



CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FUNDAÇÃO HERMINIO OMETTO

NÚCLEO DE ENGENHARIA

ENGENHARIA ELÉTRICA

Projeto de sistemas elétricos

Projeto elétrico de uma indústria de papel no Rio de Janeiro

Gabriel Pastre

RA: 109609

Gustavo Rodrigues Verdu

RA: 110407

Pedro Rosso

RA: 109261

Araras

Junho 2024

Sumário

1	Introdução	4
2	Levantamento de cargas	5
2.1	Setor 1	6
2.2	Setor 2	6
2.3	Setor 3	6
2.4	Totais por área	7
3	Transformador	8
3.1	Dimensionamento do transformador	8
3.2	Modelo escolhido do transformador	8
4	Seções dos condutores	10
4.1	Divisão dos circuitos e método de instalação	10
4.2	Metodologias aplicadas	10
4.2.1	Critério de ampacidade	10
4.2.2	Critério de queda de tensão	11
4.2.3	Critério de seção mínima	11
4.3	Dimensionamento do circuito do Motor 1	11
4.3.1	Critério de ampacidade	11
4.3.2	Critério de queda de tensão	12
4.3.3	Critério de seção mínima	12
4.3.4	Seção adotada para o circuito	12
4.4	Seções Adotadas	12
4.5	Dimensionamento dos alimentadores do QGF para as áreas	13
4.5.1	Cálculos QGF – Área 1	14
4.6	Seções dos alimentadores do QGF para as áreas	14
5	Fator de potência da instalação	15
5.1	Fator de potência na Área 1	15
5.2	Fator de potência na Área 2	16
5.3	Fator de potência na Área 3	16
5.4	Fator de potência da instalação como um todo	16
5.5	Método de correção do fator de potência	17
5.6	Correção do fator de potência por setor	17
5.7	Novas correntes após a correção de fator de potência	18
6	Dimensionamento dos disjuntores	19
6.1	Motor 1	19
6.2	Motor 2	19

6.3	Motor 3	20
6.4	Motor 4	20
6.5	Motor 5	20
6.6	Motor 6	21
6.7	Motor 7	21
6.8	Iluminação 1	21
6.9	Iluminação 2	22
6.10	Aquecimento 1	22
6.11	Aquecimento 2	23
6.12	Aquecimento 3	23
6.13	QGF – ÁREA 1	23
6.14	QGF – ÁREA 2	24
6.15	QGF – ÁREA 3	24
7	Seleção de Chaves de Partida	25
7.1	Motor de Menor Potência – Motor 5 (20 cv)	25
7.2	Motor de Maior Potência – Motor 4 (150 cv)	25
8	Cálculo curto circuito	27
8.1	Valores iniciais	27
8.2	Dados dos cabos para curto-circuito	28
8.3	Tipos de Curto-Circuito	28
8.4	Cálculos Realizados no Excel	30
8.5	Resultados dos cálculos de curto-circuito	32
9	Projeto Luminotécnico – Área A1	34
9.1	Metodologia de Cálculo Luminotécnico	34
9.1.1	1. Cálculo do fluxo luminoso necessário	34
9.1.2	Cálculo do fluxo luminoso total a ser emitido	34
9.1.3	3. Cálculo do número de luminárias	35
9.1.4	Disposição e espaçamento das luminárias	35
9.2	Aplicação Prática – Área A1	35
9.2.1	1. Fluxo luminoso necessário	36
9.2.2	Fluxo a ser emitido pelas luminárias	36
9.2.3	Número de luminárias	36
9.2.4	Disposição das luminárias	36
10	Subestação Abrigada	38
10.1	Especificação sumária	38
11	CONCLUSÃO	41
	Referências	42

1 Introdução

Localizada na cidade do Rio de Janeiro e atendida pela concessionária Light S/A, a indústria de papel opera em um ambiente tropical que impõe desafios térmicos importantes. Em 2025, por exemplo, a temperatura máxima registrada na cidade alcançou 44°C , valor que influencia diretamente a dissipação de calor de transformadores, barramentos e condutores.

O objetivo deste relatório é desenvolver e justificar o projeto elétrico da referida planta, abrangendo a subestação de média para baixa tensão, a distribuição interna, os dispositivos de proteção e seccionamento, além das verificações normativas de ampacidade, queda de tensão e correntes de curto circuito. Toda a elaboração fundamenta-se nas normas brasileiras vigentes, em especial a ABNT NBR 5410 para instalações de baixa tensão, complementadas por recomendações internacionais reconhecidas.

Para as análises, consideram-se os seguintes parâmetros de suprimento e disposição física: tensão nominal primária de $13,8\text{ kV}$; tensão nominal secundária de 380 V ; impedâncias de sequência positiva $(0,1 + j0,5)\text{ pu}$ e de sequência zero $(0,2 + j0,8)\text{ pu}$ referidas à base de 100 MVA ; circuito entre o transformador e o quadro geral de força (QGF) com 10 m ; trechos entre o QGF e os painéis das Áreas 1, 2 e 3 com 25 m , 35 m e 30 m , respectivamente; e distância média de 5 m entre cada barramento setorial e suas cargas. Conforme orientação do cliente, não se contabilizam comprimentos de barramentos metálicos, e a potência base adotada é 100 MVA .

2 Levantamento de cargas

Com base nas informações preliminares fornecidas pelo cliente, serão instalados sete motores assíncronos trifásicos distribuídos pelos setores da planta, conforme a Tabela 1. Optou-se pela linha **WEG W22 IR3 Premium**, em virtude do elevado rendimento e do fator de potência superior, características que se refletem em menor consumo energético e redução de custos operacionais. O catálogo oficial do fabricante, disponível em <https://github.com/Gabpastre/projeto-final/blob/main/Catalogos/Catalogo_motores.pdf>, serviu de referência para os dados nominais.

Tabela 1 – Potência nominal dos motores previstos

Motor	Potência nominal (cv)
1	50
2	125
3	30
4	150
5	20
6	75
7	30

Fonte: Dados fornecidos pelo cliente.

A partir dos valores de rendimento (η) e fator de potência ($\cos \varphi$) constantes no catálogo, calculam-se para cada máquina a potência ativa (P), reativa (Q) e aparente (S). Como exemplo, o Motor 1 possui $\cos \varphi = 0,87$ e $\eta = 0,93$.

Cálculo do Motor 1

$$\text{Potência mecânica } (P_{\text{mec}}) = 50 \times 0,7355 = 36.78 \text{ kW} \quad (2.1)$$

$$\text{Potência ativa } (P) = \frac{P_{\text{mec}}}{\eta} = \frac{36,78}{0,93} = 39.54 \text{ kW} \quad (2.2)$$

$$\text{Potência aparente } (S) = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{39,54}{0,87} = 45.45 \text{ kVA} \quad (2.3)$$

$$\text{Potência reativa } (Q) = \sqrt{S^2 - P^2} = 22.41 \text{ kvar} \quad (2.4)$$

$$I_{220} = \frac{P \times 1000}{\sqrt{3} \times 220 \times \cos \varphi} = 119.36 \text{ A} \quad (2.5)$$

$$I_{380} = \frac{P \times 1000}{\sqrt{3} \times 380 \times \cos \varphi} = 69.06 \text{ A} \quad (2.6)$$

Para os demais motores adotou-se a mesma metodologia apresentada para o Motor 1. A planta também dispõe de cargas auxiliares de iluminação e de aquecimento, cujos valores de potência ativa e fator de potência foram previamente fornecidos pelo cliente. Após o levantamento completo, obteve-se a distribuição de cargas e correntes mostrada a seguir, agrupada por setor de produção.

2.1 Setor 1

Após os cálculos para os motores 1, 2, 3 e 4, as cargas no Setor 1 podem ser observadas a seguir:

Tabela 2 – Cargas e correntes no Setor 1

Carga	P (kW)	Q (kvar)	S (kVA)	I_{220} (A)	I_{380} (A)
Motor 1	39,54	22,41	45,45	119,36	69,06
Motor 2	97,29	52,51	110,55	290,33	167,98
Motor 3	23,98	13,59	27,57	72,40	41,89
Motor 4	116,13	59,50	130,48	342,67	198,26

Fonte: Autor

2.2 Setor 2

Após os cálculos para os motores 5, 6 e 7, as cargas no Setor 2 podem ser observadas a seguir:

Tabela 3 – Cargas e correntes no Setor 2

Carga	P (kW)	Q (kvar)	S (kVA)	I_{220} (A)	I_{380} (A)
Motor 5	16.16	9.59	18.80	49.36	28.56
Motor 6	59.00	31.84	67.04	176.06	101.86
Motor 7	23.98	13.59	27.57	72.40	41.89

Fonte: Autor.

2.3 Setor 3

Após os cálculos para as cargas de Iluminação 1 e 2 e Aquecimento 1, 2 e 3, as cargas no Setor 3 podem ser observadas a seguir:

Tabela 4 – Cargas e correntes no Setor 3

Carga	P (kW)	Q (kvar)	S (kVA)	I_{220} (A)	I_{380} (A)
Iluminação 1	75.00	31.95	81.52	213.94	123.86
Iluminação 2	75.00	31.95	81.52	213.94	123.86
Aquecimento 1	30.00	0.00	30.00	78.73	45.58
Aquecimento 2	25.00	0.00	25.00	65.61	37.98
Aquecimento 3	40.00	0.00	40.00	104.97	60.78

Fonte: Autor.

2.4 Totais por área

Os valores globais de potência e corrente foram obtidos mediante a soma das potências ativas (P), reativas (Q) e aparentes (S) de todas as cargas associadas a cada setor. Para a corrente total em 380 V ($I_{\text{tot},380}$), adotou-se a condição de operação simultânea em plena carga, somando-se as correntes de cada equipamento do respectivo setor.

Tabela 5 – Potências e corrente total por área (setor)

Setor	P_{total} (kW)	Q_{total} (kvar)	S_{total} (kVA)	$I_{380,\text{tot}}$ (A)
1	276,95	148,01	314,06	477,18
2	99,15	55,03	113,41	172,31
3	245,00	63,90	258,04	392,07
Total	621,09	266,94	685,51	1 041,55

Fonte: Autor.

3 Transformador

3.1 Dimensionamento do transformador

A partir dos dados levantados, realizou-se o cálculo da potência aparente individual de cada carga. Ao final, a soma dessas potências multiplicado por um fator de demanda de 0,9 resultou em uma potência total de 616,98 kVA.

Tabela 6 – Dimensionamento do transformador

Dimensionamento do Transformador		
Tensão de entrada TF	13800	V
Tensão de saída TF	380	V
Fator de demanda	0,90	-
Potência aparente total com fator de demanda	616,98	kVA
Potência aparente escolhida do transformador	750	kVA

Fonte: Autor.

Dessa forma, optou-se pela utilização de um transformador com potência nominal de 750 kVA, o qual atende adequadamente à demanda atual do sistema e ainda proporciona margem para possíveis expansões futuras da carga instalada.

3.2 Modelo escolhido do transformador

Foi selecionado um transformador trifásico a óleo, resfriamento ONAN, potência nominal de 750 kVA. O enrolamento primário opera em 13.8 kV (sistema Light) e o secundário em 380 V/220 V, conexão Dyn5, garantindo neutro acessível para cargas monofásicas. O equipamento trabalha a 60 Hz, possui impedância de curto de 5,5 %, elevação térmica de 55 °C e nível de isolamento BIL de 95 kV no lado de alta.

FOLHA DE DADOS

Transformador Óleo Distribuição



Identificação

Código do produto: 13637131
 Tipo: Transformador abaixador
 Norma / Especificação: NBR 5366

Características do ambiente

Instalação: Ao tempo
 Altitude máxima de instalação (m.s.n.m): 1000.0
 Atmosfera: Não agressiva
 Temperatura máxima do ambiente (°C): 40.0

Características elétricas

Frequência (Hz): 60.0	Fases: Trifásico	Grupo de ligação: Dyn1
-----------------------	------------------	------------------------

Enrolamento	Potência (kVA)		Tensão (kV)	Ligação	Comutação
	ONAN				
Alta tensão	750.0		13.8 -4x0.6 kV	Triângulo	CST
Baixa Tensão			0.38	Estrela	

Elevação de temperatura dos enrolamentos média (°C)	65.0
Elevação de temperatura dos enrolamentos ponto mais quente (°C)	80.0
Classe do material isolante	E (120 °C)

Ensaio dielétricos	Alta tensão		Baixa Tensão	
	Fase	Neutro	Fase	Neutro
Nível de isolamento (kV)	15.0		1.2	1.2
Tensão de impulso (pleno) (kV)	95.0		30.0	30.0
Tensão de impulso (cortado) (kV)	105.0		33.0	
Tensão aplicada (kV)	34.0		10.0	10.0
Tensão induzida (kV)	2 x Vn		2xVn	2xVn

Temperatura de Referência @ 75.0 °C - ONAN	100%
Perdas a vazio (kW)	1.3
Perdas em carga (kW)	12.1
Perda Total (kW)	15.7
Corrente de excitação (%)	1.6

Alta/Baixa tensão	Base		Impedância @ 75.0 °C - ONAN (%)
	Posição (kV)	Potência (kVA)	
	13.8 / 0.38	750.0	5.0

Refrigeração	ONAN
Nível de ruído (dB)	58.0
Descargas parciais (pC)	300.0
Corrente de inrush (Apk)	
Fator K	K1

Fator de Carga [%]	Regulação (100% de carga)		
	ONAN ($\Phi = 0.8$)	ONAN ($\Phi = 0.9$)	ONAN ($\Phi = 1$)
100	4.34	3.8	2.03

Figura 1 – Folha de dados do transformador fornecida pelo fabricante WEG.

A ficha técnica completa encontra-se em <<https://github.com/Gabpastre/projeto-final/blob/main/Transformador/folha%20de%20dados%20trafo.pdf>>.

4 Seções dos condutores

4.1 Divisão dos circuitos e método de instalação

A malha de distribuição foi organizada para que cada alimentador atenda exclusivamente às cargas predominantes do respectivo setor, respeitando os limites de carregamento da NBR 5410. No Setor 1, os Motores 1 e 2 constituem o circuito 1, enquanto os Motores 3 e 4 formam o circuito 2. No Setor 2, os Motores 5 e 6 compartilham o circuito 3 e o Motor 7, por exigir comando independente, compõe o circuito 4. No Setor 3 agrupam-se as cargas de caráter contínuo: as luminárias 1 e 2 são alimentadas pelo circuito 5; os aquecedores 1 e 2 pelo circuito 6; e o aquecedor 3 pelo circuito 7.

Todos os alimentadores foram dimensionados segundo o método B1 da NBR 5410, utilizando cabos de cobre isolados em XLPE para 90 °C, instalados em canaletas ventiladas encaixadas no piso ou justapostas ao solo. Para a temperatura ambiente máxima local de 44 °C aplicou-se o fator de correção térmica $F_{CT} = 0,87$ às correntes admissíveis das Tabelas 36 a 38 (método B1, XLPE). O fator de agrupamento considerado foi $F_{CA} = 0,80$ para condutores instalados em feixes de dois circuitos; apenas o circuito 4 (Motor 7) e o circuito 7 (Aquecimento 3), por serem lançados isoladamente, mantiveram $F_{CA} = 1,0$.

4.2 Metodologias aplicadas

O dimensionamento dos circuitos foi verificado com base em três critérios da ABNT NBR 5410 (2004): (i) ampacidade, (ii) queda de tensão e (iii) seção mínima. A seção final adotada para cada circuito é obtida por

$$S_{\text{final}} = \max(S_{\text{amp}}, S_{\Delta V}, S_{\text{mín}}), \quad (4.1)$$

garantindo, simultaneamente, capacidade térmica, limite de tensão e conformidade normativa.

4.2.1 Critério de ampacidade

Parte-se da corrente de projeto I_n e aplicam-se o fator de correção de temperatura F_{CT} e o fator de agrupamento F_{CA} . O condutor selecionado é aceito se sua capacidade de condução I_z satisfizer

$$I_z \geq \frac{I_n}{F_{CT} \times F_{CA}}. \quad (4.2)$$

Nessa expressão, I_z é obtido nas Tabelas 36–38 da norma, já considerando o tipo de isolamento e a forma de instalação. Caso a desigualdade não seja atendida, seleciona-se a seção imediatamente superior disponível no catálogo.

4.2.2 Critério de queda de tensão

Para respeitar o limite regulamentar de 4 % imposto pela NBR 5410, calcula-se diretamente a seção mínima que satisfaz a condição de queda de tensão:

$$S_{\Delta V} = \frac{\sqrt{3} \rho L I}{V_{\text{nom}} \Delta V_{\text{max}}}, \quad (4.3)$$

onde ρ é a resistividade do condutor ($\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$), L o comprimento em metros, I a corrente de linha, V_{nom} a tensão nominal e $\Delta V_{\text{max}} = 0,04 V_{\text{nom}}$ (4 %).

4.2.3 Critério de seção mínima

Ainda que a seção verificada atenda simultaneamente aos critérios de ampacidade e queda de tensão, ela não pode ser inferior aos valores mínimos prescritos pela Tabela 47 da NBR 5410 (1,5 mm² para iluminação, 2,5 mm² para tomadas e força e 4 mm² em cobre para o condutor de proteção, entre outros).

4.3 Dimensionamento do circuito do Motor 1

Nesta seção demonstram-se os cálculos dos três critérios aplicados ao alimentador do Motor 1, tomando-se os seguintes dados de projeto:

Corrente nominal	I_n	= 69,06 A
Fator de correção térmica	F_{CT}	= 0,87
Fator de agrupamento	F_{CA}	= 0,80
Resistividade (XLPE, 90 °C)	ρ	= 0,0225 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$
Comprimento do trecho	L	= 10 m
Tensão nominal	V_{nom}	= 380 V

4.3.1 Critério de ampacidade

A corrente corrigida é:

$$I_{\text{corr}} = \frac{I_n}{F_{CT} \times F_{CA}} = \frac{69,06}{0,87 \times 0,80} = 99,22 \text{ A.}$$

Consultando as tabelas do método B1 (cabos de cobre XLPE a 90 °C) a seção imediatamente superior que suporta essa corrente é:

$$S_{\text{amp}} = 25 \text{ mm}^2.$$

4.3.2 Critério de queda de tensão

Usa-se o limite de 4 % da NBR 5410:

$$S_{\Delta V} = \frac{\sqrt{3} \rho L I_n}{V_{\text{nom}} \times 0,04} = \frac{\sqrt{3} \times 0,0225 \times 10 \times 69,06}{380 \times 0,04} = 1,77 \text{ mm}^2.$$

4.3.3 Critério de seção mínima

Para circuitos de força, a seção mínima prescrita pela tabela 47 da norma é

$$S_{\text{mín}} = 2,5 \text{ mm}^2.$$

4.3.4 Seção adotada para o circuito

Comparando-se os resultados,

$$S_{\text{final}} = \max(S_{\text{amp}}, S_{\Delta V}, S_{\text{mín}}) = \max(25, 1,77, 2,5) = 25 \text{ mm}^2.$$

Portanto, a bitola escolhida para o alimentador do Motor 1 é 25 mm², pois atende simultaneamente aos requisitos de ampacidade, queda de tensão e seção mínima estabelecidos pela ABNT NBR 5410.

4.4 Seções Adotadas

Aplicando a mesma sequência de verificações demonstrada para o circuito do Motor 1 e buscando a menor seção de condutor que atenda aos três critérios simultaneamente, foram tomadas as seguintes seções.

Tabela 7 – Seção de condutor adotada para cada carga

Carga	Seção (mm ²)
Motor 1	25
Motor 2	95
Motor 3	10
Motor 4	120
Motor 5	6
Motor 6	50
Motor 7	10
Iluminação 1	70
Iluminação 2	70
Aquecimento 1	10
Aquecimento 2	10
Aquecimento 3	16

Fonte: Autor.

4.5 Dimensionamento dos alimentadores do QGF para as áreas

Cada área é alimentada por um único circuito derivado do QGF, calculado com a soma aritmética das correntes de todos os seus circuitos terminais. Como esses alimentadores são instalados isolados, adota-se

$$F_{CA} = 1,0.$$

A temperatura ambiente máxima de projeto é de 44 °C, o que implica o fator de correção térmica

$$F_{CT} = 0,87.$$

A corrente corrigida de cálculo é obtida por

$$I_{\text{corr}} = \frac{I_{\text{tot}}}{F_{CT} \times F_{CA}}.$$

Para a verificação de ampacidade utilizam-se as Tabelas 36–38 da NBR 5410 (método B1, cobre XLPE 90 °C). A seção necessária pela queda de tensão limita-se a 4 nominal e resulta de

$$S_{\Delta V} = \frac{\sqrt{3} \rho L I_{\text{tot}}}{V_{\text{nom}} \times 0,04}.$$

A bitola adotada em cada caso é o maior valor entre a seção obtida por ampacidade, a seção obtida por queda de tensão e a seção mínima fixada na Tabela 47 da norma.

4.5.1 Cálculos QGF – Área 1

A corrente total calculada para a Área 1 é $I_{\text{tot}} = 477,18$ A. Como o alimentador é instalado isoladamente, adota-se o fator de agrupamento $F_{\text{CA}} = 1,0$. A temperatura ambiente máxima de 44 °C impõe o fator de correção térmica $F_{\text{CT}} = 0,87$. A corrente de projeto corrigida resulta de

$$I_{\text{corr}} = \frac{I_{\text{tot}}}{F_{\text{CT}} F_{\text{CA}}} = \frac{477,18}{0,87 \times 1,0} = 548,48 \text{ A.}$$

Consultando as tabelas do método B1 para cabos de cobre com isolação XLPE a 90 °C verifica-se que a menor seção capaz de conduzir I_{corr} é $S_{\text{amp}} = 300 \text{ mm}^2$.

A verificação de queda de tensão utiliza o limite de quatro por cento da NBR 5410 e o comprimento entre o QGF e o painel da Área 1, $L = 10$ m. Aplicando $\rho = 0,0225 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ obtem-se

$$S_{\Delta V} = \frac{\sqrt{3} \rho L I_{\text{tot}}}{V_{\text{nom}} \times 0,04} = \frac{\sqrt{3} \times 0,0225 \times 10 \times 477,18}{380 \times 0,04} = 12,23 \text{ mm}^2.$$

A seção mínima prescrita pela Tabela 47 para alimentadores trifásicos de força é $S_{\text{mín}} = 10 \text{ mm}^2$.

Comparando os três valores,

$$S_{\text{final}} = \max(S_{\text{amp}}, S_{\Delta V}, S_{\text{mín}}) = \max(300, 12,23, 10) = 300 \text{ mm}^2,$$

de forma que a bitola adotada para o alimentador da Área 1 é 300 mm^2 , atendendo simultaneamente aos critérios de ampacidade, queda de tensão e seção mínima exigidos pela ABNT NBR 5410.

4.6 Seções dos alimentadores do QGF para as áreas

Aplicou-se a mesma metodologia adotada no dimensionamento do alimentador da Área 1, verificando-se sucessivamente os critérios de ampacidade, queda de tensão e seção mínima exigidos pela ABNT NBR 5410 para cabos de cobre com isolação XLPE, instalados pelo método B1. As seções finais obtidas para cada setor encontram-se na Tabela 8.

Tabela 8 – Seção adotada para os alimentadores do QGF

Área	Seção final (mm ²)
1	300
2	70
3	240

Fonte: Autor.

5 Fator de potência da instalação

O fator de potência representa a relação entre a potência ativa P , que é efetivamente convertida em trabalho útil, e a potência aparente S que circula no sistema elétrico. Ele é expresso por

$$\text{FP} = \frac{P}{S} = \cos \varphi,$$

em que φ é o ângulo de defasagem entre tensão e corrente. Quanto mais o fator de potência se aproxima da unidade, menor é a potência reativa Q requisitada pelo circuito, resultando em correntes inferiores nos condutores, menor aquecimento de transformadores, redução de perdas ôhmicas e disponibilidade adicional de capacidade instalada.

A manutenção de valores elevados de fator de potência é importante por três motivos principais. Em primeiro lugar, melhora-se a eficiência energética, pois as perdas por efeito Joule diminuem. Em segundo lugar, permite-se o aproveitamento pleno da capacidade dos transformadores e alimentadores, evitando que correntes reativas ultrapassem os limites de ampacidade. Finalmente, evita-se a aplicação de penalidades tarifárias, uma vez que as concessionárias de energia cobram excedentes de potência reativa quando o fator de potência se situa abaixo do mínimo contratual.

Para esta instalação, adota-se como referência o Código de Fornecimento da concessionária Light, que exige um fator de potência mínimo de 0,92 na fronteira de medição.

5.1 Fator de potência na Área 1

O fator de potência do alimentador da Área 1 é determinado a partir das potências ativa P , reativa Q e aparente S , segundo

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad \text{FP} = \frac{P}{S}.$$

Os valores levantados para o setor são $P = 276,95$ kW e $Q = 148,01$ kvar. Substituindo-se na expressão de S ,

$$S = \sqrt{276,95^2 + 148,01^2} = 314,06 \text{ kVA}.$$

Em seguida, obtém-se o fator de potência:

$$\text{FP}_{\text{Área 1}} = \frac{276,95}{314,06} = 0,88 \text{ (indutivo)}.$$

O resultado de 0,88 é inferior ao limite de 0,92 fixado pelo contrato de fornecimento da concessionária Light. Conclui-se, portanto, que a Área 1 necessita correção de fator

de potência, recomendando-se a instalação de um banco de capacitores ou dispositivo compensador equivalente para evitar penalidades e reduzir as correntes no alimentador.

5.2 Fator de potência na Área 2

A Área 2 apresenta potências ativa $P = 99,15$ kW e reativa $Q = 55,03$ kvar. A potência aparente resulta de

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{99,15^2 + 55,03^2} = 113,41 \text{ kVA}.$$

O fator de potência obtém-se por

$$FP_{\text{Área 2}} = \frac{P}{S} = \frac{99,15}{113,41} = 0,87.$$

Como o valor calculado (0,87 indutivo) é inferior ao limite contratual de 0,92, a Área 2 requer correção de fator de potência mediante banco de capacitores ou dispositivo compensador equivalente.

5.3 Fator de potência na Área 3

Para a Área 3 foram levantadas $P = 245,00$ kW e $Q = 63,90$ kvar. Calcula-se

$$S = \sqrt{245,00^2 + 63,90^2} = 258,04 \text{ kVA}, \quad FP_{\text{Área 3}} = \frac{245,00}{258,04} = 0,95.$$

O fator de potência de 0,95 satisfaz o requisito mínimo de 0,92 exigido pela concessionária; portanto, não é necessária correção de potência reativa para o alimentador da Área 3.

5.4 Fator de potência da instalação como um todo

Para avaliar o desempenho global, somaram-se as potências ativas e reativas dos três alimentadores oriundos do QGF. Os valores totais são $P_{\text{tot}} = 621,09$ kW e $Q_{\text{tot}} = 266,94$ kvar. A potência aparente da instalação resulta de

$$S_{\text{tot}} = \sqrt{P_{\text{tot}}^2 + Q_{\text{tot}}^2} = \sqrt{621,09^2 + 266,94^2} = 685,51 \text{ kVA}.$$

O fator de potência global calcula-se por

$$FP_{\text{tot}} = \frac{P_{\text{tot}}}{S_{\text{tot}}} = \frac{621,09}{685,51} = 0,91.$$

Como 0,91 se encontra abaixo do valor mínimo de 0,92 exigido pela concessionária, conclui-se que a instalação, considerada em seu conjunto, necessita de correção de fator

de potência. O dimensionamento do banco automático de capacitores deverá, portanto, levar em conta o déficit reativo global para elevar o fator de potência a pelo menos 0,92, preferencialmente a 0,95, reduzindo perdas e evitando cobranças adicionais na fatura de energia elétrica.

5.5 Método de correção do fator de potência

A correção de potência reativa será dimensionada com base no triângulo de potências, em que a potência aparente S forma a hipotenusa cujos catetos são a potência ativa P e a potência reativa Q . Pretende-se elevar o fator de potência da instalação até $FP_f = 0,92$.

Se $FP_i = \cos \varphi_i$ representa o fator de potência atual, a potência reativa capacitiva a instalar é obtida por

$$Q_c = P(\tan \varphi_i - \tan \varphi_f), \quad (5.1)$$

com

$$\varphi_i = \arccos(FP_i), \quad \varphi_f = \arccos(0,92).$$

Após a compensação, a potência reativa remanescente é

$$Q_{\text{novo}} = Q_{\text{existente}} - Q_c,$$

e a nova potência aparente resulta de

$$S_{\text{novo}} = \sqrt{P^2 + Q_{\text{novo}}^2}, \quad FP_{\text{novo}} = \frac{P}{S_{\text{novo}}}.$$

O valor de Q_c calculado na Equação (5.1) indica a potência nominal do banco de capacitores necessária para que o fator de potência passe de FP_i para 0,92. Seleciona-se, então, o conjunto comercial imediatamente superior, assegurando o atendimento ao limite contratual estabelecido pela concessionária.

5.6 Correção do fator de potência por setor

Adotou-se o método do triângulo de potências:

$$Q_c = P(\tan \varphi_i - \tan \varphi_f), \quad \varphi_i = \arccos(FP_i), \quad \varphi_f = \arccos(0,92) = 23,07^\circ.$$

Em seguida, compara-se Q_c com os degraus comerciais de capacitores e calcula-se a nova potência aparente S_{novo} depois da compensação.

Setor 1

Potência ativa $P = 276,95$ kW–FP atual 0,88 $Q_{c1} = 31,50$ kvar; recomenda-se banco de 35 kvar. Depois da correção, a nova potência aparente é $S_{\text{nov}} = 301,03$ kVA.

Setor 2

Potência ativa $P = 99,15$ kW–FP atual 0,87 $Q_{c2} = 13,95$ kvar; recomenda-se banco de 15 kvar. A correção eleva o fator de potência a 0,92 e resulta em $S_{\text{nov}} = 107,77$ kVA.

Setor 3

Este setor já opera com fator de potência 0,95; não necessita compensação ($Q_{c3} = 0$). Assim, não há alteração na potência aparente.

Instalação completa

Potência ativa total $P_{\text{tot}} = 621,09$ kW–FP atual 0,906 Correção global necessária $Q_{\text{ctot}} = 25,53$ kvar; especifica-se banco de 30 kvar instalado no QGF. Após a compensação, a potência aparente do sistema é $S_{\text{nov}} = 675,10$ kVA, estabelecendo fator de potência de 0,92 na fronteira de medição.

5.7 Novas correntes após a correção de fator de potência

Com o fator de potência corrigido, recalculam-se as correntes de linha a partir da nova potência aparente S_{nov} . Para sistemas trifásicos a relação é

$$I = \frac{S_{\text{nov}} \times 10^3}{\sqrt{3} V},$$

em que I é a corrente de linha, V a tensão de fase-fase (220 V ou 380 V) e S_{nov} a potência aparente já corrigida. Os resultados para cada setor e para o sistema completo estão sintetizados na Tabela 9.

Tabela 9 – Potência aparente corrigida e correntes resultantes

Setor	$S_{\text{nov}} \text{ (kVA)}$	$I_{220} \text{ (A)}$	$I_{380} \text{ (A)}$
1	301,03	1 368,31	457,37
2	107,77	489,85	163,74
3	—	—	—
Instalação total	675,10	3 068,64	1 025,71

Fonte: Autor.

6 Dimensionamento dos disjuntores

6.1 Motor 1

Corrente total levantada para o circuito: $I_{\text{tot}} = 99,22 \text{ A}$.

Fatores de correção: $F_{\text{CT}} = 0,87$ (temperatura ambiente de 44°C) e $F_{\text{CA}} = 0,80$ (dois cabos agrupados).

$$I_b = \frac{99,22}{0,87 \times 0,80} = 142,49 \text{ A}.$$

Condutor previsto: 35 mm^2 (cobre, XLPE, método B1). Capacidade térmica tabelada: $I_z = 178 \text{ A}$.

Seleciona-se disjuntor caixa-moldada 100 A curva D:

$$1,45 I_n = 1,45 \times 100 = 145 \text{ A} \leq 178 \text{ A}.$$

A curva D foi escolhida porque, de acordo com a ABNT NBR IEC 60898-1 e a ABNT NBR IEC 60947-2, o disparador magnético atua entre 10 e 14 vezes a corrente nominal I_n . O Motor 1 apresenta corrente de partida aproximadamente igual a $7 I_b$; assim, o disjuntor permite a energização do motor sem desligamento intempestivo e ainda assegura a proteção contra curtos-circuitos conforme a norma.

6.2 Motor 2

Corrente total levantada para o circuito: $I_{\text{tot}} = 167,98 \text{ A}$.

Fatores de correção: $F_{\text{CT}} = 0,87$ (temperatura ambiente de 44°C) e $F_{\text{CA}} = 0,80$ (dois cabos agrupados).

$$I_b = \frac{167,98}{0,87 \times 0,80} = 241,35 \text{ A}.$$

Condutor previsto: 150 mm^2 (cobre, XLPE, método B1). Capacidade térmica tabelada: $I_z = 385 \text{ A}$.

Seleciona-se disjuntor caixa-moldada 250 A curva D:

$$1,45 I_n = 1,45 \times 250 = 362,50 \text{ A} \leq 385 \text{ A}.$$

A curva D foi escolhida porque, conforme a ABNT NBR IEC 60898-1 e NBR IEC 60947-2, o disparador magnético atua entre 10 e 14 vezes a corrente nominal I_n . O Motor 2 apresenta corrente de partida próxima de $7 I_b$; assim, o disjuntor permite a energização sem desligamento intempestivo e garante a proteção contra curtos-circuitos.

6.3 Motor 3

Corrente total levantada para o circuito: $I_{\text{tot}} = 41,89 \text{ A}$.

Fatores de correção: $F_{\text{CT}} = 0,87$ e $F_{\text{CA}} = 0,80$.

$$I_b = \frac{41,89}{0,87 \times 0,80} = 60,15 \text{ A}.$$

Condutor previsto: 16 mm^2 (cobre, XLPE, método B1). Capacidade térmica tabelada: $I_z = 101 \text{ A}$.

Seleciona-se disjuntor caixa-moldada 63 A curva D:

$$1,45 I_n = 1,45 \times 63 = 91,35 \text{ A} \leq 101 \text{ A}.$$

6.4 Motor 4

Corrente total levantada para o circuito: $I_{\text{tot}} = 198,26 \text{ A}$.

Fatores de correção: $F_{\text{CT}} = 0,87$ e $F_{\text{CA}} = 0,80$.

$$I_b = \frac{198,26}{0,87 \times 0,80} = 284,87 \text{ A}.$$

Condutor previsto: 185 mm^2 (cobre, XLPE, método B1). Capacidade térmica tabelada: $I_z = 445 \text{ A}$.

Seleciona-se disjuntor caixa-moldada 300 A curva D:

$$1,45 I_n = 1,45 \times 300 = 435,00 \text{ A} \leq 445 \text{ A}.$$

A escolha da curva D garante tolerância ao elevado pico de partida do motor sem abrir o circuito.

6.5 Motor 5

Corrente total levantada para o circuito: $I_{\text{tot}} = 28,56 \text{ A}$.

Fatores de correção: $F_{\text{CT}} = 0,87$ e $F_{\text{CA}} = 0,80$.

$$I_b = \frac{28,56}{0,87 \times 0,80} = 40,96 \text{ A}.$$

Condutor previsto: 10 mm^2 (cobre, XLPE, método B1). Capacidade térmica tabelada: $I_z = 76 \text{ A}$.

Seleciona-se disjuntor caixa-moldada 40 A curva D:

$$1,45 I_n = 1,45 \times 40 = 58,00 \text{ A} \leq 76 \text{ A}.$$

A curva D permite a corrente de partida ($7 I_b$) sem disparo inconveniente.

6.6 Motor 6

Corrente total levantada para o circuito: $I_{\text{tot}} = 101,86 \text{ A}$.

Fatores de correção: $F_{\text{CT}} = 0,87$ e $F_{\text{CA}} = 0,80$.

$$I_b = \frac{101,86}{0,87 \times 0,80} = 146,33 \text{ A}.$$

Condutor previsto: 70 mm^2 (cobre, XLPE, método B1). Capacidade térmica tabelada: $I_z = 242 \text{ A}$.

Seleciona-se disjuntor caixa-moldada 160 A curva D:

$$1,45 I_n = 1,45 \times 160 = 232,00 \text{ A} \leq 242 \text{ A}.$$

A curva D, com limite magnético de $10\text{--}14 I_n$, aceita a corrente de partida sem interrupções.

6.7 Motor 7

Corrente total levantada para o circuito: $I_{\text{tot}} = 41,89 \text{ A}$.

Como o circuito é individual, $F_{\text{CA}} = 1,00$; mantém-se $F_{\text{CT}} = 0,87$.

$$I_b = \frac{41,89}{0,87} = 48,15 \text{ A}.$$

Condutor previsto: 10 mm^2 (cobre, XLPE, método B1). Capacidade térmica tabelada: $I_z = 76 \text{ A}$.

Seleciona-se disjuntor caixa-moldada 50 A curva D:

$$1,45 I_n = 1,45 \times 50 = 72,50 \text{ A} \leq 76 \text{ A}.$$

A curva D garante que o motor parta sem desligamento acidental.

6.8 Iluminação 1

Corrente total levantada para o circuito: $I_{\text{tot}} = 123,86 \text{ A}$.

Fatores de correção: $F_{\text{CT}} = 0,87$ (temperatura ambiente de 44°C) e $F_{\text{CA}} = 0,80$ (dois cabos agrupados).

$$I_b = \frac{123,86}{0,87 \times 0,80} = 177,96 \text{ A}.$$

Condutor previsto: 95 mm² (cobre, XLPE, método B1). Capacidade térmica tabelada: $I_z = 292$ A.

Seleciona-se disjuntor caixa-moldada 200 A curva C:

$$1,45 I_n = 1,45 \times 200 = 290 \text{ A} \leq 292 \text{ A}.$$

A curva C, cujo disparador magnético atua entre 5 e 10 vezes a corrente nominal I_n , é apropriada para a carga linear de iluminação, garantindo proteção térmica e contra curto-circuito sem desligamentos espúrios.

6.9 Iluminação 2

Parâmetros idênticos a Iluminação 1:

$$I_{\text{tot}} = 123,86 \text{ A}; F_{\text{CT}} = 0,87; F_{\text{CA}} = 0,80.$$

$$I_b = 177,96 \text{ A}.$$

Condutor 95 mm² (cobre, XLPE) – $I_z = 292$ A.

Disjuntor 200 A curva C:

$$1,45 I_n = 290 \text{ A} \leq 292 \text{ A}.$$

A escolha da curva C mantém coerência com o tipo de carga e satisfaz o critério $1,45 I_n \leq I_z$.

6.10 Aquecimento 1

Corrente total levantada para o circuito: $I_{\text{tot}} = 45,58$ A.

Fatores de correção: $F_{\text{CT}} = 0,87$ e $F_{\text{CA}} = 0,80$ (dois cabos agrupados).

$$I_b = \frac{45,58}{0,87 \times 0,80} = 65,49 \text{ A}.$$

Condutor previsto: 25 mm² (cobre, XLPE, método B1). Capacidade térmica tabelada: $I_z = 146$ A.

Seleciona-se disjuntor caixa-moldada 80 A curva C:

$$1,45 I_n = 1,45 \times 80 = 116 \text{ A} \leq 146 \text{ A}.$$

A curva C é adequada para carga resistiva pura, sem picos de partida, atendendo ao requisito térmico da norma.

6.11 Aquecimento 2

Corrente total levantada para o circuito: $I_{\text{tot}} = 37,98 \text{ A}$.

Fatores de correção: $F_{\text{CT}} = 0,87$ e $F_{\text{CA}} = 0,80$.

$$I_b = \frac{37,98}{0,87 \times 0,80} = 54,57 \text{ A}.$$

Condutor previsto: 16 mm^2 (cobre, XLPE). Capacidade térmica tabelada: $I_z = 101 \text{ A}$.

Seleciona-se disjuntor caixa-moldada 63 A curva C:

$$1,45 I_n = 1,45 \times 63 = 91,35 \text{ A} \leq 101 \text{ A}.$$

A curva C garante proteção eficaz sem risco de desligamento indevido em função da natureza resistiva da carga.

6.12 Aquecimento 3

Corrente total levantada para o circuito: $I_{\text{tot}} = 60,78 \text{ A}$.

Fatores de correção: $F_{\text{CT}} = 0,87$ (temperatura ambiente) e $F_{\text{CA}} = 1,00$ (circuito isolado).

$$I_b = \frac{60,78}{0,87} = 69,86 \text{ A}.$$

Condutor previsto: 25 mm^2 (cobre, XLPE). Capacidade térmica tabelada: $I_z = 146 \text{ A}$.

Seleciona-se disjuntor caixa-moldada 80 A curva C:

$$1,45 I_n = 1,45 \times 80 = 116 \text{ A} \leq 146 \text{ A}.$$

Assim, o circuito de aquecimento 3 permanece protegido dentro dos critérios da ABNT NBR 5410, evitando sobrecorrente e garantindo confiabilidade operacional.

6.13 QGF – ÁREA 1

A corrente total levantada para o circuito foi de $I_{\text{tot}} = 477,18 \text{ A}$. Os fatores de correção adotados foram $F_{\text{CT}} = 0,87$ para temperatura de 44°C e $F_{\text{CA}} = 1,00$ para um cabo por eletroduto utilizando o método B1.

A corrente de projeto foi calculada conforme a Equação 6.1:

$$I_b = \frac{477,18}{0,87 \times 1,00} = 548,48 \text{ A} \quad (6.1)$$

O condutor previsto é de 300 mm^2 (cobre, XLPE, método B1) e o disjuntor selecionado é do tipo caixa-moldada de 630 A.

A verificação da coordenação é apresentada na Equação 6.2:

$$I_b (548,48 \text{ A}) \leq I_r (630 \text{ A}) \quad (6.2)$$

6.14 QGF – ÁREA 2

A corrente total levantada para o circuito foi de $I_{\text{tot}} = 172,31 \text{ A}$. Os fatores de correção adotados foram $F_{\text{CT}} = 0,87$ e $F_{\text{CA}} = 1,00$.

A corrente de projeto foi calculada conforme a Equação 6.3:

$$I_b = \frac{172,31}{0,87} = 198,06 \text{ A} \quad (6.3)$$

O condutor previsto é de 70 mm^2 (cobre, XLPE, método B1) e o disjuntor selecionado é do tipo caixa-moldada de 200 A ($I_r = I_n = 200 \text{ A}$).

A verificação da coordenação é apresentada na Equação 6.4:

$$I_b (198,06 \text{ A}) \leq I_r (200 \text{ A}) \quad (6.4)$$

6.15 QGF – ÁREA 3

A corrente total levantada para o circuito foi de $I_{\text{tot}} = 392,07 \text{ A}$. Os fatores de correção adotados foram $F_{\text{CT}} = 0,87$ e $F_{\text{CA}} = 1,00$.

A corrente de projeto foi calculada conforme a Equação 6.5:

$$I_b = \frac{392,07}{0,87} = 450,65 \text{ A} \quad (6.5)$$

O condutor previsto é de 240 mm^2 (cobre, XLPE, método B1) e o disjuntor selecionado é do tipo caixa-moldada de 500 A .

A verificação da coordenação é apresentada na Equação 6.6:

$$I_b (450,65 \text{ A}) \leq I_r (500 \text{ A}) \quad (6.6)$$

7 Seleção de Chaves de Partida

Para cada motor foi avaliado o dispositivo de partida adequado, considerando a aplicação mecânica específica na fábrica e o impacto na rede elétrica.

7.1 Motor de Menor Potência – Motor 5 (20 cv)

O Motor 5 alimenta a esteira que transporta bobinas de papel para o setor de corte. Não há necessidade de controle de velocidade variável nem de redução de torque de partida, pois a esteira opera sempre em velocidade constante e a carga é leve. Por isso, a partida direta é a solução mais simples e econômica, sem riscos de sobrecarga na rede.

Adota-se o contator modelo CWM32-00-30D33 (32 A, 3 polos, AC-3, 380 V 50/60 Hz), cuja capacidade de 32 A em categoria AC-3 suporta confortavelmente a corrente de partida do motor.

Tabela 10 – Especificação do Contator – Motor 5 (Partida Direta)

Especificação	Valor
Modelo	CWM32-00-30D33
Corrente Nominal	32 A (AC-3, 380 V)
Tensão de Operação	Até 690 V CA
Tensão da Bobina	380 V CA (50/60 Hz)
Número de Polos	3 polos principais (3NA)
Categoria de Utilização	AC-3 (partida de motores)
Potência Máxima Suportada	Até 15 kW (20 cv) em 380 V
Grau de Proteção	IP20
Temperatura Ambiente	-5°C a +60°C
Normas Atendidas	IEC 60947 / UL / CSA

Fonte: Catálogo técnico do fabricante.

7.2 Motor de Maior Potência – Motor 4 (150 cv)

O Motor 4 aciona o refinador de celulose, equipamento crítico no processo de fabricação de papel. Durante a partida do refinador, ocorre um elevado pico de torque e, consequentemente, de corrente (superior a 1000 A), o que pode causar quedas de tensão na rede e choques mecânicos na transmissão.

Optou-se por um soft starter para limitar o inrush e proteger tanto a rede quanto o próprio refinador. O modelo escolhido foi o SSW070200T5SZ (WEG SSW07 2200TQ), com corrente nominal de 200 A.

Tabela 11 – Especificação do Soft Starter – Motor 4 (Partida Suave)

Especificação	Valor
Modelo	SSW070200T5SZ (WEG SSW07 2200TQ)
Corrente Nominal	200 A (trifásico)
Tensão de Alimentação	220-575 V CA (trifásico)
Frequência	50/60 Hz
Potência Nominal do Motor	Até 150 cv (110 kW em 380 V)
Tensão de Controle	100-240 V CA
Bypass Interno	Sim (contator interno para regime permanente)
Funções Adicionais	Rampa de aceleração/desaceleração, proteções
Interface	Teclado frontal com display LCD
Grau de Proteção	IP20 (gabinete aberto)
Normas Atendidas	IEC 60947-4-2 / UL 508C / CSA C22.2

Fonte: Catálogo técnico WEG.

8 Cálculo curto circuito

8.1 Valores iniciais

Para a realização dos cálculos de curto-circuito, é essencial dispor de um conjunto de dados iniciais que servirão como referência para as etapas posteriores. No presente estudo, foram considerados os seguintes parâmetros fornecidos no enunciado do exercício:

- **Tensão Primária (V_p):** Corresponde à tensão no lado de alta tensão do transformador ou no ponto principal de alimentação do sistema elétrico. Expressa em quilovolts (kV), essa grandeza define o nível de tensão da rede anterior à transformação, sendo determinante para o estabelecimento dos valores base do lado primário, assim como para o cálculo das correntes de curto-circuito nesse nível.
- **Tensão Secundária (V_s):** Refere-se à tensão do lado de baixa tensão do transformador ou ao ponto do sistema onde está sendo analisado o evento de curto-circuito. Também apresentada em quilovolts (kV), essa tensão é utilizada para calcular os valores base do lado secundário e determinar as correntes de curto-circuito correspondentes.
- **Impedância de Sequência Positiva (Z_1):** Essa impedância caracteriza a oposição ao fluxo de correntes simétricas (balanceadas) em sistemas trifásicos. É um parâmetro essencial nos cálculos de curto-circuito trifásico equilibrado, sendo geralmente fornecido pelo fabricante no caso de transformadores, ou obtido por meio de cálculos em linhas de transmissão, considerando resistência e reatância. Pode ser expressa em ohms (Ω) ou por unidade (pu).
- **Impedância de Sequência Zero (Z_0):** Utilizada para análise de faltas assimétricas, como curto-circuito monofásico à terra. Representa a resistência ao fluxo de correntes de sequência zero, que retornam à fonte por caminhos como o solo. Sua determinação depende da configuração de aterramento e pode ser expressa em Ω ou pu.
- **Potência Base (S_{base}):** Valor de potência escolhido como referência para normalização dos demais parâmetros elétricos do sistema.
- **Corrente Base Primária ($I_{base,p}$):** Corrente de referência calculada para o lado de alta tensão do sistema, a partir da potência base e da tensão primária.

$$I_{base,p} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} \cdot V_p} \quad (8.1)$$

- **Corrente Base Secundária ($I_{\text{base,s}}$):** Corrente base calculada no lado de baixa tensão, com base nos mesmos critérios da corrente primária, mas utilizando a tensão secundária.

$$I_{\text{base,s}} = \frac{S_{\text{base}}}{\sqrt{3} \cdot V_s} \quad (8.2)$$

- **Impedância Base Primária ($Z_{\text{base,p}}$):** Impedância de referência do lado primário do sistema, obtida a partir da tensão e potência base.

$$Z_{\text{base,p}} = \frac{V_p^2}{S_{\text{base}}} \quad (8.3)$$

- **Impedância Base Secundária ($Z_{\text{base,s}}$):** Impedância de referência do lado secundário, também calculada com base na tensão e potência base do respectivo lado.

$$Z_{\text{base,s}} = \frac{V_s^2}{S_{\text{base}}} \quad (8.4)$$

8.2 Dados dos cabos para curto-circuito

Para a avaliação das correntes de curto-circuito foi necessário atribuir, a cada trecho de circuito, as impedâncias de sequência positiva, negativa e zero correspondentes às seções de condutor dimensionadas no Capítulo Seções dos condutores. Esses parâmetros foram extraídos do catálogo técnico da Phelps Dodge, no qual constam as tabelas de resistência e reatância por quilômetro para cabos de cobre isolados em XLPE.

O documento completo utilizado como referência primária para os valores empregados nas planilhas de cálculo está disponível em:

<https://github.com/Gabpastre/projeto-final/blob/main/Catalogos/Catalogo_cabos.pdf>

8.3 Tipos de Curto-Circuito

Existem diferentes tipos de curto-circuito que podem ocorrer em sistemas elétricos trifásicos, cada um com características específicas quanto ao equilíbrio das correntes e à severidade do evento. A seguir, são apresentados os principais tipos, juntamente com suas respectivas fórmulas de cálculo da corrente de falta:

- **Curto-Circuito Trifásico (Simétrico):** Esse tipo de falta ocorre quando as três fases de um sistema trifásico entram em contato direto entre si. É considerado o mais severo, pois normalmente gera as maiores correntes de curto-circuito. Por ser um evento simétrico, as correntes nas três fases permanecem balanceadas, com defasagens de 120° , semelhante ao regime normal de operação.

A corrente de curto-circuito trifásica pode ser determinada por:

$$I_{cc3\varphi} = \frac{V_{LL}}{\sqrt{3} \cdot Z_{1,\text{total}}} \quad (8.5)$$

Onde:

- V_{LL} : tensão entre fases (linha-linha) no ponto de estudo (em V ou kV);
 - $Z_{1,\text{total}}$: impedância total de sequência positiva do caminho da corrente de falta, incluindo fonte, transformadores e linhas, referida à mesma base.
- **Curto-Circuito Monofásico à Terra (Assimétrico):** É o tipo mais comum em redes elétricas e acontece quando apenas uma fase entra em contato com o solo ou com o condutor de proteção (PE). Como apenas uma fase está envolvida, as correntes tornam-se desequilibradas entre as fases, caracterizando uma falta assimétrica.

A corrente de curto-circuito monofásica é calculada por:

$$I_{cc1\varphi} = \frac{3 \cdot V_{LN}}{Z_{1,\text{total}} + Z_{2,\text{total}} + Z_{0,\text{total}}} \quad (8.6)$$

Onde:

- V_{LN} : tensão de fase para neutro (fase-terra) no ponto de curto;
 - $Z_{1,\text{total}}$: impedância de sequência positiva total;
 - $Z_{2,\text{total}}$: impedância de sequência negativa total;
 - $Z_{0,\text{total}}$: impedância de sequência zero total.
- **Curto-Circuito Bifásico (Fase-Fase):** Neste caso, duas fases entram em contato direto entre si, sem envolvimento do terra. Apesar de menos comum que o monofásico à terra, esse tipo também provoca correntes elevadas e assimétricas.

A corrente de curto-circuito bifásica (em pu) é estimada por:

$$I_{cc2\varphi} = \frac{\sqrt{3} \cdot V_{\text{pré-falta}}}{Z_{1,\text{total}} + Z_{2,\text{total}}} \quad (8.7)$$

Onde:

- $V_{\text{pré-falta}}$: tensão de linha antes do curto-circuito;
- $Z_{1,\text{total}}$ e $Z_{2,\text{total}}$: impedâncias totais de sequência positiva e negativa, respectivamente.

8.4 Cálculos Realizados no Excel

Nesta seção, apresentam-se os cálculos de curto-circuito desenvolvidos no Microsoft Excel.

[illegible]

Figura 2 – Parte 1 da planilha de cálculo de curto-circuito desenvolvida no Excel

X_CaboPos_pu	0,1333102493	pu		=D74/('S - Tabela curto circuito'\Vbbt^2/'S - Tabela curto circuito'\Pb)
Z_CaboPos_pu	0,171398891966759+0,133310249307479j	pu		=COMPLEX(D78,D81,"j")
Sequência zero				
R_Cabo	0,248	mOhms/m	Tabelado	
R_CaboPos_ohm	0,00062	Ohms		=D84*\$D\$72/(1000*\$D\$73)
R_CaboPos_pu	0,4293628809	pu		=D79/('S - Tabela curto circuito'\Vbbt^2/'S - Tabela curto circuito'\Pb)
X_Cabo	2,01	mOhms/m	Tabelado	
X_CaboPos_ohm	0,005025	Ohms		=D87*\$D\$72/(1000*\$D\$73)
X_CaboPos_pu	3,479916898	pu		=D82/('S - Tabela curto circuito'\Vbbt^2/'S - Tabela curto circuito'\Pb)
Z_CaboPos_pu	0,429362880886427+3,47991689750692j	pu		=COMPLEX(D86,D89,"j")
CURTO CIRCUITO				
TRIFÁSICO				
zeq até o ponto - APENAS SEQ POSITIVA	2,36473222530009+6,96279680036358j			=IMSUM(D76,D46,'S - Tabela curto circuito'\Zps)
Ics	6644,4848309311-19564,2437760581j	A (cartesiano)		=IMDIV('S - Tabela curto circuito'\Ibtt,D87)
Módulo de Ics	20,66	KA		=IMABS(D94)/1000
Fase de Ics	-71,24	Graus		=DEGREES(IMARGUMENT(D94))
MONOFÁSICO				
Zeq até este ponto - Lado de BT	7,02279778393351+21,0550801517833j			=IMSUM(D87,D87,D46,'S - Tabela curto circuito'\Zos)
Icft	6497,71966667073-19480,8411967321j	A (cartesiano)		=IMDIV(3*'S - Tabela curto circuito'\Ibtt,D92)
Módulo de Icft	20,54	A		=IMABS(D99)/1000
Fase de Icft	-71,55	Graus		=DEGREES(IMARGUMENT(D99))
ASSIMÉTRICO				
relação X/R	2,94			=IMAGINARY(D93)/IMREAL(D93)
Fator de assimetria	1,30			=SQRT(1+2*EXP(-2*0,00416/D101))
corrente de curto circuito	26,85			=D104*D95
Impulso da corrente de curto	37,98			=D99*SQRT(2)
Tau	0,007810352455			=IMAGINARY(D87)/(PI()*2*60*IMREAL(D87))
BARRAMENTO 1				
IMPEDÂNCIA				
Lc	25	m	Comprimento dos cabos	
Nc	1		Condutores por fase	
Sc	300	mm²	Seção dos condutores	
Sequência positiva				
R_Cabo	0,081	mOhms/km	Tabelado	
R_CaboPos_ohm	0,002025	Ohms		=D117*\$D\$113/(1000*\$D\$114)
R_CaboPos_pu	1,402354571	pu		=D109/('S - Tabela curto circuito'\Vbbt^2/'S - Tabela curto circuito'\Pb)
X_Cabo	0,077	mOhms/m	Tabelado	
X_CaboPos_ohm	0,001925	Ohms		=D120*\$D\$113/(1000*\$D\$114)
X_CaboPos_pu	1,333102493	pu		=D112/('S - Tabela curto circuito'\Vbbt^2/'S - Tabela curto circuito'\Pb)
Z_CaboPos_pu	1,40235457063712+1,33310249307479j	pu		=COMPLEX(D119,D122,"j")
Sequência zero				
R_Cabo	0,229	mOhms/m	Tabelado	
R_CaboPos_ohm	0,005725	Ohms		=D125*\$D\$113/(1000*\$D\$114)
R_CaboPos_pu	3,96468144	pu		=D117/('S - Tabela curto circuito'\Vbbt^2/'S - Tabela curto circuito'\Pb)
X_Cabo	1,987	mOhms/m	Tabelado	#N/A
X_CaboPos_ohm	0,049675	Ohms		=D128*\$D\$113/(1000*\$D\$114)
X_CaboPos_pu	34,40096953	pu		=D120/('S - Tabela curto circuito'\Vbbt^2/'S - Tabela curto circuito'\Pb)
Z_CaboPos_pu	3,96468144044321+34,4009695290859j	pu		=COMPLEX(D127,D130,"j")
CURTO CIRCUITO				
TRIFÁSICO				
zeq até o ponto - APENAS SEQ POSITIVA	3,76708679593721+8,29589929343837j			=IMSUM(D123,\$D\$93)
Ics	6894,70802509018-15183,56399311358j	A (cartesiano)		=IMDIV('S - Tabela curto circuito'\Ibtt,D125)
Módulo de Ics	16,68	KA		=IMABS(D135)/1000
Fase de Ics	-65,58	Graus		=DEGREES(IMARGUMENT(D135))
MONOFÁSICO				
Zeq até este ponto - CCM	11,4168421052631+58,9359665783761j			=IMSUM(D122,\$D\$87,\$D\$87,\$D\$84,\$D\$46,'S - Tabela curto circuito'\Zs)
Icft	1443,98690783659-7454,14216604065j	A (cartesiano)		=IMDIV(3*'S - Tabela curto circuito'\Ibtt,D130)
Módulo de Icft	7,59	KA		=IMABS(D140)/1000
Fase de Icft	-79,04	Graus		=DEGREES(IMARGUMENT(D140))
ASSIMÉTRICO				
relação X/R	2,20			=IMAGINARY(D134)/IMREAL(D134)
Fator de assimetria	1,45			=SQRT(1+2*EXP(-2*0,00416/D139))
corrente de curto circuito	24,10			=D145*D136
Impulso da corrente de curto	34,09			=D137*SQRT(2)
Tau	0,01369314784			=IMAGINARY(D130)/(PI()*2*60*IMREAL(D130))
BARRAMENTO 2				
IMPEDÂNCIA				
Lc	35	m	Comprimento dos cabos	
Nc	1		Condutores por fase	

Figura 3 – Parte 2 da planilha de cálculo de curto-circuito desenvolvida no Excel

Sc	70	mm ²	Seção dos condutores	
Sequência positiva				
R_Cabo	0,343	mOhms/m	Tabelado	
R_CaboPos_ohm	0,012005	Ohms		=D158*D154/(1000*D155)
R_CaboPos_pu	8,313711911	pu		=D147/(1/5 - Tabela curto circuito/Vbbit^2/5 - Tabela curto circuito/IPb)
X_Cabo	0,079	mOhms/m	Tabelado	
X_CaboPos_ohm	0,002765	Ohms		=D161*D154/(1000*D155)
X_CaboPos_pu	1,914819945	pu		=D150/(1/5 - Tabela curto circuito/Vbbit^2/5 - Tabela curto circuito/IPb)
Z_CaboPos_pu	8,31371191135734+1,91481994459834j	pu		=COMPLEX(D160,D163,"j")
Sequência zero				
R_Cabo	0,491	mOhms/m	Tabelado	
R_CaboPos_ohm	0,017185	Ohms		=D166*D154/(1000*D155)
R_CaboPos_pu	11,90096953	pu		=D155/(1/5 - Tabela curto circuito/Vbbit^2/5 - Tabela curto circuito/IPb)
X_Cabo	2,15	mOhms/m	Tabelado	
X_CaboPos_ohm	0,07525	Ohms		=D169*D154/(1000*D155)
X_CaboPos_pu	52,11218837	pu		=D158/(1/5 - Tabela curto circuito/Vbbit^2/5 - Tabela curto circuito/IPb)
Z_CaboPos_pu	11,9009695290859+52,112188365651j	pu		=COMPLEX(D168,D171,"j")
CURTO CIRCUITO				
TRIFÁSICO				
zeq até o ponto - APENAS SEQ POSITIVA	10,6784441366574+8,87761674496192j			=IMSUM(D164,D93)
Ics	8413,25054016566-6994,42848781097j	A (cartesiano)		=MDIV(5 - Tabela curto circuito/Ibbit,D163)
Módulo de Ics	10,94	A		=IMABS(D176)/1000
Fase de Ics	-39,74	Graus		=DEGREES(IMARGUMENT(D176))
MONOFÁSICO				
Ze q até este ponto - CCM	19,3531301939058+76,6471854149412j			=IMSUM(D160,\$D\$87,\$D\$87,\$D\$84,\$D\$46/5 - Tabela curto circuito/Iz)
Icft	1411,54414602273-5590,35591646295j	A (cartesiano)		=MDIV(3*5 - Tabela curto circuito/Ibbit,D168)
Módulo de Icft	5,77	A		=IMABS(D181)/1000
Fase de Icft	-75,82922	Graus		=DEGREES(IMARGUMENT(D181))
ASSIMÉTRICO				
relação X/R CCM	0,83			=IMAGINARY(D175)/IMREAL(D175)
Fator de assimetria	1,02			=SQRT(1+2*EXP(-2*0,00416/D177))
corrente de curto circuito	11,19			=D186*D177
Impulso da corrente de curto	15,82			=D175*SQRT(2)
Tau	0,002205247272			=IMAGINARY(D163)/(PI()*2*60*IMREAL(D163))
BARRAMENTO 3				
IMPEDÂNCIA				
Lc	30	m	Comprimento dos cabos	
Nc	1		Condutores por fase	
Sc	240	mm ²	Seção dos condutores	
Sequência positiva				
R_Cabo	0,099	mOhms/m	Tabelado	
R_CaboPos_ohm	0,00297	Ohms		=D199*D195/(1000*D196)
R_CaboPos_pu	2,056786704	pu		=D185/(1/5 - Tabela curto circuito/Vbbit^2/5 - Tabela curto circuito/IPb)
X_Cabo	0,077	mOhms/m	Tabelado	
X_CaboPos_ohm	0,00231	Ohms		=D202*D195/(1000*D196)
X_CaboPos_pu	1,599722992	pu		=D188/(1/5 - Tabela curto circuito/Vbbit^2/5 - Tabela curto circuito/IPb)
Z_CaboPos_pu	2,0567867036011+1,59972299168975j	pu		=COMPLEX(D201,D204,"j")
Sequência zero				
R_Cabo	0,248	mOhms/m	Tabelado	
R_CaboPos_ohm	0,00744	Ohms		=D207*D195/(1000*D196)
R_CaboPos_pu	5,152354571	pu		=D193/(1/5 - Tabela curto circuito/Vbbit^2/5 - Tabela curto circuito/IPb)
X_Cabo	2,01	mOhms/m	Tabelado	
X_CaboPos_ohm	0,0603	Ohms		=D210*D195/(1000*D196)
X_CaboPos_pu	41,75900277	pu		=D196/(1/5 - Tabela curto circuito/Vbbit^2/5 - Tabela curto circuito/IPb)
Z_CaboPos_pu	5,15235457063712+41,7590027700831j	pu		=COMPLEX(D209,D212,"j")
CURTO CIRCUITO				
TRIFÁSICO				
zeq até o ponto - APENAS SEQ POSITIVA	4,4215189289012+8,56251979205333j			=IMSUM(D205,D93)
Ics	7233,82231176373-14008,7032788225j	A (cartesiano)		=MDIV(5 - Tabela curto circuito/Ibbit,D201)
Módulo de Ics	15,77	KA		=IMABS(D217)/1000
Fase de Ics	-62,69	Graus		=DEGREES(IMARGUMENT(D217))
MONOFÁSICO				
Ze q até este ponto - CCM	12,6045152354571+66,2939998193733j			=IMSUM(D198,\$D\$87,\$D\$87,\$D\$84,\$D\$46/5 - Tabela curto circuito/Iz)
Icft	1261,63072422766-6635,60203956002j	A (cartesiano)		=MDIV(3*5 - Tabela curto circuito/Ibbit,D206)
Módulo de Icft	6,75	KA		=IMABS(D222)/1000
Fase de Icft	-79,23	Graus		=DEGREES(IMARGUMENT(D222))
ASSIMÉTRICO				
relação X/R CCM	1,94			=IMAGINARY(D216)/IMREAL(D216)
Fator de assimetria	1,18			=SQRT(1+2*EXP(-2*0,00416/D215))

Figura 4 – Parte 3 da planilha de cálculo de curto-circuito desenvolvida no Excel

8.5 Resultados dos cálculos de curto-circuito

A Tabela 12 sintetiza as correntes de curto-circuito obtidas para os principais pontos do sistema, considerando o método de componentes simétricas. Observa-se que o maior

valor trifásico (21.18 kA) ocorre no secundário do transformador, enquanto no ponto de entrega da concessionária o nível cai para 8.20 kA.

Tabela 12 – Correntes de curto-circuito calculadas

Setor	I_{cs} (kA)	I_{clf} (kA)	Fator de assimetria	I_{ca} (kA)
Ponto de entrega	8,20	6,81	2,18	17,87
Secundário do transformador	21,18	20,87	1,32	27,86
QGF	20,66	20,54	1,30	26,85
Barramento Área 1	16,68	7,59	1,45	24,10
Barramento Área 2	10,94	5,77	1,02	11,19
Barramento Área 3	15,77	6,75	1,18	18,63

Fonte: Autor.

9 Projeto Luminotécnico – Área A1

Esta seção apresenta o processo de dimensionamento luminotécnico da Área A1, com base nas recomendações da ABNT NBR 5413 e ABNT ISO/CIE 8995-1:2013, utilizando o método dos lúmens. O cálculo é dividido em duas partes: primeiramente, o desenvolvimento teórico com as fórmulas e conceitos utilizados, seguido da aplicação prática com os dados reais do projeto.

9.1 Metodologia de Cálculo Luminotécnico

O método dos lúmens é amplamente utilizado para o dimensionamento de sistemas de iluminação em ambientes internos, permitindo determinar a quantidade de luminárias necessárias para atingir uma iluminância média desejada.

9.1.1 1. Cálculo do fluxo luminoso necessário

A iluminância média requerida E_{req} (em lux) é o valor mínimo recomendado para o tipo de atividade desenvolvida no ambiente. O fluxo luminoso total requerido no plano de trabalho é dado por:

$$\Phi_{tot,req} = E_{req} \times A$$

onde:

- $\Phi_{tot,req}$ = fluxo luminoso total requerido no plano de trabalho [lm];
- E_{req} = iluminância média requerida [lx];
- A = área útil do ambiente [m²].

9.1.2 Cálculo do fluxo luminoso total a ser emitido

Considerando que parte da luz é perdida por absorção e fatores de manutenção, o fluxo efetivamente necessário a ser emitido pelas luminárias é obtido por:

$$\Phi_{emitido} = \frac{\Phi_{tot,req}}{CU \times FM}$$

onde:

- $\Phi_{emitido}$ = fluxo luminoso total a ser emitido pelas luminárias [lm];

- CU = coeficiente de utilização (obtido em tabelas específicas, depende da geometria e refletâncias);
- FM = fator de manutenção (considera perdas ao longo do tempo).

9.1.3 3. Cálculo do número de luminárias

Sabendo o fluxo luminoso emitido por cada luminária, o número necessário de luminárias é obtido por:

$$N_{lum} = \frac{\Phi_{emitido}}{\Phi_{lum}}$$

onde:

- N_{lum} = número de luminárias;
- Φ_{lum} = fluxo luminoso emitido por uma luminária [lm].

9.1.4 Disposição e espaçamento das luminárias

Após determinar a quantidade de luminárias, define-se uma malha de distribuição que proporcione uniformidade na iluminância. Os espaçamentos devem ser proporcionais à geometria do ambiente e respeitar o índice do local K , dado por:

$$K = \frac{L \times W}{H_m \times (L + W)}$$

onde:

- L = comprimento do ambiente [m];
- W = largura do ambiente [m];
- H_m = altura do plano de trabalho até a luminária [m].

9.2 Aplicação Prática – Área A1

Com base nas características da Área A1 e nos critérios normativos, temos:

- Área: $A = 20 \text{ m} \times 15 \text{ m} = 300 \text{ m}^2$
- Iluminância requerida: $E_{req} = 500 \text{ lx}$
- Fluxo por lâmpada: $\Phi_{lmp} = 2\,400 \text{ lm}$
- Lâmpadas por luminária: 4

- $\Phi_{lum} = 4 \times 2\,400 = 9\,600 \text{ lm}$
- Coeficiente de utilização: $CU = 0,58$
- Fator de manutenção: $FM = 0,80$

9.2.1 1. Fluxo luminoso necessário

$$\Phi_{tot,req} = 500 \times 300 = 150\,000 \text{ lm}$$

9.2.2 Fluxo a ser emitido pelas luminárias

$$\Phi_{emitido} = \frac{150\,000}{0,58 \times 0,80} = \frac{150\,000}{0,464} \approx 323\,276 \text{ lm}$$

9.2.3 Número de luminárias

$$N_{lum} = \frac{323\,276}{9\,600} \approx 33,66 \Rightarrow 34 \text{ luminárias}$$

Para melhor distribuição, adota-se 35 luminárias.

9.2.4 Disposição das luminárias

Adotou-se:

- 5,00 m entre colunas
- 2,50 m entre linhas

conforme representado na Figura 5.

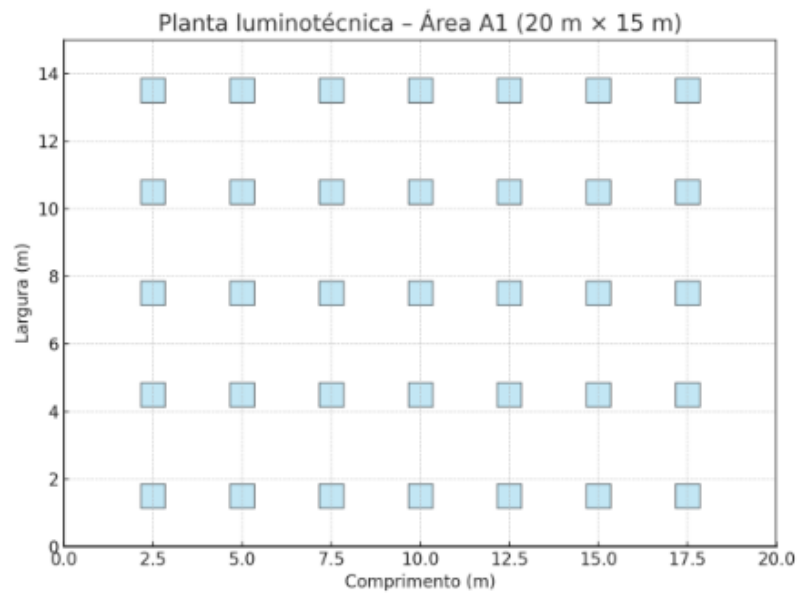


Figura 5 – Disposição simplificada das luminárias na Área A1.

10 Subestação Abrigada

10.1 Especificação sumária

De acordo com o Guia Técnico “RECON–BT 2024 – Padrões de Entrada em Média Tensão” da Light, foi adotada uma subestação abrigada convencional com entrada aérea em 13,8 kV. Esse arranjo segue a planilha dimensional de 4,00 m × 3,50 m de área interna livre, pé-direito mínimo de 2,30 m e soleira elevada 15 cm acima do passeio. O transformador trifásico a óleo, potência nominal de 750 kVA, conexão Dyn5, elevação térmica 55 °C e impedância de 5,5 % satisfaz a potência aparente de carga calculada (685,51 kVA) com folga de 9 %, em consonância com a ABNT NBR 5356-1 e o fator de reserva de 5 % indicado pela Light para sobrecargas ocasionais. A tensão primária de 13,8 kV corresponde ao sistema de distribuição local, enquanto a tensão secundária de 380/220 V mantém compatibilidade com os quadros de baixa tensão projetados.

No ponto de entrega instala-se um seccionador de manobra sob carga com chave de aterramento integrada e isolamento SF₆, precedido de pára-raios poliméricos classe 15 kV. O cubículo de medição e proteção contém transformadores de corrente 200/5 A, 15 VA, classe 0,3, e transformadores de potencial 15 kV, 15 VA, classe 0,3, conforme requisito “M-P06” do manual da concessionária. O barramento de baixa tensão em cobre eletrolítico suporta 1 900 A (quatro jogos de 100 mm × 10 mm) e recebe o disjuntor geral termomagnético de 800 A, curva C, com unidade microprocessada de proteção. A sala utiliza porta metálica com venezianas na metade superior, grelhas de exaustão a 30 cm do piso e venezianas de admissão a 15 cm do teto. A malha de aterramento, dimensionada pela ABNT NBR 15751, visa resistência não superior a 10 Ω e integra o sistema de proteção contra descargas atmosféricas da ABNT NBR 5419-1.

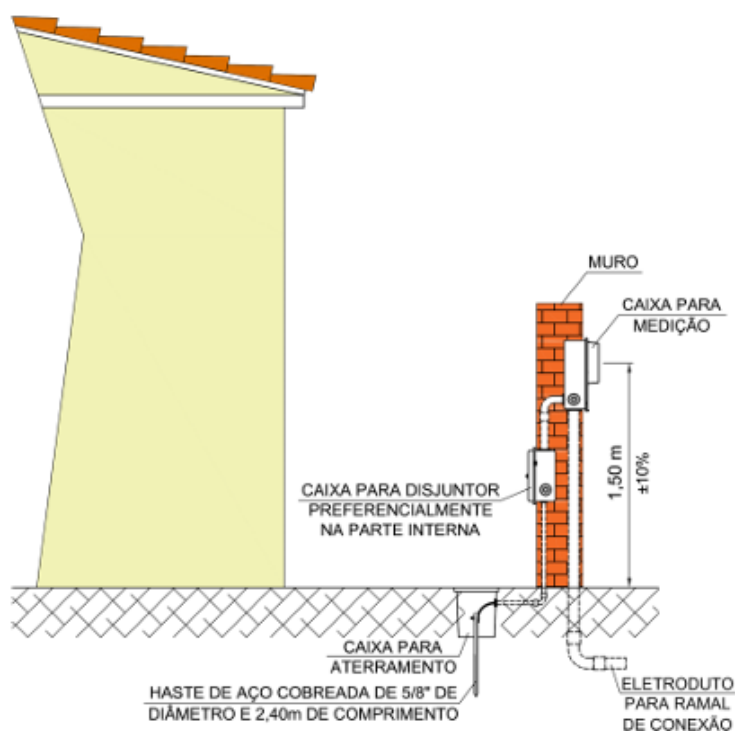
Vista Lateral

Figura 6 – Fonte: RECON-BT 2024, Light.

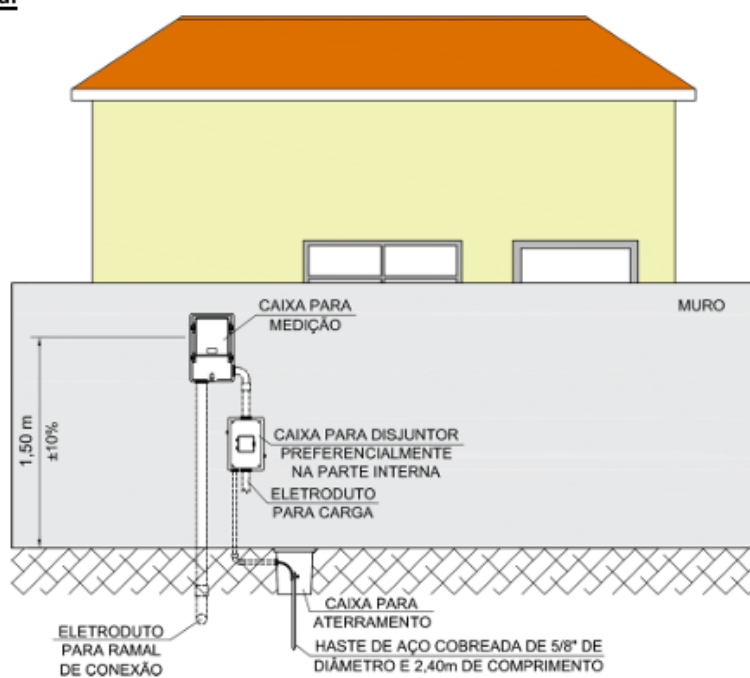
➡ Padrão com ramal de conexão subterrâneo**Vista Frontal**

Figura 7 – Fonte: RECON-BT 2024, Light.

Os requisitos de ventilação, iluminação de emergência, distância mínima de 1,20 m em frente aos cubículos, posição da calha de entrada dos cabos de média e baixa tensão,

bem como o esquema de sinalização e os bloqueios mecânicos, seguem integralmente as orientações do manual técnico da concessionária, garantindo conformidade com seus padrões e com as prescrições de segurança da NR-10.

11 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o desenvolvimento completo do projeto elétrico de uma indústria de papel localizada no Rio de Janeiro, contemplando todas as etapas necessárias desde o levantamento de cargas até a especificação final da subestação abrigada. Os objetivos propostos foram integralmente alcançados, resultando em um sistema elétrico dimensionado com rigor técnico e em conformidade com as normas brasileiras vigentes.

O levantamento de cargas identificou uma demanda total de 685,51 kVA, distribuída em três setores produtivos com características distintas. O Setor 1 concentrou as cargas motrizes de maior porte, totalizando 314,06 kVA; o Setor 2 apresentou demanda de 113,41 kVA com motores de médio porte; e o Setor 3 agrupou as cargas de iluminação e aquecimento, somando 258,04 kVA. Esta distribuição permitiu o dimensionamento otimizado dos circuitos alimentadores.

O transformador especificado de 750 kVA atende adequadamente à demanda calculada de 616,98 kVA (considerando fator de demanda de 0,9), proporcionando margem de 21,6% para expansões futuras. A escolha do modelo trifásico a óleo com conexão Dyn5 e impedância de 5,5% demonstrou-se apropriada para as características da instalação.

O dimensionamento dos condutores seguiu rigorosamente os três critérios da NBR 5410:2004 – ampacidade, queda de tensão e seção mínima. As seções adotadas variaram de 6 mm² a 300 mm², garantindo operação segura mesmo sob as severas condições térmicas locais (44°C). Os fatores de correção aplicados ($FCT = 0,87$ e $FCA = 0,80$) asseguraram margem adequada de segurança.

O projeto luminotécnico da Área A1 resultou na especificação de 35 luminárias de 4 lâmpadas cada, dispostas em malha regular, proporcionando iluminância média de 500 lux conforme exigido pela NBR ISO/CIE 8995-1:2013. O método dos lúmens mostrou-se eficaz para o dimensionamento, considerando coeficiente de utilização de 0,58 e fator de manutenção de 0,80.

A subestação abrigada foi especificada conforme padrão RECON-BT 2024 da Light, com dimensões de 4,00 m × 3,50 m, incluindo todos os componentes de média tensão necessários: seccionador sob carga, para-raios, transformadores de instrumentos e cubículo de proteção. O arranjo proposto atende integralmente aos requisitos técnicos e de segurança estabelecidos pela concessionária e pela NR-10.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5356-1:2012**: transformadores de distribuição – parte 1: requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410:2004**: instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5413:1992**: iluminância de interiores. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5418:1995**: instalações elétricas em atmosferas explosivas. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419-1:2015**: proteção contra descargas atmosféricas – parte 1: princípios gerais. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5444:2014**: símbolos gráficos para instalações elétricas. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14039:2021**: instalações elétricas em média tensão de 1 kV a 36,2 kV. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16274:2014**: eficiência energética de sistemas de iluminação – requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO/CIE 8995-1:2013**: iluminação de ambientes de trabalho – parte 1: interior. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR IEC 60898-1:2019**: disjuntores para proteção contra sobrecorrentes em instalações domésticas e análogas – parte 1: corrente alternada. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR IEC 60947-2:2017**: aparelhos de manobra e comando de baixa tensão – parte 2: disjuntores. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR IEC 60204-1:2019**: segurança de máquinas – equipamentos elétricos de máquinas – parte 1: requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2019.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR-10**: segurança em instalações e serviços em eletricidade. Brasília, 2019.

CREDER, Antônio Carlos Queiroz. **Instalações elétricas**. 17. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021.

LIGHT SERVIÇOS DE ELETRICIDADE S.A. **Manual de fornecimento de energia elétrica**: procedimentos e padrões técnicos. Rio de Janeiro, 2023.

LIGHT SERVIÇOS DE ELETRICIDADE S.A. **Procedimento de conexão de unidades consumidoras em média tensão**: versão 6. Rio de Janeiro, 2023.