



Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia elétrica

RAFAEL MARTINS LEITE

**PROJETO DE UM SISTEMA ELÉTRICO INDUSTRIAL DE
BAIXA TENSÃO UTILIZANDO O SOFTWARE DOC**

Uberlândia
2018

RAFAEL MARTINS LEITE

**PROJETO DE UM SISTEMA ELÉTRICO INDUSTRIAL DE
BAIXA TENSÃO UTILIZANDO O SOFTWARE DOC**

Trabalho apresentado como requisito parcial de avaliação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: Antônio Carlos Delaiba

Assinatura do Orientador

Uberlândia
2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais pelo carinho e estímulo incessantes. Aos meus amigos e colegas pelo apoio durante os estudos, presença nos momentos de confraternização e amparo nos de dificuldade. Por fim, saúdo o caro Professor Antônio Carlos Delaiba, pela motivação, compreensão e orientação durante este trabalho.

RESUMO

Este trabalho consiste no projeto e especificação de dispositivos do lado de baixa tensão da instalação elétrica de uma indústria fictícia, proposta pelo orientador. Para isto, serão usadas duas metodologias, a analítica e a computacional. No método analítico, serão utilizadas as técnicas tradicionais aprendidas durante a graduação e os componentes elétricos serão escolhidos com auxílio de catálogos. Já pelo método computacional, o software DOC distribuído pela ABB, fará a análise do sistema automaticamente, sendo necessário apenas montá-lo e configurá-lo no programa. Esta ferramenta computacional ainda permitirá a especificação e dimensionamento dos painéis de baixa tensão.

ABSTRACT

This paper consists on the project and specification of the devices on the low voltage side of the electrical installation of a fictitious industry, proposed by the advisor. For such, it will be used two methodologies, the analytical and the computational. On the analytical method, it will be used the traditional techniques learned during the graduation and the electrical components will be chosen with the assistance of catalogues. While on the computational method, the software DOC, distributed by ABB, will do the analyses of the system automatically, being necessary only draw and configure it on the software. This computational tool will also allow the specification and sizing of the low voltage panels.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Diagrama unifilar do sistema proposto	12
Figura 2.2 Dimensões do Trafo	14
Figura 2.3 Un no chaveamento	16
Figura 2.4 Dispositivos de manobra e proteção	16
Figura 2.5 Circuito de força da Chave estrela-triângulo	17
Figura 2.6 Circuito de comando da Chave estrela-triângulo	17
Figura 2.7 Gráfico de funcionamento de F1	23
Figura 2.8 Esquema de ligação do autotransformador.....	24
Figura 2.9 Circuito de força da Chave compensadora	25
Figura 2.10 Circuito de comando da Chave compensadora	25
Figure 2.11 Gráfico de funcionamento de F2	31
Figura 2.12 Perfil de tensão na partida com soft-starter.....	33
Figura 2.13 Gráfico de funcionamento de F3	35
Figura 2.14 Gráfico de funcionamento de F3	37
Figure 2.15 Tabela de Coordenação de Seletividade	43
Figura 2.16 Divisão de correntes pelo barramento.....	44
Figura 3.1 Área de trabalho do software DOC	50
Figura 3.2 Entrada dos dados gerais da rede	51
Figura 3.3 Diagrama unifilar de baixa tensão no DOC	52
Figura 3.4 Características do Transformador de potência	52
Figura 3.5 Características do MIT 1 no DOC	53
Figura 3.6 Características do Circuito de Iluminação	53
Figura 3.7 Corrente de curto-circuito fornecidas pelo DOC.....	54
Figura 3.4 Curvas do disjuntor D0 e fusível F1	56
Figura 3.5 Curvas dos disjuntores D0 e D4.....	57
Figura 3.6 Curvas dos disjuntores D0 e D4.....	58
Figura 3.7 Primeira parte do Assistente de configuração do painel	59
Figura 3.8 Segunda parte do Assistente de configuração do painel	60
Figura 3.8 Terceira parte do Assistente de configuração do painel.....	61
Figura 3.9 Vista frontal do painel de baixa tensão.....	62
Figura 3.10 Vista superior do painel de baixa tensão.....	62
Figura 3.11 Vista frontal do painel de baixa tensão com barramentos.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Cargas ligadas na B.T	11
Tabela 2.2 Características do Trafo	13
Tabela 2.3 Características MIT 1	15
Tabela 2.4 Características dos contadores M e Δ	19
Tabela 2.5 Tabela 2.4 Características do contator Y	20
Tabela 2.6 Características do relé de sobrecarga E1	20
Tabela 2.7 Características do Fusível F1	23
Tabela 2.8 Características MIT 2 e 4	24
Tabela 2.9 Características do Autotransformador AT1	26
Tabela 1.10 Características do contator C1	27
Tabela 2.11 Características do contator C2	28
Tabela 2.12 Características do Contator Y	29
Tabela 2.13 Características dos relés E2 e E3	30
Tabela 2.14 Características do Fusível F2	30
Tabela 2.15 Características do Disjuntor D1	31
Tabela 2.16 Características do MIT3	32
Tabela 2.17 Características da Soft-starter	33
Tabela 2.18 Características do Fusível F3	34
Tabela 2.19 Características do MIT 5	35
Tabela 2.20 Características do Conversor de Frequência	36
Tabela 2.21 Características do Fusível F4	37
Tabela 2.22 Características do Contator de proteção do Conversor de Frequência	38
Tabela 2.23 Características MIT 6 e 7	39
Tabela 2.24 Características do Disjuntor D1	39
Tabela 2.25 Características dos circuitos de Iluminação 1 e 2	40
Tabela 2.26 Características dos Disjuntores D4 e D5	40
Tabela 2.27 Características dos circuitos de Aquecimento 1, 2 e 3	41
Tabela 2.28 Características dos fusíveis F5, F6 e F7	41
Tabela 2.29 Características dos contator dos circuitos de aquecimento	42
Tabela 2.30 Características do Disjuntor D0	42
Tabela 2.31 Tabela de dimensionamento de barramentos de cobre	45
Tabela 2.32 Características do barramento de BT	48
Tabela 2.33 Características do banco de Capacitores	49
Tabela 3.1 Listagem dos dispositivos de proteção	55

ABREVIATURAS E SIGLAS

ABB – Asea Brown Boveri

ANEEL – Agência Nacional De Energia Elétrica

IP – Índice de Proteção

MIT – Motor de Indução Trifásico

NBR – Norma Brasileira

PRODIST – Procedimento de Distribuição

Sumário

1. INTRODUÇÃO	9
1.1. Motivação.....	9
1.2. Objetivo	9
1.3. Metodologia Analítica	9
1.4. Metodologia Computacional	10
2. MÉTODO ANALÍTICO.....	10
2.1. Dimensionamento do transformador de potência.....	12
2.2. Especificação dos acionamentos e proteção dos motores.....	14
2.2.1. Dimensionamento do acionamento e proteção – motor 1	15
2.2.2. Dimensionamento do acionamento e proteção – motores 2 e 4... 24	
2.2.3. Dimensionamento do acionamento e proteção – motor 3	32
2.2.4. Dimensionamento do acionamento e proteção – motor 5	35
2.2.5. Dimensionamento do acionamento e proteção – motores 6 e 7... 38	
2.3. Especificação da proteção dos circuitos de iluminação	40
2.4. Especificação da proteção dos circuitos de aquecimento	41
2.5. Especificação da proteção geral do lado bt e seletividade.....	42
2.6. Barramento de baixa tensão	44
2.7. Correção do fator de potência.....	48
3. MÉTODO COMPUTACIONAL	50
3.1. Desenho do diagrama unifilar	50
3.2. Cálculos e dimensionamentos	54
3.3. Seletividade pelo método computacional	55
3.4. Dimensionamento dos painéis	58
4. CONCLUSÕES	64
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

A partir da revolução industrial, a tecnologia e a sociedade como um todo tiveram avanços exponenciais. Hoje, e por muito tempo até um futuro muito distante, este setor econômico será de extrema importância para o mundo. E se a indústria é um dos pilares econômicos que sustentam a humanidade moderna, a energia que a sustenta também é fundamental. Este é um assunto muito abrangente que poderia ser abordado desde a geração da energia elétrica até o seu consumo eficiente, porém este trabalho tratará dos artifícios necessários para o projeto de um sistema industrial.

Seguindo este pensamento, deve-se atentar ao planejamento de uma instalação que garanta o fornecimento de eletricidade. É essencial que se garanta que as máquinas de uma indústria trabalhem protegidas de falhas e de forma harmoniosa, para assim garantir uma produção eficiente. Logo, é preciso contar com vários dispositivos de proteção, manobra, seccionamento, controle e medição. Estes devem ser escolhidos e parametrizados diante de uma análise criteriosa da instalação e das cargas. Também há a preocupação para com a sua disposição e o espaço físico que irão ocupar, sendo de extrema importância o projeto dos painéis que receberão estes equipamentos.

Levando em consideração todos estes fatos, o estudo do lado de baixa tensão de uma instalação elétrica é de suma importância. Se faz necessário uma abordagem criteriosa e confiável, baseando-se nos conhecimentos do projetista e na utilização de ferramentas que o auxiliem e simplifiquem este processo.

1.2. Objetivo

O objetivo deste trabalho é projetar o sistema de baixa tensão de uma indústria hipotética. Para este fim, serão utilizadas duas metodologias, das quais uma analítica e outra computacional.

1.3. Metodologia Analítica

Nesta seção do trabalho, serão especificados os equipamentos presentes no lado de baixa tensão do sistema, utilizando dos conhecimentos adquiridos durante a graduação de engenharia elétrica. Por meio de cálculos dos parâmetros da instalação e a consulta de catálogos das fabricantes dos dispositivos, estes serão escolhidos. Também será contemplado o dimensionamento dos barramentos a serem utilizados, a correção do fator de potência e a seletividade entre as proteções.

1.4. Metodologia Computacional

O software DOC é distribuído pela fabricante ABB e tem o objetivo de facilitar para os seus clientes o dimensionamento dos dispositivos de uma rede elétrica. Isso garante que a empresa estenda o seu alcance, uma vez que os usuários desta ferramenta estarão inclinados a utilizar outros de seus serviços e a adquirir seus produtos.

Este programa possibilita o desenho de diagramas unifilares, entregando os cálculos relacionados ao mesmo e os dispositivos a serem utilizados. Também permite o estudo da seletividade das proteções, essencial para o bom funcionamento da indústria. Por fim, ele ainda é capaz de fazer o projeto dos painéis que receberão estes equipamentos.

Este artifício será utilizado para os mesmos fins da metodologia analítica e os dois poderão se constatar ou gerar comparações.

2. MÉTODO ANALÍTICO

Uma vez definidas as cargas e circuitos a serem alimentados, desenhou-se o diagrama unifilar para que assim fosse possível definir e especificar os demais equipamentos de proteção e de partida dos motores. Nesta etapa, isso será feito de forma analítica, utilizando-se dos conhecimentos adquiridos durante a graduação. Em um momento futuro isso será refeito com o auxílio do software DOC.

O fornecimento de energia para esta indústria é feito em média tensão de 13800V, com uma frequência de 60Hz e nível de curto-circuito de 300MVA. Já o fornecimento na baixa tensão é feito com um valor de 380/220V.

Deve-se atentar ao fato de que 0,7 é o fator de simultaneidade dessa indústria, logo deve-se multiplicar a demanda total de carga do sistema por este valor. As cargas trifásicas a serem instaladas seguem discriminadas na tabela 2.1, com os respectivos fatores de potência, rendimentos e potências.

Tabela 2.1 Cargas ligadas na B.T

	Potência Mecânica (Hp)	Fator de potência	Rendimento	Potência ativa (W)	Potência reativa (kVAr)	Potência aparente (kVA)
Motor 1	60	0,86	0,941	47,57	28,22	55,31
Motor 2	150	0,86	0,952	117,54	69,75	136,68
Motor 3	20	0,81	0,924	16,15	11,69	19,93
Motor 4	150	0,86	0,952	117,54	69,75	136,68
Motor 5	20	0,81	0,924	16,15	11,69	19,93
Motor 6	20	0,81	0,924	16,15	11,69	19,93
Motor 7	20	0,81	0,924	16,15	11,69	19,93
Iluminação 1	-	0,92	-	79,00	33,65	85,87
Iluminação 2	-	0,92	-	79,00	33,65	85,87
Aquecimento 1	-	1	-	26,50	-	26,50
Aquecimento 2	-	1	-	26,50	-	26,50
Aquecimento 3	-	1	-	26,50	-	26,50

Utilizou-se a seleção de motores do fabricante WEG da linha W22 IR2, que fornece a potência dos mesmos em Hp (*horse power*), além do fator de potência e o rendimento. Com esses dados foi possível calcular as potências ativa, reativa e aparente de cada um.

Nos circuitos de iluminação, estipulou-se um fator de potência de 0,92 que seria um valor aproximado para luminárias LED.

O projeto foi feito com apenas um quadro de distribuição, uma vez que todas as cargas são protegidas apenas por um disjuntor (D2). A planta elétrica proposta é esboçada na Figura 2.1.

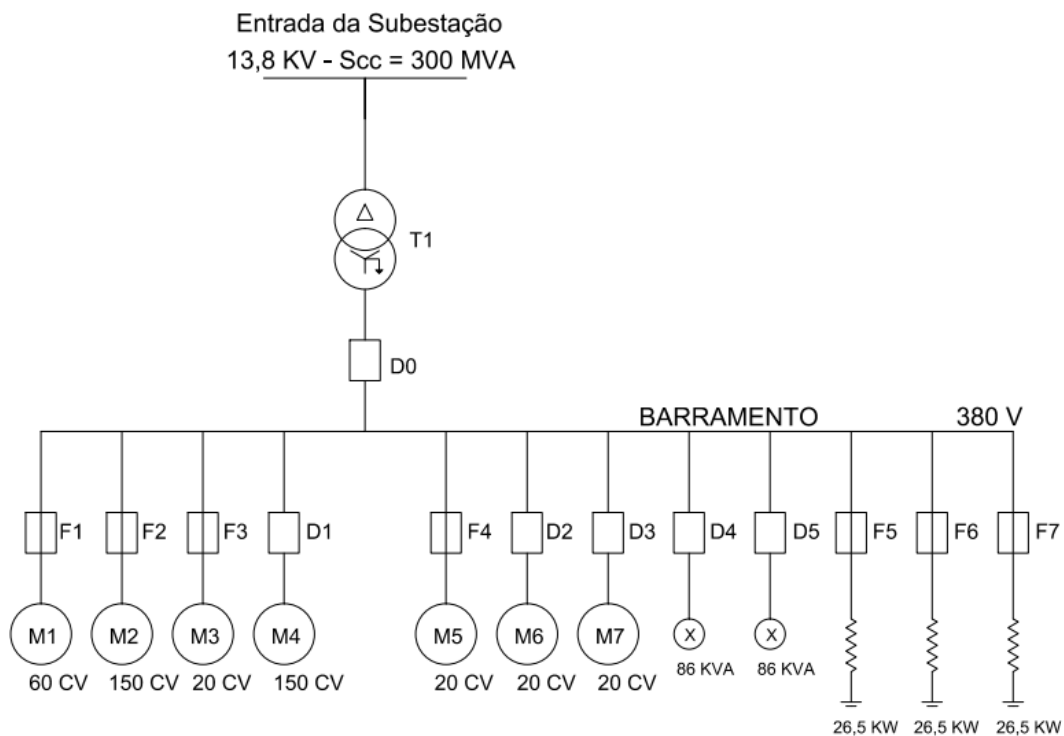


Figura 2.1 Diagrama unifilar do sistema proposto

2.1. Dimensionamento do transformador de potência

Com base no diagrama unifilar e nas potências de cada carga, é possível calcular a demanda total do sistema e assim definir qual é o transformador para a instalação. Desta forma, será necessário fazer a soma algébrica das potências ativas e reativas separadamente.

- $P_{total} = 581,37 \text{ kW}$
- $Q_{total} = 279,78 \text{ kVAr}$

Uma vez que se tem esses dois valores totais, se faz a soma vetorial do mesmo para obter-se a potência aparente total.

- $S_{total} = 645 \text{ kVA}$

Esta seria a potência aparente total da instalação e com ela seria possível calcular a corrente total exigida pelas cargas. Entretanto, devemos levar em conta o valor do fator de simultaneidade que foi dado na proposta do projeto. Este número representa o quanto de carga será consumida ao mesmo tempo, ou seja, simultaneamente. Logo, é necessário multiplicar a potência total por 0,7, valor fornecido na proposta do projeto. É importante salientar que este valor representa a instalação como um todo e não foi trabalhado com os fatores de demanda e de utilização individuais das cargas.

- $S_{total} \times 0,7 = 451,6 \text{ kVA}$

O valor de potência comercial do transformador que melhor atenderá a demanda em questão será 500kVA. Este valor ainda possibilita o aumento de potência consumida em até 45,7kVA, aproximadamente 10% da demanda até então utilizada. Este aumento pode ser feito adicionando-se carga ou aumentando o fator de simultaneidade estipulado. O transformador escolhido é fabricado pela empresa WEG e é refrigerado a óleo, o método mais comum para esta faixa de potência. As características do mesmo seguem na tabela 2.2.

Tabela 2.2 Características do Trafo

Transformador T1	
Potência	500 kVA
Norma de Fabricação	NBR 5356/93
Refrigeração	ONAN - Óleo Natural, Ar Natural - Imerso em óleo isolante mineral
Classe de Tensão	15 kV
Tensão Primária	13.8/13.2/12.6/12/11.4/10.8/10.2 kV
Tensão Secundária	380/220 V
Primário	Triângulo (delta)
Secundário	Estrela com neutro acessível
Deslocamento Angular	30°
Frequência nominal	60 Hz
Elevação de Temperatura	55° C no ponto médio dos enrolamentos 50° C no topo do óleo
NBI - Primário	-
Perdas em vazio	Sob Consulta
Perdas totais	Sob Consulta
Corrente de excitação	1.2 %
Impedância a 75° C	4.5 %
Comprimento (C)	1955 mm
Largura (L)	1240 mm
Altura (A)	1380 mm
Peso	1260 kg

Valores garantidos potência nominal no tap de maior tensão

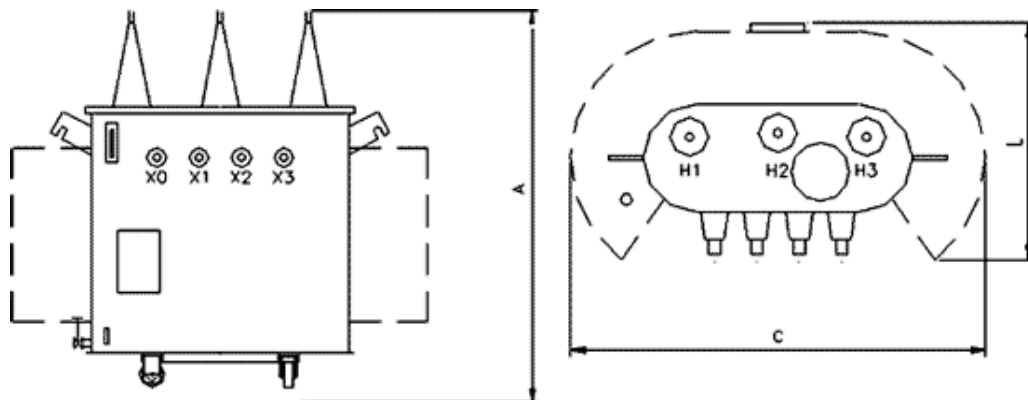


Figura 2.2 Dimensões do Trafo

2.2. Especificação dos acionamentos e proteção dos motores

Ao todo serão ligados 7 motores nesta indústria, com potencias mecânicas de 20cv, 60cv e 150cv. Estas máquinas de indução trifásica, exigem uma proteção contra curto-circuito e sobrecarga, por isto utilizou-se de fusíveis e disjuntores magnéticos para o primeiro fenômeno e disjuntores e relés térmicos para o segundo.

Além destes equipamentos, se faz necessário uma atenção para com a partida destas cargas, que geram picos de corrente muito altos e que podem comprometer o funcionamento da instalação devido a quedas de tensão no barramento da mesma. Para esta finalidade, utilizou-se de métodos de partida diversos como, a chave estrela-triângulo, chave compensadora, soft-start e conversor de frequência. Cada um destes artifícios usa formas diferentes para controlar a corrente de partida, com características específicas e com equipamentos distintos para sua aplicação que serão abordados à medida que forem sendo especificados neste trabalho.

2.2.1. Dimensionamento do acionamento e proteção – motor 1

Este primeiro motor tem uma potência mecânica de 60 cv e tensão nominal de 380/660 V. Suas demais características são apresentadas na tabela 2.3.

Tabela 2.3 Características MIT 1

MIT 1	
Tensão	380 V
Potência	45kW/60hp
Corrente nominal	84,5A
I_p/I_n	7,2
Rendimento	94,10%
Corrente de partida	608,4 A
Polos	4
Fator de potência	86%
Partida	A vazio

Uma vez que está máquina pode operar com uma tensão de 380 ou 660 volts, ele obrigatoriamente deve ser ligado em delta para funcionar no regime permanente. Sabe-se então que é necessário aplicar uma tensão de 380 V em cada bobina de seu estator para o funcionamento correto, e este é exatamente o valor da tensão de linha do lado BT do sistema.

Desta forma, utilizou-se da chave estrela-triângulo para o acionamento. Quando se faz a partida nesse motor, as bobinas do estator estarão ligadas em estrela, porém a tensão nas mesmas será $\sqrt{3}$ vezes menor que a nominal devido a tensão da rede. Sendo assim, a corrente de partida diminuirá na mesma ordem que a tensão nas bobinas. Quando se alcançar uma velocidade do rotor próxima a nominal, acontece o chaveamento para a ligação delta e o motor passa a funcionar em regime permanente.

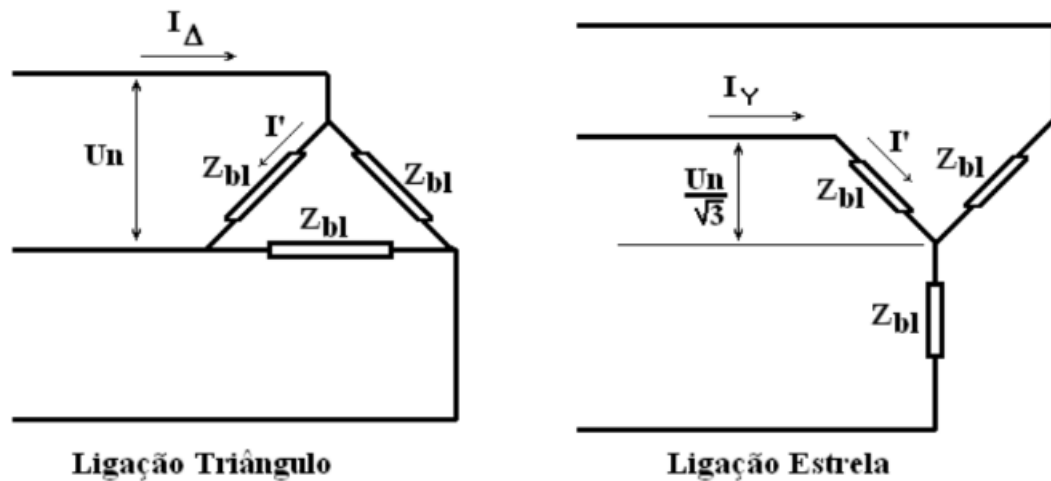


Figura 2.3 U_n no chaveamento

Para a montagem desse acionamento serão utilizados 3 tipos de equipamentos diferentes sendo eles, um fusível para a proteção contra curto-circuito, contadores para o chaveamento entre as ligações e um relé térmico para a proteção contra sobre carga do motor. O esboço do circuito e dos equipamentos utilizados é mostrado na imagem 2.4.



Figura 2.4 Dispositivos de manobra e proteção

A ligação do circuito de força do acionamento junto com o relé térmico é mostrada na Figura 2.5.

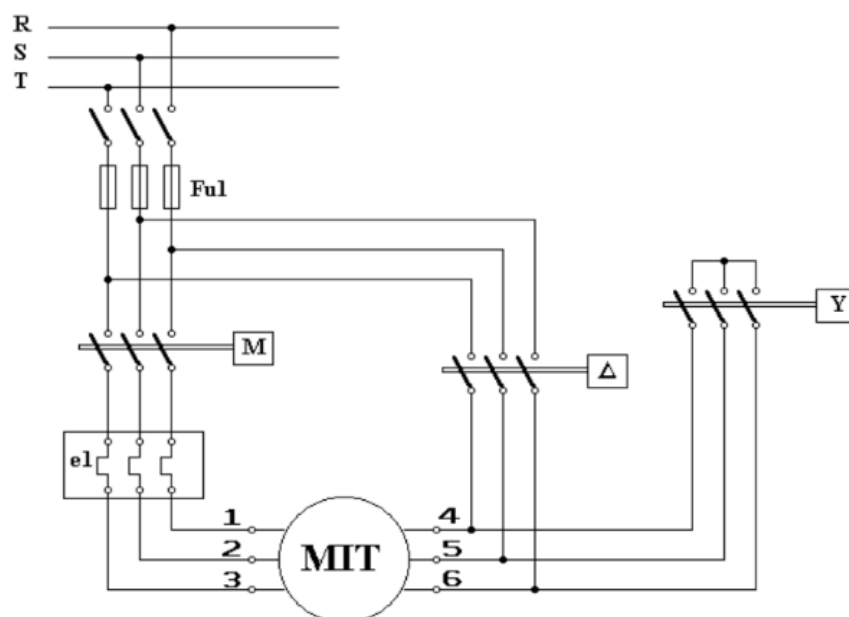


Figura 2.5 Circuito de força da Chave estrela-triângulo

Já o circuito de comando do acionamento em questão é apresentado na Figura 2.6.

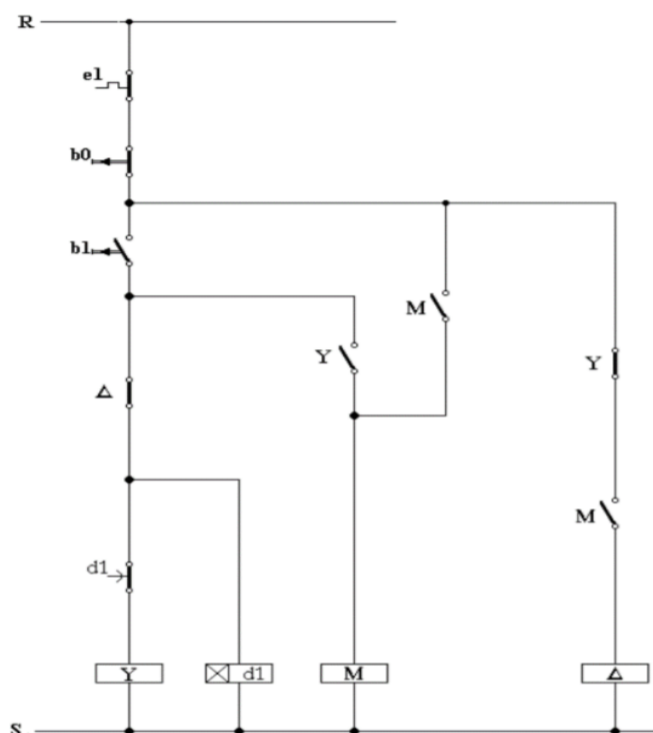


Figura 2.6 Circuito de comando da Chave estrela-triângulo

Com os esquemas de ligação apresentados, o próximo passo é a especificação dos componentes de proteção e manobra do circuito.

- **Contatores M e Δ**

A corrente de regime permanente nesses contatores será:

$$I_{regime} = \frac{I_{nominal}}{\sqrt{3}} = \frac{84,5}{\sqrt{3}} = 48,8 \text{ A}$$

A corrente máxima que estes contatores precisarão interromper é obtido por:

$$I_{ruptura} = \frac{I_{partida}}{\sqrt{3}} = \frac{608,4}{\sqrt{3}} = 351,3 \text{ A}$$

Já a máxima corrente em que será exercida nos contatores durante as conexões das ligações estrela e delta são, respectivamente:

$$I_{conex\tilde{a}o \text{ Y}} = \frac{I_{partida}}{3} = \frac{608,4}{3} = 202,8 \text{ A}$$

$$I_{conex\tilde{a}o \text{ } \Delta} = \frac{I_{partida}}{\sqrt{3}} = \frac{608,4}{\sqrt{3}} = 351,3 \text{ A}$$

Para especificar o contator corretamente, o seu valor de corrente de emprego deve respeitar as inequações a seguir, de acordo com o catálogo utilizado.

$$I_e \geq I_{regime} = 48,8 \text{ A}$$

$$I_e \geq \frac{I_{ruptura}}{8} = 43,9 \text{ A}$$

$$I_e \geq \frac{I_{conex\tilde{a}o}}{10} = 35,1 \text{ A}$$

Chega-se a conclusão de que estes contatores devem ter uma corrente nominal maior que 48,8 A. Assim sendo, o equipamento escolhido é o AX50 da fabricante ABB. As características do mesmo seguem na tabela 2.4.

Tabela 2.4 Características dos contatores M e Δ

Contator Tripolar ABB -AX50	
Tensão de comando	CA
Categoria	AC-3
Tensão nominal	400 V
Corrente nominal	50 A

- **Contator Y**

A especificação deste contator é exatamente a mesma dos outros dois, mas devido a sua função, podemos desconsiderar as correntes de regime permanente e de conexão.

Este dispositivo é responsável por curto circuitar o final das bobinas do motor, garantindo assim a conexão estrela. Logo, só haverá corrente no mesmo caso ocorra algum desequilíbrio de tensão entre as fases. Esta possível corrente teria um valor muito inferior à dos outros critérios, então ela pode ser desconsiderada.

Também é importante lembrar que este contator é o primeiro a ser acionado, antes mesmo de ser energizado. Desta forma, a sua corrente de conexão é nula.

O único critério que precisa ser respeitado é a corrente máxima que o dispositivo precisara interromper. No caso, será a corrente de partida quando o motor estiver em Y.

$$I_{ruptura} = \frac{I_{partida}}{3} = \frac{608,4}{3} = 202,8 \text{ A}$$

Verificando a mesma condição que foi utilizada para os contatores M e Δ para determinar a corrente nominal, temos:

$$I_e \geq \frac{I_{ruptura}}{8} = 25,35 \text{ A}$$

De acordo com a inequação, o contator escolhido deve ter uma corrente nominal maior que 25,35 A. O dispositivo escolhido foi o AX 32 da ABB. Suas características são apresentadas na tabela 2.5.

Tabela 2.5 Tabela 2.4 Características do contator Y

Contator tripolar ABB –AX32	
Tensão de comando	CA
Categoria	AC-3
Tensão nominal	400 V
Corrente nominal	32 A

- **Relé de sobrecarga E1**

Para determinar o relé térmico de sobrecarga seria necessário apenas conhecer a corrente nominal do motor e escolher um dispositivo que trabalhe com uma faixa de corrente que contemple esse valor. Porém, observa-se que o relé se ligado dentro da conexão do delta, ou seja, entre as bobinas do motor. Desta maneira a corrente que passará por ele é a de fase, logo:

$$I_{ajuste} = \frac{I_{nominal}}{\sqrt{3}} = 48,8 \text{ A}$$

A corrente ajustada no relé deverá ser maior que 48,8 A. Sendo assim, o dispositivo utilizado foi o TF 65-53 da AAB. Suas informações seguem na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 Características do relé de sobrecarga E1

Relé de sobrecarga E1 ABB TF 65-53	
Ajuste Mínimo	44 A
Ajuste Máximo	53 A
Tipo	Térmico

- **Fusível F1**

Para determinar o fusível que irá proteger os equipamentos contra um possível curto-circuito deve-se conhecer 3 parâmetros do circuito:

- Corrente nominal;
- Corrente de pico na partida do motor;
- Corrente simétrica de curto circuito.

As duas primeiras grandezas já foram obtidas, seja pelo catálogo do motor ou por cálculos. Porém, se faz necessário a obtenção do nível de curto-circuito no lado BT da instalação, que também será útil para o dimensionamento de outros dispositivos de proteção.

Para isso, precisa-se das impedâncias do sistema no lado de baixa tensão, são elas:

- Impedância do transformador de potência;
- Impedância na entrada da instalação.

A primeira já é fornecida no catálogo do transformador e neste caso tem um valor de 4,5%, ou 0,045 pu.

Já o cálculo da impedância de entrada é obtido pela equação a seguir, onde divide-se a potência nominal do transformador pelo nível de curto da rede.

$$Z_{e[pu]} = \frac{S_T}{S_{cc}}$$

Onde,

- $Z_{e[pu]}$ = Impedância de entrada;
- S_T = Potência nominal do transformador [VA];
- S_{cc} = Nível de curto circuito da rede [VA];

Substituído os valores, teremos o seguinte resultado:

$$Z_{e[pu]} = \frac{500 \text{ kVA}}{300 \text{ MVA}} = 0,001666$$

Para se obter a corrente de curto-circuito no secundário do transformador é preciso dividir a sua corrente nominal referida a esse lado e dividi-la pela impedância equivalente do sistema em pu, que é a soma de $Z_{e[pu]}$ e $Z_{T[pu]}$ (Impedância nominal do Trafo). Logo, tem-se:

$$I_{nst} = \frac{500 * 10^3}{\sqrt{3} * 380} = 760 \text{ A}$$

$$I_{k''} = \frac{760}{0,04666} = 16.285,9 \text{ A}$$

Onde,

- I_{nst} = Corrente nominal no secundário do Trafo;
- $I_{k''}$ = Corrente de curto-circuito simétrico do lado de baixa tensão.

Arredondando o valor obtido, considera-se que esse sistema tenha uma corrente de curto circuito equivalente a 16,3 kA. Nesse momento, todos os valores necessários para especificação do fusível são conhecidos.

- Corrente nominal: 84,5 A;
- Corrente de pico na partida do motor: 351,26 A;
- Corrente simétrica de curto circuito: 16,3 kA.

Para escolher o melhor fusível deve-se observar em quanto tempo este terá seu elo rompido quando sobre a influência da corrente de partida e a de curto-circuito. No primeiro caso, o equipamento não pode abrir durante o processo de partida da carga, portanto o tempo de fusão deve ser maior que o tempo de partida. Já para o segundo, é essencial que o fusível atue antes que a proteção a montante, no caso um disjuntor eletromagnético de caixa moldada. É preciso atentar-se a esse detalhe pois é ele que garante a seletividade das proteções. Esse estudo é importante pois caso o curto aconteça nesse motor em específico, somente ele será desligado e o resto dos equipamentos continuaram a funcionar normalmente.

Também é importante lembrar que os catálogos do relé térmico e dos contadores determina o valor do fusível máximo que se pode utilizar com o mesmo. Entretanto, esse valor é pensado para uma corrente de curto-circuito de 100 KA, valor muito acima do que foi calculado. Dessa maneira, não é necessário se preocupar com essa característica.

O fusível utilizado foi o OFAF0-100 aM de 500 V da ABB, pois o mesmo é específico para motores uma vez que é construído para que opere apenas em curto-circuitos. Suas características seguem na tabela 2.7.

Tabela 2.2.7 Características do Fusível F1

Fusível F1 OFAF0AM100	
Classe	aM
Corrente	100 A
Tamanho	0

O gráfico $I \times t$ a seguir, se encontra no catálogo do dispositivo e mostra o tempo em que o elo fusível irá se fundir para determinado valor de corrente. Além disso, foram adicionados marcadores que representam a corrente de partida e de curto-circuito.

aM 500V, 00

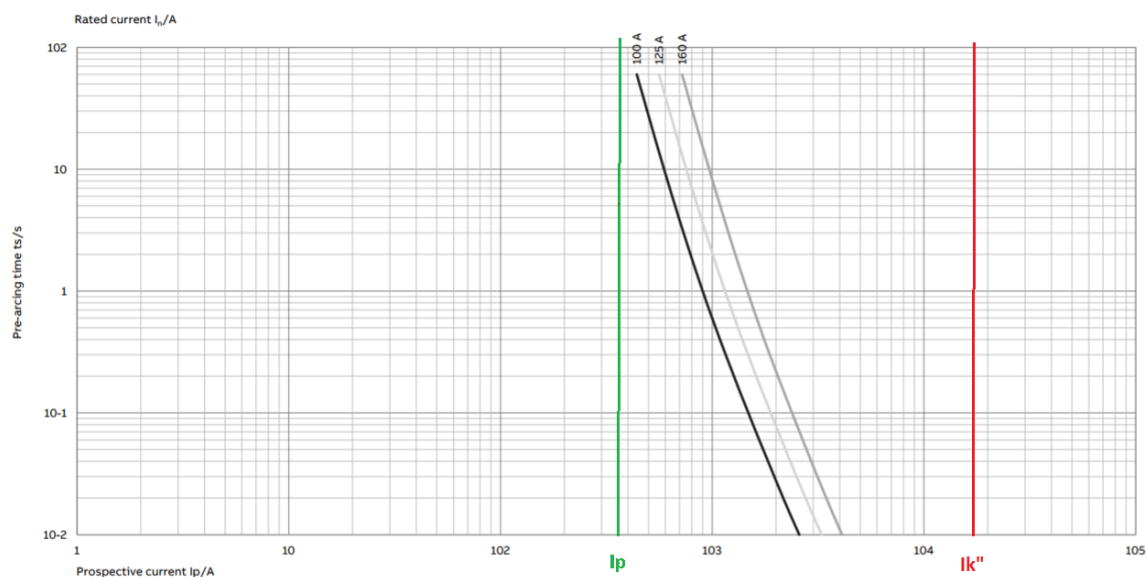


Figura 2.7 Gráfico de funcionamento de F1

Observa-se que para a corrente de partida, o fusível não será acionado pois ele nem mesmo toca a curva do mesmo. Desta forma é garantido que a partida não será interrompida. O mesmo acontece com a corrente de curto-circuito, mas por sua vez ela se encontra do outro lado da curva, o que implica que o dispositivo abrirá muito rapidamente, antes mesmos das proteções a montante garantindo assim a seletividade. Desta forma, se garante que o fusível só atuará em caso de curto-circuito, deixando o caso de sobrecarga apenas para o relé térmico.

2.2.2. Dimensionamento do acionamento e proteção – motores 2 e 4

Estes dois motores são idênticos e tem uma potência mecânica de 150 cv e tensão nominal de 220/380 V. Eles tem a mesma proteção contra sobre carga feita por um relé térmico e o mesmo acionamento feito por chave compensadora. Só se diferenciam em sua proteção contra curto circuito, sendo o motor 2 protegido por um fusível e o motor 4 por um disjunto eletromagnético. Suas demais características são apresentadas na tabela 2.8.

Tabela 2.2.8 Características MIT 2 e 4

MIT 2 e 4	
Tensão	380 V
Potência	111,9kW/150hp
Corrente nominal	204 A
I_p/I_n	7,3
Rendimento	95,20%
Corrente de partida	1490 A
Polos	4
Fator de potência	86%
Partida	A vazio

O acionamento para estas máquinas será a chave compensadora. Ele consiste na ligação de um autotransformador nos terminais de entrada do estator que será responsável por limitar a tensão no mesmo. A partida será feita então com uma tensão reduzida, diminuindo também a corrente de partida. Quando a velocidade do rotor tiver alcançando um valor próximo a nominal, há um chaveamento e a desconexão do autotransformador aplicando-se assim a tensão nominal no motor. Na figura 2.8 é mostrado o esquema de ligação.

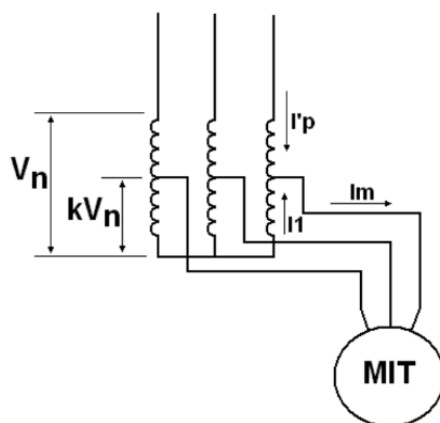


Figura 2.8 Esquema de ligação do autotransformador

Esta montagem utilizará dos mesmos dispositivos que a anterior com a adição de um autotransformador. Há também a diferença de que a proteção contra curto-circuito do Motor 4 será feita com um disjuntor.

O esquema do circuito de potência em questão é mostrado na figura 2.9.

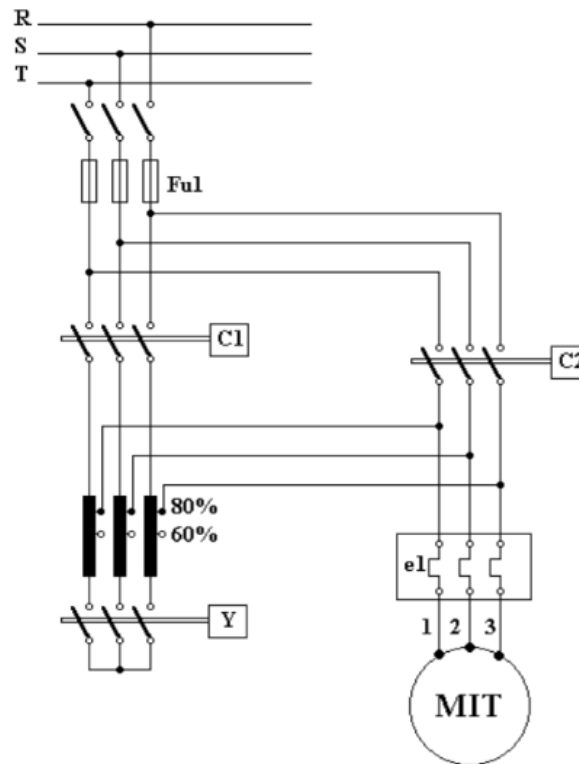


Figura 2.9 Circuito de força da Chave compensador

Já o circuito de comando do acionamento em questão é apresentado na Figura 2.10.

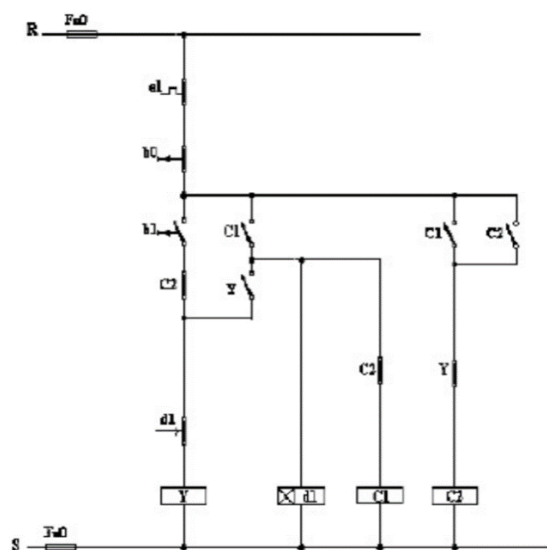


Figura 2.10 Circuito de comando da Chave compensadora

Uma vez que os esquemas foram apresentados, pode-se especificar os equipamentos necessários para a montagem

- Autotransformador

Este dispositivo é específico para esta aplicação, logo ele é escolhido pela potência nominal do motor. Assim sendo, foi escolhido o autotransformador da fabricante WISE, com grau de proteção IP00 e próprio para acionar motores de 150cv. Na tabela 2.9 são apresentadas as suas características.

Tabela 2.9 Características do Autotransformador AT1

Autotransformador AT1 WISE 150cv	
Potência de acionamento	150cv
Tensão nominal	380 V
Tensão Secundária	380/220 V
Frequência nominal	60 Hz
Classe de Temperatura	F (155°C) elevação Max nos enrolamentos 105°C
TAP	65 ou 80%
Comprimento (C)	227 mm
Largura (L)	312 mm
Altura (A)	340 mm
Peso	65,7 kg

O TAP escolhido foi o de 80% e é este valor que definirá a diminuição do conjugado e corrente de partida. Essa redução é mostrada nas equações a seguir:

$$M_p' = k^2 * M_p \quad I_p' = k^2 * I_p$$

$$M_p' = 0,8^2 * M_p \quad I_p' = 0,8^2 * I_p$$

Onde,

- M_p e I_p são o conjugado e a corrente nominal de partida do motor;
- M_p' e I_p' são o conjugado e a corrente de partida no acionamento.

Observa-se que tanto o conjugado quanto a corrente de partida serão multiplicados por uma constante de 0,64. O valor de I_p' então será de 953 A, e será utilizado para o dimensionamento dos contadores.

- **Contador C1**

Este contador é o responsável por desligar o autotransformador do resto do circuito, logo não passará corrente no mesmo durante o regime permanente de operação. Desta maneira podemos desconsiderar este parâmetro no dimensionamento.

O valor de corrente máximo que C1 deverá interromper é o mesmo que precisa ser conectado e são dados por:

$$I_{ruptura} = I_{conexão} = k^2 * I_{partida} = 953 \text{ A}$$

Para a correta escolha do equipamento é necessário respeitar as seguintes inequações, assim como foi feito nos contadores do acionamento anterior.

$$I_e \geq \frac{I_{ruptura}}{8} = 119,125 \text{ A}$$

$$I_e \geq \frac{I_{conexão}}{10} = 95,3 \text{ A}$$

O contador escolhido precisa de uma corrente nominal maior que 119,125 A. Para este caso o CMW 150 22-30 da fabricante WEG foi a melhor opção e suas características seguem especificadas na tabela 2.10.

Tabela 1.10 Características do contador C1

Contador Tripolar WEG -CWM 150 22-30	
Tensão de comando	CA
Categoria	AC-3
Tensão nominal	440 V
Corrente nominal	150 A

- **Contator C2**

No caso deste dispositivo, a conexão será feita antes do autotransformado estar isolado do motor, ou seja, a corrente ainda estará fluindo por ele e não pelo contator C2. Sendo assim, podemos desconsiderar a corrente de conexão.

Por outro lado, a corrente de regime permanente será a própria corrente nominal do motor.

$$I_{conex\tilde{a}o} = I_{nominal} = 204 \text{ A}$$

A máxima corrente de interrupção será a corrente de partida do motor, a mesma dada em sua placa. Este contator só irá abrir o circuito em caso de sobrecarga ou para desliga-lo e como é ele que estará ligando a máquina a rede, ele deve suportar esse grande valor de corrente.

$$I_{ruptura} = I_{partida} = 1489,2 \text{ A}$$

A corrente nominal do equipamento deve respeitar as mesmas condições dos demais, logo:

$$I_e \geq I_{regime} = 204 \text{ A}$$

$$I_e \geq \frac{I_{ruptura}}{8} = 186,2 \text{ A}$$

Levando essas desigualdades em consideração, o contator será o CMW 250 22-30 da WEG, que tem seus dados descritos na tabela 2.11.

Tabela 2.11 Características do contator C2

Contator Tripolar WEG -CWM 150 22-30	
Tensão de comando	CA
Categoria	AC-3
Tensão nominal	440 V
Corrente nominal	250 A

- **Contator Y**

Este contator terá apenas um valor de corrente de ruptura, pois ele apenas tem a função de fechar as bobinas do autotransformador em Y. Assim sendo, este é ligado antes da energização do circuito e não estará ligado durante o funcionamento da máquina.

Sua corrente de ruptura é dada por:

$$I_{ruptura} = (k - k^2) * I_{partida} = 238,3 A$$

Seguindo o mesmo passo para a escolha dos contadores:

$$I_e \geq \frac{I_{ruptura}}{8} = 29,8 A$$

O contator nesse caso é o CMW 32 22-30 da WEG, com seus dados descritos na tabela 2.12.

Tabela 2.12 Características do Contator Y

Contator Tripolar WEG -CWM 150 22-30	
Tensão de comando	CA
Categoria	AC-3
Tensão nominal	440 V
Corrente nominal	32 A

Escolheu-se os contadores da WEG, pois o estudo do acionamento com chave compensadora foi feito utilizando um catálogo deste fabricante. Neste material, já está indicado todos os equipamentos necessários para a aplicação deste método de partida. Comparando-os com os fornecidos pela ABB, nota-se que não há muita diferença em seus atributos nominais e isso garante que se pode escolher ambas as marcas.

- **Relé Eletrônico E2 e E3**

Para a proteção contra sobrecarga, escolheu-se o relé eletrônico da ABB para ambos os motores. O dispositivo em questão é o EF 205-210 (E2 e E3) com uma faixa de ajuste de corrente de 63 a 210 A, valores que atendem a corrente nominal do motor que é de 204 A. Na Tabela 2.13 seguem as suas informações.

Tabela 2.13 Características dos relés E2 e E3

Relé eletrônico ABB EF 205-210	
Ajuste Mínimo	63 A
Ajuste Máximo	210 A
Tipo	Eletrônico

- **Fusível F2**

A proteção contra curto-circuito do motor 2 será feita com um fusível. Foi escolhido o OFAF1-315 aM de 500 V da ABB, específico para a proteção contra curto-circuito em motores. Segue suas informações na Tabela 2.14 e a sua curva na Figura 2.11.

Tabela 2.14 Características do Fusível F2

Fusível F2 OFAF1AM-315	
Classe	aM
Corrente	315 A
Tamanho	1

aM 500V, 1

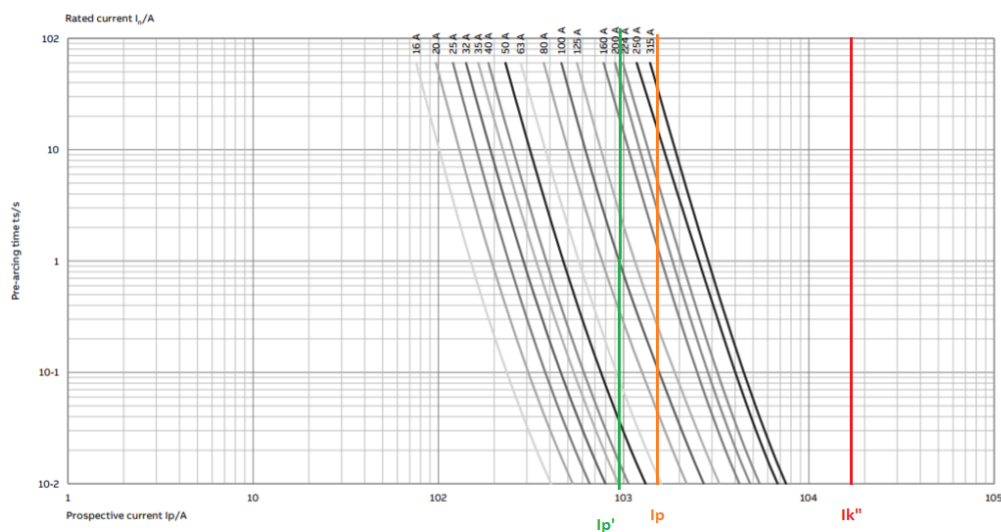


Figure 2.11 Gráfico de funcionamento de F2

- **Disjuntor Magnético D1**

Já a proteção contra curto-circuito do motor 4 será feita com um disjuntor eletromagnético. Para escolhê-lo é preciso saber a corrente nominal e a corrente de curto-circuito simétrico, ambos valores são conhecidos e tem os valores respectivos de 204 A e 16,3 kA. O disjuntor escolhido foi da fabricante WEG, modelo ACW 250H-MTU220-3, com corrente nominal de 220 A e proteção somente magnética. Suas informações seguem na Tabela 2.15.

Tabela 2.15 Características do Disjuntor D1

Disjuntor de Caixa Moldada D1 WEG ACW250H-MTU220-3	
Tipo	Caixa Moldada
Corrente nominal interrompida	220 A
Tensão Máxima	690 V
Frequência nominal	60 Hz
Polos	3
Tipo do relé	Somente Magnético
Capacidade máxima de interrupção sob curto-circuito	85 kA
Faixa de ajuste	6 a 12 x In

Assim como os contatores, foi escolhido um disjuntor da fabricante WEG pela facilidade de seu dimensionamento, uma vez que o mesmo já está indicado no catálogo utilizado.

2.2.3. Dimensionamento do acionamento e proteção – motor 3

O motor 3 tem uma potência de 20cv e uma tensão nominal de 380/660 V, desta maneira ele é ligado em delta. Ele irá partir com uma carga de 70% e esta será feita com o auxílio de uma *soft-starter*. As informações de placa da máquina seguem na tabela 2.16.

Tabela 2.16 Características do MIT3

MIT 3	
Tensão	380 V
Potência	15kW/20hp
Corrente nominal	30,5 A
I_p/I_n	7,1
Rendimento	92,40%
Corrente de partida	216,55 A
Polos	4
Fator de potência	81%
Partida	70% de carga

- **Soft-starter**

Este dispositivo eletrônico é composto por pontes de tiristores (SCR's), acionadas por um circuito eletrônico. Tem a finalidade de limitar a tensão aplicada no motor e aumenta-la gradualmente até que a mesma atinja o valor nominal e a máquina o seu regime permanente de funcionamento. Este artifício é comumente conhecido como rampa de partida, pois graficamente este aumento gradual de tensão se assemelha a uma rampa, como mostrado na figura 2.12.

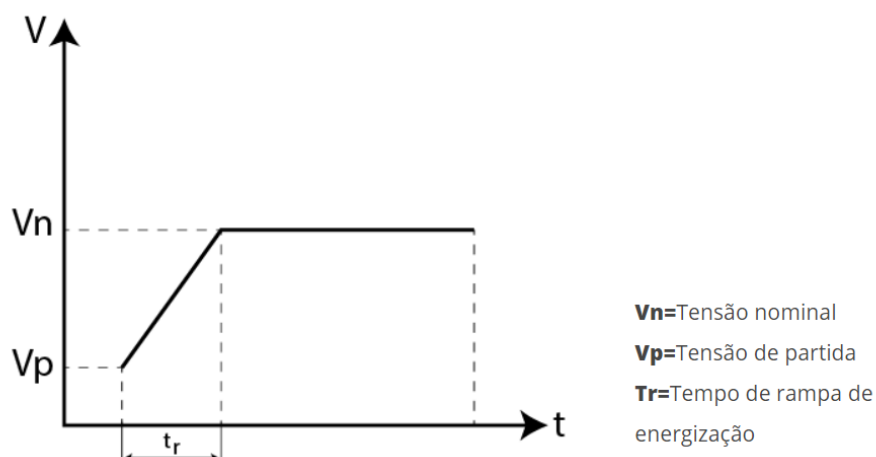


Figura 2.12 Perfil de tensão na partida com *soft-starter*

É importante lembrar que a corrente de partida também sofrerá uma diminuição. Esta é definida por uma constante k , definida na parametrização do aparelho. Este coeficiente multiplica a corrente I_p obtendo-se a I_p' e o seu quadrado multiplicado pelo M_p (conjugado de partida) resulta no M_p' .

$$M_p' = k^2 * M_p \quad I_p' = k * I_p$$

No caso estudado o k foi definido com um valor de 0,7, desta maneira a corrente de partida para este acionamento será de 151,6 A.

Para escolher o *soft-starter* correto, deve-se levar em consideração a corrente e a tensão nominal do motor, que são respectivamente 30,5 A e 380 V. Logo, o aparelho escolhido foi o PSE 37-600-70 da ABB. Suas informações seguem na tabela 2.17.

Tabela 2.17 Características da *Soft-starter*

Soft-starter ABB PSE 37-600-70	
Tensão nominal	400 V
Corrente nominal	37 A
Motor Máximo	25cv / 18,5kW

- **Fusível ultrarrápido F3**

A proteção para esta partida também se mostra essencial. A *soft-starter* eletrônica já tem uma proteção intrínseca contra sobrecargas, mas a proteção contra curtos-circuitos deve ser dimensionada. Para este caso, será utilizado o fusível ultrarrápido (aR), que deve atuar apenas para correntes de valores muito elevados, mas com tempos reduzidos para assim fazer a devida proteção do componente eletrônico.

Segundo o catalogo de fusíveis da WEG, para os dispositivos de ação ultrarrápidos e tamanho 1, deve-se considerar a corrente de sobrecarga multiplicada por 2,5 e o mesmo tempo de abertura. Logo, se considerarmos a corrente de partida igual a 152,6 A e estimar um tempo de partida igual a 10 segundos, o fusível escolhido deve abrir em um tempo superior ao de partida para uma corrente de aproximadamente 380 A. Deve-se tomar este cuidado, pois os fusíveis ultrarrápidos tem baixos valores de I^2t , por isto não devem ser sensíveis a situações de pequenas sobrecargas. Caso fossem dimensionados de forma tradicional, estes estariam sujeitos a diminuição de sua vida útil, atuações indevidas e redução de sua capacidade de interrupção.

De acordo com a análise do gráfico e a tabela do catálogo, o fusível a ser utilizado é o FNH1-160-KA. Suas características seguem na Tabela 2.18 e o gráfico na Figura 2.13.

Tabela 2.18 Características do Fusível F3

Fusível ultrarrápido WEG F3 FNH1-160	
Classe	aR
Corrente	160 A
Tamanho	1

Fusíveis FHN1 aR

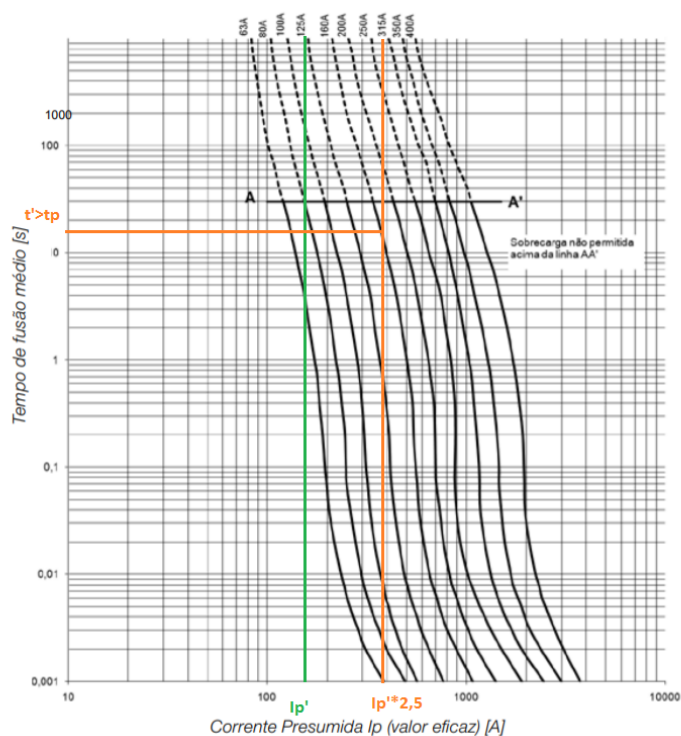


Figura 2.13 Gráfico de funcionamento de F3

Observando o gráfico, é possível concluir-se que para a corrente de 380 A, o tempo de fusão do elo fusível é superior a 10 segundos. Também é visto que para a corrente de curto-circuito simétrica de 16,3 Ka, que nem aparece na imagem, a fusão ocorrerá quase que instantaneamente. Logo, garantiu-se que o fusível está imune a possíveis sobrecargas e que atuará rapidamente no curto-circuito.

2.2.4. Dimensionamento do acionamento e proteção – motor 5

O MIT 5 tem as mesmas características de fábrica e de funcionamento que o MIT 3. A Tabela 2.19 contém as suas informações.

Tabela 2.19 Características do MIT 5

MIT 5	
Tensão	380 V
Potência	15kW/20hp
Corrente nominal	30,5 A
I_p/I_n	7,1
Rendimento	92,40%
Corrente de partida	216,55 A
Polos	4
Fator de potência	81%
Partida	70% de carga

- **Conversor de Frequência**

Este motor terá sua partida feita por um conversor de frequência. Tal aparelho é constituído por dois circuitos de potência. Juntos, tem a função de retificar a tensão de entrada e a partir desta gerar uma onda não senoidal na saída, sendo esta equivalente a uma onda senoidal com frequência diferente da entrada. Deste modo, ele pode tanto funcionar como um método de partida quanto uma alternativa para o controle da velocidade do MIT. Não será abordado a fundo o funcionamento deste dispositivo, já que este estudo poderia gerar um outro trabalho inteiro.

É preciso, porém, atentar-se as demais particularidades deste acionamento. A proteção contra sobrecarga já se encontra integrada nos conversores de frequência, logo se este for responsável por apenas uma máquina, não é necessária uma proteção adicional para tal fenômeno.

Já para evitar danos gerados pelo curto-circuito, utiliza-se de fusíveis ultrarrápidos, assim como no caso das *soft-starters*. Estes irão limitar o curto-circuito uma vez que irão romper o elo para correntes elétricas de valores muito elevados com uma alta velocidade.

Ao mesmo tempo, é preciso dimensionar um contator a montante do conversor, responsável por evitar um religamento automático após uma interrupção no fornecimento de energia elétrica. Ele também permite o seccionamento remoto da rede elétrica que alimenta o conversor.

Para escolher este dispositivo é preciso levar em conta a corrente e a tensão nominal do motor além da possível corrente de sobrecarga que este poderá atuar. Os dois primeiros dados são conhecidos, já o último pode ser desconsiderado, uma vez que a máquina irá operar apenas com sua carga nominal.

Então, levando-se em consideração uma corrente e uma tensão nominal de 380 V e 30,5 A respectivamente, o conversor escolhido foi o ACS580-01-032A-4 da ABB. Suas informações seguem na Tabela 2.20.

Tabela 2.20 Características do Conversor de Frequência

Conversor de Frequência ABB ACS580-01-032A-4	
Tensão nominal	380, 400 ou 415 V
Corrente nominal sem sobrecarga	32 A
Potência típica do motor sem sobrecarga	20cv / 15kW

- **Fusível Ultrarrápido F4**

O estudo feito será o mesmo já realizado para o fusível do motor 3. Considerando que o fator de redução de corrente (k) na parametrização do inversor é igual a 0,5, a nova corrente de partida (I_p') será 108,6 A. Levando-se em conta também um tempo de partida de 8 segundos, teremos que uma corrente de aproximadamente 270 A deverá romper o filamento do fusível num tempo superior a este.

Desta maneira o dispositivo escolhido foi o F4 FNH1-125-KA da fabricante WEG. Suas informações e seu gráfico de funcionamento se encontram respectivamente na Tabela 2.21 e na Figura 2.14.

Tabela 2.21 Características do Fusível F4

Fusível ultrarrápido WEG F4 FNH1-125	
Classe	aR
Corrente	125 A
Tamanho	1

Fusíveis FHN1 aR

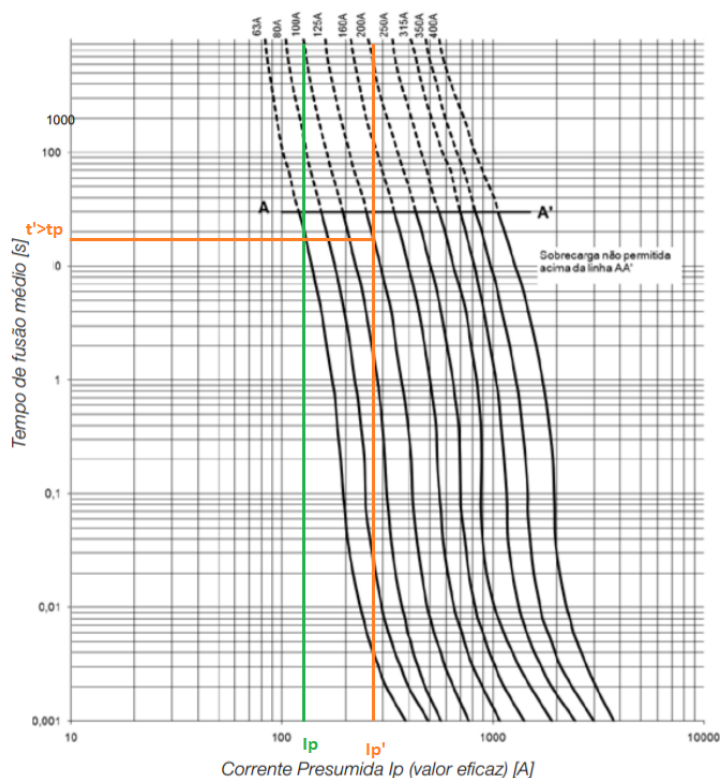


Figura 2.14 Gráfico de funcionamento de F3

Analisando o gráfico, conclui-se que assim como no ultimo fusível ultrarrápido, foi garantido que este não irá sofrer influencias de possíveis sobrecargas e que atuará muito rapidamente em caso de curto-circuito.

- **Contator**

Este contator tem somente a função de proteger o conversor de religamentos inesperados da rede. Logo, precisa-se de atenção apenas as correntes de conexão e de regime permanente, que serão iguais as correntes de partida e nominal do motor, respectivamente.

Utilizando o mesmo critério que os demais contadores, tem-se:

$$I_e \geq I_{regime} = 30,5 A$$

$$I_e \geq \frac{I_{conexão}}{10} = 10,86 A$$

Analisando estes valores, a melhor opção de contator é o AX 32 da ABB. Suas características são apresentadas na tabela 2.22.

Tabela 2.22 Características do Contator de proteção do Conversor de Frequência

Contator tripolar ABB –AX32	
Tensão de comando	CA
Categoria	AC-3
Tensão nominal	400 V
Corrente nominal	32 A

2.2.5. Dimensionamento do acionamento e proteção – motores 6 e 7

Esta máquina também tem 20cv de potência mecânica, logo são idênticos aos outros já apresentados. A Tabela 2.23 apresenta suas características.

Tabela 2.23 Características MIT 6 e 7

MIT 6 e 7	
Tensão	380 V
Potência	15kW/20hp
Corrente nominal	30,5 A
I_p/I_n	7,1
Rendimento	92,40%
Corrente de partida	216,55 A
Polos	4
Fator de potência	81%
Partida	70% de caraga

- **Disjuntor-motor D2 e D3**

A partida de ambos os motores será feita de forma direta, logo não será necessário o dimensionamento de equipamentos para tal finalidade. Já a proteção será feita utilizando-se um disjuntor-motor da ABB. Tal dispositivo apresenta a função de proteção contra curto-circuito e sobrecarga e, como o próprio nome diz, é feito especificamente para a aplicação em motores.

Levando-se em conta que a corrente nominal e de curto-circuito são respectivamente 30,5 A e 16,35 kA, o disjuntor escolhido foi o MS165-32 da ABB. Este aparelho tem uma corrente nominal de 32 A e uma capacidade máxima de interrupção nominal em serviço de 75 kA, valores que atendem bem a sua aplicação.

Na Tabela 2.24 seguem as características do disjuntor a ser utilizado.

Tabela 2.24 Características do Disjuntor D1

Disjuntor-motor D2 e D3 ABB MS165-32	
Tipo	Disjuntor-motor
Corrente nominal interrompida	32 A
Tensão Máxima	690 V
Frequência nominal	60 Hz
Polos	3
Tipo do relé	Termomagnético
Capacidade máxima de interrupção sob curto-circuito	75 kA
Faixa de ajuste térmico	23 a 32 A
Faixa de ajuste magnético	15xI _{nd}

2.3. Especificação da proteção dos circuitos de iluminação

A instalação industrial da qual se trata este trabalho, apresenta dois circuitos de iluminação LED, os quais também necessitam de proteção. Ao contrário dos motores, nos quais se precisa levar em conta as possíveis sobrecargas e uma proteção térmica para evitar danos devido a estas, a iluminação exige apenas uma atenção para o caso de curto-circuito. Logo, o dispositivo escolhido para esta função foi o disjuntor de caixa moldada eletrônico.

Na Tabela 2.25 encontram-se detalhadas as características dos dois circuitos de iluminação desta instalação.

Tabela 2.25 Características dos circuitos de Iluminação 1 e 2

Circuitos de Iluminação 1 e 2	
Potência real consumida	79 kW
Fator de potência	0,92
Corrente nominal	130,5 A
Potência aparente	85,9 kVA

Considerando que a corrente nominal e de curto-circuito neste caso serão, respectivamente 130,5 A e 16,3 kA, o disjuntor escolhido foi o TN2 160 PR221DS-1 da ABB, que possui uma corrente nominal de 160 A e uma capacidade máxima de interrupção de 36 kA. Seus dados seguem na Tabela 2.26.

Tabela 2.26 Características dos Disjuntores D4 e D5

Disjuntor de Caixa Moldada D4 e D5 ABB XT2N 160 Ekip In=160 A	
Tipo	Caixa Moldada
Corrente nominal interrompida	160 A
Tensão Máxima	690 V
Frequência nominal	60 Hz
Polos	3
Tipo do relé	Eletrônico
Capacidade máxima de interrupção sob curto-circuito	36 kA
Faixa de ajuste	1 a 10xIn

Para estes circuitos foi feito apenas o estudo de proteção, faltando assim os arranjos e os dispositivos responsáveis pelo acendimento das lâmpadas. Porém estes não serão contemplados neste trabalho.

2.4. Especificação da proteção dos circuitos de aquecimento

Por fim, tem-se três circuitos de aquecimento iguais. Sabe-se que este tipo de carga tem um fator de potência unitário e precisa ser protegido apenas contra sobrecargas, uma vez que a mesma é puramente resistiva. Logo, a proteção será feita utilizando-se de um fusível e um contator, que tem a função de acionar e desligar os aparatos de aquecimento.

Na Tabela 2.27 encontram-se detalhadas as características dos circuitos de aquecimento desta indústria.

Tabela 2.27 Características dos circuitos de Aquecimento 1, 2 e 3

Circuitos de Aquecimento 1, 2 e 3	
Potência real consumida	26,5 kW
Fator de potência	1
Corrente nominal	40,26 A

Com correntes nominal e de curto-circuito com os respectivos valores de, 40,26 A e 16,3 kA o fusível escolhido foi o OFAA00-80 da ABB. Suas características são apresentadas na tabela 2.28.

Tabela 2.28 Características dos fusíveis F5, F6 e F7

Fusíveis F5, F6 e F7 ABB OFAAG00-80	
Classe	gG
Corrente	80 A
Tamanho	00

O contator a ser utilizado é o AX32 da ABB, já utilizado anteriormente para os acionamentos dos motores. Apesar de sua corrente nominal ser de 32 A no regime AC-3, o seu valor de catálogo passa a ser de 55 A considerando um regime AC-1. Utiliza-se esse regime de funcionamento pois o circuito tem um fator de potência maior do que 0,95. As características do dispositivo seguem na Tabela 2.29.

Tabela 2.29 Características dos contator dos circuitos de aquecimento

Contator Tripolar Modelo ABB -AX50	
Tensão de comando	CA
Categoria	AC-1
Tensão nominal	690 V
Corrente nominal	55 A

2.5. Especificação da proteção geral do lado bt e seletividade

Uma vez definidos todos equipamentos dos circuitos individuais, volta-se para a proteção geral do mesmo. Conhecendo as características gerais da indústria em questão no seu lado de baixa tensão, pode-se escolher um disjuntor com atributos correspondente a corrente e potência total do sistema em questão.

Para definir este equipamento, utiliza-se dos valores de coerente nominal do transformador e a corrente de curto-circuito, que tem valores de aproximadamente 760 A e 16,3 kA, respectivamente. Levando-se estes valores em consideração, foi escolhido o E1.2B 800 Ekip Touch LSI 800 da fabricante ABB. Na Tabela 2.30 encontram-se suas informações retiradas do catálogo.

Tabela 2.30 Características do Disjuntor D0

Disjuntor Aberto D0 E1.2B 800 Ekip Touch LSI 800	
Tipo	Aberto
Corrente nominal interrompida	800 A
Tensão Máxima	690 V
Frequência nominal	60 Hz
Polos	3
Tipo do relé	Termomagnético
Capacidade máxima de interrupção sob curto-circuito	42 kA
Faixa de ajuste térmico	0,4 a 1xIn
Faixa de ajuste magnético	1,5 a 15xIn

O estudo da seletividade entre o disjuntor D0 e os demais disjuntores a sua jusante garante que em caso de ocorrência de alguma falha, serão desconectados da rede elétrica o menor número de cargas possíveis. Isto é importante para que a indústria continue funcionando com uma maior eficiência, uma vez que a falha não afetará todo o sistema.

Isto é obtido garantindo-se que o disjuntor, ou dispositivo de proteção, a montante e mais próximo da falha será o primeiro a atuar, desligando a mesma do restante da instalação e mantendo o restante das cargas alimentadas. Caso haja alguma falha no primeiro dispositivo de proteção, o segundo mais próximo e a montante deve ser escolhido e configurado para atuar logo após o anterior. E esse raciocínio se repete até o aparelho mais distante da falha.

Serão utilizados de exemplo na análise analítica de seletividade os disjuntores D0, D4 e D5, já que são todos da fabricante ABB e se encontram na tabela de coordenação distribuída pela mesma. Um exemplo é o suficiente nesta etapa do trabalho já que este estudo será mais aprofundado na análise computacional que será discutida mais à frente.

A seguir na Figura 2.15 encontra-se a tabela de coordenação de seletividade entre os disjuntores abertos e de caixa moldada, com os dispositivos em questão já indicados.

ACB - MCCB @ 400/415 V

Load s.	Version	Release	Supply s. I _N [A]	E1		E2				E3					E4			E6	
				B	N	B	N	S	L*	N	S	H	V	L*	S	H	V	H	V
				EL		EL				EL					EL			EL	
				800 1000 1250 1600	800 1000 1250 1600	1600 2000	1000 1250 1600 2000	800 1000 1250 1600 2000	1250 1600	2500 3200	1000 1250 1600 2000 2500 3200	800 1000 1250 1600 2000 2500 3200	2000 2500	4000 4000	3200 4000	4000 5000 6300	3200 4000 5000 6300		
T1	B	TM	160	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	
	C			T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T		
	N			T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T		
T2	N	TM,EL	160	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	
	S			T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T		
	H			T	T	T	55	65	T	T	T	T	T	T	T	T	T		
T3	L	TM	250	T	T	T	55	65	T	T	T	75	T	T	T	T	T	T	
	N			T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T		
	S			T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T		
T4	N	TM,EL	250 320	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	
	S			T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T		
	H			T	T	T	55	65	T	T	T	T	T	T	T	T	T		
	L			T	T	T	55	65	100	T	T	75	85	100	T	T	100	T	100
	V			T	T	T	55	65	100	T	T	75	85	100	T	T	100	T	100
T5	N	TM,EL	400 630	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	
	S			T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T		
	H			T	T	T	55	65	T	T	T	T	T	T	T	T	T		
	L			T	T	T	55	65	100	T	T	75	85	100	T	T	100	T	100
	V			T	T	T	55	65	100	T	T	75	85	100	T	T	100	T	100
T6	N	TM,EL	630 800 1000	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	
	S			T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T		
	H			T	T	T	55	65	T	T	T	T	T	T	T	T	T		
	L			T	T	T	55	65	T	T	T	75	85	T	T	T	T	T	
S7	S	EL	1250 1600	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	
	H			T	T	T	55	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T		
	L			T	T	T	55	65	T	T	T	75	85	T	T	T	T	T	

Table valid for Emax circuit-breakers only with PR121/P, PR122/P and PR123/P releases
* Emax L circuit-breakers only with PR122/P and PR123/P releases

Table valid for Emax circuit-breakers only with PR121/P, PR122/P and PR123/P releases

* Emax L circuit-breakers only with PR122/P and PR123/P releases

Figure 2.15 Tabela de Coordenação de Seletividade

Cruzando a coluna do dispositivo escolhido para D0 e a linha do que representa os disjuntores D4 e D5, encontra-se o símbolo “T”. Isto significa que estes disjuntores são totalmente seletivos, logo foram dimensionados corretamente e garantirão o bom funcionamento da indústria em questão.

2.6. Barramento de baixa tensão

Para se especificar os barramentos utilizados no lado de baixa tensão é necessário respeitar três critérios, sendo estes:

- Capacidade de condução máxima de corrente;
- Efeito térmico – cálculo da área máxima da seção transversal do condutor utilizando a corrente de curto-circuito;
- Efeito dinâmico – cálculo das solicitações dinâmicas da corrente de curto-circuito.

Para começar a análise é preciso identificar como as correntes se distribuirão no barramento. Para este estudo, foi utilizada a corrente total exigida pelas cargas, tendo em consideração o fator de simultaneidade. Preferiu-se fazer desta forma para se ter uma visão mais real e econômica do caso, uma vez que nem todas as cargas estarão ligadas ao mesmo tempo. Isto é demonstrado na Figura 2.16.

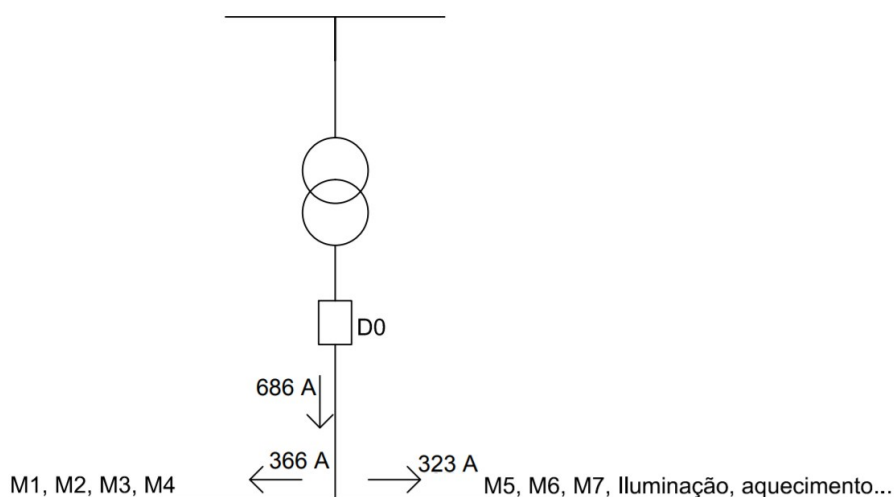


Figura 2.16 Divisão de correntes pelo barramento

Observa-se que a maior corrente que circulará pelo barramento tem um valor de aproximadamente 366 A. Consultando a Tabela 2.31, é possível verificar qual condutor atenderá o critério da condução de máxima corrente.

Tabela 2.31 Tabela de dimensionamento de barramentos de cobre

CARGAS ADMISSÍVEIS PARA BARRAS RETANGULARES DE COBRE										
ALT. X ESP.	SECÇÃO	PESO	CARGA CONTÍNUA (λ)							
			CORRENTE ALTERNADA 40 A 60 HZ							
			PINTADAS				NU			
			NÚMERO DE BARRAS				NÚMERO DE BARRAS			
mm	mm ²	Kg/m	1	2	3	4	1	2	3	4
12 X 2	24	0,21	125	225	-	-	110	200	-	-
15 X 2	30	0,27	155	270	-	-	140	240	-	-
15 X 3	45	0,4	185	330	-	-	170	300	-	-
20 X 2	40	0,36	205	350	-	-	185	315	-	-
20 X 3	60	0,53	245	425	-	-	220	380	-	-
20 X 5	100	0,89	325	550	-	-	290	495	-	-
25 X 3	75	0,67	300	510	-	-	270	460	-	-
25 X 5	125	1,11	385	670	-	-	350	600	-	-
30 X 3	90	0,8	350	600	-	-	315	540	-	-
30 X 5	150	1,34	450	780	-	-	400	700	-	-
40 X 3	120	1,07	460	780	-	-	420	710	-	-
40 X 5	200	1,78	600	1000	-	-	520	900	-	-
40 X 10	400	3,56	835	1500	2060	2800	750	1350	1850	2500
50 X 5	250	2,23	700	1200	1750	2310	630	1100	1550	2100
50 X 10	500	4,45	1025	1800	2450	3330	920	1620	2300	3000
60 X 5	300	2,67	825	1400	1980	2650	750	1300	1800	2400
60 X 10	600	5,34	1200	2100	2800	3800	1100	1860	2500	3400
80 X 5	400	3,56	1060	1800	2450	3300	950	1650	2200	2900
80 X 10	800	7,12	1540	2600	3450	4600	1400	2300	3100	4200
100 X 5	500	4,45	1310	220	2950	3800	1200	2000	2600	3400
100 X 10	1000	8,9	1880	3100	4000	5400	1700	2700	3600	4800

O barramento que melhor atenderia tal exigência seria o de cobre nu, com seção de 150mm² (30mm de altura por 5mm de largura).

Analisando em seguida o critério do efeito térmico, é preciso calcular a área máxima da seção transversal do condutor utilizando a corrente de curto-circuito e o tempo de atuação da proteção. Encontra-se tal valor pela seguinte equação:

$$A = k * I_k'' * \sqrt{t}$$

Onde,

- A = área da seção transversal do barramento[mm²];
- k = constante do material utilizado (Cobre=7 e Alumínio=11,2);
- I_k'' = Corrente de curto-circuito simétrico do lado de baixa tensão[kA];
- t = tempo de atuação da proteção[s];

Considerando que a proteção irá atuar entre 18 e 25 ms, a seção do barramento para este critério será de aproximadamente 18,04 mm², uma vez que, conservadoramente, utilizou-se o maior valor de tempo.

$$A = 7 * 16,3 * \sqrt{0,025}$$

$$A = 18,04 \text{ mm}^2$$

Conclui-se que o barramento com valor comercial já escolhido de 150mm² atenderá tranquilamente o critério de efeito térmico, uma vez que sua seção transversal é bem maior que o valor calculado.

Para encontrar o efeito dinâmico gerado pela corrente de curto-circuito, é necessário verificar a sollicitação mecânica no barramento. Para isto, inicialmente, calcula-se a força exercida no mesmo durante o curto-circuito, que é obtida pela equação:

$$F_{bar} = \frac{0,0204 * I_S^2 * l}{d}$$

Onde,

- F_{bar} = força exercida no barramento[kgf];
- I_S = corrente de curto circuito assimétrica [kA];
- l = comprimento do barramento[cm];
- d = distâncias entre os condutores das fases[cm].

A corrente de curto-circuito assimétrica é obtida, de forma simplificada por:

$$I_S = 2,5 * I_S$$

$$I_S = 2,5 * 16,30$$

$$I_S = 40,75 \text{ kA}$$

Considerando que os isoladores estão distanciados em 50 cm e que o condutor de cada fase esteja a 8 cm de distância um do outro, então a força máxima sobre o barramento será:

$$F_{bar} = \frac{0,0204 * 40,75^2 * 50}{8}$$

$$F_{bar} = 211,722 \text{ kgf}$$

Como os barramentos são retangulares, estes deverão ficar paralelos pelas faces de menor área, garantindo assim que a força exercida sobre eles durante o curto-circuito seja a menor possível. Desta forma é preciso calcular o momento de inércia de cada uma pela equação a seguir:

$$W_b = \frac{a^2 * e}{6000}$$

Onde,

- W_b = momento de inércia do barramento[cm³];
- a = altura do barramento [cm];
- e = espessura do barramento[cm].

Portanto:

$$W_b = \frac{30^2 * 5}{6000}$$

$$W_b = 0,75 \text{ cm}^3$$

Com todos estes dados definidos, pode-se calcular o conjugado de flexão, para compara-lo com os níveis máximos que o barramento conseguirá suportar. Utiliza-se a seguinte equação para se calcular o conjugado de flexão:

$$M_b = \frac{F_{bar} * l}{12 * W_b}$$

Onde,

- M_b = conjugado de flexão[kgf/cm²];
- F_{bar} = força exercida no barramento[kgf];
- l = comprimento do barramento[cm];
- W_b = momento de inércia do barramento[cm³].

Logo, o conjugado de flexão no barramento será de:

$$M_b = \frac{211,722 * 50}{12 * 0,75}$$

$$M_b = 1176,23 \text{ kgf/cm}^2$$

O valor obtido não pode ultrapassar o valor máximo suportado pelo cobre, que é de 3000kgf/cm². Portanto o barramento escolhido atende todos os critérios da instalação e está de acordo com a aplicação. Suas características seguem discriminadas na Tabela 2.32.

Tabela 2.32 Características do barramento de BT

Barramento de BT	
Altura X	
Espessura	30 X 5
Capacidade de condução	400 A
Barras por fase	1
Seção transversal	150mm ²

O dimensionamento deste barramento foi feito utilizando-se de dados hipotéticos, logo, em caso de uma aplicação prática, deve se verificar o espaço disponível no quadro para a montagem.

2.7. Correção do fator de potência

Observando-se a potência total do sistema, chega-se à conclusão que o fator de potência da mesma tem uma característica indutiva e tem um valor abaixo do exigido pelas normas. Desta maneira, se faz necessária a correção do fator de potência, que é obtida a partir da conexão de um banco de capacitores a montante do quadro de distribuição da indústria.

É importante lembrar que este sistema trabalha com um fator de utilização de 0,7, logo será levado isso em conta no cálculo do melhor banco de capacitores a ser utilizado.

A potência total demandada pelo quadro de distribuição é:

$$S_{total} = 406.958 + 195856j$$

Logo, o fator de potência inicial é igual a:

$$fp = \frac{P}{|S_{total}|}$$

$$fp = \frac{406.958}{451.635}$$

$$fp = 0,9$$

Conforme os padrões exigidos pelo módulo 8 do PRODIST da ANEEL, o limite mínimo para o fator de potência, para unidades conectadas a níveis de tensão inferiores a 230 Kv, é de 0,92. Nesta situação, é essencial a conexão do banco de capacitores. Para este estudo, foi-se um pouco conservador uma vez que se escolheu um valor de 0,95 como o novo fator de potência, com a intenção de garantir que se está respeitando a norma e para caso de uma possível

expansão do consumo. A potência nominal para o banco a ser escolhido é dada pela seguinte equação:

$$Q_C = P * [tg(\theta_{ant}) - tg(\theta_{novo})]$$

Onde,

- Q_C = potência do banco de capacitores [kVAr];
- P = potência ativa do sistema [kW];
- θ_{ant} = ângulo de potência antes do banco de capacitores [°];
- θ_{novo} = ângulo de potência com o banco de capacitores [°].

Os ângulos de potência são dados por:

$$\theta_{ant} = \cos^{-1}(0,901) = 25,7^\circ$$

$$\theta_{novo} = \cos^{-1}(0,95) = 18,19^\circ$$

A potência reativa e capacitiva necessária para a correção será de:

$$Q_C = 406.958 * [tg(25,7) - tg(18,19)]$$

$$Q_C = 62.133 \text{ kVAr}$$

O valor comercial da potência do banco de capacitores mais próximo obtido em cálculo é 65 kVAr. O banco escolhido foi o CLMD63 da fabricante WEG. O catálogo do mesmo já indica quais os fusíveis e contadores a serem utilizados com o dispositivo. As características do mesmo seguem na Tabela 2.33.

Tabela 2.33 Características do banco de Capacitores

Banco de Capacitores WEG CLMD63	
Potência reativa	65 kVAr
Tensão	380 V
Corrente	
Nominal	98,8 A
Contator	UA110
Fusível gG	OFAF00H160A

3. MÉTODO COMPUTACIONAL

Como proposto pelo trabalho, se fez o estudo do sistema elétrico industrial utilizando uma metodologia computacional. O software em questão é o DOC, distribuído pela fabricante ABB, o qual calcula e especifica todos os componentes a serem utilizados.

3.1. Desenho do diagrama unifilar

A área de trabalho do programa é exibida na Figura 3.1.

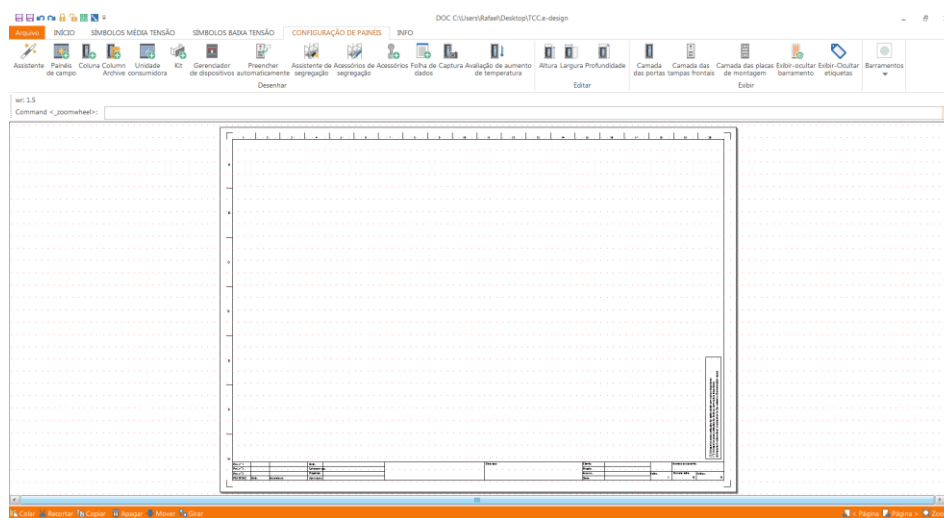


Figura 3.1 Área de trabalho do software DOC

Para iniciar-se um projeto é preciso entrar com as informações gerais da instalação em questão, que são:

- Tensão no lado de média: 13.800 V;
- Tensão no lado de baixa: 380 V;
- Corrente de curto circuito na média tensão: 12,55 kA (300MVA);
- Frequência da rede: 60 Hz.

Com estes dados se define a fonte de alimentação da rede, como demonstra a figura 3.2.

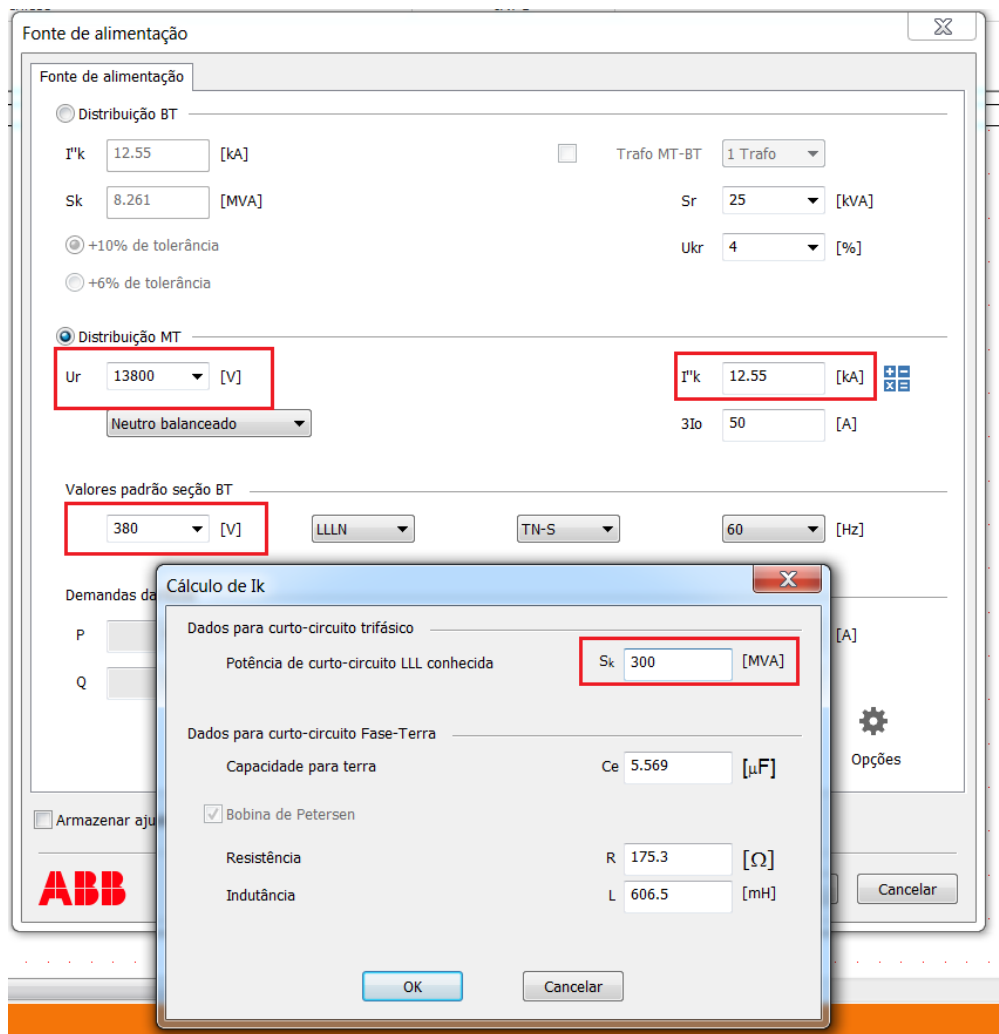


Figura 3.2 Entrada dos dados gerais da rede

Observa-se na imagem anterior que o software calcula sozinho a corrente de curto-circuito na média tensão, bastando apenas inserir o valor de nível de curto que no caso é 300MVA.

O principal estudo do trabalho é focado no lado de baixa tensão do sistema, logo a imagem 3.3 traz o diagrama unifilar do mesmo, apresentando todos os componentes utilizados.

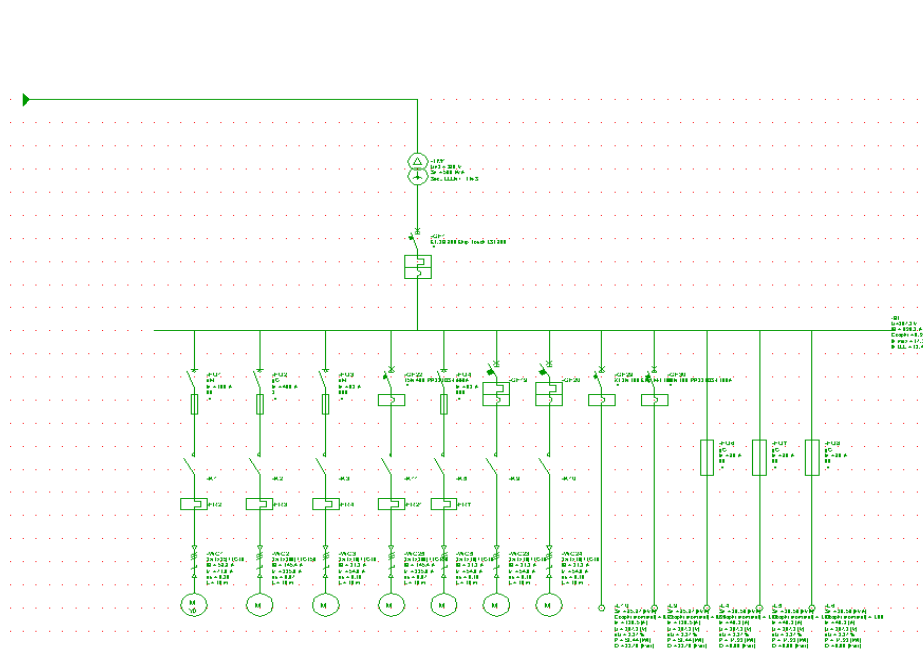


Figura 3.3 Diagrama unifilar de baixa tensão no DOC

Uma vez que todos os componentes tenham sido montados e interligados na interface do programa, é preciso inserir os dados de placa ou catálogo de cada um. Isso é feito para o transformador, os motores e demais cargas. Os dispositivos de manobra e proteção são dimensionados pelo próprio software no momento em que se utiliza de sua função de cálculo.

Para o transformador, por exemplo, é necessário entrar com os dados de potência, tipo de ligação, as tensões, impedância e perda percentual, dentre outras características. A janela do mesmo segue na Figura 3.4.

Figura 3.4 Características do Transformador de potência

Seguiu-se o mesmo procedimento para cada motor de indução. Nem todos são iguais, porém o procedimento é o mesmo para todos, mudando

apenas os valores em cada campo. Na Figura 3.5 é apresentado a especificação da máquina de 60 cv como exemplo.

Figura 3.5 Características do MIT 1 no DOC

Por fim, as cargas genéricas representaram os circuitos de iluminação e de aquecimento. A Figura 3.6 traz as propriedades de um circuito de iluminação como exemplo.

Figura 3.6 Características do Circuito de Iluminação

É possível perceber que no caso da carga genérica é possível escolher entre inserir a potência da mesma ou a corrente nominal, uma vez que o próprio

DOC fará o cálculo da outra grandeza. No caso acima, foi definida a potência e a corrente foi calculada automaticamente.

3.2. Cálculos e dimensionamentos

Uma vez que todas as cargas estão definidas, utiliza-se a ferramenta de resolução do programa que definirá todos os demais dispositivos, as correntes drenadas e de curto-circuito.

Na figura 3.7 são apresentadas as correntes de curto-circuito da instalação.

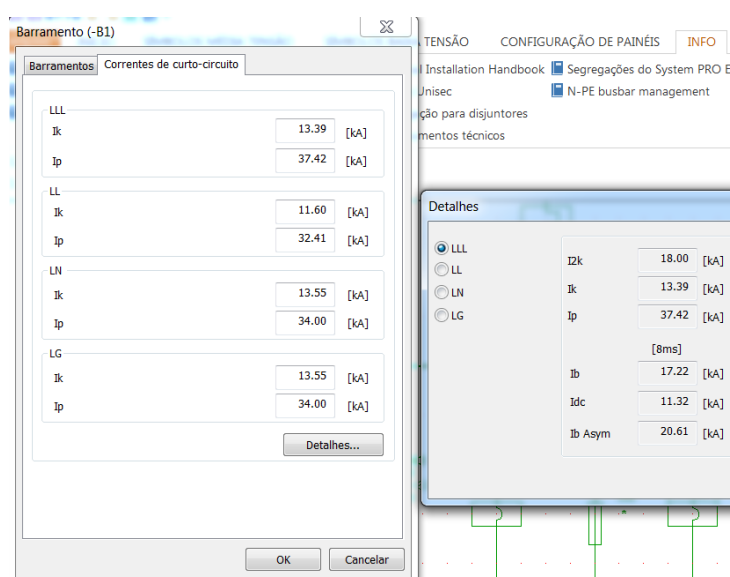


Figura 3.7 Corrente de curto-circuito fornecidas pelo DOC

A corrente I_k de curto-circuito trifásico encontrada pelo software foi de aproximadamente 13,4 kA no barramento, enquanto a corrente de curto máxima tem valor aproximado de 17,2 kA. São valores próximos aos 16,3 kA encontrados no método analítico e não comprometem o estudo feito anteriormente.

Os componentes escolhidos pelo software são todos da fabricante ABB, uma vez que o programa também é. Logo, a maioria dos dispositivos escolhidos no estudo analítico são iguais ao do estudo computacional, exceto aqueles que são de outros fabricantes e os que o software calculou de forma conservadora, como foi o caso dos motores de 150 cv e de 60 cv. Nesses casos, o estudo de seletividade deve ser feito separadamente, porém este não será abordado nesse trabalho.

Abaixo segue a Tabela 3.1, relacionando todos os dispositivos de proteção dimensionados nos métodos analítico e computacional. Esta permite uma fácil comparação entre as escolhas das duas metodologias.

Tabela 3.1 Listagem dos dispositivos de proteção

Dimensionamento das proteções				
	Analítico		Computacional	
Cargas	Sobrecarga	Curto-circuito	Sobrecarga	Curto-circuito
Motor 1	Relé de sobrecarga ABB TF 65-53	Fusível ABB OFAF0AM-100	Relé de sobrecarga ABB TF 96-60	Fusível ABB OFAF0AM-100
Motor 2	Relé eletrônico ABB EF 205-210	Fusível ABB OFAF1AM-315	Relé eletrônico ABB EF 370-380	Fusível ABB OFAF1AM-315
Motor 3	-	Fusível WEG FNH1-160	-	Fusível ABB OFAF1AM-100
Motor 4	Relé eletrônico ABB EF 205-210	Disjuntor WEG ACW250H-MTU220-3	Relé eletrônico ABB EF 370-380	Disjuntor ABB T4N 250 PR221DS-I 250A
Motor 5	-	Fusível WEG FNH1-125	-	Fusível ABB OFAF1AM-125
Motor 6	Disjuntor-motor ABB MS 165-32		Disjuntor-motor ABB MS 165-32	
Motor 7	Disjuntor-motor ABB MS 165-32		Disjuntor-motor ABB MS 165-32	
Iluminação	-	Disjuntor ABB XT2N 160 Ekip	-	Disjuntor ABB XT2N 160 Ekip
Aquecimento	-	Fusível ABB OFAAGG00-80	-	Fusível ABB OFAAGG00-80

Não houve comparação entre os contadores utilizados nos métodos de partida, assim como o *soft-starter* e o conversor de frequência, pois estes não podem ser representados pelo *software*.

Também é importante salientar que o disjuntor de caixa aberta D0, que protege todo o barramento, foi escolhido da mesma maneira em ambos os métodos. Seu modelo é ABB E1.2B 800 Ekip Touch LSI 800.

3.3. Seletividade pelo método computacional

A seletividade dos componentes é feita automaticamente pelo DOC durante o processo de cálculos do mesmo e caso haja algum erro, o mesmo irá acusar. Utilizando da ferramenta “Curvas”, é possível plotar as curvas características dos disjuntores e fusíveis para que se possa observar graficamente o funcionamento dos mesmos. Como exemplo, serão mostrados a seletividade entre dois disjuntores de caixa fechada e um fusível (D2, D4 e F1) responsáveis pela proteção das cargas, em relação ao disjuntor de caixa aberta (D0) que protege todo o barramento.

Na Figura 3.4 são apresentadas as curvas de corrente por tempo de abertura, relativas ao funcionamento de D0 e F1.

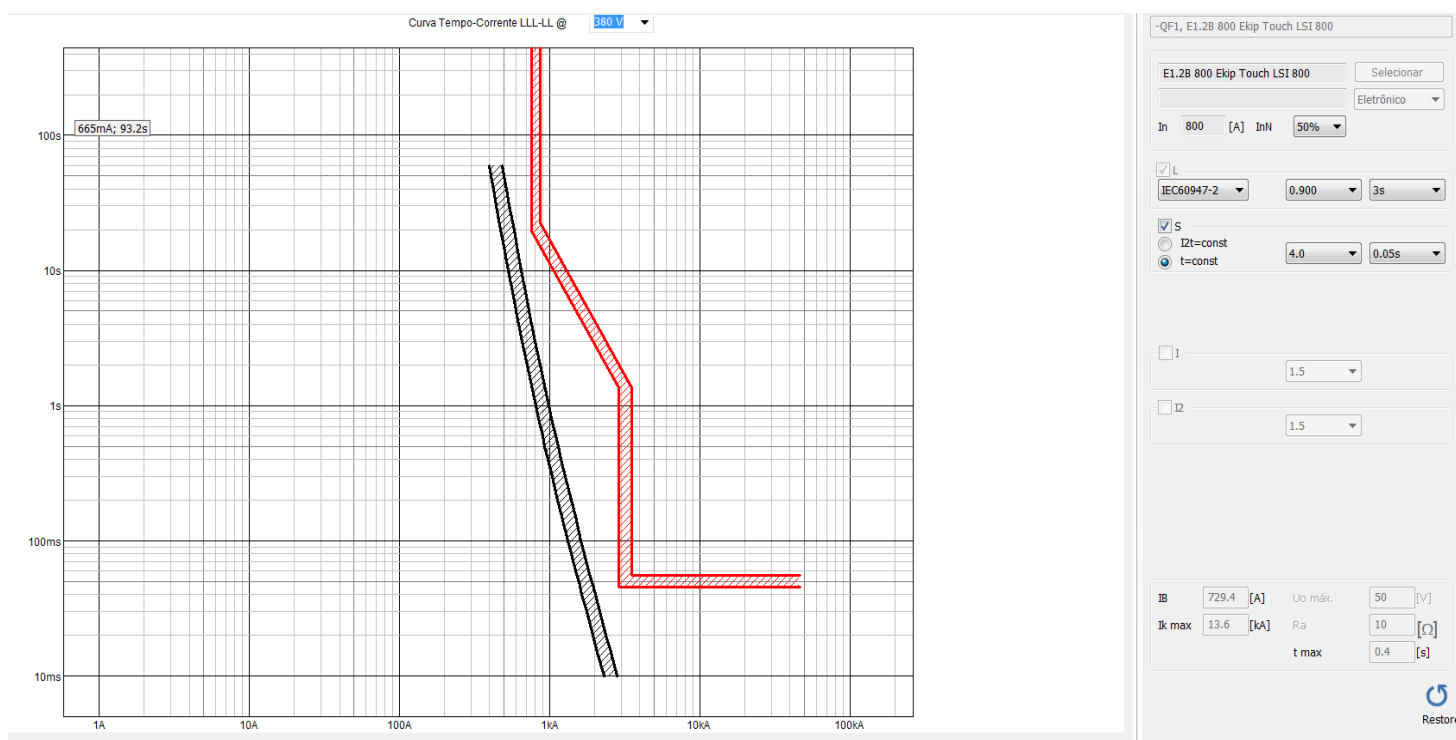


Figura 3.4 Curvas do disjuntor D0 e fusível F1

O DOC permite que se movimente a curva no gráfico de forma que se encontre a melhor corrente de ajuste para a aplicação. No caso de D0 acima, o ajuste térmico é compreendido entre 0,4 e 1 vezes o valor de corrente nominal do aparelho, que é 800 A. Ele é submetido a uma corrente de 690 A que está entre a faixa de ajuste. Como é possível observar na figura, D0 foi ajustado em um valor maior que o da corrente de operação, com um ajuste de 0,9 (720 A) o qual é indicado na janela do lado esquerdo. É importante lembrar que este ajuste é facilmente alterado no software, uma vez que pode ser feito alterando o valor ou movimentando-se a curva com o cursor do mouse.

Também se conclui que a seletividade está bem garantida entre o fusível e o disjuntor. O disjuntor D0 tem o ajuste magnético em 4 vezes a sua corrente nominal (3200 A) e o ajuste de tempo é 0,05 segundos, o menor possível. Observa-se pelas curvas que o fusível terá o seu elo rompido bem antes que o disjuntor possa atuar no caso de um curto-circuito, em que as correntes atingem valores muito altos.

Para estudar a seletividade entre os disjuntores D0 e D4, a Figura 3.5 traz as suas curvas de funcionamento.

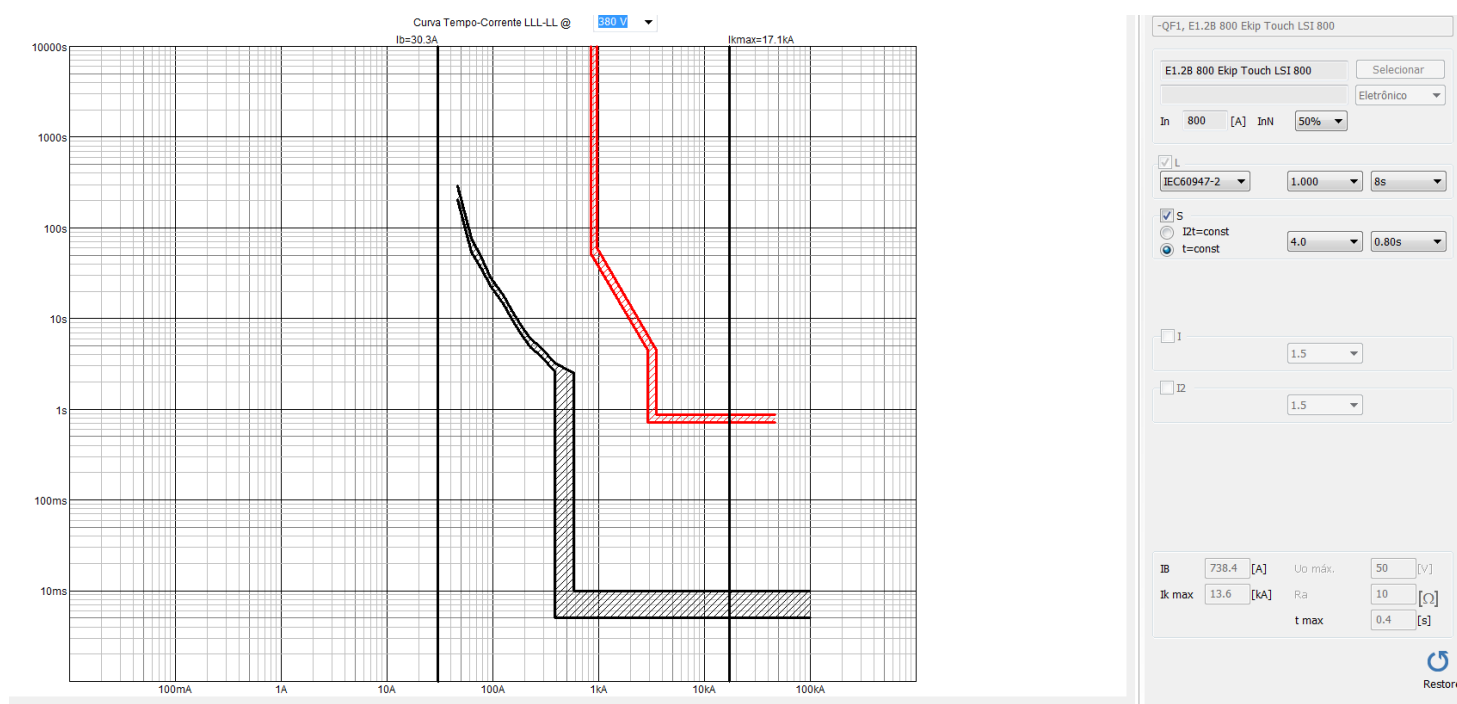


Figura 3.5 Curvas dos disjuntores D0 e D2

Neste caso, a corrente de ajuste de D2, que é um disjuntor-motor, pode variar entre 23 e 32 A. Esta foi estipulada para exatamente 30,3 A, valor calculado pelo software como sendo a corrente nominal do motor de 20 cv. Já o seu ajuste magnético é fixo, sendo este 15 vezes a sua corrente nominal (480 A).

Fazendo a análise gráfica, conclui-se que os dois dispositivos serão seletivos. É também importante observar que o ajuste de tempo do disjuntor D0 foi alterado em relação ao caso anterior. Enquanto que na análise com o fusível F1 o disjuntor D0 abria rapidamente em caso de curto-circuito, agora ele foi ajustado para atuar em um tempo maior, 0,8 segundos. Esta função não faz muita diferença para os casos contemplados, mas é muito útil quando é preciso retardar a atuação de um disjuntor para se garantir a seletividade.

Por fim, a figura 3.6 apresenta as curvas dos disjuntores D0 e D4.

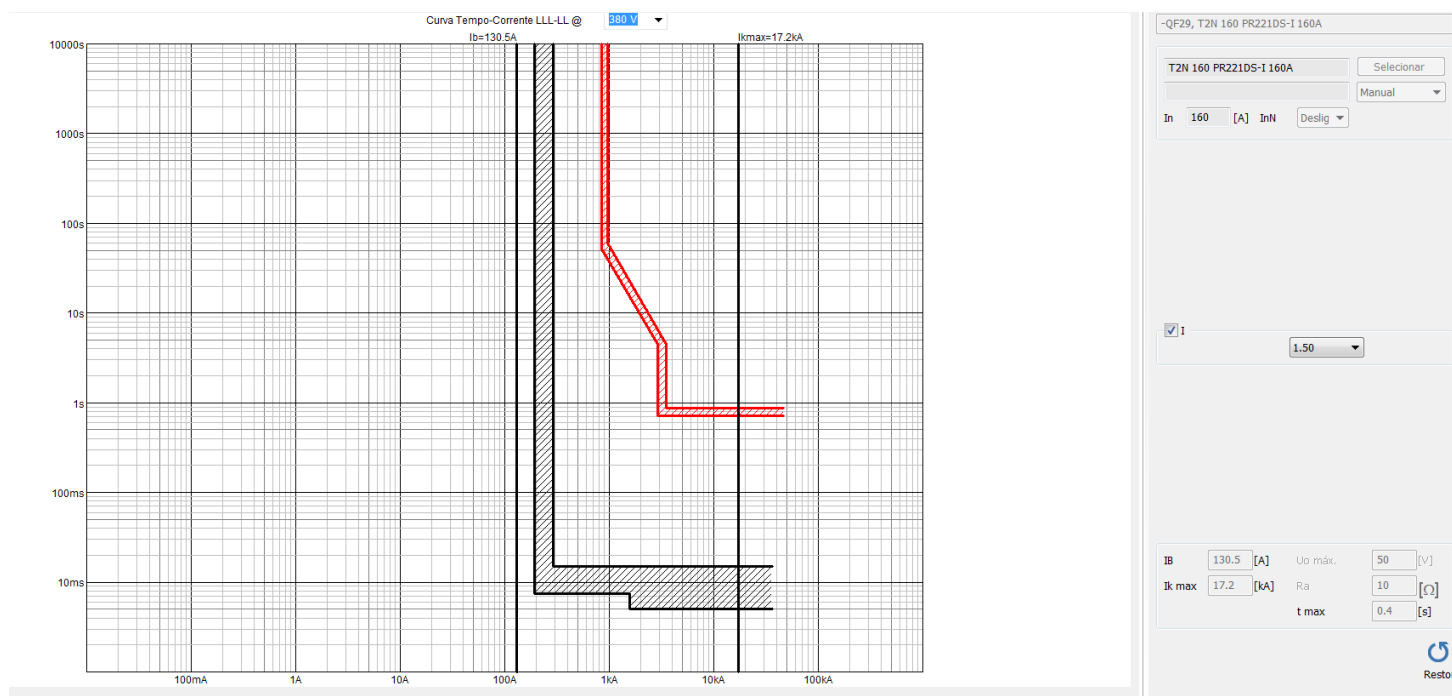


Figura 3.6 Curvas dos disjuntores D0 e D4

Neste caso o disjuntor D4, de caixa moldada, tem apenas a proteção eletromagnética. A corrente de operação do mesmo é de 130,5 A e o seu ajuste magnético foi de 1,5 vezes a corrente nominal do mesmo que tem valor de 160 A. Como se trata de um circuito de iluminação, não existirá sobrecarga, logo se a corrente ultrapassar 240 A (ajuste magnético), certamente se tratará de um caso de curto-circuito.

O Disjuntor D0 não foi alterado em relação ao caso anterior e a seletividade foi mantida.

É importante frisar que o estudo de seletividade foi feito de forma individual para cada caso. Em uma análise que se garanta a segurança geral do sistema, deve-se ajustar o disjuntor a montante de forma que este seja seletivo com todos os dispositivos de proteção a sua jusante.

3.4. Dimensionamento dos painéis

Além de todo o dimensionamento do sistema elétrico, o software DOC conta com uma ferramenta que permite gerar o esboço dos painéis elétricos. Utilizando o assistente de configuração de painel, é possível escolher as características de acordo com o projeto e ao final de todos os passos o próprio programa desenha as colunas com seus respectivos dispositivos.

Tal painel contará basicamente com 3 colunas. A primeira se destina a D0, que por se tratar de um disjuntor de caixa aberta, acaba por ocupar mais espaço. Já as duas restantes recebem os disjuntores e fusíveis responsáveis pela proteção de cada carga do sistema.

Iniciando o assistente que consiste de 3 partes, escolhe-se os disjuntores que estarão na primeira coluna e a finalidade do painel (distribuição, automação ou unidade consumidora. Logo, será selecionado somente o disjuntor D0 e um painel de distribuição. Observa-se isto na Figura 3.7.

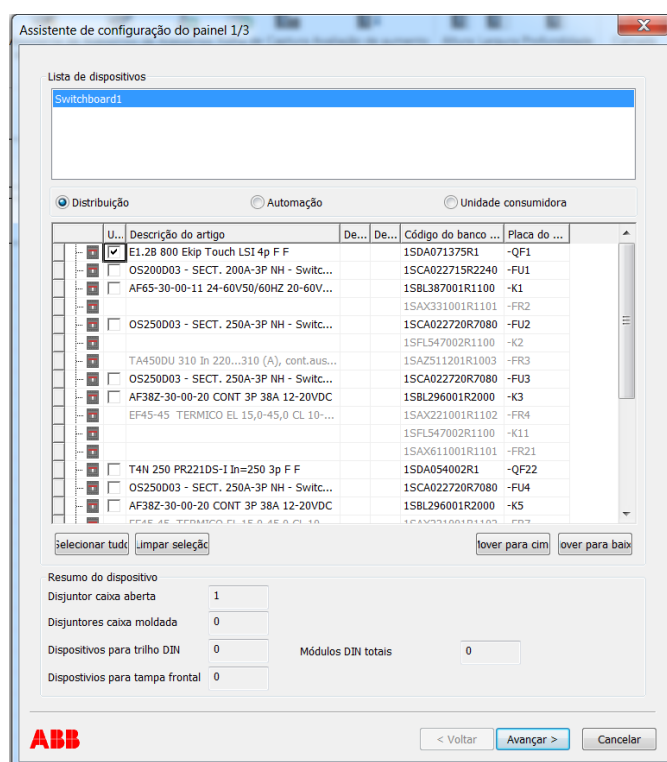


Figura 3.7 Primeira parte do Assistente de configuração do painel

Na segunda etapa do assistente, o software permite definir os seguintes aspectos do painel:

- Grau de proteção (IP);
- Nível de curto-circuito;
- Modelo e dimensões da coluna;
- Posição de instalação;
- Cobertura dos painéis.

Escolheu-se um grau de proteção 65, o que garante que o painel será a prova de pó e jatos de água. O nível de curto-circuito é 25 kA, pois é o mais próximo tanto do valor analítico quanto o do computacional, calculados

anteriormente. Cada coluna terá a dimensão de 1800x600x 900 milímetros e será instalada no chão, com o intuito de comportar todos os dispositivos. Por fim, escolheu-se uma porta de vidro com abertura para a direita. Este processo pode ser visto na Figura 3.8.

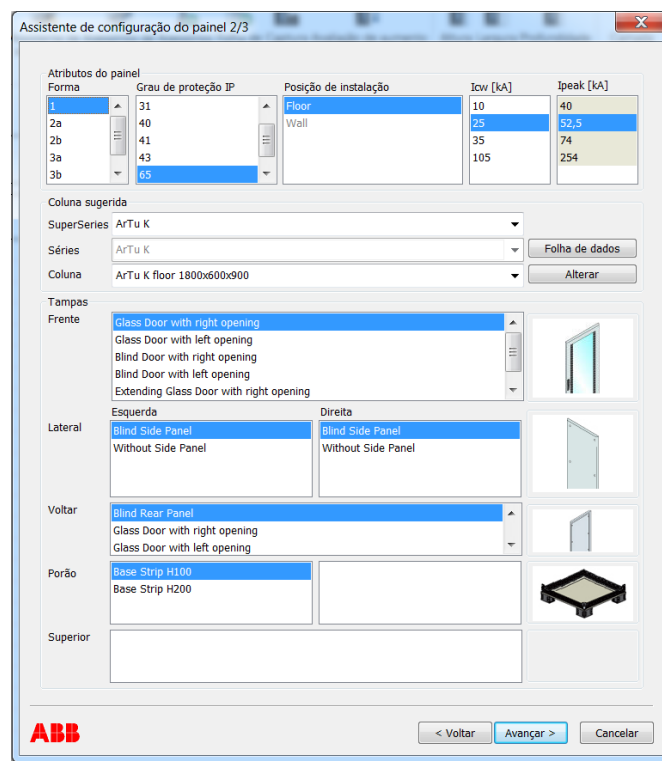


Figura 3.8 Segunda parte do Assistente de configuração do painel

Na última parte são definidos os métodos de instalação dos equipamentos e os espaços que serão utilizados. Na Figura 3.9 observa-se as opções de gerenciamentos de espaço para os dispositivos, barramentos ou uma possível reserva. Ao final deste último passo, o software desenhará o painel automaticamente.

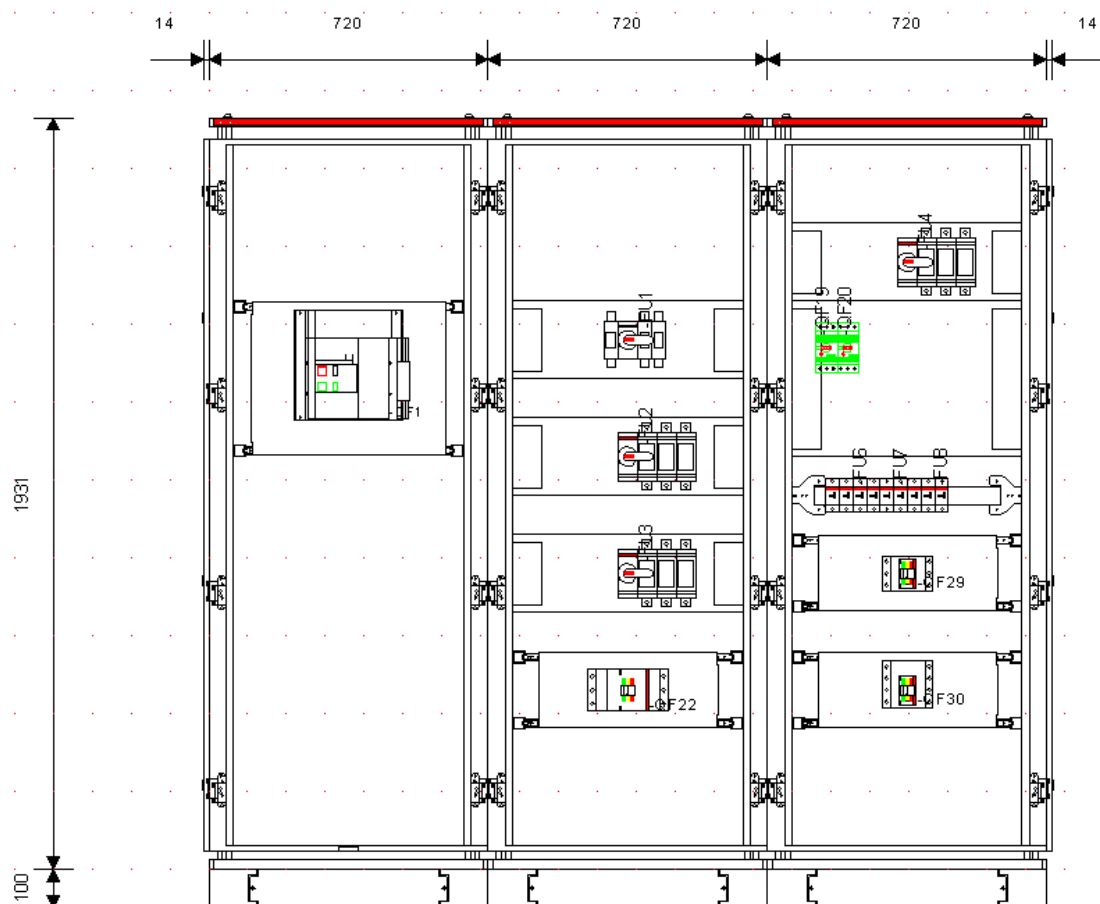


Figura 3.9 Vista frontal do painel de baixa tensão

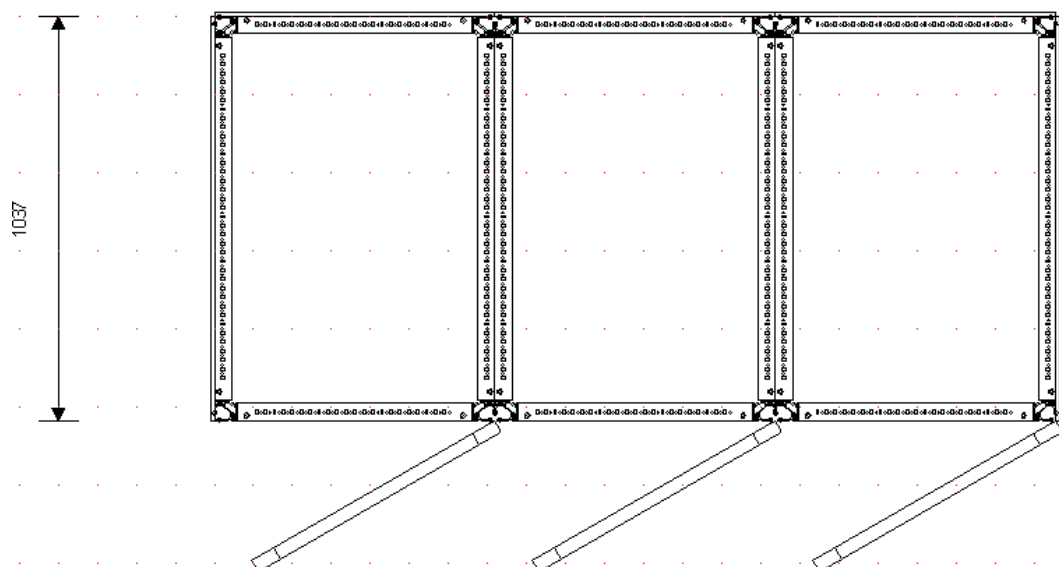


Figura 3.10 Vista superior do painel de baixa tensão

O software ainda permite, mesmo que de forma bem simples, o desenho dos barramentos que estarão dentro do painel. Não é possível fazer a ligação dos equipamentos e dos barramentos utilizando o DOC. Desta forma, dentro das possibilidades, os barramentos principais ficaram dispostos como apresentado na figura 3.11.

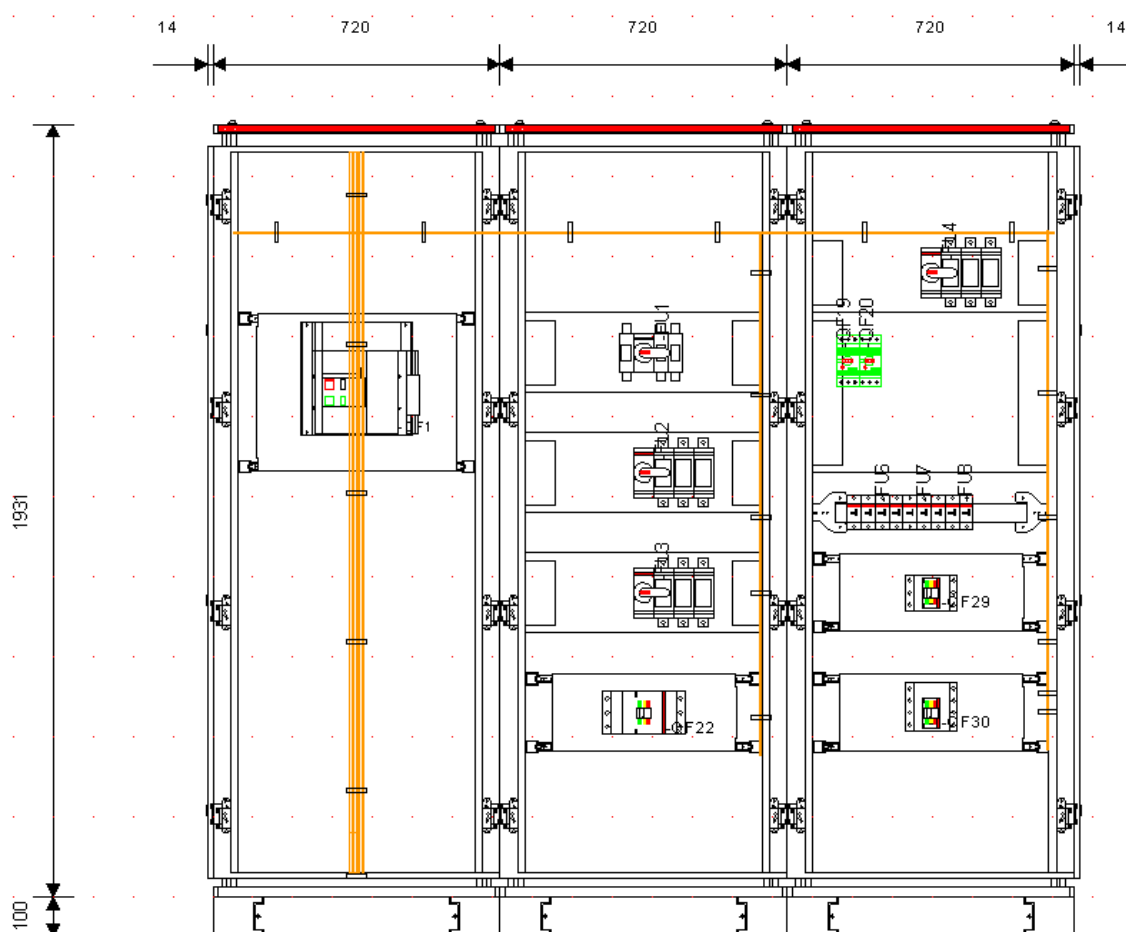


Figura 3.11 Vista frontal do painel de baixa tensão com barramentos

4. CONCLUSÕES

Como proposto, foram especificados todos os acionamentos e proteções do lado de baixa tensão desta instalação industrial, tanto pelo método analítico quanto pelo computacional. O software DOC se mostrou uma ótima ferramenta para esse trabalho, pois o acelera e o torna mais interativo uma vez que é possível ver a representação gráfica dos equipamentos e da instalação elétrica. Porém, é importante levar em consideração algumas diferenças entre os dois métodos que se apresentaram durante o estudo:

- O software DOC não permite que se determine o fator de simultaneidade do sistema. Logo foi necessário rodar a simulação uma vez com todas as cargas com fator de utilização igual a 0,7 (mesmo valor do fator de simultaneidade) para que fosse possível se especificar corretamente o transformador e os níveis de curto-circuito da instalação. Após esta simulação, foi necessário fazer várias outras com as cargas tendo o fator de utilização igual a 1, para que assim os dispositivos fossem corretamente dimensionados.
- Houveram discrepâncias entre as marcas utilizadas. Enquanto que no método analítico foram utilizados equipamentos das fabricantes ABB e WEG, o DOC trabalha apenas com a ABB, que é a sua distribuidora. Isso deixa o projetista um pouco limitado, uma vez que ele está à mercê a possibilidade de preços mais altos e falta de disponibilidade de algum dispositivo.
- Também apareceram diferenças nos relés escolhidos para os motores 1, 2 e 4. Mesmo sendo da mesma marca (ABB), o programa não permitiu que os dispositivos no método analítico fossem utilizados. Isto pode ter ocorrido pelo software ter levado em consideração fatores que não foram abordados no método analítico, como os cabos. Desta forma o DOC acabou sendo mais conservador na escolha destes relés.
- Para a proteção contra curto-circuito dos motores acionados por *soft-starter* e inversor de frequência, foram utilizados fusíveis ultra rápidos. Estes tem seu funcionamento e dimensionamento explicados detalhadamente no catálogo da WEG, o qual foi utilizado nesse trabalho. Porém, mais uma vez estes não são contemplados pelo DOC.
- Apesar de o software permitir a utilização do acionamento por chave estrela-triângulo. Preferiu-se não utilizar o mesmo no método computacional para que os motores seguissem o mesmo padrão de cálculos no programa, uma vez que os demais acionamentos estudados não podem ser simulados.

A ferramenta *Curves* presente no software se fez muito útil, possibilitando o estudo detalhado e interativo da parametrização e seletividade dos disjuntores utilizados. O dimensionamento dos painéis elétricos também foi outro ponto onde o programa se mostrou muito prático, pois além de ser muito simples é extremamente condizente com o que se vê em campo.

Por fim, é possível afirmar que o DOC é um software confiável por ter tido resultados numéricos muito próximos do método analítico. Além disso pode representar muito bem a instalação depois de montada, apesar da falta de alguns recursos.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. PRODIST. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. Módulo 8. Qualidade da Energia Elétrica. Disponível em:
<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/M%C3%B3dulo8_Revis%C3%A3o_7.pdf>

[2] ASEA BROWN BOVERI. *Coordination Tables*. Disponível em:
<[http://www02.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/bab350f7ea49a79bc125710002eb37e/\\$file/1SDC007004D0204.pdf](http://www02.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/bab350f7ea49a79bc125710002eb37e/$file/1SDC007004D0204.pdf)>

[3] ASEA BROWN BOVERI. *DOC*. Manual do usuário. Disponível em:
<<https://library.e.abb.com/public/672f6e952b16c70383257b17006bc8a7/Manual%20DOC%202.0.0.0059.pdf>>

[4] ASEA BROWN BOVERI. Linha de contadores AX. Disponível em:
<<http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK106713A2665&LanguageCode=pt&DocumentPartId=&Action=Launch>>

[5] ASEA BROWN BOVERI. *Softstarters*. Disponível em:
<<https://library.e.abb.com/public/e2e2a4b68cf737c9c1257c000029622f/1SFC132007C1601.pdf>>

[6] ASEA BROWN BOVERI. Inversores de frequência de baixa tensão. Disponível em:
<https://library.e.abb.com/public/79368835a0024427ba2f66c455d50d3f/PT_AC_S580_catalog_3AUA0000185486_RevD.pdf>

[7] ASEA BROWN BOVERI. *Fusegear*. Disponível em: <<https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1SCC317001C0201&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>>

[8] ASEA BROWN BOVERI. Disjuntores em caixa moldada e aberta. Disponível em: <<https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1SCC317001C0201&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>>

[9] ASEA BROWN BOVERI. Controle e proteção de motores. Disponível em: <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1SBC100197C16__&LanguageCode=pt&DocumentPartId=&Action=Launch>

- [10] DELAIBA, Antônio Carlos. Apostila de subestações.
- [11] DELAIBA, A.C.; NETO, H. Apostila de instalações industriais.
- [12] WEG S.A. Transformadores. Disponível em:
<http://ecatalog.weg.net/tec_cat/tech_transformadores.asp>
- [13] WEG S.A. Seleção de motores elétricos. Disponível em:
<http://ecatalog.weg.net/tec_cat/tech_motor_sel_web.asp>
- [14] WEG S.A. Disjuntor em caixa moldada ACW. Disponível em:
<<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-disjuntor-em-caixa-moldada-de-alta-capacidade-acw-50022907-catalogo-portugues-br.pdf>>
- [15] WEG S.A. Contatores linha CWM. Disponível em:
<<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-contatores-linha-cwm-50051271-catalogo-portugues-br.pdf>>
- [16] WEG S.A. Fusível aR e gL/gG. Disponível em:
<<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-fusiveis-ar-e-gl-gg-50009817-catalogo-portugues-br.pdf>>
- [17] WISE TRANSFORMADORES. Autotransformadores Trifásicos de Partida. Disponível em:
<<http://wisetransformadores.com.br/site/?pagina=produto&id=11>>