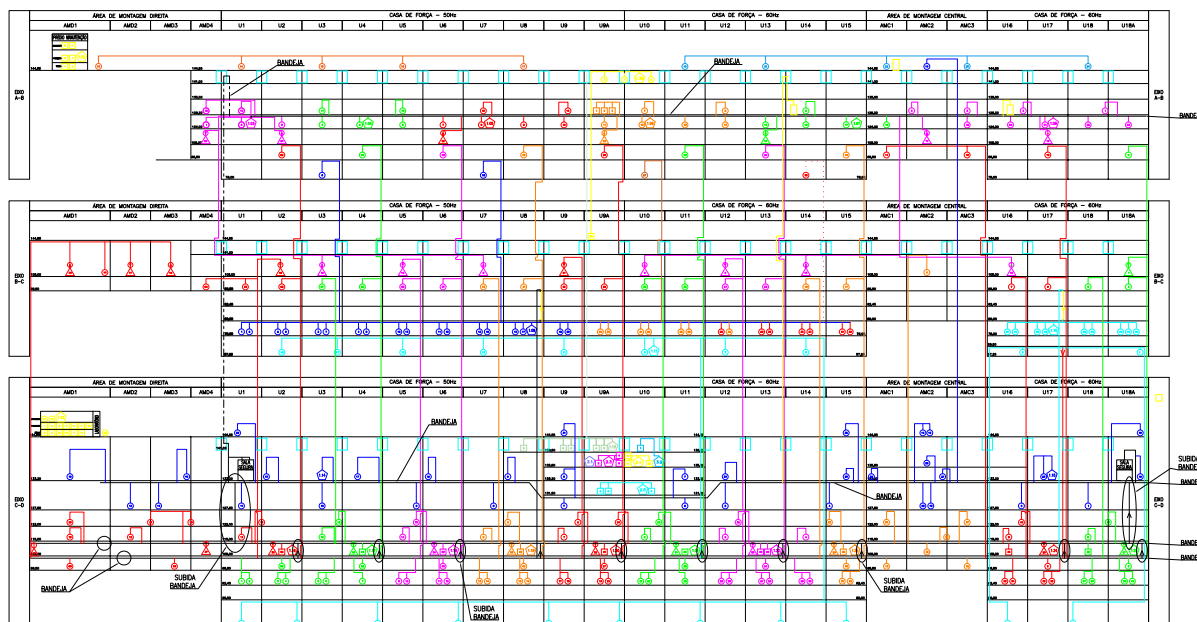
Figura 14 – Recorte da planilha de associação de UTAs e APs.

AP							UTA				
Elevação	Eixo	Unidade Geradora	TAG definitiva	TAG Site Survey	Tipo	Local	Elevação	Eixo	Unidade Geradora	TAG	Local
144,55	A-B	AMD1	AP05-UTA1.02	AP05	E 20m	CASA DE FORÇA	144,55	A-B	AMD1	UTA1.02	CASA DE FORÇA
144,55	A-B	AMD1	AP06-UTA1.02	AP06	E 20m	CASA DE FORÇA	144,55	A-B	AMD1	UTA1.02	CASA DE FORÇA
124,00	A-B	AMD4	AP01-UTA1.03	AP01	MR 30m	CASA DE FORÇA	124,00	A-B	U1	UTA1.03	CASA DE FORÇA
124,00	A-B	U1	AP02-UTA1.03	AP02	MR 30m	CASA DE FORÇA	124,00	A-B	U1	UTA1.03	CASA DE FORÇA
124,00	A-B	U2	AP03-UTA1.03	AP03	MR 30m	CASA DE FORÇA	124,00	A-B	U1	UTA1.03	CASA DE FORÇA
108,00	B-C	U7	AP08-UTA1.03	AP08	LR 80m	CASA DE FORÇA	124,00	A-B	U1	UTA1.03	CASA DE FORÇA
108,00	B-C	U3	AP10-UTA1.03	AP10	LR 80m	CASA DE FORÇA	124,00	A-B	U1	UTA1.03	CASA DE FORÇA
128,20	A-B	U1	AP12-UTA1.03	AP12	MR 30m	CASA DE FORÇA	124,00	A-B	U1	UTA1.03	CASA DE FORÇA
128,20	A-B	AMD4	AP13-UTA1.03	AP13	MR 30m	CASA DE FORÇA	124,00	A-B	U1	UTA1.03	CASA DE FORÇA
108,00	A-B	U2	AP24-UTA1.03	AP24	LR 80m	CASA DE FORÇA	124,00	A-B	U1	UTA1.03	CASA DE FORÇA
108,00	A-B	AMD4	AP26-UTA1.03	AP26	LR 80m	CASA DE FORÇA	124,00	A-B	U1	UTA1.03	CASA DE FORÇA
124,00	A-B	U3	AP04-UTA1.04	AP04	MR 30m	CASA DE FORÇA	124,00	A-B	U4	UTA1.04	CASA DE FORÇA
124,00	A-B	U4	AP05-UTA1.04	AP05	MR 30m	CASA DE FORÇA	124,00	A-B	U4	UTA1.04	CASA DE FORÇA
124,00	A-B	U5	AP06-UTA1.04	AP06	MR 30m	CASA DE FORÇA	124,00	A-B	U4	UTA1.04	CASA DE FORÇA

Fonte: Elaborado pelo autor.

- **Desenho de Associação entre UTAs e APs (DAUA):** o DAUA apresenta a localização física e as interligações das UTAs e dos APs ao longo da Casa de Força. Esse desenho foi elaborado pelo autor durante o PB, e foi utilizado para validar a distribuição dos equipamentos e visualizar as interligações previstas entre os dispositivos da rede. O DAUA pode ser observado na Figura 15, onde:
 - os pentágonos representam as UTAs;
 - os círculos representam os APs tipo MR;
 - os triângulos representam os APs tipo LR;
 - os quadrados representam os APs tipo E;
 - as linhas representam as conexões entre UTAs e APs;
 - as cores destacam os grupos de APs conectados a cada UTA, de forma que os equipamentos próximos e conectados compartilham da mesma cor.

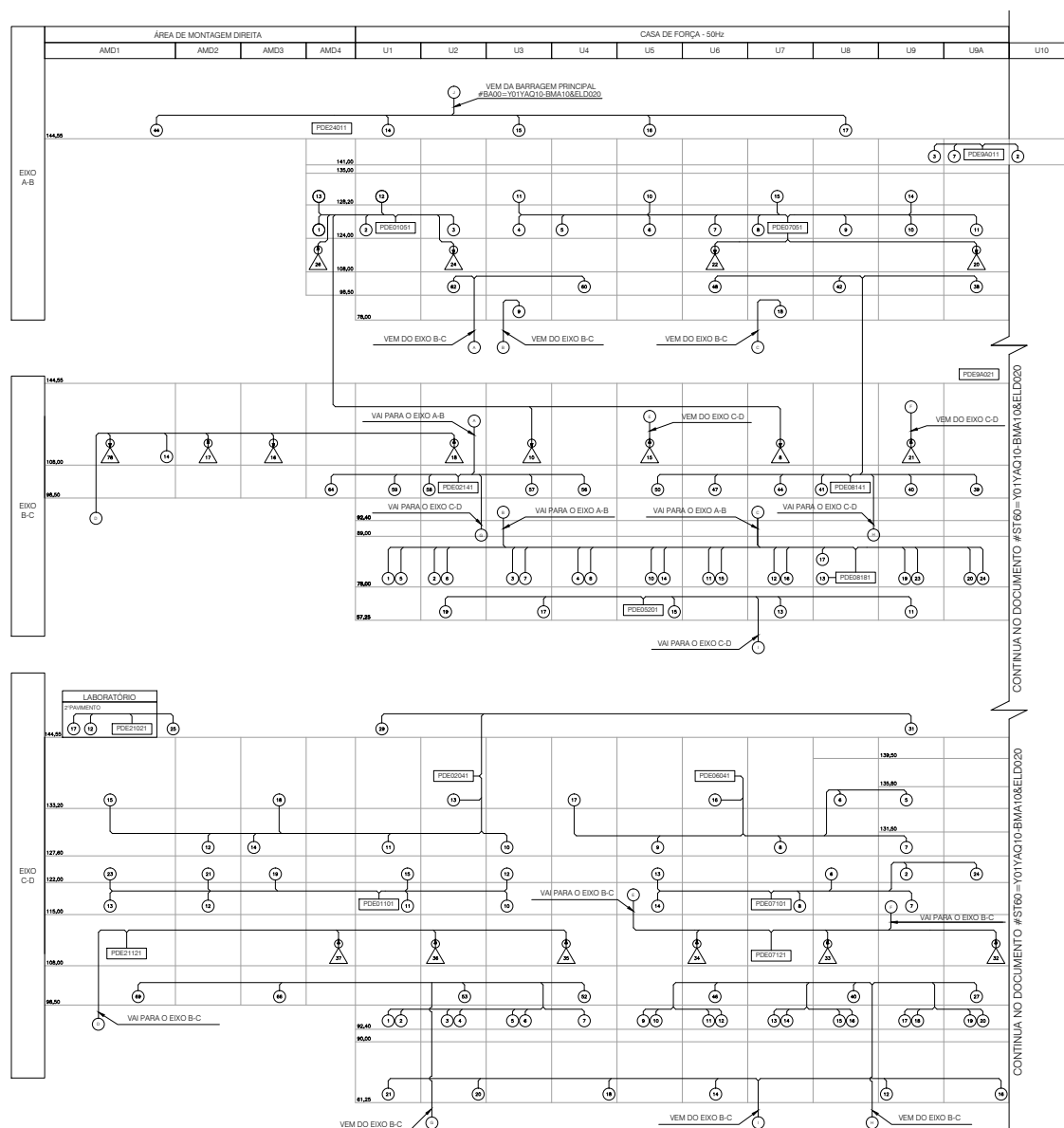
Figura 15 – Desenho de Associação entre UTAs e APs da Casa de Força.



Fonte: Elaborado pelo autor.

- **DLDPs:** os DLDPs apresentam a localização dos PDEs e os circuitos de alimentação elétrica associados à infraestrutura da RTA. Esses documentos forneceram as informações necessárias para identificação dos pontos de alimentação dos equipamentos e serviram de base para elaboração das LCPs e das respectivas Memória de Cálculo de Dimensionamento dos Cabos (MCDC). Um exemplo de Diagrama de Localização e Distribuição de PDEs (DLDP) pode ser observado na Figura 16, onde:
 - os retângulos representam os PDEs;
 - os círculos representam os APs tipo MR;
 - os triângulos representam os APs tipo LR;
 - as linhas representam as conexões entre PDEs e APs/PTOs.

Figura 16 – Recorte do DLDP da Casa de Força 50 Hz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.3 Elaboração dos Documentos

Após o estudo das especificações técnicas e o levantamento das informações de projeto, teve início a elaboração dos documentos executivos da infraestrutura de cabeamento da RTA. Essa etapa compreendeu o cadastro das informações no banco de dados corporativo, a identificação das características dos cabos, a determinação dos percursos de instalação, o dimensionamento dos circuitos de alimentação elétrica e a geração da documentação técnica correspondente.

- Cadastro no banco de dados: foram cadastradas no banco de dados as informações referentes aos equipamentos, cabos e vias de cabeamento, estabelecendo a estrutura necessária para o desenvolvimento das listas de cabos.

- Codificação de cabos: foram definidos os códigos de identificação dos cabos, em conformidade com os critérios estabelecidos pelo CCVC, garantindo padronização e rastreabilidade dos elementos da infraestrutura.
- Definição de percursos e comprimento de cabos: essa atividade foi realizada a partir da análise do modelo tridimensional da usina utilizando o software Revit Viewer, permitindo identificar as vias de cabeamento percorridas por cada interligação e determinar os respectivos comprimentos de instalação.
- Dimensionamento de cabos: para os circuitos de alimentação elétrica dos PDEs, foi realizado o dimensionamento dos cabos, considerando os critérios de capacidade de condução de corrente, queda de tensão, suportabilidade a curto-circuito, seção mínima e coordenação entre condutor e dispositivo de proteção. Os cálculos foram desenvolvidos em planilha do Microsoft Excel.
- Geração das listas de cabos: as listas de cabos foram produzidas por meio do módulo de relatórios do banco de dados, responsável por integrar os itens cadastrados e gerar os documentos padronizados do empreendimento nos formatos PDF e Excel.
- Produção das memórias de cálculo: as memórias de cálculo foram elaboradas no Microsoft Word, reunindo os critérios de dimensionamento, os parâmetros adotados e os resultados obtidos para cada circuito de alimentação elétrica. Esses documentos complementam as LCPs, fornecendo a justificativa técnica para a seleção dos condutores especificados no PE.

4.1.4 Gestão e Emissão dos Documentos

A GED seguiu o fluxo adotado pela Nova Engevix, composto pelas etapas de iniciação, elaboração, circulação, verificação e emissão. Esse processo assegura o controle de versões, a rastreabilidade das alterações e a conformidade dos documentos com os requisitos do CMI e da Itaipu Binacional.

A gestão interna foi conduzida no ambiente DOx, software corporativo desenvolvido pela Nova Engevix, que opera em formato web e centraliza a criação, edição e validação dos documentos. O sistema registra automaticamente todas as revisões realizadas, permitindo rastrear autores, datas de alteração, versões e comentários associados ao processo de desenvolvimento.

O processo tem início com a solicitação, junto à coordenação e à secretaria, da criação de um espaço reservado para o novo documento. No caso das memórias de cálculo, nesse espaço insere-se o arquivo inicial, geralmente um template padronizado, contendo a estrutura de capítulos e os campos de identificação necessários. A partir desse esboço, o documento passa pelo processo de elaboração e é mantido no

DOx, onde permanece disponível para edição e consulta pelos profissionais envolvidos no contrato de Atualização Tecnológica da Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional, garantindo transparência e registro de todas as alterações realizadas.

No caso das listas de cabos, o documento é elaborado no banco de dados, e então é inserido no DOx o arquivo extraído do banco de dados já finalizado, em formato Excel ou PDF.

Com o documento finalizado, ele segue para a fase de circulação, em que é submetido à análise crítica de membros da equipe definidos pelo autor. A seleção dos revisores buscou garantir diversidade técnica, envolvendo representantes das subequipes da Engenharia Elétrica da Nova Engevix, além do supervisor direto e do coordenador do projeto. Os revisores dispõem de prazo definido para inserir comentários e sugestões, que são incorporados em versão revisada do documento.

Na sequência, ocorre a verificação, fase destinada à análise final antes da emissão. Esse processo é restrito a profissionais autorizados, como o coordenador do projeto e engenheiros experientes, que verificam a conformidade do documento em relação às normas técnicas, templates e requisitos do cliente. Após a verificação, é gerada a versão final, alocada em pasta específica do DOx e encaminhada à secretaria do setor. Esse é o documento final, que enfim pode ser emitido pela secretaria.

A emissão do documento é realizada no sistema Aconex, plataforma administrada pelo CMI e responsável pela coordenação geral da gestão documental do projeto. Nela, o documento passa por novos fluxos de análise envolvendo o CMI e, posteriormente, Itaipu Binacional. Comentários e solicitações de ajuste são registrados e retornam à Nova Engevix, que realiza as adequações necessárias e reitera o processo de circulação e verificação interna, até que o documento seja reapresentado no Aconex. Esse ciclo se repete até que o documento receba o selo de aprovação. A aprovação inicial é concedida pelo CMI, seguida pela análise e validação final de Itaipu Binacional. Apenas após essa fase o documento é considerado apto para uso na usina ou por outras partes interessadas.

Esse processo é apresentado de forma mais detalhada na Seção 4.5. A adoção desse fluxo garante controle das revisões e a conformidade da documentação com os requisitos contratuais do empreendimento.

4.2 REQUISITOS TÉCNICOS DE PROJETO

A elaboração das listas de cabos e das memórias de cálculo do PE da RTA foi realizada com base nos critérios estabelecidos pelas especificações técnicas do empreendimento e pelos documentos desenvolvidos durante o PB. Esses requisitos orientaram as decisões tomadas ao longo do projeto, garantindo compatibilidade entre a documentação executiva e a infraestrutura prevista para implantação.

- **Arquitetura da RTA:** todas as interligações desenvolvidas no PE seguiram a arquitetura definida para a RTA, respeitando a distribuição das UTAs, RAs, APs, PTOs e PTMs estabelecida no PB. Não foram realizadas alterações na arquitetura da rede, sendo escopo do PE detalhar sua implantação física.
- **Padronização da identificação dos cabos:** todos os cabos foram identificados conforme os critérios estabelecidos pelo CCVC. Essa padronização garante rastreabilidade entre desenhos, listas de cabos, banco de dados e demais documentos do empreendimento, permitindo a identificação de cada circuito da infraestrutura.
- **Limite de comprimento para enlaces metálicos:** os enlaces metálicos foram limitados a 100 m, sendo 90 m destinados ao cabeamento permanente e 10 m aos cabos de manobra, conforme estabelecido pela ANSI/TIA-568. Esse requisito influenciou diretamente a definição das áreas de atendimento das UTAs e a validação das interligações metálicas previstas no projeto.
- **Determinação dos percursos de cabeamento:** os comprimentos dos cabos foram definidos a partir dos percursos efetivamente percorridos pela infraestrutura da usina, considerando eletrocalhas, eletrodutos, canaletas e demais vias de cabos previstas no projeto. Sobre o comprimento obtido foi aplicada uma margem adicional de 5%, destinada a compensar pequenos desvios de percurso.
- **Dimensionamento dos circuitos de alimentação:** os cabos elétricos associados aos PDEs foram dimensionados de acordo com os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 5410 e pelo CPE. O dimensionamento considerou capacidade de condução de corrente, queda de tensão e suportabilidade a curto-circuito, sendo posteriormente documentado nas respectivas memórias de cálculo.
- **Capacidade das UTAs:** cada UTA possui um switch óptico e um switch metálico, ambos com capacidade limitada de 24 portas. Essa restrição estabeleceu o número máximo de equipamentos que poderiam ser atendidos por cada unidade, devendo ser respeitada durante a elaboração das listas de cabos e a definição das interligações.

4.3 LISTAS DE CABOS

As listas de cabos constituem um dos principais tipos de documentos do PE. Sua função é consolidar, de forma estruturada, todas as informações necessárias para a instalação dos cabos em campo, estabelecendo as interligações entre equipamentos, os tipos de cabos empregados, seus percursos e demais características necessárias à execução do lançamento. Dessa forma, as listas de cabos servem como documento de referência para as equipes responsáveis pela implantação da infraestrutura, garantindo

que as interligações previstas em projeto sejam executadas conforme os critérios técnicos estabelecidos.

As listas de cabos desenvolvidas para a RTA seguem um modelo padronizado adotado pelo Plano de Atualização Tecnológica da Itaipu Binacional. A estrutura do documento é composta por uma capa contendo informações gerais, como título, códigos de identificação, autores, revisores e data de emissão; uma contracapa destinada ao controle de revisões; uma página com notas e documentos de referência; e, por fim, as páginas de lista de cabos propriamente ditas.

As listas de cabos são emitidas em formato A3, em orientação paisagem. Possuem em média cinco páginas, sendo uma para capa, duas para contracapa e duas para a lista em si. Um exemplo de lista de cabos completa pode ser visualizado no Apêndice A.

Tanto as LCUs e as LCRAs, quanto as LCPs, seguem etapas de elaboração muito semelhantes. Portanto, o processo completo será descrito para as LCUs e, nas seções referentes às LCRAs e às LCPs, serão abordados detalhes específicos ao processo de elaboração de cada uma.

A Seção 4.3.1 apresenta a estrutura das listas de cabos e descreve as principais informações técnicas registradas em cada documento. Em seguida, a Seção 4.3.2 aborda os critérios adotados para organização das listas e para definição das listas principais e secundárias. A Seção 4.3.3 descreve o processo de elaboração das LCUs, utilizado como referência metodológica para o desenvolvimento das listas de cabos. Posteriormente, as Seção 4.3.4 e Seção 4.3.5 apresentam as particularidades relacionadas à elaboração das LCRAs e das LCPs, respectivamente. Por fim, a Seção 4.4 descreve o desenvolvimento das MDCs, documentos responsáveis por registrar o dimensionamento dos cabos de alimentação elétrica da RTA.

4.3.1 Estrutura das Listas de Cabos

Cada lista de cabos é organizada em formato tabular, no qual cada linha representa um cabo e cada coluna corresponde a uma informação técnica. Um exemplo desse tipo de documento pode ser visualizado na Figura 17. Os campos presentes nas listas são descritos a seguir.

Figura 17 – Exemplo de lista de cabos.

PAINÉIS DE BAIXA TENSÃO - PAINEL DE DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO ESTABILIZADA - PDE17041 - LISTA DE CABOS

Identificação do Cabo	COMPR. [m]	Código do Material	Formação			ORIGEM		DESTINO		FINALIDADE	PERCURSO
			Nº de Cabos	Nº de Cond.	Seção [mm²]	DE	COLUMNA	PARA	COLUMNA		
HU17T045-C	266,00	ECP-11741-02	1	1	2,5	PDE17041		PTO-AP25-UTAI.15		FORÇA BT	BU17T523 -> BU17852 -> EU17T034 -> EU17T032 -> EU16T017 -> EU16T016 -> EC03T006 -> EC03T005 -> EC02T028 -> VIAS INTERNAS A SALA DIESEL 60Hz
HU17T046-PE	266,00	ECP-11745-02	1	1	2,5	PDE17041		PTO-AP25-UTAI.15		FORÇA BT	BU17T523 -> BU17852 -> EU17T034 -> EU17T032 -> EU16T017 -> EU16T016 -> EC03T006 -> EC03T005 -> EC02T028 -> VIAS INTERNAS A SALA DIESEL 60Hz
HU17T047-A	290,00	ECP-11741-02	1	1	2,5	PDE17041		PTO-AP14-UTAI.15		FORÇA BT	BU17T523 -> BU17852 -> EU17T034 -> EU17T032 -> EU16T017 -> EU16T016 -> EC03T006 -> EC03T005 -> EC02T028 -> EC02T027 -> EC01T009 -> BC01T016a -> EC01T007 -> BC01T01 -> PENDENTE
HU17T047-C	290,00	ECP-11741-02	1	1	2,5	PDE17041		PTO-AP14-UTAI.15		FORÇA BT	BU17T523 -> BU17852 -> EU17T034 -> EU17T032 -> EU16T017 -> EU16T016 -> EC03T006 -> EC03T005 -> EC02T028 -> EC02T027 -> EC01T009 -> BC01T016a -> EC01T007 -> BC01T01 -> PENDENTE
HU17T047-PE	290,00	ECP-11745-02	1	1	2,5	PDE17041		PTO-AP14-UTAI.15		FORÇA BT	BU17T523 -> BU17852 -> EU17T034 -> EU17T032 -> EU16T017 -> EU16T016 -> EC03T006 -> EC03T005 -> EC02T028 -> EC02T027 -> EC01T009 -> BC01T016a -> EC01T007 -> BC01T01 -> PENDENTE
HU17T048-A	368,00	ECP-11741-02	1	1	2,5	PDE17041		PTO-AP15-UTAI.15		FORÇA BT	BU17T523 -> BU17852 -> EU17T034 -> EU17T032 -> EU16T017 -> EU16T016 -> EC03T006 -> EC03T005 -> EC02T028 -> EC02T027 -> EC01T009 -> BC01T016a -> EC01T007 -> BC01T01 -> PENDENTE
HU17T048-C	368,00	ECP-11741-02	1	1	2,5	PDE17041		PTO-AP15-UTAI.15		FORÇA BT	BU17T523 -> BU17852 -> EU17T034 -> EU17T032 -> EU16T017 -> EU16T016 -> EC03T006 -> EC03T005 -> EC02T028 -> EC02T027 -> EC01T009 -> BC01T016a -> EC01T007 -> BC01T01 -> PENDENTE
HU17T048-PE	368,00	ECP-11745-02	1	1	2,5	PDE17041		PTO-AP15-UTAI.15		FORÇA BT	BU17T523 -> BU17852 -> EU17T034 -> EU17T032 -> EU16T017 -> EU16T016 -> EC03T006 -> EC03T005 -> EC02T028 -> EC02T027 -> EC01T009 -> BC01T016a -> EC01T007 -> BC01T01 -> PENDENTE
HU17T049-A	186,00	ECP-11741-02	1	1	2,5	PDE17041		PTO-AP16-UTAI.15		FORÇA BT	BU17T523 -> BU17852 -> EU17T034 -> EU17T032 -> EU16T017 -> EU16T016 -> EC03T006 -> EC03T005 -> EC02T028 -> EC02T027 -> EC01T009 -> BC01T016a -> EC01T007 -> BC01T01 -> PENDENTE
HU17T049-C	186,00	ECP-11741-02	1	1	2,5	PDE17041		PTO-AP16-UTAI.15		FORÇA BT	BU17T523 -> BU17852 -> EU17T034 -> EU17T032 -> EU16T017 -> EU16T016 -> EC03T006 -> EC03T005 -> EC02T028 -> EC02T027 -> EC01T009 -> BC01T016a -> EC01T007 -> BC01T01 -> PENDENTE
HU17T049-PE	186,00	ECP-11745-02	1	1	2,5	PDE17041		PTO-AP16-UTAI.15		FORÇA BT	BU17T523 -> BU17852 -> EU17T034 -> EU17T032 -> EU16T017 -> EU16T016 -> EC03T006 -> EC03T005 -> EC02T028 -> EC02T027 -> EC01T009 -> BC01T016a -> EC01T007 -> BC01T01 -> PENDENTE
HU17T050-A	13,00	ECP-11221-05	1	1	10	PDE17041		UTAI.15		FORÇA BT	EU17T047
HU17T050-C	13,00	ECP-11221-05	1	1	10	PDE17041		UTAI.15		FORÇA BT	EU17T047
HU17T050-PE	13,00	ECP-11225-05	1	1	10	PDE17041		UTAI.15		FORÇA BT	EU17T047
HU17T051-A	13,00	ECP-11221-05	1	1	10	PDE17041		UTAI.15		FORÇA BT	EU17T047
HU17T051-C	13,00	ECP-11221-05	1	1	10	PDE17041		UTAI.15		FORÇA BT	EU17T047
HU17T051-PE	13,00	ECP-11225-05	1	1	10	PDE17041		UTAI.15		FORÇA BT	EU17T047

Fonte: Elaborado pelo autor.

- Identificação do cabo: corresponde ao código único atribuído a cada cabo, elaborado conforme os critérios estabelecidos pelo CCVC.
- Comprimento: indica o comprimento previsto para instalação do cabo. Esse valor é obtido a partir da análise do modelo tridimensional da usina no software Revit Viewer, considerando o percurso efetivamente percorrido pelas vias de cabos.
- Código do material: identifica o modelo de cabo especificado para a interligação, conforme o código cadastrado na Lista de Materiais de Uso Contínuo (LMUC). Esse código permite associar cada cabo às suas características construtivas e a um modelo específico para orientar a compra de materiais.
- Formação: descreve as características construtivas do cabo, incluindo a quantidade de cabos da interligação, o número de condutores ou fibras, a seção nominal dos condutores e o diâmetro externo. Essas informações são obtidas a partir do cadastro do material correspondente na LMUC.
- Origem: identifica o equipamento onde o cabo se inicia, estabelecendo o ponto de origem da interligação.
- Destino: identifica o equipamento ao qual o cabo está conectado, definindo o ponto final da interligação.
- Finalidade: indica a função desempenhada pela interligação, como alimentação elétrica, comunicação de rede, controle ou outras aplicações previstas no projeto.
- Percurso: conjunto das vias de cabos percorridas entre a origem e o destino da interligação, utilizando as respectivas tags cadastradas no banco de dados. Essas informações são definidas a partir da análise do modelo tridimensional da usina no Revit Viewer e representam o trajeto previsto para instalação do cabo.

4.3.2 Critérios de Organização das Listas de Cabos

No contexto do Plano de Atualização Tecnológica, as listas de cabos são organizadas por equipamento. Cada equipamento possui uma lista própria contendo todas as interligações associadas a ele. Os documentos desenvolvidos neste trabalho são as LCUs, as LCPs e as LCRA's. Dessa forma, todos os cabos que entram ou saem de um determinado equipamento devem estar representados em sua respectiva lista, independentemente de se tratarem de cabos de alimentação elétrica, cabos metálicos de rede ou cabos de fibra óptica.

Como consequência dessa organização, determinadas interligações aparecem simultaneamente em duas listas de cabos distintas, uma vez que um mesmo cabo pode conectar dois equipamentos que possuem documentação própria. Para evitar duplicidade de informações, o projeto adota uma convenção que estabelece a existência de uma lista principal e de uma lista secundária para cada interligação.

Na lista principal, o cabo é apresentado com todas as suas informações técnicas, incluindo percurso, comprimento e características construtivas. Na lista secundária, por sua vez, é apresentado apenas o código do cabo acompanhado da origem, destino e uma referência ao documento onde suas informações completas estão registradas. Essa abordagem reduz a redundância de dados e facilita o controle de revisões, uma vez que alterações passam a ser realizadas em apenas um documento de referência. Além disso, mitiga a possibilidade do cabo ser lançado duas vezes, por estar contido em duas listas ao mesmo tempo.

Para cabos de alimentação elétrica, a definição da lista principal é baseada no sentido do fornecimento de energia. Assim, o equipamento responsável pela alimentação possui a lista principal, enquanto o equipamento alimentado possui a lista secundária. Um exemplo desse critério ocorre nas interligações entre os PDEs e as UTAs, nas quais as LCPs constituem os documentos principais e as LCUs atuam como documentos secundários.

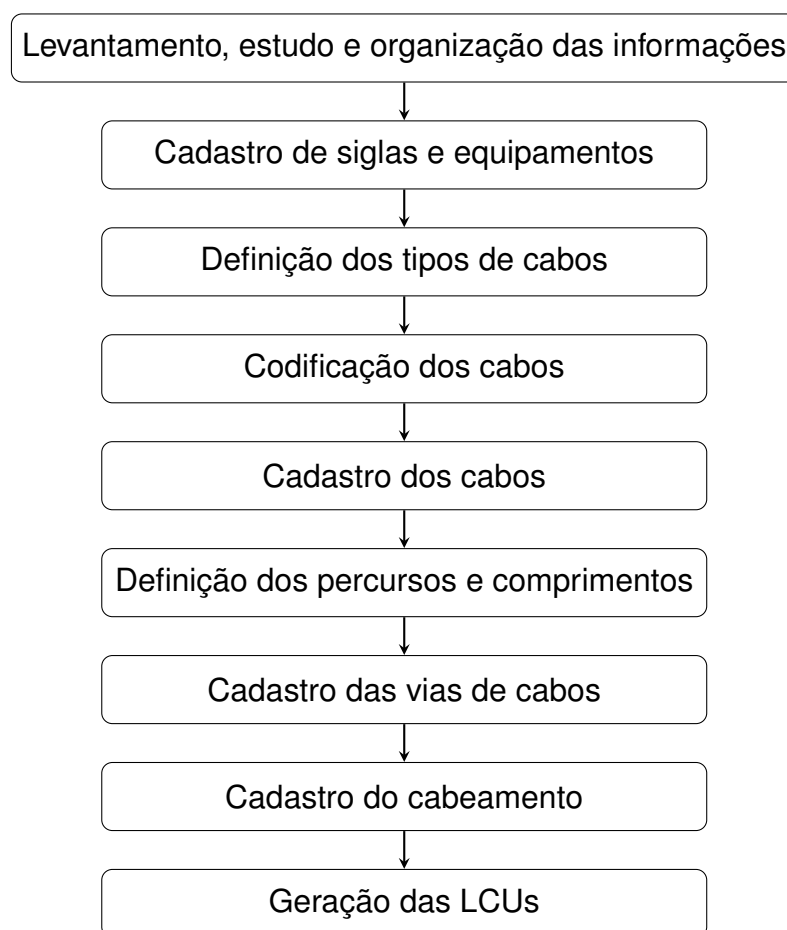
Para cabos de comunicação, a definição da lista principal segue a hierarquia da arquitetura de rede estabelecida para a RTA. Nesses casos, o equipamento localizado em nível superior da arquitetura possui a lista principal, enquanto o equipamento localizado em nível inferior possui a lista secundária. Como exemplo, podem ser citadas as interligações entre os RAs e as UTAs, nas quais as LCRA's constituem os documentos principais e as LCUs contêm apenas as referências correspondentes.

4.3.3 Listas de Cabos das UTAs

As LCUs têm como objetivo apresentar todas as interligações associadas às UTAs, com ênfase nos cabos do módulo de Acesso LAN da RTA. No escopo da Casa de Força da Itaipu Binacional, foram desenvolvidas 30 LCUs, correspondentes às 30

UTAs previstas para instalação. Cada documento reúne informações referentes aos cabos de rede e alimentação relacionados a uma determinada UTA, servindo como referência para implantação da infraestrutura em campo e para controle dos cabos ao longo do ciclo de vida do sistema. A Figura 18 apresenta a sequência de etapas de produção das LCUs.

Figura 18 – Etapas de elaboração das LCUs.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na sequência, as etapas mostradas acima serão descritas em maiores detalhes.

4.3.3.1 Levantamento, Estudo e Organização das Informações do Projeto

A primeira etapa da elaboração das LCUs consistiu no levantamento, estudo e organização das informações necessárias para o desenvolvimento dos documentos. Para isso, foram consultadas as especificações técnicas da RTA e os documentos produzidos durante o PB. Embora parte significativa desse levantamento já tivesse sido realizada nas etapas anteriores do empreendimento, os documentos de referência continuaram sendo consultados ao longo de todo o desenvolvimento do PE, com o objetivo de garantir a conformidade das soluções adotadas com os requisitos estabelecidos para a infraestrutura.

A análise desses documentos permitiu identificar três grupos principais de interligações associados às UTAs: as conexões de Acesso LAN, as conexões de uplink, as conexões de backbone e as conexões de alimentação elétrica.

- Acesso LAN: corresponde às interligações entre as UTAs e os dispositivos de terminação da rede, representados pelos PTOs e PTMs.
- Uplink: corresponde às interligações redundantes entre as UTAs e as Salas Seguras de 50 Hz e 60 Hz, responsáveis pela integração das unidades aos data-centers.
- Backbone: corresponde às interligações entre as salas de comunicação da usina.
- Alimentação: corresponde às interligações responsáveis pelo fornecimento de energia elétrica às UTAs, provenientes dos PDEs.

Dentre essas três categorias, as conexões de Acesso LAN constituem o foco principal das LCUs. Diferentemente do entendimento inicialmente adotado em parte das atividades do PB, as UTAs não realizam a conexão direta dos APs à rede, mas sim dos respectivos PTOs e PTMs. No escopo da Casa de Força, foram previstas interligações para 302 PTOs e 49 PTMs, distribuídos ao longo da Casa de Força. Os PTOs são conectados por meio de cabos de fibra óptica, enquanto os PTMs utilizam cabos metálicos de par trançado.

A definição das associações entre UTAs, PTOs e PTMs foi realizada durante o PB, utilizando como principal critério a proximidade física entre os equipamentos. Para cada ponto de terminação, foi identificada a UTA mais adequada para realizar a conexão, levando em consideração restrições técnicas como o comprimento máximo permitido para os enlaces metálicos e a capacidade disponível dos switches instalados nas UTAs. Essas análises resultaram na elaboração da PAUA e do DAUA, documentos do PB que serviram como base para o desenvolvimento das LCUs no PE.

As conexões de uplink, de backbone e de alimentação também foram consideradas durante a elaboração das listas, uma vez que todos os cabos associados às UTAs devem estar representados em sua documentação. Entretanto, os critérios de definição dessas interligações são tratados de forma mais detalhada na Seção 4.3.4 (uplink e backbone) e na Seção 4.3.5 (alimentação). Dessa forma, as informações levantadas nesta etapa forneceram a base necessária para o cadastramento dos elementos da infraestrutura e para o desenvolvimento das etapas subsequentes.

4.3.3.2 Cadastro de Siglas e Equipamentos

Após o levantamento das informações necessárias para elaboração das LCUs, iniciou-se o processo de cadastramento dos elementos da infraestrutura no banco de

dados do projeto. Essa etapa teve como objetivo criar os registros necessários para identificação dos equipamentos que seriam utilizados na geração das listas de cabos.

Inicialmente, foi realizado o cadastro das siglas dos equipamentos. Para isso, foi utilizado um arquivo no formato CSV exportado da seção de siglas do banco de dados, contendo a estrutura padronizada para importação das informações. Os principais campos preenchidos nessa etapa foram a tag do equipamento, sua descrição, o ciclo de vida e a fase do projeto. O cadastramento foi realizado para todos os equipamentos relacionados às LCUs, incluindo UTAs, PTOs e PTMs.

As informações utilizadas nesse processo foram obtidas principalmente a partir da PAUA. Para todos os equipamentos cadastrados, o ciclo de vida foi definido como Em uso e a fase do projeto foi definida como Projetado. Esses critérios foram adotados por se tratarem de equipamentos novos e permanentes, previstos contratualmente para implantação no âmbito da Atualização Tecnológica da Itaipu Binacional.

Concluído o cadastro das siglas, foi realizado o cadastro dos equipamentos na seção de quadros do banco de dados. Essa etapa teve como finalidade registrar informações complementares associadas aos equipamentos físicos presentes na infraestrutura. Entre os campos disponíveis para preenchimento encontram-se dados construtivos, características dimensionais e informações de localização.

Embora o banco de dados permita o cadastramento de diversas características dos equipamentos, os campos considerados essenciais para o desenvolvimento das LCUs foram a tag e as informações de localização. Os dados de localização incluem informações como unidade geradora, eixo e elevação, permitindo associar cada equipamento à sua posição física dentro da usina. Essas informações foram extraídas dos documentos produzidos durante o PB e transferidas para os arquivos de importação do banco de dados.

Ao final dessa etapa, todos os equipamentos relacionados às LCUs encontravam-se devidamente cadastrados e identificados no banco de dados, estabelecendo a base necessária para as atividades subsequentes de especificação dos cabos, definição das interligações e geração da documentação executiva.

4.3.3.3 Definição dos Tipos de Cabos

Com os equipamentos devidamente cadastrados, a etapa seguinte consistiu na definição dos tipos de cabos a serem utilizados em cada interligação das LCUs. Essa atividade foi realizada a partir da análise das especificações técnicas da RTA, nos quais são estabelecidos os requisitos construtivos e de desempenho para os meios de transmissão utilizados na infraestrutura de comunicação.

As informações referentes aos cabos encontravam-se distribuídas em diferentes seções dos documentos de referência, exigindo um processo de consolidação para que pudessem ser utilizadas de forma organizada na elaboração das listas de cabos.

O levantamento tratado na Seção 4.3.3.1 foi fundamental para compreender o papel de cada interligação dentro da arquitetura da rede e, conseqüentemente, determinar o tipo de cabo mais adequado para cada aplicação.

No contexto das conexões de Acesso LAN, foram identificados dois tipos principais de interligação. As conexões entre UTAs e PTOs são realizadas por meio de cabos de fibra óptica monomodo de quatro vias, enquanto as conexões entre UTAs e PTMs utilizam cabos metálicos de par trançado categoria 6A. A Tabela 2 apresenta os tipos de cabos definidos para as conexões de Acesso LAN contempladas nas LCUs.

Tabela 2 – Tipos de cabos para as conexões de Acesso LAN.

Origem	Destino	Meio de transmissão	Quantidade de vias por cabo	Quantidade de cabos
UTA	PTO	Cabo de fibra óptica monomodo	4 fibras ópticas	1
UTA	PTM	Cabo de par trançado CAT.6A	8 condutores metálicos	1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Além da definição do meio de transmissão, essa etapa permitiu identificar as características necessárias para o cadastramento posterior dos cabos no banco de dados, incluindo informações relacionadas à formação dos cabos e especificações dos materiais utilizados. Esses dados serviram como base para as etapas subsequentes de codificação e cadastramento dos cabos.

4.3.3.4 Codificação dos Cabos

Após a definição dos tipos de cabos utilizados nas interligações de Acesso LAN, iniciou-se a etapa de codificação deles. Essa atividade teve como objetivo atribuir uma identificação única a cada interligação, permitindo sua rastreabilidade ao longo de todo o ciclo de vida do empreendimento.

A codificação foi realizada de acordo com os conceitos estabelecidos no documento CCVC. Para isso, foi utilizado, inicialmente, o arquivo CSV correspondente à seção de cabeamento do banco de dados, responsável por reunir as principais informações associadas a cada cabo. Entre os campos presentes nesse arquivo destacam-se o código de identificação do cabo, o código do material, a origem, o destino, o percurso e o comprimento.

Inicialmente, foram cadastradas as informações de origem e destino de todas as interligações de Acesso LAN. As origens correspondiam às UTAs, enquanto os destinos correspondiam aos respectivos PTOs e PTMs associados. Essas informações serviram como base para a geração das identificações dos cabos.

O CCVC estabelece uma estrutura padronizada para formação das tags dos cabos, composta por campos que representam características como o tipo do cabo, a área da usina onde a interligação está localizada, a fase do empreendimento e uma numeração sequencial. Essa estrutura permite identificar de forma rápida informações

relevantes sobre cada cabo, além de garantir a unicidade das identificações dentro do empreendimento.

Para um dos campos da numeração sequencial, o critério de codificação delega ao projetista a definição da lógica de organização dos códigos. Com o objetivo de facilitar o gerenciamento das interligações, foi adotada uma estratégia baseada na associação direta entre faixas de numeração e equipamentos. Nessa abordagem, cada UTA recebeu uma faixa exclusiva de códigos reservada para os cabos relacionados a ela. A definição dessas faixas foi realizada por meio de uma planilha compartilhada entre os membros da equipe, utilizada para controle e distribuição dos intervalos de numeração. Dessa forma, foi possível evitar a duplicidade de códigos e garantir a consistência da identificação dos cabos produzidos por diferentes projetistas.

Para cada UTA foi reservada uma faixa de cinquenta códigos. Essa quantidade foi definida considerando a capacidade máxima de conexões dos switches instalados nas UTAs, bem como uma margem adicional destinada a futuras expansões da infraestrutura. A reserva dessas faixas permite acomodar ampliações previstas para a rede sem a necessidade de alterações na lógica de identificação já estabelecida.

Com as faixas de codificação definidas e as informações de origem e destino previamente cadastradas, os códigos dos cabos puderam ser gerados. Para isso, as interligações foram organizadas de acordo com a UTA de origem, as identificações foram atribuídas sequencialmente às conexões associadas a cada equipamento e foram inseridas no arquivo de cabeamento. Ao final dessa etapa, todos os cabos de Acesso LAN possuíam identificação única e compatível com os critérios de codificação adotados no projeto, possibilitando o prosseguimento das atividades de cadastramento e detalhamento da infraestrutura.

4.3.3.5 Cadastro dos Cabos

Com a codificação concluída, iniciou-se a etapa de cadastro dos cabos no banco de dados do projeto. O objetivo dessa atividade foi associar cada cabo às suas características físicas e aos materiais especificados para sua implementação, permitindo que essas informações fossem posteriormente utilizadas na geração das listas de cabos.

O cadastramento foi realizado por meio da seção de cabos do banco de dados, utilizando arquivos CSV destinados à importação das informações. Nessa etapa, foram preenchidos campos como: a tag do cabo (previamente determinada), o código do material, formação, ciclo de vida e fase do projeto.

A definição dos códigos de material foi realizada com base na LMUC, documento responsável por consolidar os materiais padronizados aprovados para utilização no projeto. Para cada tipo de interligação identificado nas LCUs, foi selecionado o item correspondente na LMUC, cadastrado na etapa de PB. A Figura 19 apresenta um exem-

plo de cabo cadastrado na LMUC, onde são apresentadas informações construtivas e os códigos de material de cada cabo.

Figura 19 – Exemplo de cadastro de cabo na LMUC.

TÍTULO: FIBER-LAN INDOOR_OUTDOOR (CFOT-EO) - ABNT	ECF-11315
DESCRIÇÃO: Cabo óptico tipo "tight", constituído por fibras ópticas do tipo monomodo. As fibras ópticas possuem revestimento primário em acrilato e revestimento secundário em material termoplástico. Sobre o conjunto de fibras, são colocados elementos de tração de fios dielétricos. O conjunto de fibras é protegido contra penetração de água e com capa externa em material termoplástico não propagante à chama e resistente a intempéries.	
REFERÊNCIA: FURUKAWA ou similar	
NORMA: ABNT NBR 14772 / ITU-T G 651 / ITU-T G 652 / ITU-T G 657 ANSI/TIA-568.3-D: "OPTICAL FIBER CABLING COMPONENTS STANDARD".	
DESENHO: 	

SUBCÓDIGO	QUANTIDADE DE FIBRAS	RAIO MÍNIMO DE CURVATURA DURANTE A INSTALAÇÃO (mm)	RAIO MÍNIMO DE CURVATURA APÓS A INSTALAÇÃO (mm)	DIÂMETRO EXTERNO (mm)	REFERÊNCIA FABRICANTE
ECF-11315-01	2	72,00	48,00	4,80	CABO OPTICO CFOT-SM-EO-02F-G-652D-LSZH (FIBER-LAN INDOOR/OUTDOOR)
ECF-11315-02	4	78,00	52,00	5,20	CABO OPTICO CFOT-SM-EO-04F-G-652D-LSZH (FIBER-LAN INDOOR/OUTDOOR)
ECF-11315-03	6	84,00	56,00	5,60	CABO OPTICO CFOT-SM-EO-06F-G-652D-LSZH (FIBER-LAN INDOOR/OUTDOOR)
ECF-11315-04	8	90,00	60,00	6,00	CABO OPTICO CFOT-SM-EO-08F-G-652D-LSZH (FIBER-LAN INDOOR/OUTDOOR)
ECF-11315-05	10	94,50	63,00	6,30	CABO OPTICO CFOT-SM-EO-10F-G-652D-LSZH (FIBER-LAN INDOOR/OUTDOOR)
ECF-11315-06	12	97,50	65,00	6,50	CABO OPTICO CFOT-SM-EO-12F-G-652D-LSZH (FIBER-LAN INDOOR/OUTDOOR)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Além do código do material, também foi necessário definir a formação de cada cabo. Esse campo descreve as características construtivas da interligação, permitindo identificar aspectos como quantidade de vias, número de fibras ópticas ou quantidade de condutores metálicos presentes no cabo. Essas informações são posteriormente

apresentadas nas listas de cabos e auxiliam tanto as equipes de montagem quanto os processos de aquisição de materiais.

Ao término dessa etapa, todos os cabos das conexões de Acesso LAN encontravam-se cadastrados e associados aos materiais correspondentes, estabelecendo a base necessária para as atividades de definição de percursos, cálculo dos comprimentos e consolidação das interligações no banco de dados.

4.3.3.6 Definição de Percursos e Comprimentos

Após o cadastramento, iniciou-se a etapa de definição dos percursos e determinação dos comprimentos dos cabos. Essa atividade teve como objetivo estabelecer os caminhos que cada cabo deverá percorrer ao longo da infraestrutura projetada para a RTA, além de fornecer os comprimentos necessários para elaboração das listas de cabos.

A definição dos percursos foi realizada utilizando o modelo tridimensional da Casa de Força desenvolvido em Revit. Esse modelo reúne informações de diversas disciplinas de engenharia envolvidas no projeto, incluindo sistemas elétricos, sistemas mecânicos, estruturas civis e infraestrutura de telecomunicações. Dessa forma, tornou-se possível analisar a integração entre os diferentes sistemas presentes na usina e avaliar a viabilidade dos encaminhamentos previstos para os cabos.

Os percursos foram definidos a partir das vias de cabos projetadas especificamente para a Atualização Tecnológica. Essas vias foram desenvolvidas pela equipe de modelagem da Nova Engevix, responsável pela definição da infraestrutura física necessária para acomodar os cabos dos novos sistemas implantados no empreendimento. Assim, a determinação dos percursos exigiu interação entre as equipes de engenharia e de modelagem, de forma a garantir que as interligações previstas fossem compatíveis com a infraestrutura projetada. Na prática, a equipe de engenharia produziu documentos no PB que serviram como base para a equipe de modelagem. E então, a equipe de engenharia utiliza os modelos elaborados pela equipe de modelagem para atender as suas demandas em relação à produção de documentos.

A complexidade dessa atividade está diretamente relacionada às características da Casa de Força. A infraestrutura projetada para a RTA encontra-se inserida em um ambiente industrial de grande porte, que abriga sistemas elétricos de média e alta tensão, equipamentos mecânicos de grandes dimensões, sistemas de automação, salas técnicas, escritórios, auditórios e diversas outras instalações. Nesse contexto, a definição dos percursos exigiu a análise criteriosa dos espaços disponíveis e da interação entre os diferentes sistemas presentes na usina.

Além da complexidade física do ambiente, a escala da infraestrutura também representa um fator relevante. As LCUs abrangem mais de 300 interligações distribuídas ao longo da Casa de Força, envolvendo aproximadamente 44,6 quilômetros de

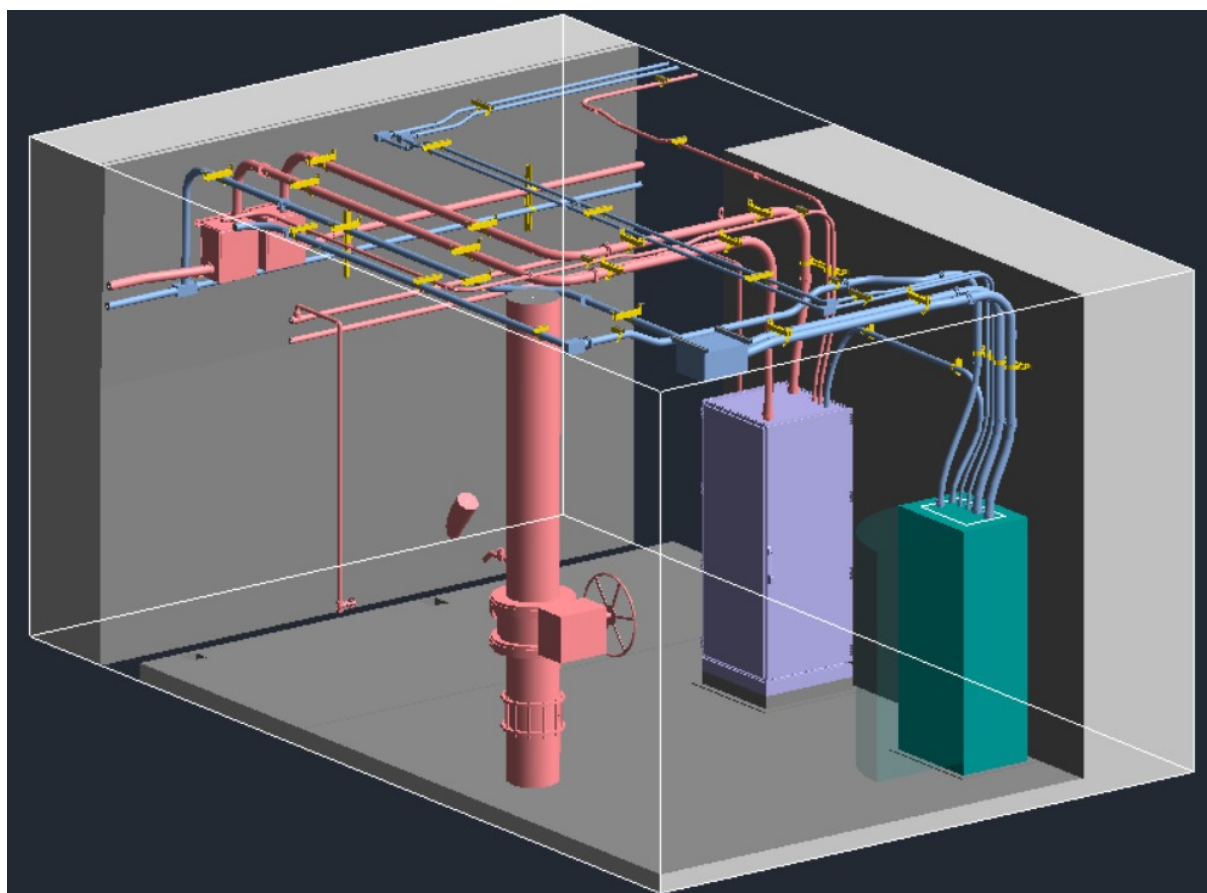
cabeamento. Em diversos casos, os percursos atravessam múltiplas elevações e diferentes setores da usina. Algumas interligações apresentam comprimentos superiores a 800 metros, exigindo análise cautelosa para definição dos encaminhamentos.

Para viabilizar essa atividade, foi utilizado o modelo tridimensional da usina, visualizados a partir do Revit Viewer. O processo de definição dos percursos era iniciado pela localização dos equipamentos de origem e destino da interligação, nesse caso uma UTA e um PTO ou PTM. A partir desses pontos, eram analisadas visualmente as possíveis rotas utilizando as vias de cabos. Essa análise era realizada diretamente no ambiente tridimensional, percorrendo virtualmente o trajeto pretendido e avaliando a viabilidade do encaminhamento.

A Figura 20 apresenta um exemplo corte de visualização do modelo tridimensional no Revit Viewer, onde pode-se visualizar:

- uma UTA, na cor lilás;
- um PDE, na cor turquesa;
- eletrodutos para cabos de alimentação, em azul;
- eletrodutos para cabos de rede, em vermelho;
- uma tubulação de sistemas mecânicos, em vermelho, à frente dos painéis.

Figura 20 – Exemplo de corte de visualização do modelo tridimensional no Revit Viewer.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em determinadas situações, os equipamentos encontravam-se em elevações distintas da Casa de Força. Nesses casos, era necessário carregar vínculos adicionais ao modelo principal, correspondentes aos pavimentos ou setores adjacentes envolvidos na interligação. Os vínculos consistem em modelos tridimensionais complementares que podem ser inseridos temporariamente na visualização, permitindo analisar simultaneamente elementos pertencentes a diferentes arquivos de projeto.

Após a definição visual da rota, era utilizada uma extensão desenvolvida em pyRevit por um integrante da equipe. O pyRevit consiste em uma plataforma de desenvolvimento baseada em Python que permite a criação de ferramentas personalizadas para automação de atividades no ambiente Revit. A extensão utilizada possui uma função denominada *Medir*, desenvolvida especificamente para apoiar as atividades relacionadas ao projeto de infraestrutura da RTA.

Ao acionar essa função, o usuário seleciona sucessivamente pontos ao longo das vias de cabos que compõe o percurso definido para a interligação. Com base nessas seleções, a ferramenta realiza de forma semiautomática o levantamento do comprimento total do trajeto e das tags das vias percorridas. Dessa forma, foi possível

obter simultaneamente as informações necessárias para cadastramento do percurso e determinação do comprimento do cabo.

O procedimento foi repetido para todas as interligações contempladas pelas LCUs. Após a obtenção dos comprimentos, foi aplicada uma margem adicional de 5% sobre cada valor calculado, destinada a absorver pequenas variações associadas à instalação em campo.

Por fim, as informações obtidas no modelo tridimensional foram transferidas para o arquivo CSV de cabeamento utilizado nas etapas anteriores. Nesse momento, o arquivo já continha os dados de identificação, origem e destino dos cabos, restando apenas o cadastramento formal das vias de cabos para que pudesse ser submetido ao banco de dados do projeto.

4.3.3.7 Cadastro das Vias de Cabos

Concluída a definição dos percursos das interligações, foi realizada a etapa de cadastro das vias de cabos no banco de dados do projeto. Essa atividade teve como objetivo registrar a infraestrutura física utilizada pelos cabos da RTA, permitindo que os percursos definidos durante a etapa anterior pudessem ser associados às interligações cadastradas.

As vias de cabos correspondem aos elementos da infraestrutura destinados ao encaminhamento dos cabos ao longo da usina, incluindo eletrocalhas, leitos, eletrodutos e demais componentes projetados para acomodar os sistemas da Atualização Tecnológica. Cada uma dessas vias possui uma tag própria, utilizada para sua identificação e rastreabilidade dentro do empreendimento.

O cadastro foi realizado por meio da seção específica de vias do banco de dados, utilizando arquivos CSV destinados à importação das informações. Para cada via foram registradas informações como tag de identificação, fase do projeto e ciclo de vida.

Cada percurso definido para um cabo é representado por uma sequência de tags de vias cadastradas, possibilitando que as interligações sejam associadas aos caminhos previstos durante a etapa de instalação. Alterações futuras na infraestrutura podem ser identificadas e gerenciadas de forma controlada.

Ao final dessa etapa, todas as vias utilizadas pelas interligações contempladas nas LCUs encontravam-se cadastradas no banco de dados, permitindo o prosseguimento para o cadastramento do cabeamento e a consolidação das informações necessárias à geração das listas de cabos.

4.3.3.8 Cadastro do Cabeamento

Com os cabos, equipamentos e vias devidamente cadastrados, foi realizada a etapa de cadastro do cabeamento. Essa atividade teve como objetivo consolidar, em

um único registro, todas as informações necessárias para representar cada interligação da infraestrutura de cabeamento da RTA.

O cadastro foi realizado por meio da seção de cabeamento do banco de dados, utilizando o mesmo arquivo CSV empregado nas etapas tratadas na Seção 4.3.3.4 e na Seção 4.3.3.6. Nesse momento do desenvolvimento, o arquivo já continha as informações de tags dos cabos, origem, destino, comprimentos e percursos definidos para cada interligação.

A principal finalidade dessa etapa foi estabelecer o relacionamento entre os diferentes elementos previamente cadastrados no banco de dados. Para cada cabo, foram associadas as respectivas tags dos equipamentos de origem e destino, bem como a sequência de vias utilizada para compor seu percurso.

Além de consolidar as informações produzidas nas etapas anteriores, o cadastramento do cabeamento permitiu realizar verificações de consistência entre os registros. Durante esse processo, foram identificadas e corrigidas eventuais divergências relacionadas à nomenclatura dos equipamentos, à codificação dos cabos e às tags das vias de cabos utilizadas nos percursos. Após a conclusão das verificações, os arquivos CSV foram importados para o banco de dados.

Ao final dessa etapa, todas as interligações contempladas pelas LCUs encontravam-se cadastradas no banco de dados, possibilitando a geração das listas de cabos.

4.3.3.9 Geração das Listas de Cabos

Com a conclusão do cadastramento dos equipamentos, cabos, vias e cabeamento, foi possível iniciar a geração das LCUs. Nessa etapa, o banco de dados já possuía todas as informações necessárias para representar a infraestrutura projetada, incluindo os equipamentos de origem e destino, os códigos dos cabos, as informações de formação dos cabos, os códigos de material, a finalidade, os percursos associados e os respectivos comprimentos.

Embora todas essas informações já estivessem cadastradas, elas ainda se encontravam armazenadas na forma de registros individuais ou de relacionamentos entre entidades do banco de dados. A próxima etapa foi utilizar os recursos de geração de relatórios disponíveis na própria plataforma para consolidar essas informações no formato documental exigido pelo projeto.

A geração das listas foi realizada por meio do módulo de relatórios do banco de dados. Para cada UTA, foi criado um relatório do tipo Lista de Cabos, correspondente à respectiva LCU. No início, foram preenchidos os campos necessários para composição da capa e contracapa do documento, incluindo informações de codificação, descrição, responsáveis pela elaboração e demais dados administrativos previstos no padrão do empreendimento.

O documento também conta com uma página direcionada para inserção de

notas, documentos de referência e documentos complementares. As notas são informações que o autor do documento deseja comunicar ao leitor para auxiliar na compreensão das informações. Os documentos de referência são os quais atuaram como base para a elaboração da lista. E por fim, os documentos complementares são, em geral, documentos adicionais relacionados com o equipamento que está sendo tratado na lista.

Concluído o preenchimento das informações de capa e contracapa, foi realizada a geração do conteúdo principal da lista de cabos. Para isso, na seção de importação do relatório, era selecionada a UTA correspondente à LCU em elaboração. A partir dessa seleção, o banco de dados realizava uma consulta nas interligações cadastradas e identificava todos os cabos associados àquela UTA, independentemente do tipo de conexão ao qual pertenciam.

Como resultado dessa consulta, eram apresentados os cabos de Acesso LAN, uplink, backbone e alimentação elétrica associados ao equipamento selecionado. Todos esses cabos deveriam constar na LCU, uma vez que o documento tem como objetivo representar todas as interligações relacionadas à respectiva UTA. Dessa forma, os cabos eram importados para o relatório e passavam a compor as linhas da tabela da lista de cabos.

Após a importação, era necessário adequar a apresentação dos cabos de acordo com a convenção de listas principais e secundárias adotada no projeto. Os cabos de Acesso LAN constituem as interligações cuja lista principal é a própria LCU e, portanto, devem ser apresentados com todas as informações técnicas cadastradas. Já os cabos de uplink, backbone e alimentação elétrica possuem como documentos principais as LCRA's e as LCP's. Nesses casos, as linhas correspondentes na LCU deveriam apresentar apenas o código do cabo, a origem e o destino da interligação.

Para atender esse requisito, o banco de dados disponibilizava opções específicas na tela de importação dos cabos. Por meio dessas opções, era possível definir quais interligações deveriam ser tratadas como referências a documentos principais externos. Quando essa configuração era aplicada, o sistema substituía o percurso do cabo pelo código de referência da lista principal correspondente. Esse procedimento foi realizado individualmente para todos os cabos classificados como interligações secundárias.

Após a configuração das referências e da exibição das informações, era gerada uma visualização preliminar do documento em seu formato final. Nessa etapa, era realizada uma conferência geral da lista. Uma vez concluída, a revisão da lista era considerada finalizada e o documento podia ser gerado em formato PDF ou Excel para prosseguimento no fluxo do projeto.

Ao final dessa etapa, as 30 LCUs contempladas no escopo deste trabalho encontravam-se finalizadas, consolidando as informações produzidas ao longo das

etapas anteriores e fornecendo os documentos necessários para a implantação do cabeamento das UTAs da Casa de Força.

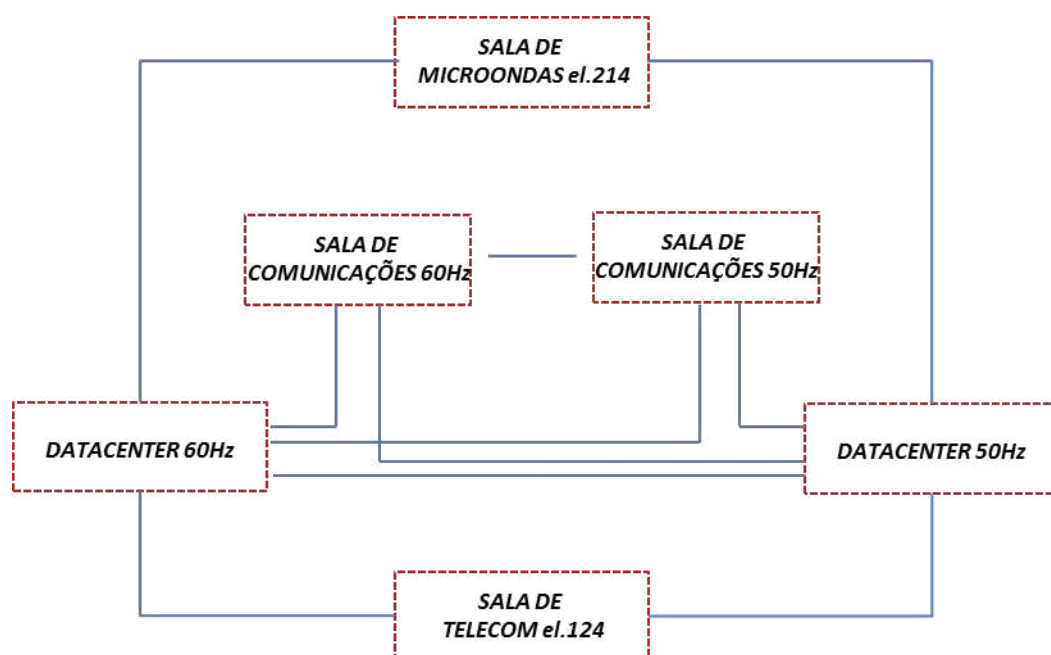
4.3.4 Listas de Cabos dos Racks Abertos do Backbone Óptico

As LCRAs têm como objetivo apresentar as interligações associadas aos RAs da RTA, abrangendo os cabos de uplink, backbone e alimentação elétrica. No escopo da Casa de Força da Itaipu Binacional, foram desenvolvidas cinco LCRAs, correspondentes aos cinco RAs previstos para instalação nessa região da usina. Esses equipamentos encontram-se distribuídos entre as principais salas de comunicação de Itaipu Binacional, sendo identificados como:

- RTA-TELECOM, localizado na Sala de Telecomunicações;
- RTA-COM.50HZ, localizado na Sala de Comunicações 50 Hz;
- RTA-COM.60HZ, localizado na Sala de Comunicações 60 Hz;
- RTA-08B, localizado na Sala Segura 50 Hz;
- RTA-16B, localizado na Sala Segura 60 Hz.

O projeto contempla ainda um sexto RA, denominado RTA-MICROONDAS, instalado na região da barragem. Entretanto, esse equipamento não faz parte do escopo do presente documento. Na Figura 21 são apresentadas as interligações entre as salas do backbone, onde cada linha azul representa uma interligação composta por dois cabos de fibra óptica.

Figura 21 – Backbone Óptico.



Fonte: (ITAIPU Binacional, 2017).

Fonte: Elaborado pelo autor.

O processo de elaboração das LCRAs seguiu a mesma metodologia apresentada para as LCUs, incluindo as atividades de levantamento das informações, cadastramento das siglas e equipamentos no banco de dados, codificação dos cabos, definição dos percursos, cadastramento das interligações e geração dos relatórios. Foi utilizado o mesmo template adotado para as LCUs, fornecido pelo CMI. Dessa forma, esta seção concentra-se nas particularidades associadas aos RAs.

A análise das especificações técnicas da RTA permitiu identificar uma distinção entre os RAs instalados nas Salas Seguras e os demais equipamentos dessa categoria. Os RAs RTA-08B e RTA-16B integram a infraestrutura de datacenter da RTA, constituindo o acesso à camada central da rede para os demais equipamentos do sistema. Como consequência, todas as UTAs e todos os demais RAs devem possuir interligações com esses equipamentos, garantindo acesso aos serviços disponibilizados pelos datacenters.

Durante o desenvolvimento das LCRAs, foram identificados três grupos principais de interligações associados aos RAs: conexões de uplink, conexões de backbone e conexões de alimentação elétrica. As conexões de uplink e backbone possuem como documentos principais as próprias LCRAs, enquanto as conexões de alimentação elétrica têm como documentos principais as LCPs, tratadas na Seção 4.3.5.

As conexões de uplink são responsáveis pela integração entre a camada de Acesso LAN e a camada Core LAN da arquitetura da RTA. Essas interligações conec-

tam as UTAs aos RAs das Salas Seguras por meio de cabos de fibra óptica monomodo, permitindo o acesso dos dispositivos de campo aos recursos disponibilizados pelos datacenters. Os detalhes dessas interligações são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Tipos de cabos para as conexões de uplink.

Origem	Destino	Meio de transmissão	Quantidade de vias por cabo	Quantidade de cabos
RTA-08B	UTA	Cabo de fibra óptica monomodo	12 fibras ópticas	1
RTA-16B	UTA	Cabo de fibra óptica monomodo	12 fibras ópticas	1

Fonte: Elaborado pelo autor.

As conexões de backbone constituem a infraestrutura principal de interligação entre as salas de comunicação da usina. Por meio delas, os RAs instalados nas Salas de Comunicações e na Sala de Telecomunicações são conectados aos RAs das Salas Seguras. Além disso, são previstas interligações entre as duas Salas Seguras e entre as duas Salas de Comunicações, formando uma infraestrutura redundante para transporte de dados. Todas essas conexões utilizam cabos de fibra óptica monomodo com 72 fibras ópticas e são implementadas em redundância, com dois cabos para cada interligação. Os detalhes dessas conexões são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Tipos de cabos para as conexões de backbone.

Origem	Destino	Meio de transmissão	Quantidade de vias por cabo	Quantidade de cabos
RTA-08B	RTA-TELECOM	Cabo de fibra óptica monomodo	72 fibras ópticas	2
RTA-16B	RTA-TELECOM	Cabo de fibra óptica monomodo	72 fibras ópticas	2
RTA-08B	RTA-COM.50HZ	Cabo de fibra óptica monomodo	72 fibras ópticas	2
RTA-16B	RTA-COM.50HZ	Cabo de fibra óptica monomodo	72 fibras ópticas	2
RTA-08B	RTA-COM.60HZ	Cabo de fibra óptica monomodo	72 fibras ópticas	2
RTA-16B	RTA-COM.60HZ	Cabo de fibra óptica monomodo	72 fibras ópticas	2
RTA-08B	RTA-16B	Cabo de fibra óptica monomodo	72 fibras ópticas	2
RTA-COM.50HZ	RTA-COM.60HZ	Cabo de fibra óptica monomodo	72 fibras ópticas	2

As conexões de alimentação elétrica correspondem aos cabos responsáveis pelo fornecimento de energia aos RAs. Os equipamentos RTA-08B, RTA-16B, RTA-COM.50HZ e RTA-COM.60HZ são alimentados por painéis localizados nas respectivas salas onde se encontram instalados. Como esses painéis pertencem ao escopo de outra equipe de engenharia, suas listas de cabos não fazem parte do presente documento. O RA RTA-TELECOM, por sua vez, é alimentado por um PDE que pertence ao escopo da infraestrutura da RTA, sendo essa interligação tratada posteriormente na Seção 4.3.5.

Os processos de cadastramento de siglas, equipamentos, cabos, vias e interligações seguiram os mesmos procedimentos apresentados para as LCUs. Da mesma forma, os RAs receberam faixas exclusivas de codificação conforme os critérios estabelecidos pelo CCVC, permitindo a geração e o controle das identificações dos cabos associados a cada equipamento.

Apesar da semelhança metodológica entre os documentos, a elaboração das LCRAs apresentou um nível de complexidade superior ao observado nas LCUs. Essa

diferença decorre principalmente da abrangência das interligações associadas aos RAs das Salas Seguras, responsáveis por conectar simultaneamente todas as UTAs e todos os demais RAs da Casa de Força.

Enquanto grande parte das interligações de Acesso LAN encontra-se concentrada em regiões específicas da usina devido a maior distribuição das UTAs, os cabos de uplink e backbone percorrem extensões significativamente maiores da Casa de Força. A média de comprimento dessas interligações supera 500 metros, existindo diversos casos com comprimentos superiores a 1 quilômetro. A análise desses percursos exigiu a utilização simultânea de múltiplos vínculos do modelo tridimensional da usina, abrangendo diferentes elevações. Nessas situações, a correta definição dos caminhos demandou elevado nível de organização e atenção durante as atividades de análise no Revit Viewer, uma vez que pequenas inconsistências poderiam resultar em diferenças significativas nos comprimentos finais dos cabos e nos percursos cadastrados nas listas.

Ao final dessas atividades, as cinco LCRA's contempladas no escopo deste trabalho encontravam-se geradas e emitidas, consolidando as informações relativas às interligações de uplink, backbone e alimentação elétrica associadas aos RAs da Casa de Força. Esses documentos forneceram as informações para a implantação dos enlaces responsáveis pela integração entre as UTAs e as salas de comunicação da RTA.

4.3.5 Listas de Cabos dos PDEs

As LCPs têm como objetivo apresentar todas as interligações de alimentação elétrica associadas aos PDEs da RTA. Esses documentos reúnem as informações necessárias para implantação dos circuitos responsáveis pelo fornecimento de energia aos equipamentos de comunicação e automação distribuídos ao longo da Casa de Força.

Os PDEs são os painéis responsáveis pela distribuição de tensão estabilizada aos equipamentos da RTA. A partir deles são alimentadas as UTAs, os PTOs e o RA RTA-TELECOM, concentrando a maior parte dos circuitos de alimentação elétrica associados à rede. No escopo deste trabalho, foram desenvolvidas 30 LCPs, correspondentes aos 30 PDEs previstos para instalação na Casa de Força.

As principais informações utilizadas para desenvolvimento das LCPs foram obtidas a partir dos DLDPs, documentos elaborados durante o PB da RTA. Esses desenhos apresentam uma visão geral da distribuição dos PDEs, UTAs e PTOs ao longo da Casa de Força, utilizando como referência a divisão da usina em unidades geradoras, eixos e elevações. Além da localização aproximada dos equipamentos, os DLDPs apresentam as interligações entre cada PDE e suas respectivas cargas, constituindo a principal referência para definição dos circuitos contemplados nas listas de cabos.

A metodologia empregada na elaboração das LCPs apresenta diversas semelhanças em relação às LCUs e às LCRAs. Atividades como o cadastro de siglas e equipamentos, a definição dos percursos, o cadastramento das vias de cabos, a codificação dos cabos, o registro das informações no banco de dados e a geração dos relatórios seguiram os mesmos procedimentos já apresentados nas seções anteriores. Entretanto, os circuitos de alimentação exigiram etapas adicionais que não estavam presentes nos demais tipos de listas de cabos.

Enquanto as LCUs e as LCRAs tratavam predominantemente de cabos de comunicação previamente definidos pelas especificações da RTA, as LCPs envolvem cabos de força cuja seção e características dependem das condições específicas de cada circuito. Dessa forma, antes da definição dos cabos e da geração das listas, tornou-se necessário realizar atividades de definição da formação dos circuitos, dimensionamento dos condutores e seleção dos materiais a serem empregados. Essas etapas alteraram a sequência de desenvolvimento adotada nas listas apresentadas anteriormente e exigiram análises adicionais relacionadas aos critérios elétricos do projeto.

A elaboração das LCPs seguiu, de forma geral, a seguinte sequência de atividades: estudo e análise dos documentos de referência; cadastro das informações de siglas e equipamentos no banco de dados; definição dos circuitos de alimentação; definição dos percursos e comprimentos dos cabos; dimensionamento dos condutores; seleção dos tipos de cabos; codificação e cadastramento das informações de cabos, vias de cabos e cabeamento no banco de dados; e, por fim, geração das listas de cabos.

No que se segue, são descritas apenas as etapas relacionadas ao desenvolvimento das LCPs que diferem das etapas já tratadas nas outras listas.

4.3.5.1 Levantamento, Estudo e Organização das Informações de Projeto

A etapa de levantamento, estudo e organização das informações de projeto apresentou diversas semelhanças em relação às atividades realizadas para elaboração das LCUs e das LCRAs. Entretanto, além da ETCCR e do CPE, o desenvolvimento das LCPs teve como principal referência os DLDPs, documentos produzidos durante o PB da RTA.

Os DLDPs possuem função semelhante à dos DLUAs, porém voltada aos sistemas de alimentação elétrica da rede. Esses desenhos apresentam, em uma única visualização, a distribuição dos PDEs, das UTAs e dos APs/PTOs ao longo da Casa de Força, utilizando como referência a divisão da usina em unidades geradoras, eixos e elevações. Além da localização dos equipamentos, os desenhos apresentam as interligações entre cada PDE e as cargas sob sua responsabilidade, permitindo uma análise abrangente da distribuição das alimentações previstas para a RTA.

Embora a elaboração dos DLDPs não faça parte do escopo do presente documento, algumas definições realizadas durante sua produção possuem influência direta nas atividades desenvolvidas no PE. Entre elas destacam-se a definição da localização dos PDEs e a distribuição das cargas associadas a cada painel.

Os 30 PDEs previstos para a Casa de Força deveriam ser capazes de alimentar todas as 30 UTAs e os 351 PTOs pertencentes à RTA. Para isso, a localização dos painéis foi definida de forma a proporcionar uma distribuição adequada das alimentações ao longo da usina, considerando simultaneamente a posição das cargas e as restrições estabelecidas para o projeto.

De acordo com a ETCCR, cada PDE possui capacidade de 25 circuitos de alimentação e potência nominal de 6 kVA. Dessa forma, a distribuição das cargas entre os painéis foi realizada de modo que não fossem ultrapassados esses limites. Além disso, por determinação da Itaipu Binacional, PDEs localizados no setor de 50 Hz não poderiam alimentar cargas localizadas no setor de 60 Hz, e vice-versa. Essas restrições foram consideradas durante a elaboração dos DLDPs e influenciaram diretamente a configuração final das alimentações adotadas para a RTA.

Durante o desenvolvimento das LCPs, os DLDPs foram amplamente utilizados para identificação das cargas associadas a cada PDE e compreensão da distribuição dos equipamentos ao longo da Casa de Força. As informações obtidas nessa etapa serviram como base para as atividades subsequentes de definição da formação dos circuitos, dimensionamento dos cabos e elaboração das listas de cabos.

4.3.5.2 Definição da Formação dos Circuitos

A etapa de definição da formação dos circuitos teve como objetivo determinar a composição dos circuitos de alimentação associados a cada PDE, estabelecendo quais cargas seriam atendidas por cada circuito e como seria realizada a distribuição da alimentação entre UTAs e PTOs. Conforme apresentado na Seção 4.3.5.1, os DLDPs já definiam quais PDEs seriam responsáveis pela alimentação de cada equipamento. Entretanto, ainda era necessário definir como essas cargas seriam distribuídas entre os circuitos disponíveis em cada painel.

A primeira atividade dessa etapa consistiu na definição da arquitetura dos circuitos destinados à alimentação dos PTOs. Inicialmente, foi avaliada a possibilidade de utilização de circuitos dedicados para carga. Essa abordagem apresentava vantagens relacionadas ao isolamento de falhas e à simplificação das atividades de manutenção. Entretanto, verificou-se que a adoção desse modelo resultaria em um número significativamente maior de cabos, aumentando a ocupação das vias previstas para o projeto.

Considerando as limitações físicas existentes na Casa de Força e as restrições relacionadas à capacidade das vias projetadas para a Atualização Tecnológica, optou-

se pela utilização de circuitos radiais com continuidade entre equipamentos adjacentes. Nessa configuração, o circuito parte do PDE, alimenta um PTO e segue para outros PTOs subsequentes pertencentes ao mesmo circuito. Essa solução permitiu reduzir a quantidade de cabos necessária para atendimento das cargas sem comprometer os requisitos funcionais estabelecidos para o projeto.

Após definição da arquitetura dos circuitos, foram considerados os critérios complementares estabelecidos pela Itaipu Binacional para composição dos circuitos de alimentação dos PTOs. Os circuitos deveriam atender no máximo cinco PTOs, deveriam evitar alimentar equipamentos localizados em diferentes elevações da usina e deveriam possuir apenas uma direção predominante de encaminhamento. Esse último critério visava evitar que um mesmo circuito utilizasse repetidamente uma mesma via de cabos ao longo do percurso.

Para as UTAs, a estratégia adotada foi distinta. De acordo com a ETCCR, cada UTA deveria receber dois circuitos independentes provenientes do mesmo PDE, proporcionando redundância na alimentação elétrica do equipamento. Dessa forma, foi definida uma alimentação dedicada para cada UTA, composta por dois circuitos distintos associados ao respectivo PDE.

Com os critérios estabelecidos, iniciou-se a definição individual dos circuitos. Para essa atividade, foi utilizado o arquivo de cabeamento extraído do banco de dados do projeto, complementado pelas informações presentes nos DLDPs. No caso das UTAs, o processo consistiu na associação de cada equipamento ao seu respectivo PDE alimentador e na criação das interligações redundantes previstas pela especificação. Para os PTOs, além da definição do painel de origem, foi necessário determinar a sequência dos equipamentos ao longo de cada circuito, estabelecendo a ordem das interligações entre os pontos atendidos.

A definição desses circuitos foi realizada com auxílio do modelo tridimensional da usina disponível no Revit Viewer. Os PDEs foram analisados individualmente, observando-se a distribuição física dos PTOs, a disposição das vias de cabos e os possíveis percursos entre os equipamentos. Como os PDEs e as cargas encontram-se distribuídos em diferentes unidades e elevações da Casa de Força, cada circuito exigiu análise específica para atendimento dos critérios estabelecidos pelo projeto e das características físicas do local de instalação.

De modo geral, buscou-se agrupar PTOs localizados próximos entre si ou distribuídos ao longo de uma mesma direção física da usina, permitindo que os circuitos percorressem os equipamentos de forma sequencial. À medida que os circuitos eram definidos, as informações de origem, destino, percurso e comprimento dos cabos eram registradas no arquivo de cabeamento utilizado pelo banco de dados. Os percursos e comprimentos foram obtidos utilizando o mesmo procedimento descrito para as LCU's e para as LCRAs.

Ao final dessa etapa, encontravam-se definidos os circuitos de alimentação associados aos 30 PDEs da Casa de Força, totalizando aproximadamente 200 circuitos. As informações produzidas serviram como base para as etapas subsequentes de dimensionamento dos condutores e elaboração das LCPs.

4.3.5.3 Dimensionamento dos Cabos

Após a definição dos circuitos de alimentação, foi realizada a etapa de dimensionamento dos cabos. Essa atividade teve como objetivo determinar as seções dos condutores utilizadas em cada circuito, garantindo atendimento aos requisitos estabelecidos pela ANBT NBR 5410 e pelo CPE.

O dimensionamento foi realizado por meio de uma planilha de cálculo desenvolvida por colegas da equipe, responsável por verificar os critérios exigidos pela norma para cada circuito analisado. A ferramenta avaliava os critérios de seção mínima dos condutores, capacidade de condução de corrente, queda de tensão, suportabilidade térmica em condição de curto-circuito e coordenação entre condutor e dispositivo de proteção. A seção adotada para cada circuito correspondia ao maior valor obtido entre os critérios avaliados.

A planilha pode ser visualizada na Figura 22, onde cada linha representa um circuito e cada coluna representa uma informação sobre esse circuito. Essa figura apresenta apenas as colunas referentes ao critério de capacidade de condução de corrente por limitação de espaço na folha, mas os demais critérios também estão presentes na planilha e possuem formato semelhante.

Figura 22 – Recorte da planilha e dimensionamento de cabos de força.

Critérios: + Novo Circuito					Entrada	Entrada			Entrada	
DADOS CIRCUITO		RESULTADOS			CAPACIDADE DE CONDUÇÃO DE CORRENTE (CCC)					
Origem TAG	Destino TAG	Cabos/fase	Seção Adotada (mm²)	Critério Dominante	Ft	Fa	In corrig. (A)	Método de Instalação	Seção (mm²)	
PDE02141	PTO-AP05-UTA1.17	1 x	2,5	CCC	0,91	0,50	0,6	B2	2,5	
PDE02141	PTO-AP06-UTA1.17 / PTO-AP07-UTA1.17	1 x	2,5	CCC	0,91	0,50	1,2	B2	2,5	
PDE02141	PTO-AP52-UTA1.17	1 x	2,5	CCC	0,91	0,50	0,6	B2	2,5	
PDE02141	PTO-AP57-UTA1.17 / PTO-AP60-UTA1.17 /	1 x	2,5	CCC	0,91	0,50	1,8	B2	2,5	
PDE02141	PTO-AP58-UTA1.16 / PTO-AP53-UTA1.17 /	1 x	2,5	CCC	0,91	0,50	1,8	B2	2,5	
PDE02141	PTO-AP62-UTA1.16 / PTO-AP64-UTA1.16 /	1 x	2,5	CCC	0,91	0,50	2,4	B2	2,5	
PDE05201	PTO-AP14-UTA1.11 / PTO-AP18-UTA1.11 /	1 x	4	ΔV	0,91	0,50	2,4	B2	2,5	
PDE05201	PTO-AP15-UTA1.11 / PTO-AP13-UTA1.11 /	1 x	2,5	CCC	0,91	0,50	1,8	B2	2,5	
PDE05201	PTO-AP17-UTA1.11 / PTO-AP19-UTA1.11	1 x	2,5	CCC	0,91	0,50	1,2	B2	2,5	
PDE06041	PTO-AP05-UTA1.14	1 x	2,5	CCC	0,91	0,50	0,6	B2	2,5	
PDE06041	PTO-AP06-UTA1.14	1 x	2,5	CCC	0,91	0,50	0,6	B2	2,5	
PDE06041	PTO-AP08-UTA1.14 / PTO-AP07-UTA1.14	1 x	2,5	CCC	0,91	0,50	1,2	B2	2,5	
PDE06041	PTO-AP09-UTA1.14	1 x	2,5	CCC	0,91	0,50	0,6	B2	2,5	
PDE06041	PTO-AP16-UTA1.14	1 x	2,5	CCC	0,91	0,50	0,6	B2	2,5	
PDE06041	PTO-AP17-UTA1.14	1 x	2,5	CCC	0,91	0,50	0,6	B2	2,5	
PDE06041	UTA1.14	1 x	10	ΔV	0,91	0,50	15,0	B2	2,5	

Fonte: (Santos; Biazzi, 2025).

Os principais dados de entrada utilizados na planilha foram obtidos a partir das informações produzidas nas etapas anteriores e dos documentos de referência do

projeto

- Frequência de operação: foi definida conforme o setor da usina em que o circuito estava localizado, adotando-se valores de 50 Hz ou 60 Hz.
- Tensão de alimentação: 220 V para todos os circuitos, conforme as características dos PDEs.
- Fator de potência: unitário para todas as cargas, de acordo com as especificações técnicas dos equipamentos alimentados.
- Potências das cargas: foram determinadas a partir das especificações dos equipamentos instalados nos PTOs e nas UTAs. Para os PTOs, foi considerada potência de 60 W por equipamento. Nos casos em que um mesmo circuito alimentava múltiplos PTOs, a potência total utilizada no dimensionamento correspondia à soma das potências individuais de todos os equipamentos pertencentes ao circuito. Para as UTAs, as potências variavam entre 1.500 W e 3.000 W, dependendo da configuração de cada unidade.
- Material do condutor: Cobre, conforme estabelecido pelo CPE.
- Temperatura máxima de operação: 90 °C, conforme estabelecido pelo CPE.
- Fator de temperatura: 0,91, conforme estabelecido pelo CPE.
- Fator de agrupamento: 0,5, conforme estabelecido pela ABNT NBR 5410.
- Método de instalação: B1, correspondente à instalação em eletrodutos, de acordo com a ABNT NBR 5410. Embora os circuitos percorressem diferentes tipos de vias ao longo da usina, como eletrocalhas, leitos, canaletas e eletrodutos, optou-se por utilizar o método mais conservador para todas as análises.
- Comprimento: obtido a partir da análise dos percursos definidos no modelo tridimensional da usina.
- Queda de tensão: 3%, conforme estabelecido pelo CPE.
- Tempo de atuação do disjuntor: 0,5 s, conforme estabelecido pelo CPE.
- Corrente máxima de curto-circuito: 128 A, valor definido a partir de limitação do conversor CC/CA do PDE.
- Coordenação entre condutor e proteção: foram utilizados disjuntores de 10 A nos circuitos destinados aos PTOs e disjuntores de 16 A nos circuitos destinados às UTAs, conforme especificado pela ETCCR.

Como resultado dessa etapa, foram definidas as seções dos condutores utilizados nos circuitos de alimentação dos PTOs e das UTAs. As seções calculadas no projeto foram de 2,5 mm² e 4,0 mm², sendo posteriormente utilizadas na seleção dos materiais e na elaboração das LCPs.

4.3.5.4 Definição dos cabos para cada interligação

Após a conclusão do dimensionamento dos circuitos, foi realizada a definição dos cabos a serem utilizados em cada interligação das LCPs. Essa etapa teve como objetivo associar os resultados obtidos no dimensionamento aos materiais efetivamente previstos para instalação no empreendimento.

O CPE estabelece as características gerais dos condutores a serem utilizados, incluindo requisitos relacionados ao material do condutor, tipo e tensão de isolamento. Entretanto, para elaboração das LCPs, era necessário determinar os modelos específicos de cabos que seriam empregados em cada circuito.

Para essa atividade, foi consultada a LMUC, documento corporativo que reúne os materiais padronizados para utilização no empreendimento. A LMUC contém os códigos de materiais, descrições técnicas e características dos cabos. Dessa forma, a partir das seções obtidas durante o dimensionamento, foram selecionados os cabos correspondentes que atendiam aos requisitos definidos para cada circuito.

Os circuitos de alimentação dos PTOs e das UTAs foram concebidos utilizando três condutores unipolares, correspondentes aos dois condutores de alimentação e ao condutor de proteção. Como o dimensionamento adotou a mesma seção para os condutores de fase e para o condutor de proteção, todos os cabos pertencentes a um mesmo circuito utilizavam o mesmo modelo de material definido na LMUC. A Tabela 5 apresenta os tipos de cabos selecionados para os circuitos contemplados nas LCPs.

Tabela 5 – Tipos de cabos para as conexões de alimentação.

Origem	Destino	Meio de transmissão	Quantidade de cabos por circuito	Formação do circuito
PDE	PTO	Cabo de cobre HEPR 90 °C 0,6/1 kV	3	2F+T
PTO	PTO	Cabo de cobre HEPR 90 °C 0,6/1 kV	3	2F+T
PDE	UTA	Cabo de cobre HEPR 90 °C 0,6/1 kV	3	2F+T

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a definição dos materiais, as informações correspondentes foram incorporadas ao arquivo de cabeamento do projeto, complementando os dados de origem, destino, percurso, comprimento e seção dos condutores já definidos nas etapas anteriores. Essas informações serviram como base para a geração das LCPs e para identificação dos materiais necessários à execução dos circuitos em campo.

4.4 MEMÓRIAS DE CÁLCULO DE DIMENSIONAMENTO DOS CABOS

As MDCs têm como objetivo apresentar os critérios, parâmetros e resultados utilizados na definição das seções dos cabos de força associados aos circuitos dos PDEs. Esses documentos constituem o registro técnico dos cálculos realizados durante o projeto, demonstrando o atendimento aos requisitos estabelecidos no projeto.

Conforme apresentado na Seção 4.3.5.3, o dimensionamento dos circuitos foi realizado por meio de uma planilha. A partir dos dados de cada circuito, a planilha avaliava os critérios de seção mínima dos condutores, capacidade de condução de corrente, queda de tensão, suportabilidade térmica em condição de curto-circuito e coordenação entre condutor e dispositivo de proteção, determinando as seções requeridas pelos diferentes critérios de dimensionamento e a seção final adotada para cada circuito.

Por definição da Itaipu Binacional, foi elaborada uma memória de cálculo para cada elevação da Casa de Força que possui PDEs. As elevações que possuem cabos da RTA, mas não possuem PDEs, foram representadas na memória de cálculo da elevação onde se encontra o PDE que origina esses cabos. Dessa forma, foram produzidas nove memórias de cálculo.

O trabalho desenvolvido pelo autor concentrou-se na revisão técnica desses documentos e na consolidação dos resultados produzidos durante o dimensionamento dos circuitos. Os valores calculados na planilha de dimensionamento foram organizados e inseridos nas respectivas memórias de cálculo, compondo a documentação executiva emitida para o projeto.

A elaboração das memórias de cálculo e os critérios utilizados para o dimensionamento dos cabos serão explicados a seguir.

4.4.1 Elaboração das Memórias de Cálculo

As memórias de cálculo foram elaboradas seguindo o padrão definido pelo CMI para os documentos do PE. Embora os resultados apresentados em cada documento sejam específicos para a elevação correspondente, todas as memórias seguem a mesma estrutura organizacional e utilizam um modelo padronizado.

Assim como os demais documentos produzidos no projeto, as memórias de cálculo são compostas por capa, contracapa e corpo principal. A capa apresenta informações de identificação do documento, incluindo título, código, revisão, responsáveis pela elaboração e data de emissão. A contracapa é utilizada para registro do histórico de revisões emitidas ao longo do desenvolvimento do projeto.

O corpo principal do documento é dividido em seções destinadas à apresentação dos critérios de dimensionamento e dos resultados obtidos. Inicialmente são apresentados o objetivo da memória de cálculo, os documentos de referência utiliza-

dos e as normas técnicas aplicáveis. Em seguida são apresentadas as características dos cabos considerados no projeto e os critérios utilizados para verificação da capacidade de condução de corrente, da queda de tensão e da suportabilidade em condições de curto-circuito.

A Figura 23 apresenta um recorte do corpo do documento, onde se pode observar o capítulo que determina as características dos cabos e o início do capítulo que determina os critérios de dimensionamento dos cabos.

Figura 23 – Recorte de uma memória de cálculo.

	RTA / TELECOM E SISTEMAS INFORMÁTICOS - DIMENSIONAMENTO DOS CABOS DE FORÇA - ELEV. 144,60 - MEMÓRIA DE CÁLCULO		
--	--	--	--

4 CARACTERÍSTICAS DOS CABOS

De acordo com os critérios de projeto (documento [1]), os cabos para circuitos de força em baixa tensão utilizados na Atualização Tecnológica devem possuir seguintes características:

- Tensão de Isolação - 0,6/1 kV
- Formação - Multipolares até 16mm². Singelos acima de 16mm²
- Tipo de Encordoamento - circular compacto
- Classe Condutor - classe 2 ou 5
- Material condutor - Cobre eletrolítico
- Isolação – Termofixo de polietileno reticulado (EPR) ou termofixo de polietileno reticulado de alto grau (HEPR)
- Cobertura: PVC tipo ST2
- Temperatura de operação máxima no condutor: 90 °C

5 CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO

5.1 GERAL

O dimensionamento dos cabos de baixa tensão segue as recomendações da norma NBR 5410 de 2005 (norma de referência [1]). As seções dos cabos foram determinadas considerando os seguintes critérios:

- a) Capacidade de condução de corrente
- b) Queda de tensão
- c) Suportabilidade a curto-circuito

A seção adotada para cada cabo corresponde à maior das seções mínimas calculadas para cada um desses três critérios.

De acordo com os critérios de projeto, os cabos de força devem possuir seção mínima de 2,5 mm² e não devem ser empregados cabos com seção nominal superior a 300 mm².

Fonte: Elaborado pelo autor.

A parte final da memória de cálculo é destinada à apresentação dos resultados. Nessa seção são consolidadas as informações obtidas durante o dimensionamento dos circuitos, incluindo a identificação dos circuitos analisados, os dados de entrada

utilizados nos cálculos, os resultados obtidos para cada critério de dimensionamento e a seção final adotada para os condutores.

A Figura 24 apresenta um recorte da seção de resultados, onde cada linha representa um circuito e cada coluna representa uma informação sobre o circuito, como os parâmetros adotados e as seções calculadas para cada critério de dimensionamento.

Figura 24 – Recorte de uma memória de cálculo.

Tabela 6-1 – Dados do dimensionamento e resultados obtidos em Corrente Alternada.

De	Para	Tensão (V)	nº de Fases	Carga (kVA)	cos ϕ	Mét. De inst.	L (m)	Máx. ΔV (%)	Icc-fonte (kA)	In corrig. (A)	Critérios de Dimensionamento			Resultados		
											Cond. de corrente nº cond. x Seção (mm²)	Queda de Tensão nº cond. x Seção (mm²)	Curto-circuito nº cond. x Seção (mm²)	Seção Adotada (mm²)	ΔV (%)	Icc-fim do cabo (kA)
PDE26011	PTO22-UTA1.02 / PTO21-UTA1.02 / PTO19-UTA1.02	220	2F+T	0,2	1,00	B2	210,0	3,0	5,000	1,8	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	1,39	0,12
PDE26011	PTO10-UTA1.02 / PTO23-UTA1.02 / PTO24-UTA1.02	220	2F+T	0,2	1,00	B2	165,0	3,0	5,000	1,8	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	1,09	0,15
PDE24011	PTO14-UTA1.02 / PTO15-UTA1.02 / PTO16-UTA1.02 / PTO17-UTA1.02	220	2F+T	0,2	1,00	B2	290,0	3,0	5,000	2,4	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	2,55	0,08
PDE22011	UTA1.02	220	2F+T	1,5	1,00	B2	9,0	3,0	5,000	15,0	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 10	1 x 10	0,50	1,78
PDE22011	UTA1.02	220	2F+T	1,5	1,00	B2	9,0	3,0	5,000	15,0	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 10	1 x 10	0,50	1,78
PDE22011	PTO44-UTA1.02	220	2F+T	0,1	1,00	B2	35,0	3,0	5,000	0,6	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 4	1 x 4	0,08	0,62
PDE9A021	UTA2.1	220	2F+T	1,5	1,00	B2	9,0	3,0	5,000	15,0	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 10	1 x 10	0,50	1,78
PDE9A021	UTA2.1	220	2F+T	1,5	1,00	B2	9,0	3,0	5,000	15,0	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 10	1 x 10	0,50	1,78
PDE22021	UTA1.12	220	2F+T	1,5	1,00	B2	9,0	3,0	5,000	15,0	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 10	1 x 10	0,50	1,78
PDE22021	UTA1.12	220	2F+T	1,5	1,00	B2	9,0	3,0	5,000	15,0	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 10	1 x 10	0,50	1,78
PDE22021	PTO12-UTA1.12 / PTO17-UTA1.12	220	2F+T	0,1	1,00	B2	50,0	3,0	5,000	1,2	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	0,22	0,45
PDE22021	PTO25-UTA1.12	220	2F+T	0,1	1,00	B2	10,0	3,0	5,000	0,6	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 10	1 x 10	0,02	1,66
PDE22021	PTO29-UTA1.12 / PTO31-UTA1.12	220	2F+T	0,1	1,00	B2	410,0	3,0	5,000	1,2	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	1,80	0,06
PDE22021	PTO32-UTA1.12	220	2F+T	0,1	1,00	B2	646,0	3,0	5,000	0,6	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	1,42	0,04
PDE22021	PTO14-UTA1.12	220	2F+T	0,1	1,00	B2	714,0	3,0	5,000	0,6	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	1,57	0,03
PDE22021	PTO15-UTA1.12	220	2F+T	0,1	1,00	B2	714,0	3,0	5,000	0,6	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	1,57	0,03
PDE22021	PTO16-UTA1.12	220	2F+T	0,1	1,00	B2	884,0	3,0	5,000	0,6	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	1,94	0,03

Fonte: Elaborado pelo autor.

Um exemplo de memória de cálculo completa pode ser visualizado no Apêndice B.

4.4.2 Critérios de Dimensionamento dos Cabos

As MDCDs registram os critérios e os métodos de cálculo utilizados para o dimensionamento dos cabos de força empregados na alimentação dos equipamentos da RTA. O conteúdo técnico desses documentos foi baseado nos critérios estabelecidos pela ABNT NBR 5410 e pelo CPE, sendo estruturado em três verificações principais: capacidade de condução de corrente, queda de tensão e suportabilidade a curto-circuito.

Para cada circuito analisado, foram calculadas as seções exigidas por cada um desses critérios, utilizando os parâmetros descritos na Seção 4.3.5.3. A seção adotada corresponde ao maior valor obtido entre as verificações realizadas, garantindo o atendimento simultâneo de todos os requisitos normativos.

Capacidade de condução de corrente

A determinação da capacidade de condução de corrente inicia a partir do cálculo da corrente nominal I_n . Em circuito bifásicos, ela é calculada por:

$$I_n = \frac{S}{V} ,$$

em que:

- I_n é a corrente nominal do circuito (A);
- S é a potência aparente do circuito (VA);
- V é a tensão nominal (fase-fase) do circuito (V) (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004).

A corrente nominal deve ser adequada conforme os fatores de correção. Assim é obtida a corrente corrigida I_z , calculada por:

$$I_z = \frac{I_n}{F_t \cdot F_a \cdot n_{cp}} ,$$

em que:

- I_z é a corrente corrigida (A);
- F_t é o fator de temperatura;
- F_a é o fator de agrupamento;
- n_{cp} é o número de condutores por fase (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004).

A ABNT NBR 5410 estabelece valores de ampacidade em função da seção do condutor, do método de instalação e das condições de utilização. Os valores obtidos da corrente corrigida foram comparados às tabelas de ampacidade da norma, permitindo determinar a seção mínima necessária para atendimento desse critério.

Queda de tensão

Após a determinação preliminar da seção do condutor, verifica-se o atendimento ao limite máximo de queda de tensão estabelecido pelo CPE, igual a 3

Para circuitos bifásicos, a queda de tensão ΔV é calculada por:

$$\Delta V = 2 \cdot I_n \cdot L \cdot (R \cdot \cos \varphi + X \cdot \sin \varphi) ,$$

em que:

- ΔV é a queda de tensão (V);
- I_n é a corrente nominal do circuito (A);

- L é o comprimento do circuito;
- R é a resistência elétrica do cabo;
- X é a reatância do cabo;
- φ é o ângulo do fator de potência (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004).

A queda de tensão percentual $\Delta V_{\%}$ é obtida por:

$$\Delta V_{\%} = \frac{\Delta V}{V} \cdot 100 ,$$

em que:

- $\Delta V_{\%}$ é a queda de tensão percentual (%);
- ΔV é a queda de tensão calculada (V);
- V é a tensão nominal do circuito (V) (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004).

Caso o valor calculado ultrapasse o limite admissível, a seção do condutor é aumentada até que o critério seja satisfeito (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004).

Suportabilidade a curto-circuito

A verificação da suportabilidade térmica dos condutores em condições de curto-circuito tem como objetivo garantir que o cabo seja capaz de suportar os esforços térmicos produzidos durante uma condição de falta até a atuação do dispositivo de proteção.

A seção mínima requerida S para atendimento desse critério é determinada por:

$$S = \frac{I_{cc} \sqrt{t}}{\sqrt{48,686 \cdot \log \left(\frac{T_2 + 228}{T_1 + 228} \right)}} ,$$

em que:

- S é a seção mínima requerida do condutor (mm²);
- I_{cc} é a corrente de curto-circuito (A);
- t é o tempo de atuação da proteção (s);
- T_1 é a temperatura inicial do condutor (°C);

- T_2 é a temperatura final admissível do condutor (°C) (Consórcio Modernização de Itaipu, 2024).

Após a aplicação dos três critérios, as seções obtidas foram comparadas entre si. Conforme estabelecido pela ABNT NBR 5410, a seção final adotada para cada circuito corresponde ao maior valor obtido dentre todas as verificações realizadas. Os resultados produzidos nessa etapa foram posteriormente consolidados nas MDCDs emitidas para o projeto.

4.5 GESTÃO E EMISSÃO DOS DOCUMENTOS

A GED constitui uma atividade fundamental no desenvolvimento do PE da RTA. Além da elaboração propriamente dita, os documentos de engenharia precisam seguir procedimentos padronizados de controle de revisões, armazenamento, circulação, verificação e emissão. Esses processos garantem a rastreabilidade das informações produzidas, a padronização dos documentos e a conformidade com os requisitos estabelecidos pelo CMI e pela Itaipu Binacional.

Ao longo deste trabalho foram produzidos diversos documentos executivos de engenharia, incluindo LCUs, LCRAs, LCPs e MDCDs. Embora o objetivo deste relatório esteja relacionado à elaboração e emissão desses documentos, é importante compreender o fluxo completo pelo qual eles passam dentro do empreendimento, incluindo as etapas posteriores de análise, comentários e aprovação conduzidas pelo cliente.

Dessa forma, esta seção apresenta o processo de gestão documental utilizado no Plano de Atualização Tecnológica da Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional, descrevendo as ferramentas empregadas, as etapas internas de controle documental e o fluxo adotado para emissão dos documentos produzidos durante o estágio.

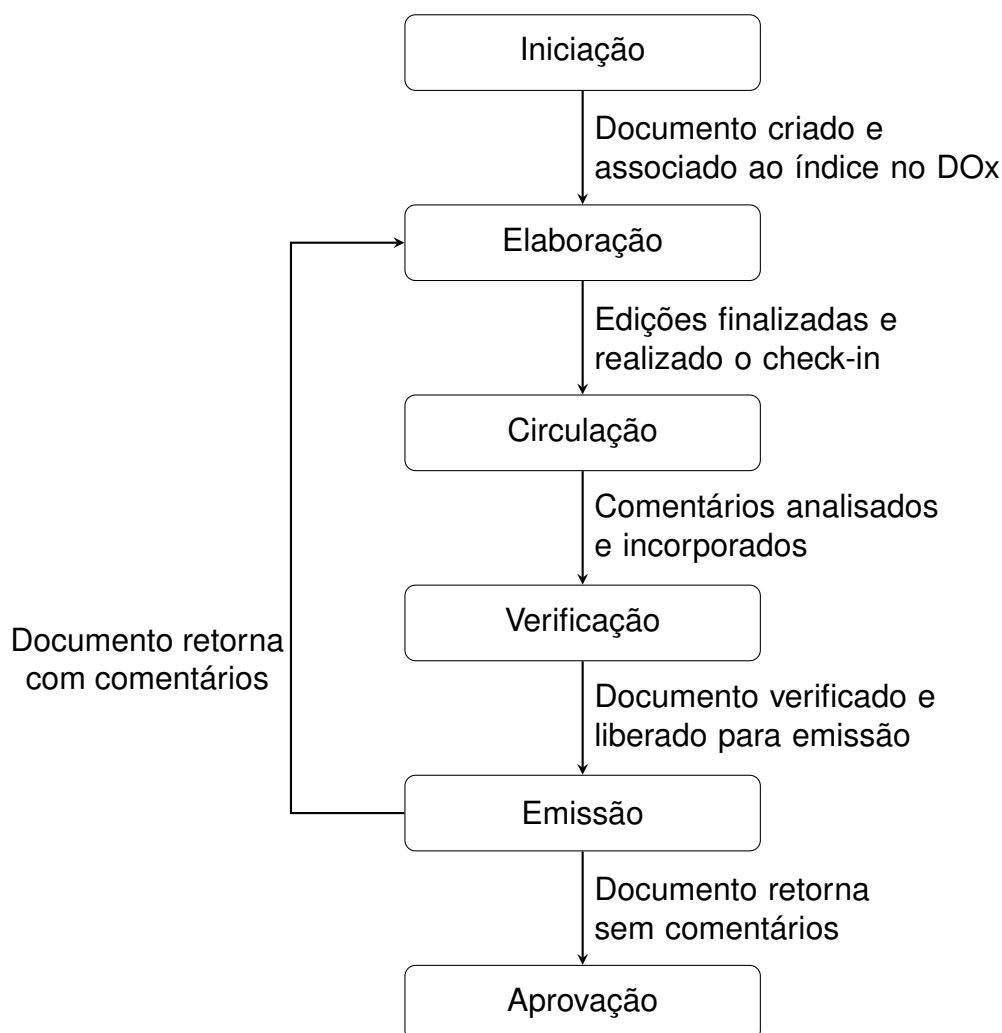
4.5.1 Fluxo de Gestão de Documentos

A gestão dos documentos do Plano de Atualização Tecnológica da Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional é realizada principalmente por meio de duas ferramentas: o DOx e o Gmail. O DOx é o sistema corporativo utilizado para controle de documentos, revisões, status e histórico de alterações, enquanto o Gmail é empregado para comunicações complementares envolvendo a secretaria, a coordenação e os demais participantes do fluxo documental.

Embora o objetivo deste trabalho esteja relacionado à elaboração e emissão dos documentos produzidos no âmbito do PE da RTA, esses documentos fazem parte de um fluxo mais amplo de gestão documental, que se estende até as etapas de análise e aprovação conduzidas pelo CMI e pela Itaipu Binacional.

O fluxo de documentos adotado no projeto, apresentado na Figura 25, é composto pelas seguintes etapas: Iniciação, Elaboração, Circulação, Verificação, Emissão, Análise do Cliente e Aprovação.

Figura 25 – Fluxograma do processo de GED.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A etapa de iniciação corresponde à criação do documento dentro do ambiente de gestão documental. Inicialmente, é solicitado à secretaria o cadastramento de um índice no DOx. Esse índice funciona como um identificador único, associando o documento a informações previamente definidas pela coordenação do projeto, como disciplina, tipo documental, código e título. Após a criação do índice, o documento passa a integrar oficialmente o sistema e torna-se disponível para edição.

A elaboração consiste na produção e atualização do conteúdo técnico do documento. Durante essa etapa, o autor realiza as atividades de engenharia necessárias, insere informações, revisa conteúdos e efetua as modificações requeridas. Todas as alterações são registradas no DOx por meio do procedimento de check-in, permitindo o controle de versões e a rastreabilidade das modificações realizadas ao longo do

desenvolvimento do documento.

Concluída a elaboração, inicia-se a circulação. Nessa fase, o documento é disponibilizado para análise de profissionais previamente selecionados, normalmente integrantes da equipe de engenharia, supervisores e coordenadores. Os participantes podem registrar comentários, sugestões e solicitações de ajuste diretamente no sistema. Após o encerramento do prazo de circulação, os comentários recebidos são analisados e incorporados ao documento quando considerados pertinentes.

Em seguida ocorre a etapa de verificação. Nessa fase, profissionais autorizados realizam uma análise final do documento, avaliando aspectos relacionados à consistência técnica, conformidade com os critérios de projeto, atendimento aos requisitos do cliente e adequação ao padrão documental adotado pelo CMI. Uma vez concluída a verificação, o documento é liberado para emissão.

A emissão corresponde à geração da revisão oficial do documento. Para os documentos produzidos neste trabalho, essa etapa normalmente envolve a exportação do arquivo para o formato PDF e seu armazenamento no diretório apropriado do DOx. Em seguida, a documentação é encaminhada à secretaria, responsável por realizar o processo formal de emissão por meio das plataformas corporativas utilizadas pelo empreendimento.

Após a emissão, o documento passa a integrar o fluxo de análise do cliente. Nessa etapa, a documentação pode ser avaliada pelo CMI e pela Itaipu Binacional, que registram comentários, solicitações de ajuste ou pareceres de aprovação. Quando comentários são recebidos, uma nova revisão é elaborada e o documento retorna às etapas anteriores do fluxo. Esse ciclo pode ocorrer diversas vezes até que todas as observações sejam tratadas.

Por fim, quando o documento atende aos requisitos técnicos e contratuais estabelecidos para o empreendimento, ele recebe o status de aprovado. Embora a aprovação final não faça parte do escopo das atividades desenvolvidas neste trabalho, a compreensão desse fluxo é importante para contextualizar o ciclo de vida completo dos documentos produzidos durante o PE da RTA.

4.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Como resultado das atividades desenvolvidas, foram elaborados documentos do PE referentes à infraestrutura de cabeamento da Casa de Força da Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional. Ao longo do trabalho foram produzidas listas de cabos destinadas às UTAs, aos PDEs e aos RAs, além das memórias de cálculo utilizadas para o dimensionamento dos circuitos de alimentação elétrica. A Tabela 6 apresenta um resumo dos documentos elaborados e de sua situação ao término deste trabalho.

No total, foram produzidos 74 documentos técnicos, todos emitidos para o fluxo corporativo de gestão documental do empreendimento. Ao término deste trabalho,

Tabela 6 – Estágio dos documentos elaborados, ao término do trabalho.

Documentos	Emitidos	Em análise pelo CMI	Em análise por Itaipu
LCUs	30	5	25
LCRAs	5	0	4*
LCPs	30	28	2
MCDCs	9	2	7
Total	74	35	38*

Fonte: Elaborado pelo autor.

* Um documento foi aprovado em versão definitiva por Itaipu Binacional.

cerca de 51% dessa documentação já havia avançado para a etapa de análise pela Itaipu Binacional, enquanto os demais documentos permaneciam em análise pelo CMI. Destaca-se que uma das LCRAs já havia sido aprovada em sua versão definitiva, evidenciando a conformidade da documentação produzida com os requisitos técnicos estabelecidos para o empreendimento.

Espera-se que a aprovação pelo CMI de 100% dos documentos elaborados seja concluída até o final do mês de agosto de 2026, enquanto a aprovação definitiva por parte de Itaipu Binacional é prevista para o mês de outubro do mesmo ano.

A aprovação do PE da RTA da Casa de Força representa um importante marco de maturidade do Plano de Atualização Tecnológica. Embora o empreendimento contemple a modernização de diversos sistemas distribuídos por toda a usina, a RTA e a Casa de Força foram definidas como prioridades nas etapas iniciais do projeto. Foi nesse contexto que foram desenvolvidos os primeiros estudos de engenharia, as definições de posicionamento dos equipamentos, o planejamento das vias de cabos, os critérios de encaminhamento e a consolidação das metodologias empregadas na elaboração dos documentos executivos. Ao longo desse processo, as equipes adquiriram experiência prática sobre os desafios impostos pelo ambiente industrial e os procedimentos mais adequados para o desenvolvimento da documentação técnica.

Esse conhecimento acumulado tende a beneficiar as próximas etapas do Plano de Atualização Tecnológica. A existência de metodologias já validadas, critérios consolidados e maior familiaridade das equipes com o empreendimento favorece a padronização dos processos e contribui para o aumento da produtividade e da qualidade técnica dos projetos que serão desenvolvidos para os demais sistemas e setores da usina.

Além disso, a aprovação do PE da RTA da Casa de Força marca uma transição entre as fases de engenharia e de implantação. A partir desse momento, a execução da infraestrutura desse setor pode ser iniciada, permitindo que as soluções concebidas durante o projeto sejam efetivamente implementadas e validadas em condições reais de operação.

A implantação da nova infraestrutura da RTA também possui potencial para contribuir, ainda que de forma indireta, para a qualidade da energia gerada pela Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional. Embora a infraestrutura de cabeamento não interfira diretamente nos processos eletromecânicos de geração, ela constitui a base de comunicação dos sistemas responsáveis pelo monitoramento, supervisão e controle da planta. Uma infraestrutura de comunicação mais confiável e organizada favorece a disponibilidade dos sistemas de automação e reduz a probabilidade de falhas de comunicação. Como consequência, cria-se um ambiente mais robusto para a operação dos sistemas responsáveis pelo controle do processo de geração, contribuindo para maior confiabilidade operacional e para a manutenção da estabilidade e da qualidade da energia elétrica produzida.

Sob a perspectiva da Nova Engevix, os resultados obtidos neste trabalho também apresentam relevância além do escopo da RTA. A elaboração do PE exigiu o desenvolvimento e a consolidação de metodologias de trabalho, critérios de documentação, processos de integração entre disciplinas e procedimentos para gestão de informações em um empreendimento de grande porte. Esses conhecimentos passam a integrar a experiência acumulada pela empresa, podendo ser reutilizados e aperfeiçoados em projetos futuros.

A participação em um dos maiores programas de modernização tecnológica do setor hidrelétrico representa um importante diferencial para a empresa. A experiência adquirida no desenvolvimento do PE da RTA amplia o portfólio técnico da Nova Engevix e fortalece sua capacidade de atuar em futuros projetos de atualização tecnológica e infraestrutura de telecomunicações, tanto junto à Itaipu Binacional quanto em empreendimentos de características semelhantes.

Além da produção documental, o trabalho contemplou o cadastramento de 1.457 cabos, totalizando aproximadamente 198,5 quilômetros de infraestrutura de cabeamento distribuída ao longo da Casa de Força. Esses resultados evidenciam a abrangência do projeto desenvolvido e a elevada quantidade de informações necessárias para representar a infraestrutura física da RTA.

Os resultados obtidos demonstram que os objetivos propostos para o trabalho foram parcialmente alcançados. Todos os documentos foram elaborados e emitidos. Um documento foi aprovado em versão definitiva. Os demais, ou encontram-se em análise pelo CMI ou em análise por Itaipu. O avanço dos documentos não depende do autor no momento, só resta aguardar o parecer das partes aprovadoras. A previsão é que todos os documentos retornem e sejam emitidos em versão definitiva nos próximos 4 meses. Quando aprovados, além de subsidiar a aquisição de materiais e a execução da instalação, os documentos passarão a integrar o conjunto oficial de documentação técnica da Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional.

De forma geral, os resultados obtidos demonstram que os objetivos propostos

para este trabalho foram parcialmente alcançados. Todos os documentos previstos no escopo foram elaborados e emitidos, cumprindo integralmente as atividades sob responsabilidade do autor. Até a conclusão do presente trabalho, um dos documentos já havia sido aprovado em sua versão definitiva, enquanto os demais encontravam-se em processo de análise pelo CMI ou por Itaipu Binacional. Nessa etapa, o avanço do processo de aprovação deixa de depender das atividades desenvolvidas pelo autor, restando apenas aguardar a análise pelas partes responsáveis. A expectativa é que todos os documentos sejam aprovados e emitidos em versão definitiva nos próximos quatro meses. Após essa etapa, além de subsidiar as atividades de aquisição de materiais, execução da obra e futuras ações de operação e manutenção, esses documentos passarão a integrar oficialmente o acervo de documentação técnica da Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional.

5 CONCLUSÃO

A elaboração do PE de cabeamento da RTA da Casa de Força da Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional envolveu um elevado grau de complexidade técnica, decorrente da necessidade de garantir a consistência de um grande volume de informações distribuídas entre diferentes documentos de engenharia. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo elaborar a documentação executiva referente ao sistema de cabeamento da RTA, contemplando listas de cabos e memórias de cálculo destinadas à implantação da infraestrutura de comunicação e alimentação elétrica da rede.

Os objetivos sob responsabilidade do autor foram integralmente alcançados, tendo sido elaborados e emitidos 74 documentos executivos de engenharia, compreendendo 30 LCUs, 30 LCPs, 5 LCRAs e 9 MCDCs. Até a conclusão deste trabalho, um desses documentos já havia sido aprovado em versão definitiva, enquanto os demais permaneciam em processo de análise pelo CMI e por Itaipu Binacional, etapa cujo avanço não depende mais das atividades desenvolvidas pelo autor. O desenvolvimento desses documentos demandou a análise e a consolidação de informações provenientes de dezenas de desenhos e documentos técnicos, evidenciando a complexidade do empreendimento e o elevado volume de dados que precisaram ser organizados e mantidos consistentes ao longo do PE.

Os resultados obtidos permitiram demonstrar a eficácia da metodologia empregada para o desenvolvimento do projeto. A estruturação das informações em um banco de dados relacional, associada à análise individualizada das vias de cabos e às verificações de consistência entre os documentos, mostrou-se adequada para gerenciar a complexidade do empreendimento, preservando a integridade das informações durante todo o processo de elaboração da documentação. A aplicação dessa metodologia em um empreendimento dessa magnitude evidencia sua capacidade de apoiar o desenvolvimento de projetos executivos de cabeamento em ambientes industriais de grande porte.

Ao longo do projeto, alterações conceituais e solicitações de revisão exigiram a readequação das soluções previamente desenvolvidas. Uma das principais alterações ocorreu com a definição da separação entre os setores de 50 Hz e 60 Hz para o encaminhamento dos cabos de alimentação. Esse requisito foi incorporado após o início do projeto e exigiu a revisão dos percursos de cabos e o redimensionamento de circuitos. Da mesma forma, alterações no posicionamento de UTAs e PDEs levaram à revisão de listas de cabos, memórias de cálculo e desenhos de localização, gerando retrabalho e impactos no cronograma de desenvolvimento da documentação.

Outro desafio relevante foi a atualização do CCVC. Alterações introduzidas nesse critério exigiram a readequação da identificação de cabos que já haviam sido

cadastrados e emitidos. Esse processo envolveu a atualização do banco de dados e das listas de cabos, preservando a consistência das informações ao longo de toda a documentação.

Como continuidade do presente trabalho, busca-se, inicialmente, a conclusão do processo de aprovação dos documentos elaborados durante a etapa de PE da infraestrutura de cabeamento da Casa de Força. Na sequência, a metodologia empregada neste trabalho continuará sendo aplicada às demais áreas contempladas pela RTA, incluindo a Barragem Principal, a Barragem Lateral, o Vertedouro e a Subestação da Margem Direita. Cada uma dessas áreas apresenta características construtivas e requisitos próprios, exigindo novas soluções.

A conclusão do PE da RTA representa apenas uma das etapas do Plano de Atualização Tecnológica da Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional. Nos próximos anos, o empreendimento seguirá com o desenvolvimento e a implantação de diversos outros sistemas previstos no programa de modernização, tendo como próximo grande escopo o plano de migração das unidades geradoras. Cada uma dessas unidades está associada a dezenas de sistemas elétricos, de automação, proteção, supervisão e telecomunicações, muitos dos quais permanecem em operação desde o início da usina. A modernização demandará a substituição de grande parte da infraestrutura de cabeamento, painéis e equipamentos atualmente instalados. À medida que os projetos executivos forem concluídos, as unidades geradoras serão retiradas de operação, uma de cada vez, para a execução dos respectivos planos de migração, permitindo a atualização tecnológica da planta sem comprometer sua continuidade operacional.

Nesse contexto, entende-se que a experiência adquirida durante o desenvolvimento do PE da RTA será amplamente aproveitada nas próximas etapas do empreendimento. Os métodos de trabalho, os critérios adotados para elaboração da documentação executiva e as práticas de gestão das informações, desenvolvidos e aperfeiçoados ao longo deste trabalho, constituem uma base consolidada para o desenvolvimento dos projetos subsequentes. Dessa forma, além da documentação produzida, este trabalho deixa como contribuição um conjunto de metodologias e conhecimentos que tendem a aumentar a eficiência das futuras etapas do Plano de Atualização Tecnológica.

De forma mais ampla, os conhecimentos adquiridos também ampliam a capacidade técnica da Nova Engevix para atuação em empreendimentos de características semelhantes. A participação em um dos maiores programas de modernização tecnológica do setor hidrelétrico proporcionou o desenvolvimento de competências relacionadas ao planejamento, à elaboração e à gestão de projetos executivos de elevada complexidade, fortalecendo a experiência da empresa em infraestrutura de automação e telecomunicações para instalações críticas. Assim, espera-se que as metodologias desenvolvidas e as lições aprendidas ao longo deste projeto possam ser reaproveitadas e continuamente aperfeiçoadas em futuras iniciativas de modernização de usinas

e em outros empreendimentos de engenharia consultiva.

REFERÊNCIAS

ANSI/TIA. **ANSI/TIA-1005-A: Telecommunications Infrastructure Standard for Industrial Premises**. Arlington, 2012a.

ANSI/TIA. **ANSI/TIA-568.0-D: Generic Telecommunications Cabling for Customer Premises**. Arlington, 2018.

ANSI/TIA. **ANSI/TIA-606-B: Administration Standard for Telecommunications Infrastructure**. Arlington, 2012b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR IEC 61082: Preparação de documentos utilizados em eletrotécnica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16636-1: Elaboração e desenvolvimento de serviços técnicos especializados de projetos arquitetônicos e urbanísticos – Parte 1: Diretrizes e terminologia**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410: Instalações Elétricas de Baixa Tensão**. Rio de Janeiro, 2004.

BRASIL. **Lei nº 14.133, de 1º de abril de 2021. Lei de Licitações e Contratos Administrativos**. Brasília: [s.n.], 2021. Diário Oficial da União. Acesso em: 2026. Disponível em:
https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/l14133.htm.

CAMPANER, Ronni M.; SOUZA, Luiza de. **Geral – Codificação de Vias e Cabos Elétricos e Ópticos – Critérios**. Foz do Iguaçu, 2025. Revisão 0.01. Documento técnico do projeto de Atualização Tecnológica da UHE Itaipu.

CISCO SYSTEMS. **Cisco Catalyst 9105AX Series Access Points**. [S.l.: s.n.], 2020. Documentação técnica do produto. Acesso em: março de 2026. Disponível em:
https://www.cisco.com/c/pt_br/support/wireless/catalyst-9105ax-series-access-points/series.html.

CISCO SYSTEMS. **Cisco Catalyst 9124AX Series Access Points**. [S.l.: s.n.], 2021. Documentação técnica do produto. Acesso em: março de 2026. Disponível em:
https://www.cisco.com/c/pt_br/support/wireless/catalyst-9124ax-series/series.html.

CONSÓRCIO MODERNIZAÇÃO DE ITAIPU. **Projetos Elétricos – Critérios**. [S.l.], 2024. Revisão R0.

CONSÓRCIO MODERNIZAÇÃO ITAIPU. **Serviços Auxiliares Essenciais – Painel de Distribuição de Tensão Estabilizada (PDE) – 50 Hz – Típico – Desenho**

Dimensional (Caderno Mecânico). Foz do Iguaçu, PR, 2025. Projeto Atualização Tecnológica da Usina Hidrelétrica de Itaipu. Documento aprovado.

EBELING, Charles. **An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering.** 2. ed. Long Grove: Waveland Press, 2010.

IEC. **IEC 62264: Enterprise-Control System Integration.** [S.l.], 2013.

IEEE. **IEEE Std 802.3: Ethernet Standard.** New York, 2018.

IMD/UFRN. **Fibra Ótica.** [S.l.: s.n.]. Acesso em: março de 2026. Disponível em: <https://materialpublic.imd.ufrn.br/curso/disciplina/4/19/2/8>.

ISA. **ANSI/ISA-95: Enterprise-Control System Integration.** Research Triangle Park, 2010.

ISO/IEC. **ISO/IEC 11801-3: Information technology — Generic cabling for customer premises — Part 3: Industrial premises.** Geneva, 2017.

ITAIPU BINACIONAL. **Aspectos Técnicos da Usina Hidrelétrica de Itaipu.** [S.l.], 2022. Acesso em: março de 2026. Disponível em: https://www.itaipu.gov.br/sites/default/files/af_df/2202_023_revista_aspectos_tecnicos_bizuarios_018.pdf.

ITAIPU BINACIONAL. **Critérios e Requisitos Básicos de Cabeamento Estruturado.** [S.l.], 2016. Superintendência de Engenharia (EN.DT), Revisão R0.

ITAIPU BINACIONAL. **Especificação Técnica de Equipamentos e Sistemas – Controle Centralizado.** [S.l.], 2017. Revisão R2, 2019.

ITAIPU BINACIONAL. **Usina de Itaipu fecha 2025 com produção de 72.879 milhões de MWh: energia suficiente para abastecer o planeta por um dia.** [S.l.: s.n.], 2026. Acesso em: março de 2026. Disponível em: <https://www.itaipu.gov.br/noticias/sala-de-imprensa/usina-de-itaipu-fecha-2025-com-producao-de-72879-milhoes-de-mwh-energia-suficiente-para-abastecer-o-planeta-por-um-dia>.

LIGHTERA. **CAIXA APARENTE INDUSTRIAL INDOOR/OUTDOOR IP67.** Datasheet. [S.l.], 2026. Disponível em: https://datasheet.lightera.com/versao_et_pdf?id=a0A6100000blnysEAA&lang=pt-br.

LIGHTERA. **Fiber-LAN Indoor/Outdoor CFOT-EO – ABNT.** [S.l.], 2025. Material técnico (PDF). Disponível em: <https://www.furukawalatam.com/pt-br/versao-et-pdf/fiber-lan-indoor-outdoor-cfot-eo---abnt>. Acesso em: 2026.

LIGHTERA. **RACK 15U 600x673 IP54**. Especificação Técnica. [S.l.], 2023. Disponível em: <https://www3.latam.lightera.com/pt-br/versao-et-pdf/=a0A3k00000XnFk9>.

LIGHTERA. **Rack 42U 800x800 IP55**. [S.l.: s.n.], 2024. Material técnico (PDF). Disponível em: <https://www3.latam.lightera.com/pt-br/versao-et-pdf/=a0A3k00000XnGUq>.

MAMEDE FILHO, João. **Instalações Elétricas Industriais**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2023.

MARTINEZ-PONCE, Edwin Mauricio; PONCE, Pedro; MACIAS, Israel; MOLINA, Arturo. Automation Pyramid as Constructor for a Complete Digital Twin, Case Study: A Didactic Manufacturing System. **Sensors**, v. 21, n. 14, 2021. DOI: 10.3390/s21144656. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/14/4656>.

NIST. **Guide to Industrial Control Systems (ICS) Security**. [S.l.], 2015.

NOVA PARTICIPAÇÕES S.A. **História**. [S.l.: s.n.]. Acesso em: março de 2026. Disponível em: <https://www.novaparticipacoes.com/historia/>.

QSFPTEK. **Twisted Pair Cables Guide**. [S.l.: s.n.], 2023. Accessed: março de 2026. Disponível em: <https://www.qsfptek.com/pt/qt-news/twisted-pair-cables-guide.html>.

RITTAL. **Caixa básica AX em chapa de aço – AX 1034000**. [S.l.: s.n.], 2026. <https://www.rittal.com/br-pt/products/PG20231215SCH101/PG20231512SCH301/PR070743?variantId=1034000>. Acesso em: março de 2026.

SANTOS, André Vinicius Mascarenhas; BIAZI, Victor Bergamin. **Planilha de Dimensionamento de Cabos da RTA**. [S.l.: s.n.], 2025. Documento interno. Nova Engevix Engenharia e Projetos S.A.

STALLINGS, William. **Data and Computer Communications**. 10. ed. Boston: Pearson, 2014.

CONTROLE DO EMITENTE	CÓDIGO DE ITAPI	FOLHA	REVISÃO
		48	00A

Figura 28 – Exemplo de lista de cabos (3/4 - lista de cabos). Alguns elementos foram omitidos por questões de sigilo.

CONTROLE DO EMITENTE	CÓDIGO DE ITAPIU	
.....		FOLHA REVISÃO
SE	BAA	

Figura 29 – Exemplo de lista de cabos (4/4 - lista de cabos). Alguns elementos foram omitidos por questões de sigilo.

AT	RTA / TELECOM E SISTEMAS INFORMÁTICOS - DIMENSIONAMENTO DOS CABOS DE FORÇA - ELEV. 78,00 - MEMÓRIA DE CÁLCULO		
SUMÁRIO			
1	OBJETIVO	4	
2	DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA	4	
3	NORMAS TÉCNICAS APLICÁVEIS	4	
4	CARACTERÍSTICAS DOS CABOS	5	
5	CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO	5	
5.1	GERAL	5	
5.2	CAPACIDADE DE CONDUÇÃO DE CORRENTE	6	
5.3	QUEDA DE TENSÃO	7	
5.4	SUPORTABILIDADE A CURTO-CIRCUITO	8	
6	RESULTADOS OBTIDOS	9	

Figura 31 – Exemplo de memória de cálculo de dimensionamento de cabos (2/9 - sumário). Alguns elementos foram omitidos por questões de sigilo.

AT	RTA / TELECOM E SISTEMAS INFORMÁTICOS - DIMENSIONAMENTO DOS CABOS DE FORÇA - ELEV. 78,00 - MEMÓRIA DE CÁLCULO	
----	---	--

1 OBJETIVO

O presente documento tem por finalidade apresentar os critérios e os resultados obtidos no dimensionamento dos cabos de força em baixa tensão para alimentação dos equipamentos da RTA localizados na elevação 78,00 da Casa de Força (Ver nota)¹. Os resultados serão utilizados nos projetos de instalações elétricas da Atualização Tecnológica da UHE Itaipu Binacional.

2 DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA

A Tabela 2-1 apresenta os documentos de referência utilizados para a elaboração desta memória de cálculo:

Tabela 2-1 - Documentos de Referência

Nº	CÓDIGO	DESCRIÇÃO DO DOCUMENTO
[1]		CRITÉRIO DE PROJETOS ELÉTRICOS - CRITÉRIOS
[2]		RTA / TELECOM E SISTEMAS INFORMÁTICOS - 50Hz - DIAGRAMA DE LOCALIZAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO - PDE – AP - ARRANJO GERAL
[3]		RTA / TELECOM E SISTEMAS INFORMÁTICOS - 60Hz - DIAGRAMA DE LOCALIZAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO - PDE – AP - ARRANJO GERAL
[4]		50Hz - CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO - 1ª ETAPA DE ATUALIZAÇÃO - MEMÓRIAS DE CÁLCULO
[5]		60Hz - CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO - 1ª ETAPA DE ATUALIZAÇÃO - MEMÓRIAS DE CÁLCULO
[6]		GUIA DE DIMENSIONAMENTO PRYSMIAN DE CABOS PARA BAIXA TENSÃO, DISPONÍVEL EM: https://br.prysmian.com/pt/ferramentas

3 NORMAS TÉCNICAS APLICÁVEIS

- [1] NBR 5410 (2005) Instalações elétricas de baixa tensão;
- [2] NBR 11301 – Cálculo da capacidade de condução de corrente de cabos isolados em regime permanente (fator de carga 100%);
- [3] ABNT NBR NM 280:2002 – Condutores de cabos isolados;
- [4] IEC 60287 - Electric cables – (all parts);
- [5] IEC 60909-0, Short-circuit currents in three-phase;
- [6] IEEE Std 141 Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants;

¹ Alguns dos equipamentos das elevações 57,25 e 61,25 são alimentados pelo PDE17181, localizado na elevação 78,00. Portanto, o dimensionamento dos cabos que alimentam esses equipamentos será abordado na presente memória de cálculo, referente à elevação 78,00.

ESTUDOS	CÓDIGO DE ITAIPU	PÁGINA	REVISÃO
CÓDIGO DO EMITENTE:		4	R0A

Figura 32 – Exemplo de memória de cálculo de dimensionamento de cabos (3/9 - capítulos 1, 2 e 3). Alguns elementos foram omitidos por questões de sigilo.

AT	RTA / TELECOM E SISTEMAS INFORMÁTICOS - DIMENSIONAMENTO DOS CABOS DE FORÇA - ELEV. 78,00 - MEMÓRIA DE CÁLCULO		
4	CARACTERÍSTICAS DOS CABOS		
De acordo com os critérios de projeto (documento [1]), para circuitos de força em baixa tensão com passagem por leitos ou prumadas, assim como cabos embutidos ou expostos a intempéries devem ser utilizados cabos ECP-11741, que possuem as seguintes características:			
• Tensão de Isolação - 0,6/1 kV • Formação - Multipolares até 16mm². Singelos acima de 16mm² • Tipo de Encordoamento - circular compacto • Classe Condutor - classe 2 ou 5 • Material condutor - Cobre eletrolítico • Isolação – Termofixo de polietileno reticulado (EPR) ou termofixo de polietileno reticulado de alto grau (HEPR) • Cobertura: PVC tipo ST2 • Temperatura de operação máxima no condutor: 90 °C			
Observação: para os cabos de alimentação dos Access Points (APs) com passagem por eletrodutos e perfilados/eletrocalhas, serão considerados cabos ECP-11221, cujas características conforme critérios de projeto, são dadas a seguir:			
• Tensão de Isolação – 450/750 V • Formação – Unipolar flexível • Classe Condutor - Classe 2 ou 5 • Material condutor - Cobre eletrolítico • Isolação – Dupla camada de PVC antiflam ou Termofixo de polietileno reticulado (EPR 90°C) quando da instalação em canaletas em áreas externas.			
5	CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO		
5.1	GERAL		
O dimensionamento dos cabos de baixa tensão segue as recomendações da norma NBR 5410 de 2005 (norma de referência [1]).			
As seções dos cabos foram determinadas considerando os seguintes critérios:			
a) Capacidade de condução de corrente b) Queda de tensão c) Suportabilidade a curto-circuito			
A seção adotada para cada cabo corresponde à maior das seções mínimas calculadas para cada um desses três critérios.			
De acordo com os critérios de projeto, os cabos de força devem possuir seção mínima de 2,5 mm² e não devem ser empregados cabos com seção nominal superior a 300 mm².			
ESTUDOS	CÓDIGO DE ITAIPU	PÁGINA	REVISÃO
CÓDIGO DO EMITENTE:		5	R0A
© Copyright – GE VERNOVA.			

Figura 33 – Exemplo de memória de cálculo de dimensionamento de cabos (4/9 - capítulos 4 e 5). Alguns elementos foram omitidos por questões de sigilo.

AT	RTA / TELECOM E SISTEMAS INFORMÁTICOS - DIMENSIONAMENTO DOS CABOS DE FORÇA - ELEV. 78,00 - MEMÓRIA DE CÁLCULO	
----	---	--

5.2 CAPACIDADE DE CONDUÇÃO DE CORRENTE

A capacidade de condução de corrente é a corrente máxima que o cabo pode suportar em regime permanente para condições específicas. Portanto, é necessário corrigir a corrente nominal do circuito I_n levando em conta determinados fatores de correção, resultando na corrente corrigida I_z . Os fatores a serem considerados são:

- O fator de temperatura F_t , em conformidade com a temperatura ambiente do meio circundante, quando o cabo ou o condutor considerado não estiver carregado.
- O fator de agrupamento F_a , em concordância com número de circuitos, número de condutores e o espaçamento entre os cabos.

A corrente nominal I_n dos circuitos é obtida pela equação abaixo:

$$I_n = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V} \quad (\text{Equação 5-1})$$

Onde:

I_n – Corrente nominal do circuito (A)
 S – Potência aparente do circuito (VA)
 V – Tensão nominal (fase-fase) do circuito (V)

Observação 1: A equação 5-1 é válida somente para circuitos trifásicos. Para circuitos monofásicos ou bifásicos substitui-se o fator $\sqrt{3}$ por 1, e quando monofásico considera-se V a tensão entre fase e neutro).

Observação: Para circuitos que alimentam mais de um equipamento (circuitos pinga) considera-se S como a soma das potências das cargas individuais, e como se a carga total estivesse toda acumulada no fim do cabo.

A corrente corrigida I_z é obtida pela equação abaixo:

$$I_z = \frac{I_n}{F_t \cdot F_a \cdot n_{cp}} \quad (\text{Equação 5-2})$$

Onde:

I_z – Corrente corrigida (A)
 I_n – Corrente nominal do circuito (A)
 F_a – Fator de agrupamento
 F_t – Fator de temperatura
 n_{cp} – Número de condutores por fase

O fator de temperatura F_t adotado para todos os condutores foi de 0,91, considerando-se uma temperatura ambiente de 40 °C, em conformidade com os critérios de projeto.

O fator de agrupamento F_a foi definido de acordo com as condições de instalação previstas para os circuitos, considerando o pior caso de agrupamento existente ao longo dos trechos, em conformidade com os fatores apresentados na tabela 42 a 45 da norma de referência [1]. Para os circuitos em questão foi definido um fator de agrupamento de 0,50.

ESTUDOS	CÓDIGO DE ITAIPU	PÁGINA	REVISÃO
CÓDIGO DO EMITENTE:		6	R0A
© Copyright – GE VERNOVA.			

Figura 34 – Exemplo de memória de cálculo de dimensionamento de cabos (5/9 - capítulo 5). Alguns elementos foram omitidos por questões de sigilo.

AT	RTA / TELECOM E SISTEMAS INFORMÁTICOS - DIMENSIONAMENTO DOS CABOS DE FORÇA - ELEV. 78.00 - MEMÓRIA DE CÁLCULO	
----	---	--

O número de condutores por fase (n_{cp}) de cada circuito foi estipulado caso a caso, de forma a diminuir a corrente corrigida nos casos em que a mesma apresentasse valores muito elevados, resultando em uma seção nominal do cabo acima do limite máximo estipulado.

Os métodos de instalação considerados para os cálculos foram os métodos B1 e B2, conforme seção 6.2.5.1.2 da norma de referência [1].

Após a correção da corrente nominal pelos fatores citados, e levando em consideração o método de instalação escolhido, comparou-se a corrente corrigida dos cabos com os valores de ampacidade (capacidade de condução de corrente) das Tabelas 36 a 39 da norma de referência [1], conduzindo à determinação da seção transversal do condutor necessária para suportar a corrente corrigida I_z .

5.3 QUEDA DE TENSÃO

O critério da queda de tensão delimita a seção mínima do condutor para que a queda de tensão entre a origem da instalação (secundário do transformador abaixador) e o equipamento não seja superior à máxima queda de tensão admissível, conforme critérios apresentados no documento [1]. Para os circuitos em questão, com exceção da alimentação em corrente contínua do PDE12181, considerou-se uma queda de tensão máxima de 3%. Para dita alimentação, optou-se por uma queda de tensão de 8%, sendo ainda isso dentro da faixa de operação do equipamento, com o objetivo de possibilitar uma seção transversal nominal de 25mm².

Para circuitos de corrente alternada a queda de tensão é obtida através das equações abaixo:

Circuitos trifásicos:

$$\Delta V = \frac{\sqrt{3} \cdot I_n \cdot l \cdot (R_{ca} \cdot \cos\varphi + X_L \cdot \sin\varphi)}{n_{cp}} \quad (\text{Equação 5-3})$$

Circuitos monofásicos / bifásicos:

$$\Delta V = \frac{2 \cdot I_n \cdot l \cdot (R_{ca} \cdot \cos\varphi + X_L \cdot \sin\varphi)}{n_{cp}} \quad (\text{Equação 5-4})$$

E a queda de tensão percentual é obtida por:

$$\Delta V_{(\%)} = \frac{\Delta V}{V} \cdot 100 \quad (\text{Equação 5-5})$$

Onde:

ΔV – Queda de tensão (V)
 I_n – Corrente nominal do circuito (A)
 l – Comprimento do circuito (km)
 R_{ca} – Resistência do cabo em corrente alternada (Ω/km)

ESTUDOS	CÓDIGO DE ITAIPU	PÁGINA	REVISÃO
CÓDIGO DO EMITENTE:		7	R0A
© Copyright – GE VERNOVA.			

Figura 35 – Exemplo de memória de cálculo de dimensionamento de cabos (6/9 - capítulo 5). Alguns elementos foram omitidos por questões de sigilo.

AT	RTA / TELECOM E SISTEMAS INFORMÁTICOS - DIMENSIONAMENTO DOS CABOS DE FORÇA - ELEV. 78.00 - MEMÓRIA DE CÁLCULO		
	X_L — Reatância indutiva do cabo (Ω/km) $\cos\varphi$ — Fator de potência do circuito n_{cp} — Número de condutores por fase		

Os parâmetros elétricos dos cabos (R_{ca} e X_L) foram obtidos dos catálogos dos fabricantes.

A queda de tensão é inicialmente calculada a partir dos parâmetros obtidos para as seções determinadas pelo critério da capacidade de condução de corrente.

Nos casos em que a queda de tensão inicialmente calculada ultrapassa o valor máximo admissível, são adotadas seções e/ou número de condutores em paralelo superiores aos determinados pelo critério da capacidade de condução de corrente, de modo a satisfazer o critério da queda de tensão.

5.4 SUPORTABILIDADE A CURTO-CIRCUITO

Em condições de curto-circuito a corrente que flui através do cabo aumenta, provocando um aumento de temperatura no interior do cabo. Os cabos devem ser dimensionados de forma a suportar a maior corrente de curto-circuito esperada, em um determinado intervalo de tempo.

A seção do condutor necessária para suportar uma particular condição de curto-circuito é obtida através da equação abaixo, conforme documento de referência [6]:

$$S = \frac{I_{cc} \cdot \sqrt{t}}{K} \quad (\text{Equação 5-6})$$

Onde:

- S — Seção nominal do condutor (mm^2)
 I_{cc} — Corrente de curto-circuito (A)
 t — Tempo de duração do curto-circuito (s)
 K — Fator dependente do material condutor

Para o cálculo foi considerado um tempo de duração do curto-circuito de 0,5 s, conforme critérios de projeto.

Os valores de K foram obtidos da tabela 37 do documento de referência [6].

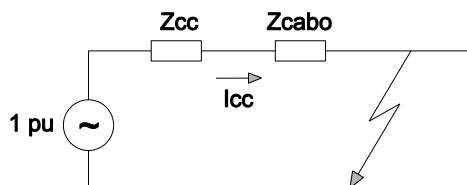
A corrente de curto-circuito I_{cc} considerada na (Equação 5-6) para cada circuito é a corrente de curto-circuito no fim do cabo, a qual é calculada considerando um equivalente de curto-circuito em série com a impedância do cabo, conforme apresentado na figura abaixo:

ESTUDOS	CÓDIGO DE ITAIPU	PÁGINA	REVISÃO
CÓDIGO DO EMITENTE:		8	R0A
© Copyright – GE VERNOVA.			

Figura 36 – Exemplo de memória de cálculo de dimensionamento de cabos (7/9 - capítulo 5). Alguns elementos foram omitidos por questões de sigilo.

AT	RTA / TELECOM E SISTEMAS INFORMÁTICOS - DIMENSIONAMENTO DOS CABOS DE FORÇA - ELEV. 78.00 - MEMÓRIA DE CÁLCULO	
----	---	--

Figura 5-1 – Circuito considerado para o cálculo da corrente de curto-circuito no cabo.



O equivalente de curto-circuito é obtido a partir das máximas correntes de curto-circuito simétricas consideradas nos barramentos dos quadros ou nos terminais dos equipamentos de onde se originam cada um dos circuitos em questão ($I_{cc-fonte}$), as quais foram obtidas das memórias de cálculo de curto circuito (documentos [4] e [5]) ou, quando não disponíveis, dos documentos existentes de Itaipu.

Dessa forma, I_{cc} é obtida através das equações abaixo:

$$I_{cc} = \frac{V}{\sqrt{3} \cdot (Z_S + Z_C)} \quad (\text{Equação 5-7})$$

Onde Z_S é a impedância de curto-circuito da fonte, dada por:

$$Z_S = \frac{V}{\sqrt{3} \cdot I_{cc-fonte}} \quad (\text{Equação 5-8})$$

E Z_C é a impedância do cabo, dada por:

$$Z_C = \sqrt{(R_{ca} \cdot l)^2 + (X_L \cdot l)^2} \quad (\text{Equação 5-9})$$

Onde:

- V – Tensão nominal (fase-fase) do circuito (V)
- $I_{cc-fonte}$ – Corrente de curto-circuito na fonte (A)
- l – Comprimento do circuito (km)
- R_{ca} – Resistência do cabo em corrente alternada (Ω/km)
- X_L – Reatância indutiva do cabo (Ω/km)

(Para circuitos monofásicos ou bifásicos substitui-se o fator $\sqrt{3}$ por 1 e quando monofásico considera-se V a tensão entre fase e neutro).

6 RESULTADOS OBTIDOS

Os dados utilizados para o dimensionamento dos cabos de cada circuito, bem como os resultados obtidos para as seções dos cabos são apresentados na Tabela 6-1 e na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, a seguir:

ESTUDOS	CÓDIGO DE ITAIPU	PÁGINA	REVISÃO
CÓDIGO DO EMITENTE:		9	R0A
© Copyright – GE VERNOVA.			

Figura 37 – Exemplo de memória de cálculo de dimensionamento de cabos (8/9 - capítulos 5 e 6). Alguns elementos foram omitidos por questões de sigilo.

RTA / TELECOM E SISTEMAS INFORMÁTICOS - DIMENSIONAMENTO DOS CABOS DE FORÇA - ELEV. 78.00 - MEMÓRIA DE CÁLCULO

Tabela 6-1 – Dados do dimensionamento e resultados obtidos

De	Para	Tensão (V)	nº de Fases	Carga (kVA)	cos φ	Mét. De Inst.	L (m)	Mét. IV (%)	Loc-fonte (kV)	In config. (A)	Cond. de corrente nº cond. x Seção (mm²)	Queda de Tensão nº cond. x Seção (mm²)	Curto-circuito nº cond. x Seção (mm²)	Resultado		
PDE08181	UTA1.09	220	2F	1,5	1,00	B2	12,4	3,0	5,000	15,0	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 10	1 x 10	0,68	1,43
PDE08181	UTA1.09	220	2F	1,5	1,00	B2	12,4	3,0	5,000	15,0	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 10	1 x 10	0,68	1,43
PDE08181	PTO17-UTA1.09 / PTO13-UTA1.09 / PTO18-UTA1.09 / PTO20-UTA1.19	220	2F	0,2	1,00	B2	174,0	3,0	5,000	2,4	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	1,53	0,14
PDE08181	PTO12-UTA1.09 / PTO11-UTA1.09 / PTO10-UTA1.09 / PTO04-UTA1.09 / PTO03-UTA1.09	220	2F	0,3	1,00	B2	246,7	3,0	5,000	3,0	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	2,71	0,10
PDE08181	PTO02-UTA1.09 / PTO01-UTA1.09 / PTO05-UTA1.09	220	2F	0,2	1,00	B2	362,4	3,0	5,000	1,8	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	2,39	0,07
PDE08181	PTO23-UTA1.09	220	2F	0,1	1,00	B2	120,7	3,0	5,000	0,6	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	0,27	0,20
PDE08181	PTO24-UTA1.19	220	2F	0,1	1,00	B2	155,7	3,0	5,000	0,6	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	0,34	0,15
PDE08181	PTO16-UTA1.09 / PTO18-UTA1.09	220	2F	0,1	1,00	B2	158,0	3,0	5,000	1,2	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	0,69	0,15
PDE08181	PTO07-UTA1.09 / PTO09-UTA1.09	220	2F	0,1	1,00	B2	475,3	3,0	5,000	1,2	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	2,09	0,05
PDE08181	PTO15-UTA1.09	220	2F	0,1	1,00	B2	163,3	3,0	5,000	0,6	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	0,26	0,15
PDE08181	PTO14-UTA1.09	220	2F	0,1	1,00	B2	199,0	3,0	5,000	0,6	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	0,44	0,12
PDE08181	PTO08-UTA1.09	220	2F	0,1	1,00	B2	241,7	3,0	5,000	0,6	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	0,53	0,10
PDE12181	PTO32-UTA1.19	220	2F	0,1	1,00	B2	24,0	3,0	5,000	0,6	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 6	1 x 6	0,05	0,86
PDE12181	PTO22-UTA1.19 / PTO21-UTA1.19 / PTO25-UTA1.19 / PTO27-UTA1.19	220	2F	0,2	1,00	B2	218,4	3,0	5,000	2,4	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	1,92	0,11
PDE12181	PTO14-UTA1.11 / PTO18-UTA1.11 / PTO20-UTA1.11 / PTO21-UTA1.11	220	2F	0,2	1,00	B2	202,9	3,0	5,000	2,4	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	1,78	0,12
PDE12181	PTO26-UTA1.19	220	2F	0,1	1,00	B2	126,6	3,0	5,000	0,6	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	0,28	0,19
PDE12181	PTO33-UTA1.20	220	2F	0,1	1,00	B2	118,4	3,0	5,000	0,6	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	0,26	0,20
PDE12181	PTO34-UTA1.20 / PTO36-UTA1.20	220	2F	0,1	1,00	B2	197,1	3,0	5,000	1,2	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	0,87	0,12
PDE12181	PTO35-UTA1.20	220	2F	0,1	1,00	B2	190,0	3,0	5,000	0,6	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	0,42	0,13
PDE17181	UTA1.10	220	2F	1,5	1,00	B2	9,0	3,0	5,000	15,0	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 10	1 x 10	0,50	1,78
PDE17181	UTA1.10	220	2F	1,5	1,00	B2	9,0	3,0	5,000	15,0	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 10	1 x 10	0,50	1,78
PDE17181	PTO42-UTA1.10 / PTO37-UTA1.10 / PTO41-UTA1.10	220	2F	0,2	1,00	B2	129,0	3,0	5,000	1,8	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	0,85	0,19
PDE17181	PTO38-UTA1.10 / PTO43-UTA1.10	220	2F	0,1	1,00	B2	120,0	3,0	5,000	1,2	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	0,53	0,20
PDE17181	PTO39-UTA1.10 / PTO44-UTA1.10	220	2F	0,1	1,00	B2	174,0	3,0	5,000	1,2	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	0,77	0,14
PDE17181	PTO40-UTA1.10 / PTO45-UTA1.10	220	2F	0,1	1,00	B2	177,0	3,0	5,000	1,2	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	0,78	0,14
PDE17181	PTO03-UTA1.10 / PTO04-UTA1.10 / PTO02-UTA1.10	220	2F	0,2	1,00	B2	268,0	3,0	5,000	1,8	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	1,77	0,09
PDE17181	PTO01-UTA1.10	220	2F	0,1	1,00	B2	174,0	3,0	5,000	0,6	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	1 x 2,5	0,38	0,14

ESTRUTURA
CÓDIGO DO EMITENTE:

CÓDIGO DE ÍTAPU

PÁGINA
10

REVISÃO
ROA

Figura 38 – Exemplo de memória de cálculo de dimensionamento de cabos (9/9 - capítulo 6). Alguns elementos foram omitidos por questões de sigilo.

APÊNDICE C – LISTA DE DOCUMENTOS ELABORADOS

Tabela 7 – Lista de documentos elaborados.

Índice de prioridade	Elevação	Documento
1	57,25	Lista de Cabos - PDE05201
1	57,25	Lista de Cabos - PDE10201
1	57,25	Lista de Cabos - UTA1.11
1	57,25	Memória de Cálculo - Dimensionamento de Cabos - Elev. 57,25
2	78,00	Lista de Cabos - PDE08181
2	78,00	Lista de Cabos - PDE12181
2	78,00	Lista de Cabos - PDE17181
2	78,00	Lista de Cabos - UTA1.09
2	78,00	Lista de Cabos - UTA1.10
2	78,00	Memória de Cálculo - Dimensionamento de Cabos - Elev. 78
3	98,50	Lista de Cabos - PDE02141
3	98,50	Lista de Cabos - PDE08141
3	98,50	Lista de Cabos - PDE12141
3	98,50	Lista de Cabos - PDE17141
3	98,50	Memória de Cálculo - Dimensionamento de Cabos - Elev. 98,5
4	108,00	Lista de Cabos - PDE07121
4	108,00	Lista de Cabos - PDE21121
4	108,00	Lista de Cabos - PDE25121
4	108,00	Lista de Cabos - UTA1.16
4	108,00	Lista de Cabos - UTA1.17
4	108,00	Lista de Cabos - UTA1.18
4	108,00	Lista de Cabos - UTA1.19
4	108,00	Lista de Cabos - UTA1.20
4	108,00	Lista de Cabos - UTA1.21
4	108,00	Lista de Cabos - UTA1.22
4	108,00	Lista de Cabos - UTA1.23
4	108,00	Lista de Cabos - UTA1.24
4	108,00	Lista de Cabos - UTA1.25
4	108,00	Memória de Cálculo - Dimensionamento de Cabos - Elev. 108

Tabela 7 – Lista de documentos elaborados.

Índice de prioridade	Elevação	Documento
5	115,00	Lista de Cabos - PDE01101
5	115,00	Lista de Cabos - PDE07101
5	115,00	Lista de Cabos - PDE12101
5	115,00	Lista de Cabos - PDE16101
5	115,00	Memória de Cálculo - Dimensionamento de Cabos - Elev. 115
6	124,00	Lista de Cabos - PDE01051
6	124,00	Lista de Cabos - PDE07051
6	124,00	Lista de Cabos - PDE10051
6	124,00	Lista de Cabos - PDE15051
6	124,00	Lista de Cabos - PDE17051
6	124,00	Lista de Cabos - RTA-TELECOM
6	124,00	Lista de Cabos - UTA1.03
6	124,00	Lista de Cabos - UTA1.04
6	124,00	Lista de Cabos - UTA1.05
6	124,00	Lista de Cabos - UTA1.06
6	124,00	Lista de Cabos - UTA1.07
6	124,00	Lista de Cabos - UTA1.08
6	124,00	Memória de Cálculo - Dimensionamento de Cabos - Elev. 124
7	131,50	Lista de Cabos - UTA2.5
8	133,20	Lista de Cabos - PDE02041
8	133,20	Lista de Cabos - PDE06041
8	133,20	Lista de Cabos - PDE12041
8	133,20	Lista de Cabos - PDE17041
8	133,20	Lista de Cabos - RTA-08B
8	133,20	Lista de Cabos - RTA-16B
8	133,20	Lista de Cabos - UTA1.14
8	133,20	Lista de Cabos - UTA1.15
8	133,20	Memória de Cálculo - Dimensionamento de Cabos - Elev. 133,2
9	135,80	Lista de Cabos - RTA-COM.50HZ
9	135,80	Lista de Cabos - RTA-COM.60HZ
9	135,80	Lista de Cabos - UTA2.3
9	135,80	Lista de Cabos - UTA2.4

Tabela 7 – Lista de documentos elaborados.

Índice de prioridade	Elevação	Documento
9	135,80	Lista de Cabos - UTA3.1
9	135,80	Lista de Cabos - UTA3.2
10	139,50	Lista de Cabos - UTA1.13
11	141,00	Lista de Cabos - PDE10011
11	141,00	Lista de Cabos - PDE9A011
11	141,00	Lista de Cabos - UTA1.39
11	141,00	Memória de Cálculo - Dimensionamento de Cabos - Elev. 141
12	144,55	Lista de Cabos - PDE21021
12	144,55	Lista de Cabos - PDE24011
12	144,55	Lista de Cabos - PDE25011
12	144,55	Lista de Cabos - UTA1.02
12	144,55	Lista de Cabos - UTA1.12
12	144,55	Memória de Cálculo - Dimensionamento de Cabos - Elev. 144,55