

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**

**FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ANÁLISE DOS IMPACTOS DE ACIONAMENTO DE  
MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS EM  
INSTALAÇÕES ELÉTRICAS INDUSTRIAIS UTILIZANDO  
A PLATAFORMA BIM E DYNAMO**

**Gabriel Negrisoni Garcia**

**Ilha Solteira - SP**

**2023**



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
Câmpus de Ilha Solteira

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**“ANÁLISE DOS IMPACTOS DE ACIONAMENTO DE MOTORES DE  
INDUÇÃO TRIFÁSICOS EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS INDUSTRIAIS  
UTILIZANDO A PLATAFORMA BIM E DYNAMO”**

**Gabriel Negrisoni Garcia**

Trabalho de graduação, apresentado  
à Faculdade de Engenharia de Ilha  
Solteira - Unesp, como parte dos  
requisitos para a obtenção do título  
de bacharel em Engenharia Elétrica

Prof. Dr. Fábio Bertequini Leão  
**Orientador**

**Ilha Solteira - SP**

**2023**

#### FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

G216a Garcia, Gabriel Negrisoni.  
Análise dos impactos de acionamento de motores de indução trifásicos em instalações elétricas industriais utilizando a plataforma Bim e Dynamo / Gabriel Negrisoni Garcia. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2023  
86 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) -  
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2023

Orientador: Fábio Bertequini Leão

Inclui bibliografia

1. Queda de tensão devido acionamentos de Mit. 2. Análise das correntes de curto-circuito. 3. Revit. 4. Dynamo. 5. Bim. 6. Projeto de instalações elétricas.

## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos **dezesesseis dias do mês de junho do ano de dois mil e vinte e três**, o discente *Gabriel Negrisoni Garcia*, matriculado sob o nº 152054073, tendo como banca examinadora seu orientador, o *Prof. Dr. Fábio Bertequini Leão*, o *Prof. Dr. Jean Marcos de Souza Ribeiro* e o *Doutorando Rafael Augusto de Araujo*, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "Análise dos Impactos de Acionamento de Motores de Indução Trifásicos em Instalações Elétricas Industriais utilizando a Plataforma Bim e Dynamo" obtendo a nota 10 (DEZ) e conceito APROVADO.

*Fábio Bertequini Leão*

Fábio Bertequini Leão

- Orientador -

*Gabriel Negrisoni Garcia*

Gabriel Negrisoni Garcia

- Discente -

*Jean Marcos de Souza Ribeiro*

Jean Marcos de Souza Ribeiro

- Membro da Banca -

*Rafael Augusto de Araujo*

Rafael Augusto de Araujo

- Membro da Banca -

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço aos meus pais, José e Denisia, pelo esforço dispendido para que eu pudesse ter uma educação de qualidade, não importando o sacrifício necessário.

À minha companheira, Taciana, pela compreensão e paciência durante o desenvolvimento deste trabalho e de toda graduação.

A todos os docentes e técnicos da FEIS, que dispuseram de tempo e paciência para que nós, discentes, pudéssemos adquirir conhecimentos de incríveis profissionais.

Ao meu orientador, Fábio Bertequini, pelo suporte neste Trabalho de Conclusão de Curso.

Aos amigos que levo para vida e as boas lembranças em decorrência de suas amizades.

E, por fim, a toda a comunidade da UNESP, que de alguma forma contribuiu para que eu pudesse evoluir como pessoa e como profissional.

*“Quando tudo parece estar indo contra  
você, lembre-se que o avião decola contra o  
vento, não a favor dele”*

*Henry Ford*

## RESUMO

Este trabalho apresenta uma ferramenta capaz de determinar as quedas de tensões provenientes de partidas de motores de indução trifásicos em instalações elétricas. No estudo, aplicou-se a análise das correntes de curto-circuito, em especial a corrente de curto-circuito simétrica, que consiste em somar todas as impedâncias proeminentes, desde o ponto de entrega da concessionária até o motor em partida. Essa análise torna-se necessária em vista que diversos equipamentos possuem limites mínimos de tensões para operar, como contadores, motores síncronos e assíncronos e até sistemas de iluminação. Tem-se também limites normativos, como indicado na norma brasileira de instalações elétricas de baixa tensão. Para isso, emprega-se o Revit, um *software* pertencente ao conceito BIM e que vem ganhando cada vez mais espaço no mercado de desenvolvimento de projetos. Em confluência está o Dynamo, um *software* de programação visual que permite interações entre o projeto desenvolvido no Revit com rotinas conectadas à dados externos. Desenvolve-se também elementos que estarão inseridos no modelo BIM, também chamados de famílias, que precisam ser devidamente parametrizadas para que possa ter a correta comunicação com os demais pares. Para aplicar os conceitos e ferramentas desenvolvidas, utilizou-se de uma instalação elétrica industrial, e, após estar devidamente configurado e dimensionado previamente, executa-se a rotina, selecionando o motor partindo e o ponto de interesse, que apresentará a queda de tensão devido ao acionamento da máquina. Ao observar os resultados obtidos pela simulação e pelo método desenvolvido manualmente, constatou-se que os resultados obtidos são fidedignos à teoria, comprovando a capacidade de realizar a análise de forma rápida e eficiente, permitindo ao projetista que possa escolher a melhor configuração do sistema elétrico.

**Palavras-chaves:** Queda de tensão devido acionamentos de MIT, Análise das correntes de curto-circuito, Revit, Dynamo, BIM, Projeto de instalações elétricas.

## **ABSTRACT**

This work presents a tool capable of determining the voltage drops of three-phase induction motor starters in an electrical installation. In the study, the analysis of short-circuit currents was applied, in particular the symmetrical short-circuit current, which consists of summing all the prominent impedances, from the delivery point of the conduit to the starting motor. This analysis becomes necessary in view of the fact that several equipment have minimum voltage limits to operate, such as contactors, synchronous and asynchronous motors and even lighting systems. There are also normative limits, as indicated in the Brazilian standard for low voltage electrical installations. For this, Revit was used, a software belonging to the BIM concept and which has been gaining more and more space in the project development market. In confluence is Dynamo, a visual programming software that allows interaction between the project developed in Revit and the routines connected to external data. In addition, elements were developed, which will be inserted in the BIM model, also called families that need to be properly parameterized so that they can have a correct communication with the other pairs. To apply the improved concepts and tools, a fictitious industry was created and, after being properly configured and previously sized, the routine was executed, selecting the starting motor and the point of interest, which will present the voltage drop due to the activation of the machine. When observing the results obtained by the simulation and by the manually developed method, it is verified that the data obtained are faithful to the theory, proving the ability to carry out an analysis quickly and efficiently, allowing the designer to choose the best configuration of the electrical system.

**Keywords:** Voltage drop due to MIT activations, Analysis of short-circuit currents, Revit, Dynamo, BIM, Design of electrical installations.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1-Circuito equivalente do motor de indução trifásico.....                          | 18 |
| Figura 2-Circuito equivalente do motor conectado na Rede Elétrica.....                    | 18 |
| Figura 3-Diagrama de fasores de sequência positiva .....                                  | 19 |
| Figura 4-Diagrama de fasores de sequência negativa.....                                   | 20 |
| Figura 5-Diagrama de fasores de sequência zero .....                                      | 20 |
| Figura 6-Circuito de sequências positiva, negativa e zero .....                           | 22 |
| Figura 7-Diagrama de impedâncias.....                                                     | 25 |
| Figura 8-Vista tridimensional do motor WEG IR3 Premium II Polos.....                      | 38 |
| Figura 9-Instalações elétricas até os motores .....                                       | 38 |
| Figura 10-Entrada de energia concessionária .....                                         | 39 |
| Figura 11-Exemplo de programação em Dynamo .....                                          | 40 |
| Figura 12-Configuração da família do motor trifásico .....                                | 42 |
| Figura 13-Parametrização das dimensões físicas do motor.....                              | 43 |
| Figura 14-Elemento Conector.....                                                          | 44 |
| Figura 15-Configuração de funcionamento do motor .....                                    | 45 |
| Figura 16-Quadro elétrico.....                                                            | 46 |
| Figura 17-Entrada de energia com transformador em poste.....                              | 47 |
| Figura 18-Configurações dos condutores elétricos.....                                     | 49 |
| Figura 19-Padrão de eletrodutos.....                                                      | 49 |
| Figura 20-Configuração do sistema de distribuição interno da indústria.....               | 50 |
| Figura 21-Informações iniciais de projeto.....                                            | 50 |
| Figura 22-Parâmetros de projeto para impedâncias em pu .....                              | 51 |
| Figura 23-Indicação visual em projeto .....                                               | 53 |
| Figura 24-Modelagem Civil .....                                                           | 54 |
| Figura 25-Infraestrutura elétrica alimentando os motores .....                            | 55 |
| Figura 26-Diagrama de comunicação entre <i>softwares</i> – Excel, Dynamo e Revit<br>..... | 56 |
| Figura 27-Importação de uma planilha para o Dynamo .....                                  | 56 |
| Figura 28-Distribuição de listas, sub-listas e elementos .....                            | 57 |
| Figura 29-Ordenamento dos valores em Dynamo .....                                         | 58 |
| Figura 30-Importação dos valores dos parâmetros no modelo BIM .....                       | 59 |

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 31-Indicação de partida e análise do mesmo motor.....                     | 60 |
| Figura 32-Vista geral da programação realizada em Dynamo.....                    | 61 |
| Figura 33-Motor M1-CCM1 durante a partida direta do M1-CCM5.....                 | 65 |
| Figura 34-Motor M1-CCM1 durante a partida Estrela-Triângulo do M1-CCM5.          | 65 |
| Figura 35-Motor M1-CCM1 durante a partida chave-compensadora 65% do M1-CCM5..... | 65 |
| Figura 36-Motor M1-CCM5 durante a partida direta.....                            | 67 |
| Figura 37-Motor M1-CCM5 durante a partida Estrela-Triângulo .....                | 67 |
| Figura 38-Motor M1-CCM5 durante a partida Chave-compensadora 65% .....           | 67 |
| Figura 39-Diagrama Unifilar Geral .....                                          | 82 |
| Figura 40-Diagrama Unifilar CCM-1 .....                                          | 83 |
| Figura 41–Diagrama Unifilar CCM-2 .....                                          | 84 |
| Figura 42-Diagrama Unifilar CCM-3 .....                                          | 85 |
| Figura 43-Diagrama Unifilar CCM-4 .....                                          | 86 |
| Figura 44–Diagrama Unifilar CCM 5.....                                           | 87 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1-Dados apresentados nos Painéis.....                                                                                                                                                        | 52 |
| Tabela 2-Distribuição dos Motores na indústria e suas respectivas potências.                                                                                                                        | 62 |
| Tabela 3-Relação de distâncias .....                                                                                                                                                                | 64 |
| Tabela 4-Queda de tensão no Motor 1 do CCM1.....                                                                                                                                                    | 64 |
| Tabela 5-Queda de tensão nos terminais do Motor 1 do CCM5 .....                                                                                                                                     | 66 |
| Tabela 6-Resistencia e reatância dos condutores de cobre (valores médios) .                                                                                                                         | 77 |
| Tabela 7-Dados característicos de transformadores trifásicos em óleo para<br>instalação interior ou exterior – classe 15kV-primário em estrela ou triângulo e<br>secundário em estrela – 60hz ..... | 78 |
| Tabela 8-Capacidade de corrente para barras retangulares de cobre com<br>pintura .....                                                                                                              | 79 |
| Tabela 9-Capacidade de corrente para barras retangulares de cobre sem<br>pintura .....                                                                                                              | 80 |

## **SIGLAS E ABREVIações**

Ampère (A): Unidade de medida no Sistema Internacional para Corrente Elétrica

BIM: Building, Information and Modelling

CCM: Centro de Controle de Motores

CPFL: Companhia Paulista de Força e Luz

ENEL: Enel Distribuição São Paulo

i: Corrente, nas bases selecionadas, dada em pu

I: Corrente eficaz, dada em Ampère

MEP: Mechanical, electrical, and plumbing

MIT: Motor de indução trifásico

Ohm ( $\Omega$ ): Unidade de medida no Sistema Internacional para impedância (resistência, reatância indutiva e reatância capacitiva)

Procel: Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

Pu: Valor por unidade

QDG: Quadro de Distribuição Geral

S: Potência aparente, dada em Volt-Ampère

s: Potência aparente, nas bases selecionadas, dada em pu

v: Tensão, nas bases selecionadas, dada em pu

V: Tensão eficaz, dada em Volt

Volt (V): Unidade de medida no Sistema Internacional para Tensão Elétrica

Volt-Ampère (VA): Unidade de medida no Sistema Internacional para Potência Aparente

Watts (W): Unidade de medida no Sistema Internacional para Potência Ativa

Z: Impedância, dada em Ohm

z: Impedância, nas bases selecionadas, dada em pu

## SUMÁRIO

|                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. INTRODUÇÃO.....                                                                            | 13 |
| 2. CÁLCULO DA CORRENTE E DA QUEDA DE TENSÃO NA PARTIDA DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS ..... | 16 |
| 2.1. CÁLCULO DA CORRENTE NA PARTIDA DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS.....                     | 16 |
| 2.2. CÁLCULO DA QUEDA DE TENSÃO NA PARTIDA DE UM ÚNICO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO .....       | 24 |
| 2.3. MÉTODOS DE PARTIDA.....                                                                  | 35 |
| 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....                                                               | 37 |
| 3.1. MATERIAIS E MÉTODOS.....                                                                 | 37 |
| 3.1.1. FAMÍLIAS DESENVOLVIDAS.....                                                            | 41 |
| 3.1.2. CONFIGURAÇÕES E PARAMETRIZAÇÕES DO MODELO BIM .....                                    | 48 |
| 3.1.3. CONFIGURAÇÃO PARA O DIMENSIONAMENTO AUTOMÁTICO ..                                      | 51 |
| 3.1.4. ANÁLISE DA PARTIDA DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO .....                                 | 53 |
| 3.1.5. MODELAGEM CIVIL E ELÉTRICA PARA SIMULAÇÃO .....                                        | 54 |
| 3.1.6. PROGRAMAÇÃO DYNAMO.....                                                                | 55 |
| 3.2. RESULTADOS OBTIDOS COM AS SIMULAÇÕES.....                                                | 62 |
| 3.2.1. SIMULAÇÃO .....                                                                        | 63 |
| 4. CONCLUSÕES.....                                                                            | 69 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                                                              | 70 |
| APÊNDICE A – CÁLCULO TEÓRICO .....                                                            | 72 |
| APÊNDICE B – TABELAS DE REFERÊNCIA.....                                                       | 77 |
| APÊNDICE C – CATÁLOGO MOTOR WEG.....                                                          | 81 |
| APÊNDICE D - DIAGRAMA UNIFILAR DA INDÚSTRIA.....                                              | 82 |

## 1. INTRODUÇÃO

De acordo com a Confederação Nacional da Indústria, a atividade industrial possui enorme potencial para gerar riquezas e inovações e está no centro de todo planejamento das nações mais desenvolvidas para retomar o crescimento econômico após a crise sanitária do COVID-19 e do conflito na Europa. Estima-se que os países desenvolvidos, como Estados Unidos, China, Japão, Coreia do Sul, Alemanha e outros destinará para o setor industrial cerca de US\$ 5 trilhões, necessitando também ao Brasil planos para retomada do crescimento, de forma que seu fortalecimento gerará oportunidades de trabalho e renda para todos os brasileiros (CNI, 2022). No centro dessa recuperação, tem-se os motores elétricos, mais especificamente os motores de indução trifásicos, responsáveis por movimentar a indústria e, portanto, um dos pilares para a retomada do crescimento (WEG, 2023).

A aplicabilidade de motores de indução trifásicos na indústria é vasta, podendo executar diversas tarefas que exijam a conversão da energia elétrica para energia mecânica, desde centrífugas, motobombas, ventiladores e diversas outras aplicações. Devido a sua alta robustez, baixo custo e simplicidade na operação, o uso massivo desse tipo de motor se torna cada vez mais presente em uma instalação industrial, de forma que o setor industrial brasileiro consome cerca de 40% da energia elétrica do país e 70% desse consumo é de responsabilidade dos motores elétricos (PROCEL, 2017). Por consequência, surge também adversidades, que necessitam ser consideradas durante o desenvolvimento de um projeto elétrico. Uma das mais impactantes e de maior notoriedade é a queda de tensão durante a partida de um MIT.

Um dos instantes mais críticos é a partida de motores elétricos, pois nesse momento, os motores solicitam uma corrente muito maior do que a de serviço contínuo, devido à mudança do estado de inércia do motor. No instante da partida, essa corrente costuma alcançar o valor de pico de seis a oito vezes a corrente nominal do motor (FRANCHI, 2008). Com isso, os dimensionamentos feitos para atender a potência solicitada pelo motor, agora são solicitados, por um curto período, a atenderem a corrente de partida. Devido a isso, a queda de tensão pode exceder os limites operacionais e normativos, podendo provocar uma série de distúrbios em equipamentos de comando e proteção e até a iluminação.

Os dispositivos de controle, tais como os contadores, têm a capacidade de funcionar mesmo diante de uma queda de tensão, desde que estejam dentro dos valores estabelecidos pelas normas ou especificações do fabricante. No entanto, os motores síncronos e assíncronos podem apresentar problemas como perda de sincronismo ou insuficiência de torque quando submetidos a tensões abaixo dos limites estabelecidos.

Segundo a NBR 5410, a queda de tensão durante a partida de um motor não deve ultrapassar 10% de sua tensão nominal no ponto de instalação do dispositivo de partida correspondente. Pode-se adotar uma queda de tensão superior a 10% em casos específicos, quando são acionadas cargas de alto conjugado resistente, desde que a tensão mínima das bobinas e da chave de partida seja inferior à tensão resultante durante a partida do motor (MAMEDE, 2017).

Uma das regras fundamentais para garantir uma vida longa ao motor, reduzir custos operacionais e proporcionar à equipe de manutenção da indústria uma rotina diária tranquila é a utilização de um sistema de partida eficiente. Com isso, a elaboração um projeto elétrico industrial deve ser realizado considerando as necessidades de cada aplicação, selecionando os métodos de partidas com base em funcionalidade e em custo final do sistema.

Levantadas essas considerações, este trabalho consiste em aplicar o método da queda de tensão a partir do critério de curto-circuito, calculando a impedância equivalente durante a partida e pôr fim a corrente de partida, de forma que seja possível analisar os impactos em uma instalação industrial.

Para isso, é utilizado o Revit, *software* pertencente a plataforma BIM, que possibilita desenvolver um projeto elétrico e parametrizar, permitindo manipulações algébricas através da programação em Dynamo. Neste último se construiu uma ferramenta capaz de simular uma indústria e aplicar os conceitos de engenharia, concedendo ao usuário a capacidade de desenvolver uma instalação ao mesmo tempo que analisa a queda de tensão e possibilitando a utilização de métodos de partida que permita atender os limites estabelecidos e com a melhor otimização.

A motivação principal para a utilização do BIM é devido a tendência do mercado, com legislações próprias surgindo, como o Decreto N° 9.983, de agosto de 2019, que dispõe sobre planos para disseminar o BIM no Brasil (BRASIL, 2019).

## **2. CÁLCULO DA CORRENTE E DA QUEDA DE TENSÃO NA PARTIDA DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS**

Neste capítulo serão introduzidos os conceitos teóricos que direcionarão o trabalho. Para isso, dividiu-se em três seções que apresentam os métodos e considerações necessárias.

A primeira, consiste em equacionar a corrente de curto-circuito simétrica, responsável pelos altos valores de pico do motor de indução trifásico durante a partida. Para essa dedução, utiliza-se o circuito equivalente do motor de indução que, durante a partida, possui baixos valores de impedância. Aplica-se também o conceito das componentes simétricas, que com as considerações necessárias, permite encontrar uma relação entre a corrente de partida e a impedância equivalente do sistema.

A segunda parte consiste em equacionar as impedâncias do sistema, imprescindíveis para determinar a corrente de partida do motor. Para isso, utiliza-se o conceito de sistema por unidade, consistindo na escolha de valores de base a fim de reduzir a complexidade dos cálculos. Nesta etapa, soma-se todos as impedâncias dos componentes elétricos que estão diretamente ligados ao motor, desde o ponto de entrada de energia da instalação até os terminais do motor.

Na terceira parte apresenta-se os métodos de partida, a influência que eles acarretam durante o acionamento e suas vantagens e desvantagens.

### **2.1. CÁLCULO DA CORRENTE NA PARTIDA DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS**

Determinar as correntes de curto-circuito nas instalações elétricas é imprescindível para desenvolver projetos elétricos e ajustar as proteções e coordenações dos seus elementos. As correntes de curto-circuito atingem grandes valores, porém a duração se limita a frações de segundo. Os valores dessas correntes são encontrados a partir da somatória de impedância, desde a fonte geradora até o ponto de defeito. Os valores máximos, ou valores de pico, abrange entre 10 e 100 vezes da corrente nominal, podendo provocar danos que estão dependentes à intervenção correta dos dispositivos de proteção. Em instalações convencionais, é possível identificar antecipadamente alguns pontos de importância fundamental, como no ponto de entrega da concessionária, em

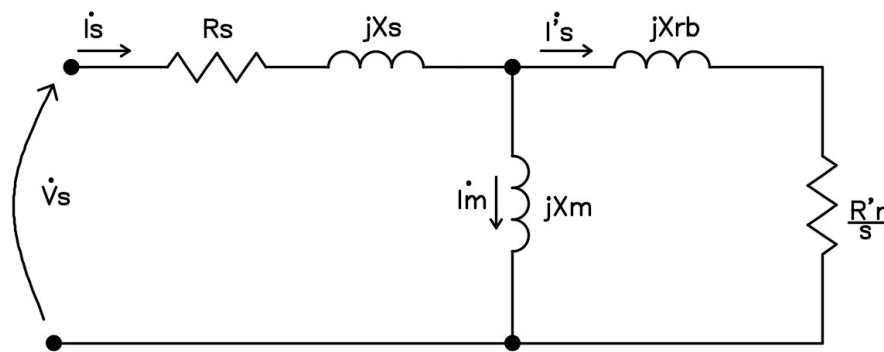
barramentos dos quadros, nos circuitos dos alimentadores, em equipamentos transformadores e motores (MAMEDE, 2017).

Considera-se uma fonte de curto-circuito o dispositivo elétrico que contribui com a corrente de curto, entre eles pode-se destacar os geradores, condensadores síncronos e motores de indução. (MAMEDE, 2017).

Existem dois tipos de variações de curto-circuito. O primeiro é que resulta em maiores valores de corrente são o do tipo franco. Ocorrem por exemplo quando o condutor de fase faz contato direto com algum tipo de massa aterrada, que pode ser desde a carcaça de um motor de indução até a parte metálica de um quadro de comando. Há também curtos-circuitos que são denominados de alta impedância, quando a corrente é igual ou inferior a nominal da carga. (MAMEDE, 2017).

O motor de indução trifásico, durante a partida, possui características similares a um curto-circuito do tipo franco, mais especificamente do tipo trifásico com contato a terra (equilibrado). Esse aspecto particular do motor assíncrono na partida ocorre devido ao escorregamento ser unitário, tornando a resistência do rotor muito pequena, e por consequência, torna a corrente de partida muito elevada quando comparada à nominal. Na Figura 1, apresenta-se o esquemático do circuito equivalente de um motor de indução trifásico. Nela é possível verificar que quando o escorregamento é unitário (indicado pela variável “s”), a resistência do rotor (indicado pela variável “ $R'r$ ”) torna-se muito pequena. No caso oposto, quando o motor trabalha à vazio, o escorregamento tende a zero, tornando a resistência do rotor muito elevada, ao ponto de considerar que é um caminho de alta impedância e que não haverá corrente rotórica.

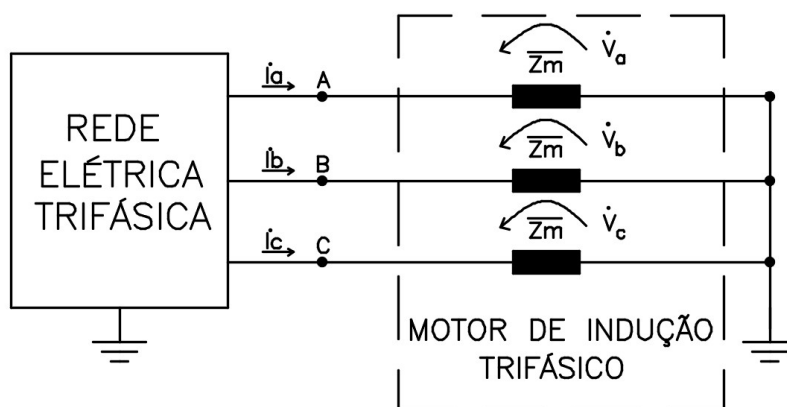
Figura 1 - Circuito equivalente do motor de indução trifásico



(FITZGERALD, 2006)

A análise da corrente de curto-circuito trifásica equilibrada passa pelo estudo das componentes sequenciais, que consiste em: componente simétrica de sequência zero, componente simétrica de sequência positiva e componente simétrica de sequência negativa. Também se adota os circuitos equivalentes de Thévenin, em vista que para o sistema elétrico, as reatâncias e resistências do motor são vistas apenas com uma única impedância (KINDERMANN, 1997). Na Figura 2 apresenta-se um circuito que equivale à ligação do motor no sistema de distribuição trifásico. Nele pode-se verificar que todo o circuito interno do motor se reduz a uma única impedância para cada fase.

Figura 2-Circuito equivalente do motor conectado na Rede Elétrica



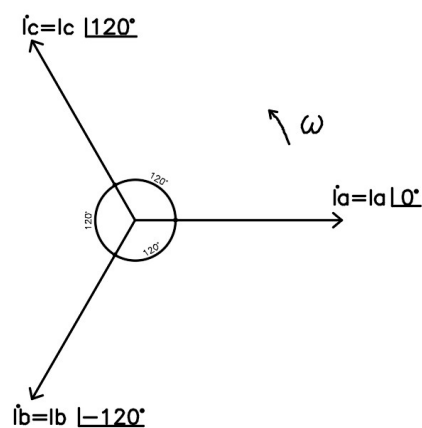
Fonte: Própria do autor

Para a ligação em estrela do motor e com um sistema equilibrado e cargas simétricas, a corrente de linha e de fase são iguais (ROBBA, 1996). Com isso,

aplica-se a análise das três componentes simétricas em cada corrente, que consiste em verificar a defasagem dos módulos à uma frequência angular  $\omega$  ( $\omega=2\pi f$ ).

A sequência positiva é composta por três fasores de módulos iguais e defasados em  $120^\circ$ . Considerando que a corrente da fase A seja a referência (está no  $0^\circ$  elétricos), a corrente da fase C está defasada 120 graus elétricos positivos da corrente da fase A e a corrente da fase B defasada 120 graus elétricos negativos da fase A. Tem-se por consequência o diagrama de fasores para as correntes, indicado na Figura 3 (MARDEGAN, 2016).

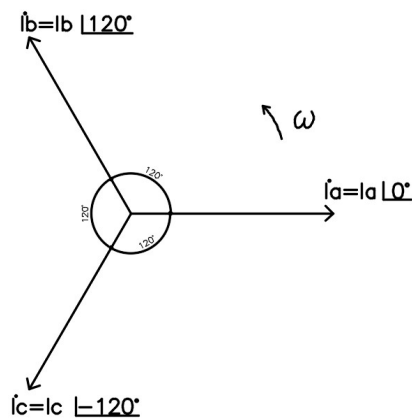
Figura 3-Diagrama de fasores de sequência positiva



(MARDEGAN, 2016)

A sequência negativa é composta também por três fasores de módulos iguais e defasados em  $120^\circ$ . A consideração que a corrente da fase A seja a referência é mantida, porém a corrente da fase C está defasada 120 graus elétricos negativos da A e a corrente da fase B defasada 120 graus elétricos positivos da fase A, resultando no diagrama conforme Figura 4 (MARDEGAN, 2016).

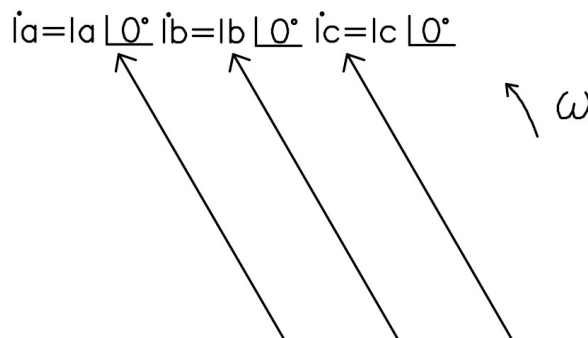
Figura 4-Diagrama de fasores de sequência negativa



(MARDEGAN, 2016)

Por fim, tem-se a sequência zero, que também é composta por três fasores de módulos iguais, porém não há defasagem entre eles. Na Figura 5 é apresentado o diagrama fasorial dessa sequência. (MARDEGAN, 2016).

Figura 5-Diagrama de fasores de sequência zero



(MARDEGAN, 2016)

Para equacionar essas três condições, necessita-se de um operador para poder representar a defasagem elétrica. Este operador é nomeado como  $\alpha$  e é definido como um vetor unitário com ângulo de  $120^\circ$ . Ele pode ser expresso em quatro formas: polar, trigonométrica, cartesiana e exponencial. Porém, mais comumente é representado ou na forma polar ou na forma cartesiana:

$$\alpha = 1 \angle 120^\circ \text{ (Forma Polar)} \quad (1)$$

$$\alpha = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \text{ (Forma Cartesiana)} \quad (2)$$

Verifica-se também que o quadrado deste operador resulta em um vetor com módulo unitário, porém com um ângulo de  $-120^\circ$ . Assim:

$$\alpha^2 = 1\angle -120^\circ \text{ (Forma Polar)} \quad (3)$$

Assim, pode-se escrever as correntes das três fases nas três sequências aplicando o operador  $\alpha$ :

$$i_a = i_{a0} + i_{a1} + i_{a2} \quad (4)$$

$$i_b = i_{b0} + \alpha^2 i_{b1} + \alpha i_{b2} \quad (5)$$

$$i_c = i_{c0} + \alpha i_{c1} + \alpha^2 i_{c2} \quad (6)$$

Os subscritos em cada variável de corrente (0, 1 e 2) representa as componentes simétricas de sequência zero, sequência positiva e sequência negativa, respectivamente.

Como esses sistemas são lineares, pode-se escrever em forma de matrizes. Logo, tem-se:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot i_0 + \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha^2 \\ \alpha \end{bmatrix} \cdot i_1 + \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha \\ \alpha^2 \end{bmatrix} \cdot i_2 \Rightarrow \\ \Rightarrow \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_0 \\ i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

Para encontrar as componentes simétricas, necessita-se realizar a divisão da matriz das correntes de fase com a da matriz que contém os operadores  $\alpha$ . Para isso, é necessário multiplicá-las, porém a que contém os operadores precisa ser transposta.

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (8)$$

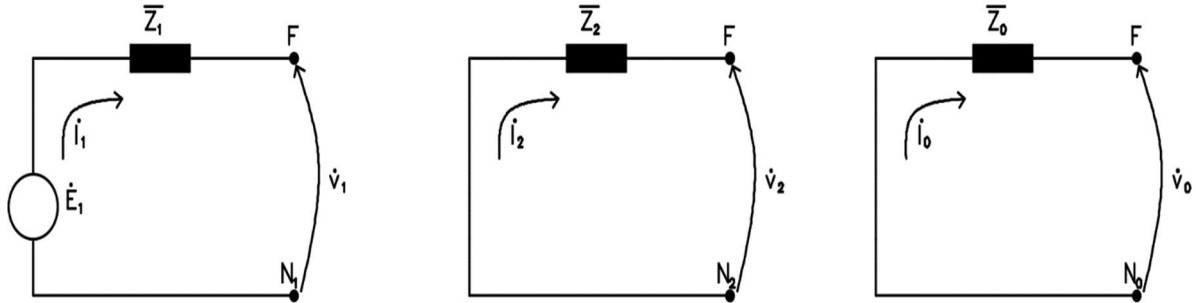
O fator  $1/3$  ocorre devido à transposição da matriz, e foi colocado em evidência, já que aparece em todos os elementos da matriz. Para a tensão, as

mesmas considerações à corrente podem ser aplicadas. Assim, tem-se:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} \quad (9)$$

Na Figura 6, apresenta-se os circuitos equivalentes para as três seqüências de rede. Nela pode-se perceber que existe uma fonte apenas para a seqüência positiva, em vista que as fontes são projetadas para gerarem as tensões e correntes apenas na seqüência positiva (MARDEGAN, 2016).

Figura 6-Circuito de seqüências positiva, negativa e zero



(MARDEGAN, 2016)

Com isso, aplica-se a primeira lei de Ohm nos circuitos equivalentes apresentados na Figura 6, de forma que, algebricamente, tem-se:

$$\dot{V}_1 = \dot{E}_1 - \bar{Z}_1 \cdot \dot{I}_1 \quad (10)$$

$$\dot{V}_2 = -\bar{Z}_2 \cdot \dot{I}_2 \quad (11)$$

$$\dot{V}_0 = -\bar{Z}_0 \cdot \dot{I}_0 \quad (12)$$

Considerando o sistema da Figura 2, e conforme a equação (8) as correntes das componentes simétricas podem ser descritas através da matriz de corrente, que correlaciona as correntes das fases com as correntes das componentes:

$$\dot{I}_0 = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c) = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + \alpha^2 \dot{I}_a + \alpha \dot{I}_a) = \frac{1}{3} \dot{I}_a (1 + \alpha^2 + \alpha) \quad (13)$$

$$\dot{I}_2 = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + \alpha^2 \dot{I}_b + \alpha \dot{I}_c) = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + \alpha^2 \alpha^2 \dot{I}_a + \alpha^2 \dot{I}_a) = \frac{1}{3} \dot{I}_a (1 + \alpha + \alpha^2) \quad (14)$$

Como:  $1 + \alpha^2 + \alpha = 1 + \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) + \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = 0$ , tem-se que:

$$I_0 = 0 \quad (15)$$

$$I_2 = 0 \quad (16)$$

Para a tensão, aplica-se as equações (11) e (12), de forma que:

$$\dot{V}_2 = -\bar{Z}_2 \cdot \dot{I}_2 \therefore \dot{V}_2 = 0 \quad (17)$$

$$\dot{V}_0 = -\bar{Z}_0 \cdot \dot{I}_0 \therefore \dot{V}_0 = 0 \quad (18)$$

Como a corrente da fase A é igual a soma das três componentes simétricas, e a componente simétrica da sequência negativa e de sequência zero são iguais a zero, tem-se que:

$$I_a = (I_0 + I_1 + I_2) = I_1 \quad (19)$$

O mesmo raciocínio é empregado para a tensão:

$$\dot{V}_a = (\dot{V}_0 + \dot{V}_1 + \dot{V}_2) = \dot{V}_1 \quad (20)$$

Como visto na Figura 2, a tensão  $\dot{V}_a$  também pode ser escrita através da relação de corrente e impedância. Também se considera que  $I_a = I_1$ . Assim:

$$\dot{V}_a = \bar{Z}_m \cdot \dot{I}_1 \quad (21)$$

Aplicando a equação (21) na equação (10), tem-se:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 = \dot{E}_1 - \bar{Z}_1 \cdot \dot{I}_1 &\Rightarrow \dot{V}_a = \dot{E}_1 - \bar{Z}_1 \cdot \dot{I}_1 \Rightarrow \\ \Rightarrow \bar{Z}_m \cdot \dot{I}_1 = \dot{E}_1 - \bar{Z}_1 \cdot \dot{I}_1 &\Rightarrow \dot{I}_1 = \dot{I}_a = \dot{I}_{cs} = \frac{\dot{E}_1}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_m} \end{aligned} \quad (22)$$

Logo, pode-se dizer que, a corrente de curto-circuito trifásica simétrica ( $\dot{I}_{cs}$ ) é equivalente a corrente demandada pelo motor na partida desde que a impedância do motor seja pequena nesta condição. Esta corrente é dada pela tensão de sequência positiva da fonte da rede elétrica dividida pela somatória de impedâncias de sequência positiva inclusive a impedância do motor.

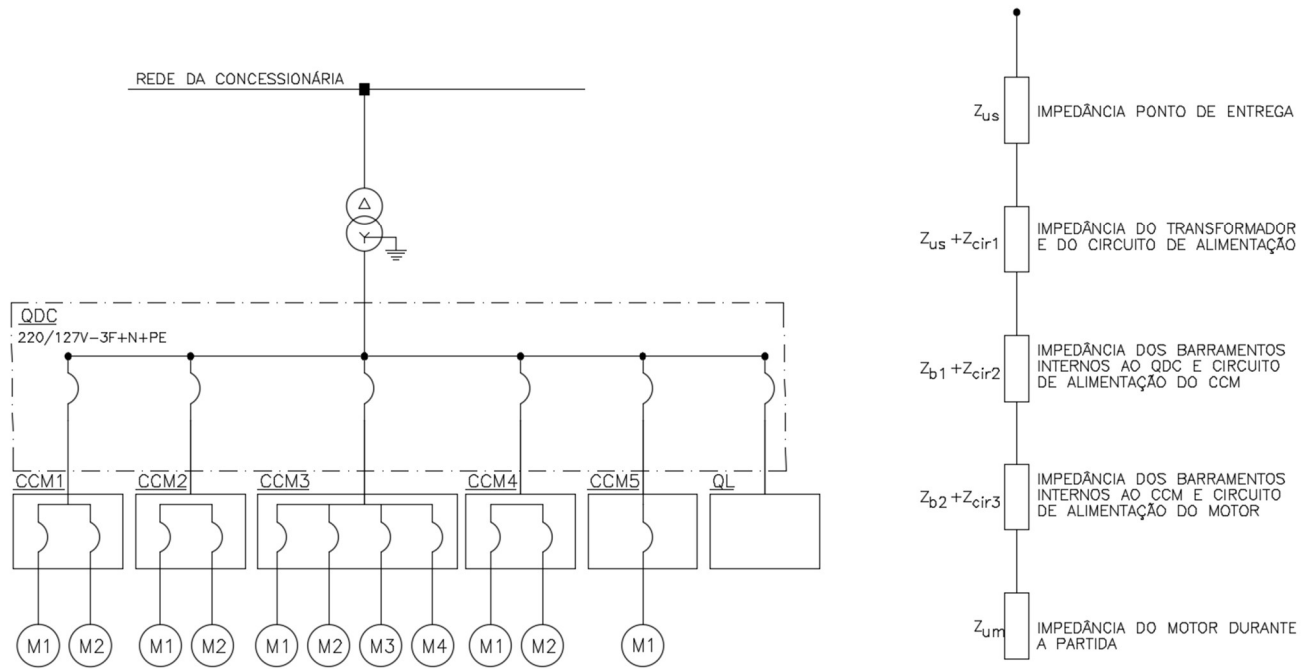
## **2.2. CÁLCULO DA QUEDA DE TENSÃO NA PARTIDA DE UM ÚNICO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO**

Durante a partida de um motor de indução, a corrente solicitada por grandes máquinas impacta diretamente outras partes da instalação, tornando prática o acionamento de motores individualmente e em instantes diferentes. A partir desta condição pode-se elaborar uma análise do impacto da partida na instalação e que pode direcionar para qual a melhor opção de partida.

Conforme apresentado na seção 2.1 , a análise das perturbações durante o acionamento pode ser verificada utilizando a análise de curto-circuito, que consiste em calcular a impedância equivalente total de sequência positiva e proceder para o cálculo da componente simétrica de curto-circuito. A impedância levantada, corresponde a somatória desde o ponto de entrega pela concessionária de energia até o estator do motor, que durante a partida, apresenta apenas valor de reatância. Neste caminho, é somado a impedância dos barramentos, dos enrolamentos do transformador e dos circuitos.

Na Figura 7 são apresentadas de forma reduzida as impedâncias envolvidas no processo de acionamento de uma máquina assíncrona. Assim, no estudo da partida, cada impedância deve ser analisada e computada para que o resultado obtido possa ser o mais fidedigno possível. Em algumas ocasiões, o valor apresentado do trecho é muito pequeno comparado aos demais, tornando possível ser desconsiderado no cálculo.

Figura 7-Diagrama de impedâncias



Fonte: Própria do Autor

O valor de impedância no ponto de entrega da concessionária é fornecido em sequência positiva ou em sequência zero dependendo da conexão do transformador. Em alguns casos, poderá ser fornecido a potência de curto-circuito ou a corrente de curto-circuito, tornando o projetista responsável pelo cálculo da impedância. Para o desenvolvimento deste trabalho, será considerado como fornecida a potência de curto-circuito do sistema em sequência positiva. Desta forma, pode-se aplicar a Equação (23):

$$X_{us} = \frac{P_b}{P_{cc}} \text{ (pu)} \quad (23)$$

Considerando que o valor de resistência ( $R_{us}$ ) no ponto de entrega é muito inferior ao valor de reatância, considera-se que  $R_{us} \cong 0$ . Logo, a impedância do ponto de entrega pode ser escrita como:

$$\vec{Z}_{us} = 0 + jX_{us} \text{ (pu)} \quad (24)$$

Os resultados das equações (23) e (24) são dados em Valores por Unidade, também chamado de *pu*. Esta normalização em pu facilita a análise de sistemas de energia elétrica que utilizam valores relativos ao invés de valores absolutos. Ela é usada para simplificar cálculos e representar os valores de tensão, corrente, impedância e potência de um sistema de energia elétrica em

uma escala adimensional. Para relacionar essas quatro grandezas elétricas, pode-se utilizar duas relações independentes (para circuitos monofásicos):

$$V = Z \cdot I \quad (25)$$

$$S = V \cdot I \quad (26)$$

Desta forma, é preciso considerar como dadas duas grandezas fundamentais elétricas dentre as quatro, designando-as como valores de base. As outras duas grandezas fundamentais não selecionadas, também chamadas de grandezas derivadas, podem ser expressas a partir das relações (27) e (28), sendo indicada como um valor percentual ou uma parte dessa grandeza (valor *pu*).

$$V_{base} = V_1 \quad (27)$$

$$S_{base} = S_1 \quad (28)$$

Na análise por unidade, os valores de cada variável elétrica são normalizados para um valor base específico, como a potência nominal de um transformador ou a capacidade nominal de um gerador. Desta forma, para facilitar o cálculo deste trabalho, a seleção dos valores bases ( $V_1$  e  $S_1$ ) corresponderão à potência nominal do transformador de entrada (ou somatória total do conjunto de transformadores) e a tensão secundária nominal no terminal do transformador. Para fins de padronização, neste trabalho a tensão de base será expressa em kilo-Volts (kV) e a potência de base será expressa em kilo-Volt-Ampère (kVA).

Assim, todas as tensões pertinentes para a análise podem ser escritas conforme as relações (29) e (30):

$$v_{\%} = \frac{V}{V_{base}} \cdot 100 \quad (v \text{ percentual}) \quad (29)$$

$$v = \frac{V}{V_{base}} \text{ pu} \quad (v \text{ por unidade}) \quad (30)$$

De forma análoga, a potência aparente também é expressa como:

$$s_{\%} = \frac{S}{S_{base}} \cdot 100 \quad (s \text{ percentual}) \quad (31)$$

$$s = \frac{S}{S_{base}} \text{ pu} \quad (s \text{ por unidade}) \quad (32)$$

Aplicando nas relações (27) e (28), tem-se por consequência:

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{V_{base}} \quad (33)$$

$$Z_{base} = \frac{V_{base}}{I_{base}} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} \quad (34)$$

Desta forma, quaisquer impedâncias ou correntes poderão ser expressas por:

$$z = \frac{Z}{Z_{base}} = Z \cdot \frac{S_{base}}{V_{base}^2} \quad \text{e} \quad z\% = 100 \cdot z \quad (35)$$

$$i = \frac{I}{I_{base}} = I \cdot \frac{V_{base}}{S_{base}} \quad \text{e} \quad i\% = 100 \cdot i \quad (36)$$

Para circuitos trifásicos simétricos e equilibrados, o conceito apresentado para os circuitos monofásicos pode ser replicado, pois qualquer circuito trifásico pode ser reduzido a um monofásico equivalente, contando que os componentes ligados em delta sejam substituídos por componentes equivalentes ligados em estrela e que o circuito adotado seja de uma fase e neutro (ROBBA, 1996).

As relações que descrevem a associação de monofásico e trifásico, podem ser escritas como:

$$V_f = Z \cdot I \quad (37)$$

$$S_f = V \cdot I \quad (38)$$

$$V = \sqrt{3}V_f \quad (39)$$

$$S = 3S_f \quad (40)$$

Neste caso,  $V_f$  e  $S_f$  representam respectivamente a Tensão de fase e Potência Aparente de uma fase. Já  $V$  e  $S$  indicam respectivamente a Tensão de linha e a Potência Aparente fornecida ao trifásico.

Aplicando as equações já apresentadas para o circuito monofásico e considerando que  $V_{bf}$  e  $S_{bf}$  são referentes as bases de tensão de fase e potência fornecida ao sistema monofásico, tem-se para o circuito trifásico as seguintes relações:

$$V_{base} = \sqrt{3}V_{bf} \quad (41)$$

$$S_{base} = 3S_{bf} \quad (42)$$

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3}V_{base}} = \frac{3S_{bf}}{3V_{bf}} = I_{bf} \quad (43)$$

$$Z_{base} = \frac{V_{base}}{\sqrt{3}I_{base}} = \frac{\sqrt{3}V_{base}^2}{\sqrt{3}S_{base}} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} = \frac{V_{bf}^2}{S_{bf}} = Z_{bf} \quad (44)$$

Desta forma, resulta em:

$$v = \frac{V}{V_{base}} = \frac{\sqrt{3}V_f}{\sqrt{3}V_{bf}} = \frac{V_f}{V_{bf}} = v_f \quad (45)$$

$$s = \frac{S}{S_{base}} = \frac{3S_f}{3S_{bf}} = \frac{S_f}{S_{bf}} = s_f \quad (46)$$

$$i = \frac{I}{I_{base}} = \frac{I}{I_{bf}} = i_f \quad (47)$$

$$z = \frac{Z}{Z_{base}} = \frac{Z}{Z_{bf}} = z_f \quad (48)$$

Portanto, os módulos das grandezas de fase e de linha, expressos em valores por unidade, possuem o mesmo valor. Para o faseamento, é preciso aplicar a defasagem para redes trifásicas, onde a tensão de linha está adiantada de 30° da tensão de fase para sequência positiva na conexão estrela (ROBBA, 1996).

Em alguns casos, é necessário estipular o valor estudado em outra base, para isso utiliza-se o conceito de mudança de base, que consiste em determinar o módulo da grandeza, multiplicar seu valor em *pu* pela base na qual ela foi estipulada e dividir a resultante pelo valor da nova base. Em virtude do que foi mencionado, tem-se:

$$v' = \frac{V}{V'_{base}} = v \cdot \frac{V_{base}}{V'_{base}} \quad (49)$$

Sendo,  $v'$  corresponde ao novo módulo da tensão em *pu*, enquanto  $V'_{base}$  indica a nova base para a tensão. De forma análoga, pode-se aplicar o conceito para as demais grandezas elétricas:

$$i' = \frac{I}{I'_{base}} = i \cdot \frac{S_{base}}{V_{base}} \cdot \frac{V'_{base}}{S'_{base}} = i \cdot \frac{V'_{base}}{V_{base}} \cdot \frac{S_{base}}{S'_{base}} \quad (50)$$

$$s' = \frac{S}{S'_{base}} = s \cdot \frac{S_{base}}{S'_{base}} \quad (51)$$

$$z' = \frac{Z}{Z'_{base}} = z \cdot \frac{V_{base}^2}{S_{base}} \cdot \frac{S'_{base}}{V'^2_{base}} = z \cdot \frac{S'_{base}}{S_{base}} \cdot \left( \frac{V_{base}}{V'_{base}} \right)^2 \quad (52)$$

Tendo em vista o que foi descrito, o valor da reatância do ponto de entrega da concessionária ( $X_{us}$ ) dependerá dos valores bases considerados pela concessionária. Geralmente, a potência estará na base de 100MVA e a base da tensão é o valor nominal da tensão da rede primária. Os valores da rede primária podem variar até mesmo dentro da própria concessionária, para isso, é necessário consultar as normas da concessionária e verificar quais são as tensões de operação da média/alta tensão no ponto de conexão da indústria.

Caso seja fornecida a potência de curto-circuito na sequência positiva ( $P_{cc}$ ) necessita-se da potência base ( $P_b$ ). Conforme já indicado, a potência base preferencialmente utilizada é a mesma do transformador, porém essa definição só é válida caso a entrada de energia seja em média ou em alta tensão. Poderá ocorrer situações em que a potência demanda geral da instalação não exija uma entrada com posto de transformação, tornando possível seguir com a entrada em baixa tensão. Assim, caberá ao projetista determinar uma potência base que reduz a necessidade de aplicar o método de mudança de base.

Seguindo o diagrama de impedâncias, apresentado na Figura 7, o próximo passo é determinar a impedância do circuito entre o ponto de entrega e o terminal primário do transformador (caso necessite do transformador na entrada). Em determinadas situações, é possível desprezar o ramal de entrada até os terminais dos primários dos transformadores, devido ao pequeno comprimento do circuito. Essas situações podem ser vistas em transformadores suspensos em postes, cuja distância entre o ponto de entrega da concessionária até o Trafo é pequena. Porém, algumas concessionárias não permitem essa configuração ou limita a potência. No caso da ENEL-SP, segundo a norma LIG-BT, a partir de 300kVA de demanda instalada, a entrada de energia só é permitida com a instalação de um *Pad-Mounted* (Transformador em pedestal) ou uma Câmara Transformadora, com potências entre 500kVA e 2000kVA (ENEL 2014). Também se tem o caso da CPFL-SP, que permite transformadores para consumidores únicos de até 300kVA suspenso em poste, conforme a GED-2855 (CPFL-2021). Acima dessa potência, a concessionária exige postos de transformação ou cabines primárias com medição em tensão primária. Com isso, caberá ao projetista incluir o ramal de entrada no cálculo de impedâncias.

Caso seja necessário a consideração do ramal de ligação entre o ponto de entrega, é preciso considerar a impedância do circuito, que terá variações de acordo com o material empregado, a distância do circuito, a seção do cabo e o número de fases que o circuito contém.

Assim, a impedância  $\bar{z}_{cir1}$  pode ser equacionada como:

$$\vec{z}_{cir1} = r_{cir1} + jx_{cir2} \text{ (pu)} \quad (53)$$

Para encontrar o valor da resistência ( $R_{cir1}$ ), é necessário primeiro encontrar o valor em *ohms*:

$$R_{cir1\Omega} = \frac{R_{u\Omega} \times L_{cir1}}{1000 \times N_{cir1}} \text{ (}\Omega\text{)} \quad (54)$$

Sendo:

$R_{u\Omega}$  – Resistência de sequência positiva do circuito, em m $\Omega$ /m;

$L_{cir1}$  – Comprimento do circuito;

$N_{cir1}$  – Número de condutores por fase;

Convertendo para em valores por unidade, tem-se:

$$r_{cir1} = R_{cir1\Omega} \times \frac{P_b}{1000 \times V_b^2} \text{ (pu)} \quad (55)$$

O valor da reatância segue o mesmo conceito apresentado para o valor de resistência:

$$X_{cir1\Omega} = \frac{X_{u\Omega} \times L_{cir1}}{1000 \times N_{cir1}} \text{ (}\Omega\text{)} \quad (56)$$

Sendo:

$X_{u\Omega}$  – Reatância de sequência positiva do circuito, em m $\Omega$ /m.

Convertendo para em valores por unidade, tem-se:

$$x_{cir1} = X_{cir1\Omega} \times \frac{P_b}{1000 \times V_b^2} \text{ (pu)} \quad (57)$$

O cálculo da impedância do transformador  $\bar{z}_{ut}$  consiste na aquisição de informações de resistência e reatância do fabricante e associar esses valores

conforme a equação (58) e (60). Assim, encontra-se a resistência e reatância da impedância:

$$r_{ut} = R_{pt} \times \frac{P_b}{P_{nt}} \times \left( \frac{V_{nt}}{V_b} \right)^2 (\text{pu}) \quad (58)$$

Onde:

$R_{pt}$  – Resistência percentual do transformador, conforme a equação abaixo:

$$R_{pt} = \frac{P_{cu}}{10 \times P_{nt}} (\%) \quad (59)$$

$r_{ut}$  – Resistência do transformador em  $\text{pu}$ , nas bases definidas de Tensão e Potência;

$P_{nt}$  – Potência nominal do transformador, em kVA;

$V_{nt}$  – Tensão nominal secundária do transformador, em kV;

$V_b$  – Tensão base, em kV;

$P_b$  – Potência base, em kVA;

$P_{cu}$  – Perdas do enrolamento do transformador.

Para o cálculo da reatância, utiliza-se a relação entre impedância e resistência. Logo, tem-se que:

$$X_{pt} = \sqrt{Z_{pt}^2 - R_{pt}^2} (\text{pu}) \quad (60)$$

Da mesma forma que a parte resistiva, a reatância está na base dos valores nominais do transformador, necessitando realizar a mudança de base. Para o cálculo da reatância, utiliza-se a equação:

$$x_{ut} = X_{pt} \times \frac{P_b}{P_{nt}} \times \left( \frac{V_{nt}}{V_b} \right)^2 (\text{pu}) \quad (61)$$

$x_{ut}$  – Reatância do transformador em  $\text{pu}$ , nas bases definidas de Tensão e Potência.;

$X_{pt}$  – Reatância do transformador, em  $\text{pu}$ , nas bases nominais do transformador ( $P_{nt}$  e  $V_{nt}$ );

Desta forma, a impedância do transformador é dada por:

$$\vec{z}_{ut} = r_{ut} + jx_{ut} \text{ (pu)} \quad (62)$$

Nos interiores dos quadros de distribuição e força, podem existir grandes barramentos que possuem a finalidade de realizar a derivação entre diversos circuitos. Devido a isso, em alguns casos é necessário considerar os barramentos no cálculo de somatória de impedância. O projetista deve também atentar-se a capacidade de condução de corrente que cada barra suporta, e utilizar a que melhor se adeque. Como a participação destas barras no cálculo da somatória de impedância tendem a ser pequenos, em muitos casos poderá ser desprezado.

A impedância da barra é dada por:

$$\vec{z}_{b1} = z_{b1} + jx_{b1} \text{ (pu)} \quad (63)$$

Sendo:

$$r_{b1} = \left( \frac{R_{b1\Omega} \times L_{b1}}{1000 \times N_{b1}} \right) \times \left( \frac{P_b}{1000 \times V_b^2} \right) \text{ (pu)} \quad (64)$$

$R_{b1\Omega}$ -Resistência ôhmica da barra, em mΩ/m;

$r_{ut}$  – Resistência da barra em pu, nas bases definidas de Tensão e Potência;

$N_{b1\Omega}$ -Número de barras em paralelo;

$L_{b1\Omega}$ -Comprimento da barra, em metros;

$$x_{b1} = \left( \frac{X_{b1\Omega} \times L_{b1}}{1000 \times N_{b1}} \right) \times \left( \frac{P_b}{1000 \times V_b^2} \right) \text{ (pu)} \quad (65)$$

$X_{b1\Omega}$ -Reatância ôhmica da barra, em mΩ/m;

$x_{ut}$  – Reatância da barra em pu, nas bases definidas de Tensão e Potência;

$\vec{z}_{b1}$  – Impedância do barramento no interior do quadro;

Como os cálculos dos demais circuitos se enquadram no mesmo equacionamento do ramal entre o ponto de entrega até o transformador, não necessitam ser apresentados novamente. Com isso, a última impedância a ser somada, é dos enrolamentos internos do motor.

Durante a partida de um motor de indução trifásico, a parte resistiva da impedância equivalente pode ser desconsiderada devido à características internas do motor. Como já discutido na seção 2.1, durante a partida o

escorregamento é unitário, tornando a resistência rotórica com o seu menor valor durante a partida. Assim, a somatória das impedâncias do estator, reatância de magnetização e a impedância do rotor, resulta em uma impedância com baixo valor resistivo e alto valor de indutância.

Por esse motivo, durante a partida do motor de indução trifásico, a parte resistiva da impedância equivalente é geralmente desprezada e a impedância equivalente é considerada puramente reativa (indutiva). Assim tem-se:

$$R_{um} \cong 0$$

Conforme já visto na seção 2.1 na equação (21), tem-se que:

$$\dot{V}_a = \bar{Z}_m \cdot \dot{I}_1 = \bar{Z}_m \cdot \dot{I}_a \quad (66)$$

Como a impedância do motor possui apenas a componente da reatância na partida e a corrente no instante é propriamente a de partida, tem-se:

$$\dot{V}_a = X_{pm(\Omega)} \cdot \dot{I}_p \quad (67)$$

Onde  $X_{pm}$  corresponde a reatância interna do motor no momento da partida.

Dividindo ambos os lados da equação (67) pelo valor de impedância de base do sistema, chega-se a seguinte expressão:

$$\frac{V_a}{Z_{base}} = \frac{X_{pm}}{Z_{base}} \cdot I_p \quad (68)$$

Nesse caso os valores utilizados serão os módulos dos fasores. A reatância ao ser dividida pelo valor de impedância base resulta no seu valor de reatância em *pu*.

$$\frac{V_a}{Z_{base}} = x_{pm(pu)} \cdot I_p \quad (69)$$

Também se considera que a tensão da fase A é a nominal do motor na partida e, portanto, igual a tensão de base, de forma que:

$$\frac{V_{base}}{Z_{base}} = x_{pm(pu)} \cdot I_p \quad (70)$$

Por fim, utilizando a equação (25) e considerando que a corrente é a nominal e a impedância o valor de base, tem-se:

$$\frac{Z_{base} \cdot I_{nm}}{Z_{base}} = x_{pm(pu)} \cdot I_p \quad (71)$$

$$\therefore x_{pm} = \frac{I_{nm}}{I_p} \text{ (pu-na base de potência e tensão nominal do motor)} \quad (72)$$

A equação (72) fornece a reatância de partida do motor em pu tendo como base os dados nominais do motor. Caso as bases de tensão e potência sejam diferentes das do motor, é necessário fazer a mudança de base conforme apresentado na equação (73):

$$x_{um} = x_{pm} \times \left( \frac{P_b}{P_{nm}} \right) \times \left( \frac{V_{nm}}{V_b} \right)^2 \quad (73)$$

Onde  $P_{nm}$  e  $V_{nm}$  correspondem a potência e a tensão nominal do motor.

Assim, pode-se escrever a impedância do motor no momento da partida como:

$$\vec{z}_{um} = 0 + jx_{um} \text{ (pu)} \quad (74)$$

Com isso, todas as impedâncias do sistema estão calculadas e nas bases escolhidas, faltando apenas o cálculo da corrente de curto-circuito simétrica ou de partida. Ela é encontrada a partir da equação (22), e como é visto, o numerador corresponde à tensão da fonte. No caso do sistema em pu, o módulo da tensão da fonte está na base da tensão, portanto seu valor em pu é unitário. Assim:

$$\vec{i}_{cs} = \frac{\vec{E}_1}{\vec{z}_1 + \vec{z}_m} \text{ (A)} \Rightarrow i_{cs} = \frac{1}{\vec{z}_1 + \vec{z}_m} \text{ (pu)} \quad (75)$$

A impedância  $\vec{z}_1$  corresponde à somatória de impedâncias até o terminal do motor (impedância do sistema), obtida a partir do diagrama da Figura 7. Desta forma pode-se calcular a corrente de partida como:

$$i_{cs} = \frac{1}{\vec{z}_{us} + \vec{z}_{ut} + \sum \vec{z}_{ub} + \sum \vec{z}_{cir} + \vec{z}_m} \text{ (pu)} \quad (76)$$

Onde:

$\sum \vec{z}_{ub}$  – Somatória das impedâncias dos barramentos, em pu;

$\sum \vec{z}_{cir}$  – Somatória das impedâncias dos circuitos, em pu;

Assim, a queda de tensão nos terminais do motor pode ser escrita como:

$$\Delta \vec{v}_{um} = \vec{z}_1 \cdot i_{cs} \text{ (%)} \quad (77)$$

### 2.3. MÉTODOS DE PARTIDA

Para contornar as adversidades causadas durante o acionamento do MIT, surge a necessidade de utilizar métodos que amenizem os impactos na instalação durante a partida, dentre os quais podem ser citados:

- Partida Estrela-Triângulo;
- Chave Compensadora 80%;
- Chave Compensadora 65%;
- Soft-Starter;
- Inversor de frequência;

Esses métodos devem ser aplicados sempre quando a potência do motor utilizado se enquadra acima do limite da concessionária de energia ou, então, para atender uma condição específica do sistema. Um exemplo disso é quando a instalação é atendida por um gerador de emergência, que é considerado uma barra finita, sujeita a variações na tensão caso a potência fornecida exceda a nominal. Para isso, o sistema deve ser contemplado de forma que a corrente de partida de um motor não interfira no funcionamento do gerador.

A partida do tipo Estrela-Triângulo possui a particularidade de reduzir a corrente de partida em três vezes, devido a conexão do motor no momento da partida ser em estrela. Para isso, o motor deve possuir seis terminais e não precisar de um conjugado alto na partida, já que ele também é reduzido em três vezes. Sua implementação é de baixo custo e de grande confiabilidade, porém pode não reduzir o suficiente a corrente de partida. A redução na corrente de partida, ou na corrente de curto-circuito simétrica, pode ser encontrada multiplicando um fator de 0,33 ao módulo da corrente.

Nas partidas utilizando chave compensadora, tanto de 80% como de 65%, utiliza-se um autotransformador com várias derivações, que regula a tensão aplicada no terminal do motor durante a partida. Esse método é mais utilizado quando há motores de alta potência e as cargas acopladas no eixo possuem alto índice de atrito. Seu custo e dimensões são consideravelmente maiores quando comparada a partida do tipo Estrela-Triângulo. A redução na corrente de partida pode ser encontrada multiplicando-a com o valor do *tap* do autotransformador ao quadrado.

As soft-starters são equipamentos que utilizam circuitos eletrônicos para controlar tiristores. Assim, pode-se ajustar as amplitudes das tensões, possibilitando o ajuste do torque e a corrente de partida para níveis desejados. Com esse método, pode-se aplicar uma partida em rampa do motor, tornando o acionamento mais suave e consequentemente reduzindo a corrente de partida. Também permite uma desaceleração suave, impedindo por exemplo o golpe de aríete em sistemas hidráulicos.

Os inversores de frequência são dispositivos eletrônicos capazes de alterar a frequência e a amplitude da tensão aplicadas ao motor. Para isso, ele transforma a corrente alternada em corrente contínua com auxílio de circuitos retificadores e transforma novamente, com o inversor, para corrente alterada. Assim, consegue-se controlar a velocidade do motor (que antes era restrita à configuração do motor, podendo em alguns casos ser modificado como na configuração Dahlander), controle do conjugado do motor e da corrente de partida do motor.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os meios que foram empregados para o desenvolvimento do trabalho, como os *softwares* e as considerações utilizadas. Também se apresentam os resultados provenientes das simulações realizadas e suas comparações com o método teórico, para validar a ferramenta desenvolvida.

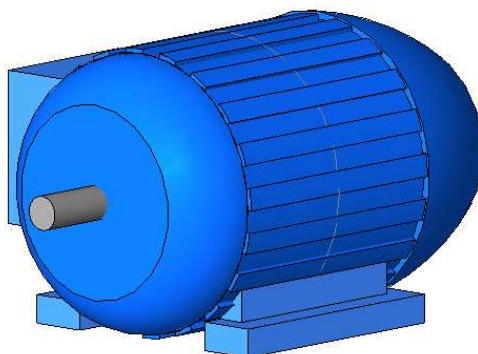
#### 3.1. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a análise dos impactos de acionamentos de motores em uma instalação elétrica, utilizou-se o software de desenhos e modelagens Revit para simular uma instalação elétrica industrial como base para a aplicação da programação desenvolvida em Dynamo, que consiste em manipular algebricamente as informações inseridas no desenho para que possa resultar em resultados práticos.

O Revit é um software pertencente ao conceito BIM (*Building, Information and Modelling*) desenvolvido pela Autodesk. Este conceito vem ganhando cada vez mais espaço no mercado e vem sendo amplamente utilizado na indústria para o desenvolvimento de projeto. O Revit permite que sejam criados modelos digitais detalhados de infraestruturas. Ele integra ferramentas para modelagem 3D, documentação, análise estrutural e energética, coordenação multidisciplinar e colaboração em equipe.

Diferente de um projeto desenvolvido em AutoCad, que utiliza conjunto de linhas, círculos e textos para desenvolver o projeto, o modelo em BIM é constituído por um conjunto de componentes e informações, que são designados por famílias (CAMPESTRINI, 2015). Essas famílias podem ser adquiridas por terceiros ou desenvolvidas por meios próprios. No caso do projeto desenvolvido para este trabalho, desenvolveu-se uma família de motor de indução trifásico, modelo W22 IR3 Premium, de II polos, com os parâmetros elétricos e construtivos fidedignos aos disponibilizados nos *datasheet* do fabricante, de forma que se pode ter motores de 0,12 kW a 370 kW, abrangendo uma boa parcela da necessidade motora industrial (WEG, 2022). Na Figura 8 é apresentado o resultado da modelagem 3D do motor.

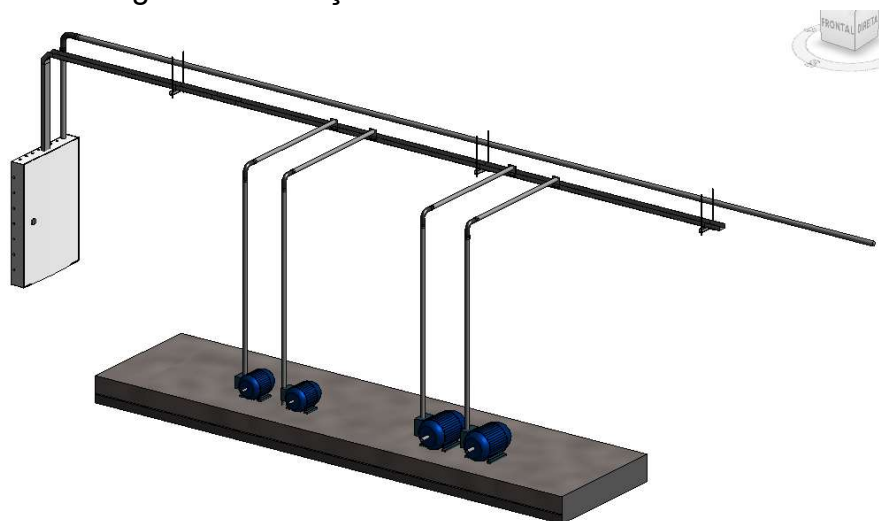
Figura 8-Vista tridimensional do motor WEG IR3 Premium II Polos



Fonte: Própria do Autor

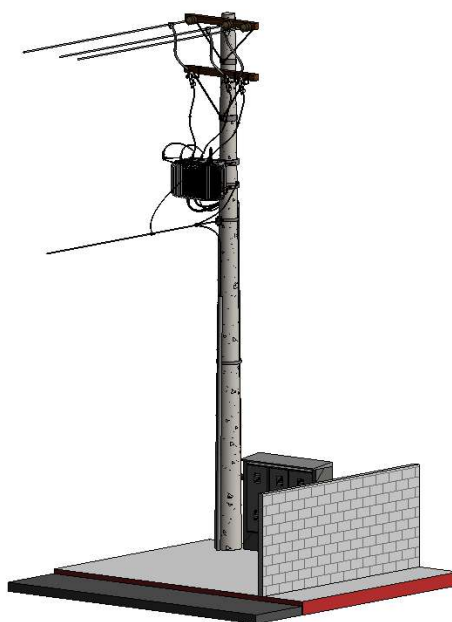
Além da família do motor, também foi preciso desenvolver outras famílias que suplementam o motor, como: eletrocalhas, eletrodutos, quadros gerais de distribuição ou de comando, pontos de tomadas/iluminação e a entrada de energia, que contém o transformador para a indústria simulada. Nas figuras Figura 9 e Figura 10 são apresentados os resultados da modelagem em perspectiva tridimensional. Essas famílias também precisam possuir corretamente os parâmetros elétricos e construtivos, para que possam ser compatíveis com o modelo BIM. No caso da indústria simulada, utiliza-se os parâmetros de família com dados elétricos, como potência aparente das cargas, tensão do secundário, fator de potência, entre muitos outros.

Figura 9-Instalações elétricas até os motores



Fonte: Própria do Autor

Figura 10-Entrada de energia concessionária



Fonte: Própria do Autor

Os modelos em BIM são utilizados como base para o desenvolvimento do projeto no Revit. Neles estão contidas todas as configurações pré-definidas para que o usuário possa utilizá-lo sem nenhuma outra intervenção.

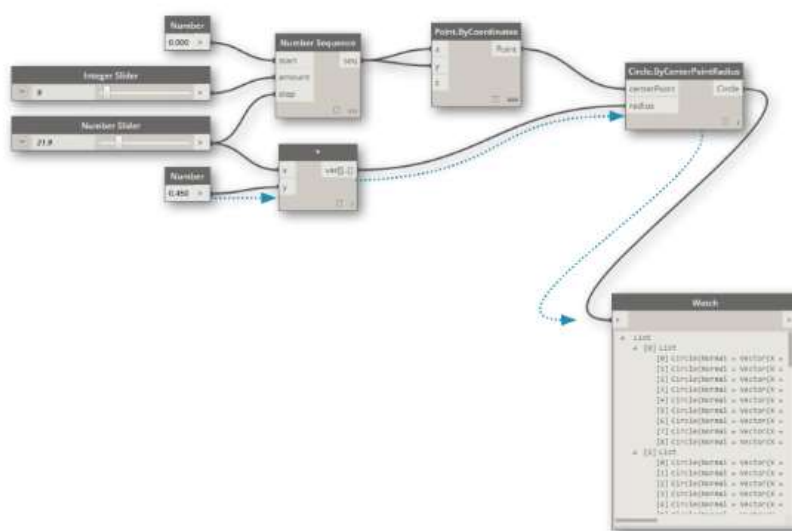
Um dos pilares dessas predefinições são os parâmetros de modelo, também nomeados como parâmetros de projeto, e podem ser associados as famílias, permitindo inserir dados precisos como: dimensões, materiais e propriedades elétricas. Esses dados podem ser usados para gerar automaticamente desenhos de construção, quantidades de materiais e dimensionamentos, além de ajudar na tomada de decisões durante o projeto.

Também no modelo, na parte do MEP (*Mechanical, electrical, and plumbing*) são inseridas informações que contemplam a NBR 5410, como a capacidade de condução de corrente dos cabos disponibilizados, seções nominais dos cabos e eletrodutos, tensões do secundário do transformador -que no Revit são chamadas de tensões de distribuição-, entre outros. Desta forma, consegue-se reproduzir a partida de um motor de indução trifásico e calcular com o auxílio do Dynamo a queda de tensão provocada em qualquer ponto da instalação.

O Dynamo permite que os usuários criem fluxos de trabalho personalizados para automatizar tarefas como a criação de famílias de

elementos, a modificação de parâmetros em massa, a extração de dados de modelo BIM e a análise de desempenho energético. O Dynamo é amplamente utilizado em projetos de arquitetura, engenharia e construção para aumentar a eficiência, reduzir erros e melhorar a qualidade do projeto. Na Figura 11 é apresentado um exemplo dessa ferramenta e como é a interface de programação.

Figura 11-Exemplo de programação em Dynamo



(CONDE, 2019)

A utilização do Dynamo, que é um *software* de programação visual de código aberto, se dá devido ao funcionamento em conjunto com o Revit e outros softwares da Autodesk. Ele permite que os usuários automatizem tarefas repetitivas, criem geometrias complexas e gerem dados a partir de modelos BIM. Ele utiliza uma interface gráfica de programação, baseada em nós e conexões para criar fluxos de trabalho automatizados (SENA, 2019). Com ele, é possível criar *scripts* personalizados sem a necessidade de escrever códigos de programação tradicional. O Dynamo é especialmente útil para tarefas que exigem cálculos matemáticos complexos, como a criação de regras de projeto que levam em consideração múltiplos critérios. Desta forma, utiliza-se ele para extrair os dados de famílias e de modelo, realizar combinações algébricas conforme descrito no Capítulo 2.2 e retornar para o modelo os resultados obtidos, para que o projetista possa tomar as devidas providências, como adicionar um método de partida para um motor que está causando quedas excessivas em outros pontos da instalação.

### 3.1.1. FAMÍLIAS DESENVOLVIDAS

O desenvolvimento de famílias compatíveis com o BIM se torna primordial em qualquer projeto feito nessa plataforma. Para isso, elas precisam abranger tanto a parte documental para as plantas baixas, como também devem ser modeladas com as dimensões do fabricante e parametrizadas com os dados pertinentes, possibilitando dimensionamentos automáticos e extrações de informações.

Um dos pilares deste trabalho é o motor de indução trifásico e para seu desenvolvimento, empregou-se o catálogo do fabricante. A parte correspondente aos dados elétricos do motor, que são apresentados no Apêndice C, foram utilizados de forma que o motor pudesse ter a correta comunicação com o modelo de projeto. Também se utilizou do catálogo da WEG as carcaças disponíveis e suas dimensões correspondentes, já que para determinado valor de potência nominal, tem-se estruturas físicas definidas. Em alguns casos, apresentou-se até três tipos de carcaças para uma única potência nominal. Essas diferenciações foram aplicadas no software através dos Tipos de Família.

O Tipo de Família permite que o projetista crie uma série de variações dentro da família apenas alterando os valores dos parâmetros internos. Esses parâmetros, também chamados de parâmetros de família, podem ser de tipo ou de instância. Os valores de instância permitem ser alterados diretamente no modelo e são identificados com o “(padrão)” após o nome do parâmetro, enquanto os de tipo, apenas são editados na família e não tem nenhuma representação após o nome.

Os parâmetros de família podem ter seus valores atribuído a fórmulas. Essas atribuições podem ser do tipo algébricas, lógicas e funcionais. As operações funcionais, necessitam de uma maior atenção, em vista que é específica do software. No caso do motor desenvolvido, utiliza-se a função “sizelook\_up”, que realiza uma busca em uma tabela carregada no formato “.csv” e retorna um valor do intervalo selecionado, com funcionalidade similar à do “PROCV” do Excel. Essa ferramenta costuma ser muito utilizada quando há inúmeros parâmetros com diversos valores para cada, permitindo que a fórmula atribuída seja pequena. Na Figura 12 é apresentada a janela de configurações e suas repartições, enquanto na Figura 13 apresenta-se a montagem física do

motor, desenvolvida utilizando cotas parametrizadas que possuem valores obtidos do catálogo do motor.

Figura 12-Configuração da família do motor trifásico

Tipo de Família – Separa os tipos de motores disponibilizados na família

Tipos de famílias

Digite o nome: U. 50HP-CARCAÇA 200L

Parâmetros de pesquisa

| Parâmetro                                 | Valor                       | Fórmula                                                                                                              |
|-------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Texto</b>                              |                             |                                                                                                                      |
| Fases                                     | 3                           | =                                                                                                                    |
| MOTOR                                     | 26.000                      | =                                                                                                                    |
| Potência Ativa_HP                         | 50.000                      | =                                                                                                                    |
| TABELA ELÉTRICA                           | DADOS MOTOR W22_IR3_P       | = "DADOS MOTOR W22_IR3_PREMIUM_ II POLOS_VN_IN_IP_FS"                                                                |
| TABELA FP E R (padrão)                    | DADOS MOTOR W22_IR3_P       | = if(Carga no Motor < 0.51, "DADOS MOTOR W22_IR3_PREMIUM_ II POLOS_FP e R 50%", if(Carga no Motor > 0.76             |
| TABELA OPCIONAIS                          | 0                           | =                                                                                                                    |
| TABELA TAMANHO                            | TABELA3 TAMANHO MOT         | =                                                                                                                    |
| <b>Materiais e acabamentos</b>            |                             |                                                                                                                      |
| Material Revestimento Motor               | Material Carcaça Motor      | =                                                                                                                    |
| Material Revestimento Motor 2             | Material Carcaça Motor(2    | =                                                                                                                    |
| <b>Elétrico - Cargas</b>                  |                             |                                                                                                                      |
| Carga no Motor (padrão)                   | 1.000000                    | =                                                                                                                    |
| Descrição Carga no Motor (padrão)         | Carga no Motor de 0 a 1; 50 | = "Carga no Motor de 0 a 1; 50%=0.5, 75%=0.75, 100%=1"                                                               |
| Fator de Serviço (padrão)                 | 1.000000                    | =                                                                                                                    |
| Descrição Fator de Serviço (padrão)       | Selecionar de acordo com o  | = "Selecionar de acordo com o máximo permitido pelo Fabricante"                                                      |
| Limitação da Corrente ( % de In) (padrão) | 0.000000                    | =                                                                                                                    |
| Descrição Limitação de Corrente (padrão)  | Somente p/ partidas c/ Soft | = "Somente p/ partidas c/ Software Starter ou Inversor de Freq."                                                     |
| Método de Partida (padrão)                | Outro                       | =                                                                                                                    |
| <b>Cotas</b>                              |                             |                                                                                                                      |
| <b>Elétrico - Circuitos</b>               |                             |                                                                                                                      |
| Corrente Demandada (padrão)               | 61.17 A                     | = (Fator de Serviço) * if(Fases = 3, ((Potência Ativa_HP / 1 mm) * 745.7 / ((Tensão nos terminais do motor) * (1.732 |
| Corrente de Partida (padrão)              | 461.32 A                    | = (Aux_Corrente de Partida / 1 mm) * 1 A                                                                             |
| Potência Aparente (padrão)                | 46617.90 VA                 | = Corrente Demandada * Tensão Aplicada * 1.732                                                                       |
| Potência Ativa (padrão)                   | 37000.00 W                  | = (Potência Ativa Nominal / 1 mm) * 1 W                                                                              |
| Reatância do Motor na Partida (padrão)    | 0.131579                    | = ((Corrente Nominal / 1 mm) / (Corrente de Partida / 1 A)                                                           |
| Resistência do Motor na Partida (padrão)  | 0.000000                    | = 0                                                                                                                  |
| Tensão Aplicada (padrão)                  | 440.00 V                    | =                                                                                                                    |
| Tensão nos terminais do motor (padrão)    | 440.000000                  | =                                                                                                                    |
| <b>Dados</b>                              |                             |                                                                                                                      |
| Corrente Nominal (padrão)                 | 60.700                      | = if(and(Tensão Aplicada = 380 V, Tensão Nominal = 220 mm), IN1 * 0.579, if(and(Tensão Aplicada = 440 V, Tensã       |
| Corrente com Rotor Bloqueado (padrão)     | 461.320                     | = (Corrente Nominal / 1 mm) * if(TABELA OPCIONAIS > 1.5, size_lookup(TABELA ELÉTRICA, "IPIN2", 1 mm, Potên           |
| Fator de Serviço Máximo (padrão)          | 1.250                       | = if(TABELA OPCIONAIS > 1.5, size_lookup(TABELA ELÉTRICA, "FS2", 1 mm, Potência Ativa_HP), if(TABELA OPCIO           |
| Fator de potência (padrão)                | 0.860                       | = if(TABELA OPCIONAIS > 1.5, size_lookup(TABELA FP E R, "FP2", 1 mm, Potência Ativa_HP), if(TABELA OPCIONAI          |
| Frequência (padrão)                       | 60.00 Hz                    | = 60 Hz                                                                                                              |
| Número de Polos (padrão)                  | 2.000                       | = size_lookup(TABELA ELÉTRICA, "P", 1 mm, Potência Ativa_HP)                                                         |
| Potência Ativa Nominal (padrão)           | 37000.000                   | = size_lookup(TABELA ELÉTRICA, "PW", 1 mm, Potência Ativa_HP) * 1000                                                 |
| Rendimento (padrão)                       | 0.930                       | = (if(TABELA OPCIONAIS > 1.5, size_lookup(TABELA FP E R, "R2", 1 mm, Potência Ativa_HP), if(TABELA OPCIONAI          |
| Tensão Nominal (padrão)                   | 440.000                     | = if(TABELA OPCIONAIS > 1.5, size_lookup(TABELA ELÉTRICA, "V2", 1 mm, Potência Ativa_HP), if(TABELA OPCIO            |
| <b>Legenda geral</b>                      |                             |                                                                                                                      |
| DESCRIÇÃO CARCAÇA (padrão)                | 200L                        | = size_lookup(TABELA TAMANHO, "", "ERRO", MOTOR)                                                                     |
| DESCRIÇÃO MOTOR (padrão)                  | MOTOR WEG_W22 IR3_2 PO      | = size_lookup(TABELA ELÉTRICA, "", "ERRO", Potência Ativa_HP)                                                        |
| <b>Outros</b>                             |                             |                                                                                                                      |
| Aux_Corrente de Partida (padrão)          | 461.320                     | = if(Método de partida = 1, Corrente com Rotor Bloqueado, if(Método de partida = 2, (Corrente com Rotor Bloqu        |
| FP (padrão)                               | 0.860000                    | = Fator de potência / 1 mm                                                                                           |
| IN1 (padrão)                              | 60.700                      | = if(TABELA OPCIONAIS > 1.5, size_lookup(TABELA ELÉTRICA, "IN2", 1 mm, Potência Ativa_HP), if(TABELA OPCIO           |
| Método de partida (padrão)                | 1                           | =                                                                                                                    |
| <b>Dados de identidade</b>                |                             |                                                                                                                      |

Parâmetros de família de tipo e de instância

Valores dos parâmetros

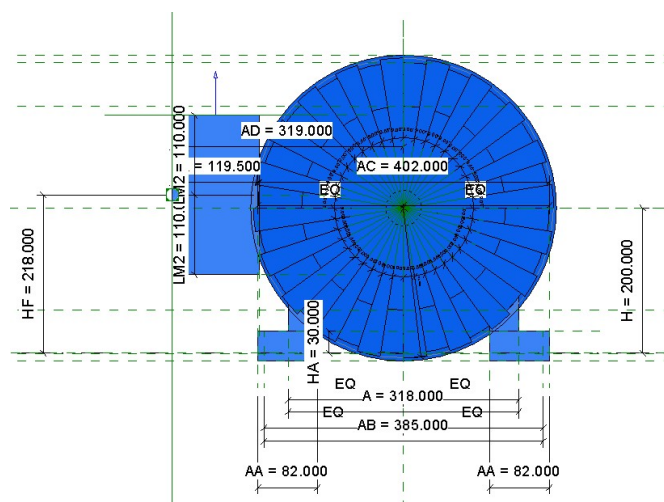
Fórmulas dos parâmetros

Gerenciar tabelas de pesquisa...

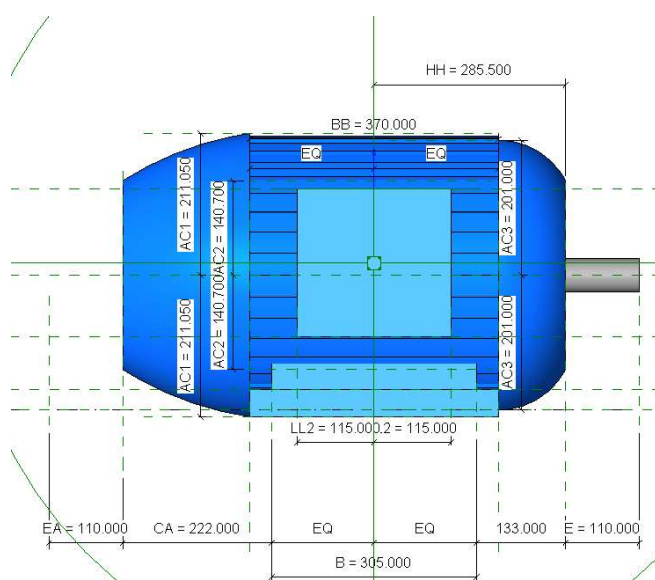
OK Cancelar Aplicar

Fonte: Própria do autor

Figura 13-Parametrização das dimensões físicas do motor



(a) Vista Frontal do Motor

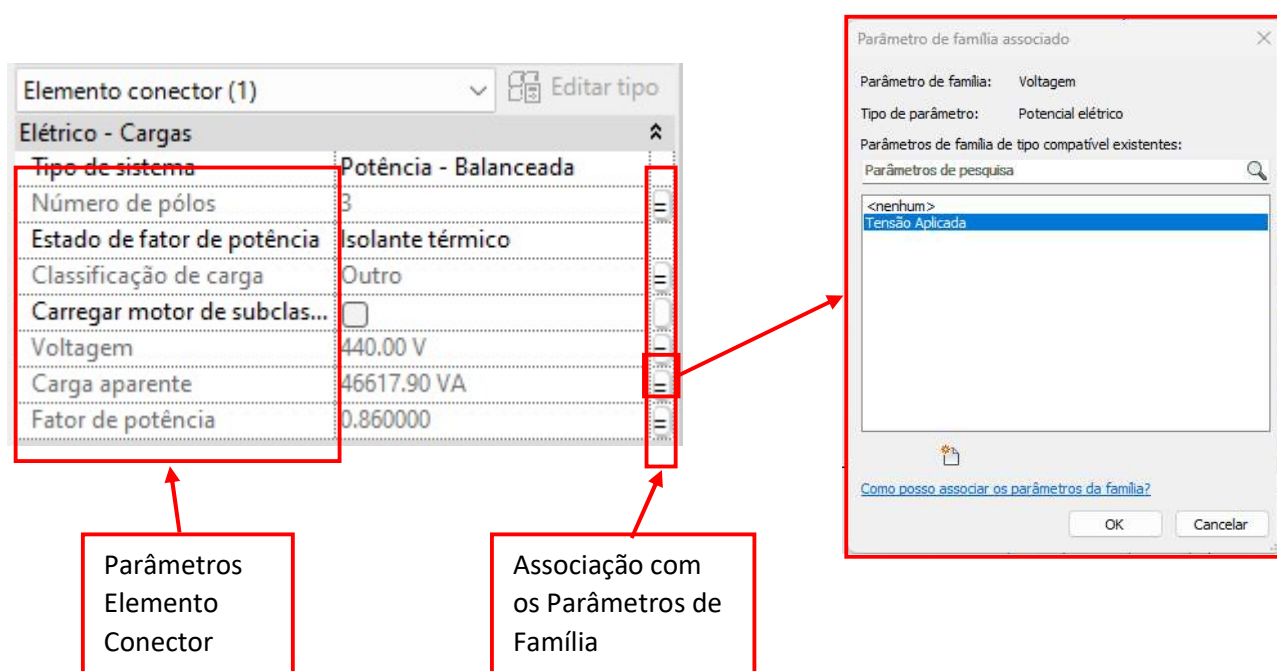


(b) Vista Lateral do Motor

Fonte: Própria do autor

A conexão do motor com o sistema de distribuição elétrica do modelo é possibilitada a partir do uso de Elementos Conectores. Essa funcionalidade do software permite associar os parâmetros de família com parâmetros de projeto, que nesta função da categoria (nome dado à separação de famílias interna do Revit) são pré-definidos. Assim, no modelo, ao realizar uma associação entre um quadro elétrico e uma família de Iluminação Elétrica (categoria que o MIT se enquadra), os dados adquiridos serão provenientes da associação feita. Na Figura 14 apresenta-se a janela de como é feita essa associação de parâmetros.

Figura 14-Elemento Conector



Fonte: Própria do autor

Com essa funcionalidade, pode-se disponibilizar para o modelo BIM as informações de potência aparente, fator de potência e o número de polos do motor. Também permite que o modelo forneça informações à família, como a tensão aplicada nos terminais e as classificações de carga.

Alguns desses parâmetros são mutáveis no projeto, como por exemplo a tensão aplicada nos terminais do motor, que no caso de motores do tipo WEG IR3 Premium, as tensões permitidas são de 220V a 440V, variando de acordo com o tipo de carcaça e a potência. Assim, permite o usuário empregar tensões no secundário diferentes da nominal, já que a informação inserida é repassada para a família, e por consequência a corrente nominal corrigida.

Também se aplica esse conceito para a classificação de carga. Esse parâmetro permite que sejam diferenciadas as cargas conectadas no sistema elétrico, de forma que se possa criar regras exclusivas para cada instância. No caso, utiliza-se esse conceito para aplicar os métodos de partida em cada motor. Logo caso queira utilizar o método estrela-triângulo em um e soft-starter em outro, ambos conectados no mesmo quadro, basta selecionar os métodos de partida a partir da classificação de carga. Como a informação é repassada à

família, a corrente de partida (que antes era definida pelo fabricante a partir da partida direta) é reajustada para o método selecionado.

Os demais parâmetros, como: número de polos, fator de potência e carga aparente são definidas internamente à família e não permite ajustes por parte do projetista.

Além desses parâmetros do Elemento conector, é necessário criar parâmetros extras, que permitem ao usuário configurar o uso do motor. Para isso, criou-se mais três parâmetros de família:

- Carga no Motor – Responsável por indicar qual a porcentagem de carga que o motor irá trabalhar. Com isso, o rendimento e o fator de potência são ajustados de acordo com o catálogo disposto no Apêndice C. Por padrão, no modelo, esse valor é unitário;
- Fator de serviço – Indica a porcentagem extra permitida de carga que o motor consegue operar continuamente. Por padrão, no modelo, esse valor é unitário;
- Limitação da corrente – Ajuste da corrente de partida em métodos que permitem essa limitação. Com esse valor diferente de zero, a corrente de partida estará limitada a esse fator multiplicada pela corrente nominal do motor.

Essas configurações estão presentes ao selecionar o motor no modelo BIM, e estão apresentadas conforme a Figura 15.

Figura 15-Configuração de funcionamento do motor

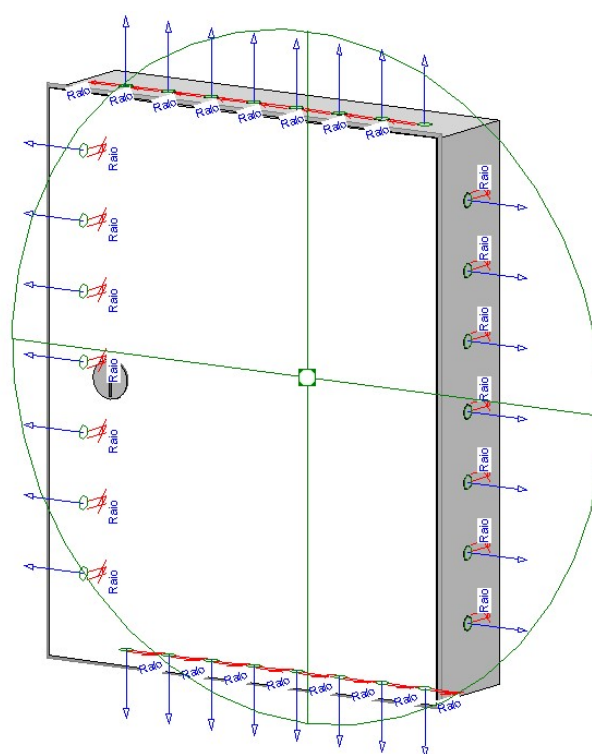
| Elétrico - Cargas           |                              | ⬆                    |
|-----------------------------|------------------------------|----------------------|
| Carga no Motor              | 1.000000                     | <input type="text"/> |
| Descrição Carga no Motor    | Carga no Motor de 0 a 1; ... | <input type="text"/> |
| Fator de Serviço            | 1.000000                     | <input type="text"/> |
| Descrição Fator de Serviço  | Selecionar de acordo co...   | <input type="text"/> |
| Limitação da Corrente ( ... | 0.000000                     | <input type="text"/> |
| Descrição Limitação de ...  | Somente p/ partidas c/ S...  | <input type="text"/> |
| Método de Partida           | Partida Direta               | <input type="text"/> |
| Painel                      | CCM-2                        | <input type="text"/> |
| Número do circuito          | 8                            | <input type="text"/> |

Fonte: Própria do autor

Outras famílias também foram desenvolvidas para complementar o motor. Em especial, os quadros de distribuição e o padrão de entrada em poste, já que ambos necessitam estar corretamente parametrizados eletricamente, de forma a possuir as conexões elétricas que permitam vínculos com o MIT.

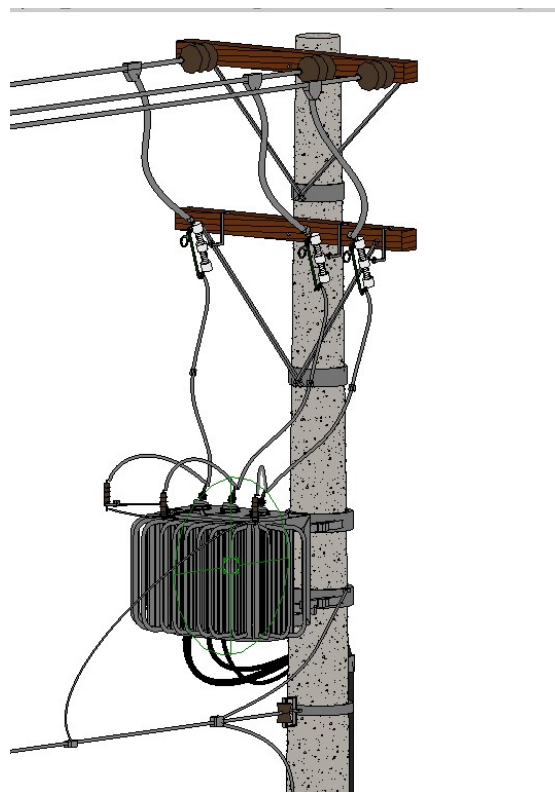
Diferentemente da família do motor de indução, a classificação do transformador em poste e do quadro elétrico é Equipamento Elétrico. Assim, no modelo, o Revit os reconhece como pontos de derivação, e não cargas, permitindo criar circuitos a partir deles e posteriormente os dimensionamentos. Nas figuras Figura 16 e Figura 17 são apresentadas vistas tridimensionais das famílias acima citadas.

Figura 16-Quadro elétrico



Fonte: Própria do Autor

Figura 17-Entrada de energia com transformador em poste



Fonte: Própria do Autor

Da mesma forma que ocorreu na família de motor, utilizou-se os tipos de família para diferenciar tamanhos e configurações. No caso do quadro de distribuição, utilizou-se de padrões disponíveis no mercado, que vão desde 400x600x200 milímetros (comprimento, largura e profundidade) até 1200x1600x250 milímetros. Para o poste, a variação ocorreu apenas na potência nominal do transformador, variando conforme a Tabela 7 do Apêndice B. Essas configurações internas são inseridas de forma similar ao apresentado na

Figura 12 e disponibilizadas para o Elemento Conector da mesma forma que ocorre na Figura 14.

### 3.1.2. CONFIGURAÇÕES E PARAMETRIZAÇÕES DO MODELO BIM

Os modelos computacionais possuem o objetivo de servir como base para simulações de projetos e auxiliar na validação e complementação dos cálculos matemáticos. Seu uso é devido a fácil construção e reconstrução, possibilitando várias condições para simulação (CAMPESTRINI, 2015). Devido à parametrização, permite-se que ocorra uma inserção de dados e tenha como retorno um dimensionamento elétrico coerente com as normas técnicas.

Para isso, o modelo precisa ser corretamente configurado, para que possa abranger todas as famílias desenvolvidas. Ao iniciar o desenvolvimento, o Revit possui poucas informações elétricas e é preciso abastecer essas informações com dados e características próprias de cada região. No caso do Brasil, precisa ser atendido as normas desenvolvidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, além também de informações da concessionária elétrica local.

Como já citado, a seção do Revit que gerencia a parte elétrica é chamada de *MEP*. Nessa seção, são inseridas todas as configurações elétricas que são imprescindíveis para o correto funcionamento, entre elas pode-se destacar a capacidade de corrente e as variações de seções de cabos, juntamente com o método de instalação e o material da isolação utilizado.

Uma vez que a indústria a ser simulada não possui particularidades específicas de instalação, os métodos utilizados, segundo a NBR-5410, são o tipo B1 e o tipo D, que são os tipos mais empregados no dia a dia, em vista que são considerados o pior caso (no caso para as aplicações de cabos unipolares em eletrodutos enterrados, embutidos ou aparentes). Além dessas configurações, determinou-se o tamanho mínimo inicial e o tamanho máximo final. Assim, a partir da capacidade de corrente, o *software* decidirá a partir do dimensionamento automático qual o cabo utilizará para alimentar cada carga, podendo ser ajustado manualmente caso o projetista ache necessário. Também se inseriu diferenciação para circuitos de iluminação, que segundo a norma técnica pode-se iniciar a partir de seções de 1,5mm<sup>2</sup>. Essas informações inseridas são apresentadas na Figura 18.

Figura 18-Configurações dos condutores elétricos

|    | Nome                                              | Material                               | Classificação temperatura (°C) | Isolamento | Tamanho máx | Multiplicador Neutro | Requerido Neutro                    | Tamanho Neutro  |              |
|----|---------------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------|------------|-------------|----------------------|-------------------------------------|-----------------|--------------|
| 1  | [Cu/PVC/750V/70°]-Un-B1-2Cc (F+N+T)               | [Cu/PVC/750V/70°]-Un-B1-2Cc            | 70                             | PVC        | 240MM²      | 1.00                 | <input checked="" type="checkbox"/> | Tamanho da fase | Steel        |
| 2  | [Cu/PVC/750V/70°]-Un-B1-2Cc (2F+T)                | [Cu/PVC/750V/70°]-Un-B1-2Cc            | 70                             | PVC        | 240MM²      | 1.00                 | <input type="checkbox"/>            | Tamanho da fase | Steel        |
| 3  | [Cu/PVC/750V/70°]-Un-B1-3Cc (3F+T)                | [Cu/PVC/750V/70°]-Un-B1-3Cc            | 70                             | PVC        | 300MM²      | 1.00                 | <input type="checkbox"/>            | Tamanho da fase | Steel        |
| 4  | [Cu/PVC/750V/70°]-Un-B1-4Cc (3F+N+T)              | [Cu/PVC/750V/70°]-Un-B1-3Cc            | 70                             | PVC        | 300MM²      | 1.00                 | <input checked="" type="checkbox"/> | Tamanho da fase | Steel        |
| 5  | [Cu/PVC/750V/70°]-Un-B1-3Cc (2F+N+T)              | [Cu/PVC/750V/70°]-Un-B1-3Cc            | 70                             | PVC        | 300MM²      | 1.00                 | <input checked="" type="checkbox"/> | Tamanho da fase | Steel        |
| 6  | [Cu/PVC/0.6-1kV/70°]-Un-B1-2Cc (F+N+T)            | [Cu/PVC/750V/70°]-Un-B1-2Cc            | 70                             | PVC        | 240MM²      | 1.00                 | <input checked="" type="checkbox"/> | Tamanho da fase | Steel        |
| 7  | [Cu/PVC/0.6-1kV/70°]-Un-B1-2Cc (2F+T)             | [Cu/PVC/750V/70°]-Un-B1-2Cc            | 70                             | PVC        | 240MM²      | 1.00                 | <input type="checkbox"/>            | Tamanho da fase | Steel        |
| 8  | [Cu/PVC/0.6-1kV/70°]-Un-B1-3Cc (2F+N+T)           | [Cu/PVC/750V/70°]-Un-B1-3Cc            | 70                             | PVC        | 300MM²      | 1.00                 | <input checked="" type="checkbox"/> | Tamanho da fase | Steel        |
| 9  | [Cu/PVC/0.6-1kV/70°]-Un-B1-3Cc (3F+T)             | [Cu/PVC/750V/70°]-Un-B1-3Cc            | 70                             | PVC        | 300MM²      | 1.00                 | <input type="checkbox"/>            | Tamanho da fase | Steel        |
| 10 | [Cu/PVC/0.6-1kV/70°]-Un-B1-4Cc (3F+N+T)           | [Cu/PVC/750V/70°]-Un-B1-3Cc            | 70                             | PVC        | 300MM²      | 1.00                 | <input checked="" type="checkbox"/> | Tamanho da fase | Steel        |
| 11 | [Cu/EPR-XLPE/0.6-1kV/90°]-Un-B1-2Cc (F+N+T)       | [Cu/EPR-XLPE/0,6k-1kV/90°]-Un-B1-2Cc   | 90                             | EPR-XLPE   | 240MM²      | 1.00                 | <input checked="" type="checkbox"/> | Tamanho da fase | Steel        |
| 12 | [Cu/EPR-XLPE/0.6-1kV/90°]-Un-B1-2Cc (2F+T)        | [Cu/EPR-XLPE/0,6k-1kV/90°]-Un-B1-2Cc   | 90                             | EPR-XLPE   | 240MM²      | 1.00                 | <input type="checkbox"/>            | Tamanho da fase | Steel        |
| 13 | [Cu/EPR-XLPE/0.6-1kV/90°]-Un-B1-3Cc (2F+N+T)      | [Cu/EPR-XLPE/0,6-1kV/90°]-Un-B1-3Cc    | 90                             | EPR-XLPE   | 300MM²      | 1.00                 | <input checked="" type="checkbox"/> | Tamanho da fase | Steel        |
| 14 | [Cu/EPR-XLPE/0.6-1kV/90°]-Un-B1-3Cc (3F+T)        | [Cu/EPR-XLPE/0,6-1kV/90°]-Un-B1-3Cc    | 90                             | EPR-XLPE   | 300MM²      | 1.00                 | <input type="checkbox"/>            | Tamanho da fase | Steel        |
| 15 | [Cu/EPR-XLPE/0.6-1kV/90°]-Un-B1-4Cc (3F+N+T)      | [Cu/EPR-XLPE/0,6-1kV/90°]-Un-B1-3Cc    | 90                             | EPR-XLPE   | 300MM²      | 1.00                 | <input checked="" type="checkbox"/> | Tamanho da fase | Non-Magnetic |
| 16 | [Cu/PVC/0.6-1kV/70°]-Un-D-2Cc (F+N+T)             | [Cu/PVC/750V/70°]-Un-D-2Cc             | 70                             | PVC        | 120MM²      | 1.00                 | <input checked="" type="checkbox"/> | Tamanho da fase | Steel        |
| 17 | [Cu/PVC/0.6-1kV/70°]-Un-D-2Cc (2F+T)              | [Cu/PVC/750V/70°]-Un-D-2Cc             | 70                             | PVC        | 120MM²      | 1.00                 | <input type="checkbox"/>            | Tamanho da fase | Steel        |
| 18 | [Cu/PVC/0.6-1kV/70°]-Un-D-3Cc (2F+N+T)            | [Cu/PVC/750V/70°]-Un-D-3Cc             | 70                             | PVC        | 240MM²      | 1.00                 | <input checked="" type="checkbox"/> | Tamanho da fase | Steel        |
| 19 | [Cu/PVC/0.6-1kV/70°]-Un-D-3Cc (3F+T)              | [Cu/PVC/750V/70°]-Un-D-3Cc             | 70                             | PVC        | 120MM²      | 1.00                 | <input type="checkbox"/>            | Tamanho da fase | Steel        |
| 20 | [Cu/PVC/0.6-1kV/70°]-Un-D-4Cc (3F+N+T)            | [Cu/PVC/750V/70°]-Un-D-3Cc             | 70                             | PVC        | 240MM²      | 1.00                 | <input checked="" type="checkbox"/> | Tamanho da fase | Steel        |
| 21 | [Cu/EPR-XLPE/0.6-1kV/90°]-Un-D-2Cc (F+N+T)        | [Cu/EPR-XLPE/0,6-1kV/90°]-Un-D-2Cc     | 90                             | EPR-XLPE   | 240MM²      | 1.00                 | <input checked="" type="checkbox"/> | Tamanho da fase | Steel        |
| 22 | [Cu/EPR-XLPE/0.6-1kV/90°]-Un-D-2Cc (2F+T)         | [Cu/EPR-XLPE/0,6-1kV/90°]-Un-D-2Cc     | 90                             | EPR-XLPE   | 240MM²      | 1.00                 | <input type="checkbox"/>            | Tamanho da fase | Steel        |
| 23 | [Cu/EPR-XLPE/0.6-1kV/90°]-Un-D-3Cc (2F+N+T)       | [Cu/EPR-XLPE/0,6-1kV/90°]-Un-D-3Cc     | 90                             | EPR-XLPE   | 240MM²      | 1.00                 | <input checked="" type="checkbox"/> | Tamanho da fase | Steel        |
| 24 | [Cu/EPR-XLPE/0.6-1kV/90°]-Un-D-3Cc (3F+T)         | [Cu/EPR-XLPE/0,6-1kV/90°]-Un-D-3Cc     | 90                             | EPR-XLPE   | 240MM²      | 1.00                 | <input type="checkbox"/>            | Tamanho da fase | Steel        |
| 25 | [Cu/EPR-XLPE/0.6-1kV/90°]-Un-D-4Cc (3F+N+T)       | [Cu/EPR-XLPE/0,6-1kV/90°]-Un-D-3Cc     | 90                             | EPR-XLPE   | 240MM²      | 1.00                 | <input checked="" type="checkbox"/> | Tamanho da fase | Steel        |
| 26 | [Cu/PVC/0.6-1kV/70°]-Un-B1-2Cc (F+N+T)-Iluminação | [Cu/PVC/750V/70°]-Un-B1-2Cc-Iluminação | 70                             | PVC        | 10MM²       | 1.00                 | <input type="checkbox"/>            | Tamanho da fase | Steel        |
| 27 | [Cu/PVC/0.6-1kV/70°]-Un-B1-2Cc (2F+T)-Iluminação  | [Cu/PVC/750V/70°]-Un-B1-2Cc-Iluminação | 70                             | PVC        | 10MM²       | 1.00                 | <input checked="" type="checkbox"/> | Tamanho da fase | Steel        |
| 28 | [Cu/PVC/750V/70°]-Un-B1-2Cc (F+N+T)-Iluminação    | [Cu/PVC/750V/70°]-Un-B1-2Cc-Iluminação | 70                             | PVC        | 10MM²       | 1.00                 | <input type="checkbox"/>            | Tamanho da fase | Steel        |
| 29 | [Cu/PVC/750V/70°]-Un-B1-2Cc (2F+T)-Iluminação     | [Cu/PVC/750V/70°]-Un-B1-2Cc-Iluminação | 70                             | PVC        | 10MM²       | 1.00                 | <input checked="" type="checkbox"/> | Tamanho da fase | Steel        |

Fonte: Própria do Autor

Também é preciso configurar as seções dos eletrodutos. Comercialmente, as medidas internas são apresentadas em polegadas, porém no *software* essas informações precisam ser inseridas em milímetros. Isso ocorre pois nas unidades gerais de projeto, precisa-se definir se seguirá padrão internacional ou padrão imperial. Para não haver dificuldades em outras áreas, opta-se por seguir no padrão internacional. Nessa área, apresentada conforme a Figura 19, também se inserem todos os padrões de eletrodutos a serem utilizados no projeto.

Figura 19-Padrão de eletrodutos

Variação de eletroduto. Para cada opção seguirá padrões específicos

Norma: PVC Corrugado Amarelo

Novo tamanho...    Excluir tamanho    Modificar tamanho...

| Tamanho comercial | ID     | OD     | Raio de curvatura mínimo | Usado em listas de tamanhos         |
|-------------------|--------|--------|--------------------------|-------------------------------------|
| 16.000            | 11.700 | 16.000 | 50.000                   | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 20.000            | 15.000 | 20.000 | 60.000                   | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 25.000            | 19.400 | 25.000 | 30.000                   | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 32.000            | 25.600 | 32.000 | 35.000                   | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 43.000            | 38.000 | 43.000 | 50.000                   | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 47.000            | 43.000 | 47.000 | 50.000                   | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 53.000            | 50.000 | 53.000 | 50.000                   | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 78.000            | 75.000 | 78.000 | 60.000                   | <input checked="" type="checkbox"/> |

Fonte: Própria do autor

Para o sistema de distribuição interno da indústria, precisa-se também inserir as informações pertinentes. Desta forma, insere-se o número de fases, a configuração de ligação do secundário do transformador, a tensão de fase e a tensão de linha. Assim se obtém as configurações apresentadas na Figura 20:

Figura 20-Configuração do sistema de distribuição interno da indústria

|   | Nome                        | Fase  | Configuração | Fiação | Voltagem L-L | Voltagem L-G |
|---|-----------------------------|-------|--------------|--------|--------------|--------------|
| 1 | 127/220V Bifásico (2F+N+T)  | Único | Nenhum       | 3      | 220V         | 127V         |
| 2 | 127/220V Bifásico (2F+T)    | Único | Nenhum       | 3      | 220V         | 127V         |
| 3 | 127/220V Monofásico (F+N+T) | Único | Nenhum       | 2      | Nenhum       | 127V         |
| 4 | 127/220V Trifásico (3F+N+T) | Três  | Ipsilon      | 4      | 220V         | 127V         |
| 5 | 220/380V Bifásico (2F+N+T)  | Único | Nenhum       | 3      | 380V         | 220V         |
| 6 | 220/380V Monofásico (F+N+T) | Único | Nenhum       | 2      | Nenhum       | 220V         |
| 7 | 220/380V Trifásico (3F+N+T) | Três  | Ipsilon      | 4      | 380V         | 220V         |
| 8 | 220/440 Trifásico (3F+N+T)  | Três  | Ipsilon      | 4      | 440V         | 220V         |

Fonte: Própria do autor

Com o intuito de aplicar os conceitos descritos no Capítulo 2.2, criou-se parâmetros para serem utilizados como bases na transformação de valores por unidade. Eles foram adicionados na parte de “Informação de projeto” e devem ser inseridos pelo projetista no *software*. Geralmente, os valores seguem a tensão do secundário escolhida e a potência do transformador utilizado, cabendo ao projetista realizar esse ajuste. Nesta mesma seção, precisa ser informado ao *software* qual a sequência a ser trabalhada e a potência de curto-circuito no ponto de entrega. Nesta versão inicial do modelo desenvolvido, apenas será utilizada a sequência positiva para os cálculos, conforme é exibido na Figura 21.

Figura 21-Informações iniciais de projeto

Informações do projeto

Familia: Família do sistema: Informações do projeto

Tipo:

Carregar...

Editar tipo...

Parâmetros de instância - Controlam a instância selecionada ou a ser criada

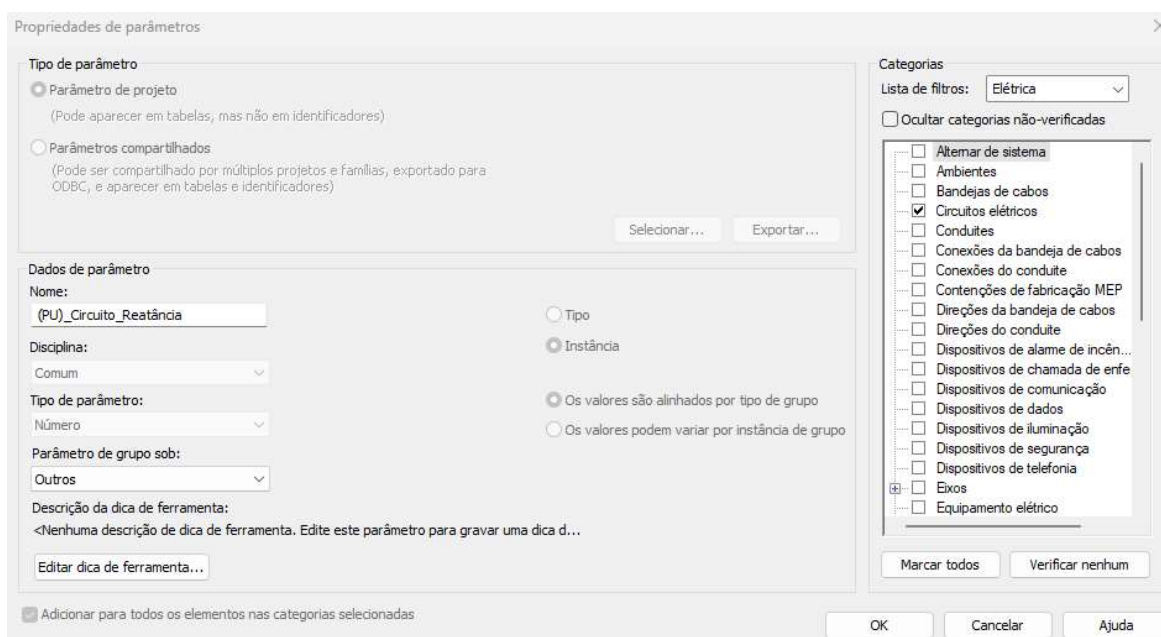
| Parâmetro                                            | Valor         |
|------------------------------------------------------|---------------|
| <b>Construção</b>                                    |               |
| <b>Dados de identidade</b>                           |               |
| <b>Análise da energia</b>                            |               |
| <b>Geral</b>                                         |               |
| Potência Base (kVA)                                  | 45.000000     |
| Sequência                                            | Positiva      |
| Tensão Base (kV)                                     | 0.220000      |
| Potência de Curto Circuito no ponto de Entrega (kVA) | 200000.000000 |
| <b>Outros</b>                                        |               |

OK Cancelar

Fonte: Própria do autor

Além dos parâmetros de projeto inseridos para serem utilizados como valores de base, foi preciso incluir outros para que o modelo pudesse trabalhar com valores em *pu*. Desse modo, criou-se parâmetros de projeto auxiliares que funcionarão como impedâncias na base selecionada e são vinculadas às categorias de famílias. Elas são calculadas a partir das equações do Capítulo 2.2. Para cada componente do sistema, é encontrada uma impedância, tornando possível a somatória de impedâncias até os terminais do motor, e por fim o cálculo da corrente durante a partida. Para isso, é necessário adicionar esses parâmetros, conforme é exibido na Figura 22.

Figura 22-Parâmetros de projeto para impedâncias em pu



Fonte: Própria do autor

### 3.1.3. CONFIGURAÇÃO PARA O DIMENSIONAMENTO AUTOMÁTICO

O modelo em Revit permite que o usuário estabeleça seus padrões e configurações conforme a necessidade. Desta forma, a ferramenta de dimensionamento automático utiliza conceitos similares a planilhas eletrônicas, que realiza cálculos empregando várias operações com distintos dados.

Para a disciplina de instalações elétricas, o *software* aplica o conceito de Painéis. Eles funcionam como planilhas e são altamente configuráveis, podendo extrair do modelo valores de parâmetros e realizar operações matemáticas ou lógicas. Nas colunas, insere-se os parâmetros que podem abranger quaisquer

categorias de família. Se forem correlacionados, podem realizar cálculos e retornar valores. Exemplo disso, é que pode-se relacionar a potência ativa (dado em Watts) com o fator de potência e com o resultado do produto encontrar a potência aparente (dado em Volt-Ampère).

Com isso, apresenta-se a Tabela 1, onde pode-se dispor outras informações além das necessárias para dimensionamento, como numeração do circuito daquele quadro e o nome destinado à carga. Pode-se também incluir fatores de correção, como fatores de agrupamento e fatores de correção de temperatura.

Tabela 1-Dados apresentados nos Painéis

| Painel: CCM-2                                       |           |                    |      |                    |                |                |      |        |         |                   |                                |                     |                    |                           |                                                               |                                       |                                                         |
|-----------------------------------------------------|-----------|--------------------|------|--------------------|----------------|----------------|------|--------|---------|-------------------|--------------------------------|---------------------|--------------------|---------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Sistema de Alimentação: 127/220V Trifásico (3F+N+T) |           |                    |      |                    |                |                |      |        |         |                   |                                |                     |                    |                           |                                                               |                                       |                                                         |
| Circuito                                            | Descrição | Tensão (V)         | FP   | Potência Ativa (W) | Carga aparente | FCT            | FCA  | Ip (A) | Ipc (A) | Comp (m)          | Queda de Tensão Admissível (%) | Queda de Tensão (V) | Queda de tensão(%) | Proteção (Disj)           | Classificação Ajustar caso Queda de tensão maior que o Limite | Isolação/Material/ Instalação         | Condutor Calculado / Capacidade de condução de corrente |
| 1                                                   | M1        | 220.00             | 0.86 | 8425.99 W          | 9798 VA        | 1.00           | 1.00 | 12.9   | 12.9    | 19.2              | 2.0                            | 3.3                 | 1.493859           | 20.00 A                   | 20.00 A                                                       | [Cu/EPR-XLPE/0.6-1kV/90°]-Un-B1-3Cc.. | 3-#2,5MM², 1-#2,5MM²                                    |
| 2                                                   | M2        | 220.00             | 0.86 | 8425.99 W          | 9798 VA        | 1.00           | 1.00 | 12.9   | 12.9    | 18.1              | 2.0                            | 3.1                 | 1.414316           | 20.00 A                   | 20.00 A                                                       | [Cu/EPR-XLPE/0.6-1kV/90°]-Un-B1-3Cc.. | 3-#2,5MM², 1-#2,5MM²                                    |
| 3                                                   | M3        | 220.00             | 0.86 | 8425.99 W          | 9798 VA        | 1.00           | 1.00 | 12.9   | 12.9    | 17.1              | 2.0                            | 2.9                 | 1.336332           | 20.00 A                   | 20.00 A                                                       | [Cu/EPR-XLPE/0.6-1kV/90°]-Un-B1-3Cc.. | 3-#2,5MM², 1-#2,5MM²                                    |
| 4                                                   | M4        | 220.00             | 0.84 | 926.34 W           | 1103 VA        | 1.00           | 1.00 | 2.9    | 2.9     | 14.8              | 2.0                            | 0.6                 | 0.253968           | 20.00 A                   | 20.00 A                                                       | [Cu/EPR-XLPE/0.6-1kV/90°]-Un-B1-3Cc.. | 3-#2,5MM², 1-#2,5MM²                                    |
| 5                                                   | M2        | 220.00             | 0.84 | 926.34 W           | 1103 VA        | 1.00           | 1.00 | 2.9    | 2.9     | 13.8              | 2.0                            | 0.5                 | 0.236806           | 20.00 A                   | 20.00 A                                                       | [Cu/EPR-XLPE/0.6-1kV/90°]-Un-B1-3Cc.. | 3-#2,5MM², 1-#2,5MM²                                    |
| 6                                                   | M6        | 220.00             | 0.84 | 926.34 W           | 1103 VA        | 1.00           | 1.00 | 2.9    | 2.9     | 12.8              | 2.0                            | 0.5                 | 0.219644           | 20.00 A                   | 20.00 A                                                       | [Cu/EPR-XLPE/0.6-1kV/90°]-Un-B1-3Cc.. | 3-#2,5MM², 1-#2,5MM²                                    |
| 7                                                   | M7        | 220.00             | 0.84 | 926.34 W           | 1103 VA        | 1.00           | 1.00 | 2.9    | 2.9     | 12.9              | 2.0                            | 0.5                 | 0.222112           | 20.00 A                   | 20.00 A                                                       | [Cu/EPR-XLPE/0.6-1kV/90°]-Un-B1-3Cc.. | 3-#2,5MM², 1-#2,5MM²                                    |
| 8                                                   | M8        | 220.00             | 0.82 | 507.97 W           | 619 VA         | 1.00           | 1.00 | 1.6    | 1.6     | 17.3              | 2.0                            | 0.4                 | 0.162628           | 20.00 A                   | 20.00 A                                                       | [Cu/EPR-XLPE/0.6-1kV/90°]-Un-B1-3Cc.. | 3-#2,5MM², 1-#2,5MM²                                    |
| 9                                                   | M9        | 220.00             | 0.82 | 507.97 W           | 619 VA         | 1.00           | 1.00 | 1.6    | 1.6     | 17.8              | 2.0                            | 0.4                 | 0.167338           | 20.00 A                   | 20.00 A                                                       | [Cu/EPR-XLPE/0.6-1kV/90°]-Un-B1-3Cc.. | 3-#2,5MM², 1-#2,5MM²                                    |
| 10                                                  | M10       | 220.00             | 0.82 | 507.97 W           | 619 VA         | 1.00           | 1.00 | 1.6    | 1.6     | 18.3              | 2.0                            | 0.4                 | 0.172048           | 20.00 A                   | 20.00 A                                                       | [Cu/EPR-XLPE/0.6-1kV/90°]-Un-B1-3Cc.. | 3-#2,5MM², 1-#2,5MM²                                    |
| 11                                                  | M11       | 220.00             | 0.82 | 507.97 W           | 619 VA         | 1.00           | 1.00 | 1.6    | 1.6     | 18.8              | 2.0                            | 0.4                 | 0.176945           | 20.00 A                   | 20.00 A                                                       | [Cu/EPR-XLPE/0.6-1kV/90°]-Un-B1-3Cc.. | 3-#2,5MM², 1-#2,5MM²                                    |
| 12                                                  |           |                    |      |                    |                |                |      |        |         |                   |                                |                     |                    |                           |                                                               |                                       |                                                         |
|                                                     |           |                    |      |                    |                |                |      |        |         |                   |                                |                     |                    |                           |                                                               |                                       |                                                         |
| Classificação da Carga                              |           | Potência Instalada |      |                    |                | Fator de Carga |      |        |         | Potência Ajustada |                                |                     |                    | Totais do Painel          |                                                               |                                       |                                                         |
| Partida Direta                                      |           | 6888 VA            |      |                    |                | 1.00           |      |        |         | 6888 VA           |                                |                     |                    |                           |                                                               |                                       |                                                         |
| Partida Delta-Estrela                               |           | 29393 VA           |      |                    |                | 2.50           |      |        |         | 73482 VA          |                                |                     |                    |                           |                                                               |                                       |                                                         |
|                                                     |           |                    |      |                    |                |                |      |        |         |                   |                                |                     |                    | Potência Total Instalada: |                                                               |                                       |                                                         |
|                                                     |           |                    |      |                    |                |                |      |        |         |                   |                                |                     |                    | Potência Total Demandada: |                                                               |                                       |                                                         |
|                                                     |           |                    |      |                    |                |                |      |        |         |                   |                                |                     |                    | Corrente Total Instalada: |                                                               |                                       |                                                         |
|                                                     |           |                    |      |                    |                |                |      |        |         |                   |                                |                     |                    | Corrente Total Demandada: |                                                               |                                       |                                                         |
|                                                     |           |                    |      |                    |                |                |      |        |         |                   |                                |                     |                    | 1                         |                                                               |                                       |                                                         |
| Notas:                                              |           |                    |      |                    |                |                |      |        |         |                   |                                |                     |                    |                           |                                                               |                                       |                                                         |

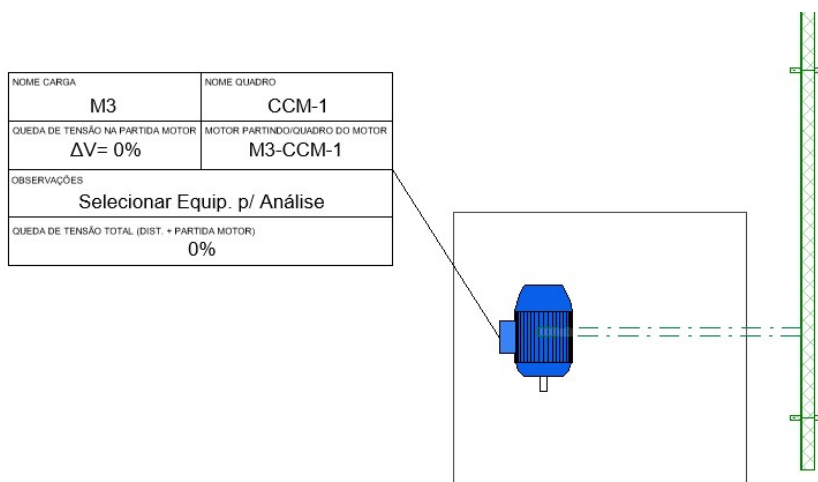
Fonte: Própria do autor

Com os fatores e grandezas inseridas na tabela, permite-se ao usuário verificar alguns resultados. Dentre eles, pode-se destacar as informações de comprimento do circuito, que é fundamental para a correta funcionalidade da planilha. Também se inclui informações de queda de tensão, apresentada tanto em Volts como em percentagem em relação a nominal selecionada. Na parte de dimensionamentos e proteções, a corrente mínima nominal do disjuntor é apresentada automaticamente e a partir dessa informação, é dimensionada a seção nominal do cabo de fase, neutro e terra, obedecendo a regra estipulada apresentada na Figura 18. Esse dimensionamento dos circuitos pode ser ajustado de acordo com o critério de queda de tensão, caso extrapole a queda de tensão máxima permitida naquele trecho.

### 3.1.4. ANÁLISE DA PARTIDA DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

A análise dos impactos que a partida dos motores causa na instalação deve ser disponibilizada ao projetista com todas as informações pertinentes para que ele possa tomar a correta decisão e com o menor custo possível, otimizando o projeto. Para isso, cria-se uma simbologia que se altera, conforme os dimensionamentos e seleções incorporadas. Assim, na Figura 23, concebe-se uma indicação visual para que possa informar em projeto qual o nome do motor, qual CCM ele está, o motor que está partindo, a queda de tensão devida a partida do motor e a queda combinada entre a queda natural, ocasionada pelo efeito Joule, que consiste na conversão de energia elétrica em calor quando uma corrente passa por um condutor, dissipando energia e consequentemente ocasionando queda de tensão no trecho. A parte em que a queda natural é considerada ocorre entre a carga e seu respectivo quadro de comando e proteção. Essa somatória entre as quedas torna-se necessária pois no momento da partida de um motor, as demais cargas poderão estar em funcionamento, de forma que haverá sobreposição de quedas, podendo resultar em valores que não satisfaçam as condições mínimas de operação.

Figura 23-Indicação visual em projeto



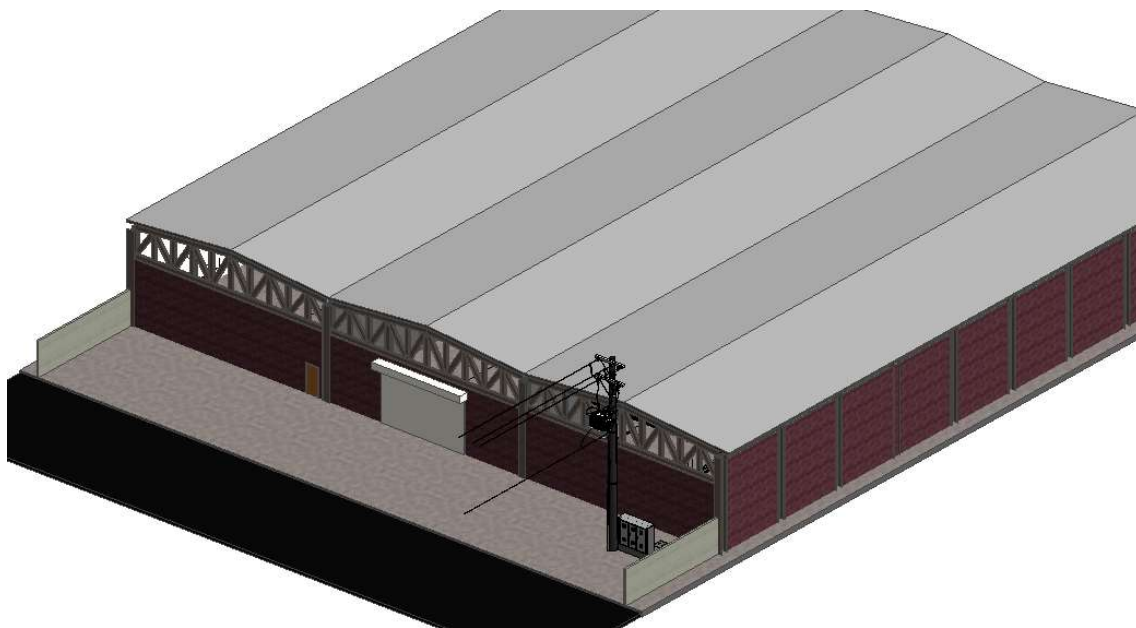
Fonte: Própria do autor

Essa funcionalidade é chamada de item de anotação, e pode ser criada de acordo com a necessidade. Com ela, pode-se associar os parâmetros e apresentá-los de forma gráfica.

### 3.1.5. MODELAGEM CIVIL E ELÉTRICA PARA SIMULAÇÃO

Com a finalidade de servir como base para a reprodução dos conceitos discutidos, criou-se uma indústria genérica, que permitiu aplicar as ferramentas desenvolvidas. Assim, modelou-se um galpão, conforme apresentado na Figura 24, que serviu como estrutura civil onde a infraestrutura de elétrica foi instalada.

Figura 24-Modelagem Civil



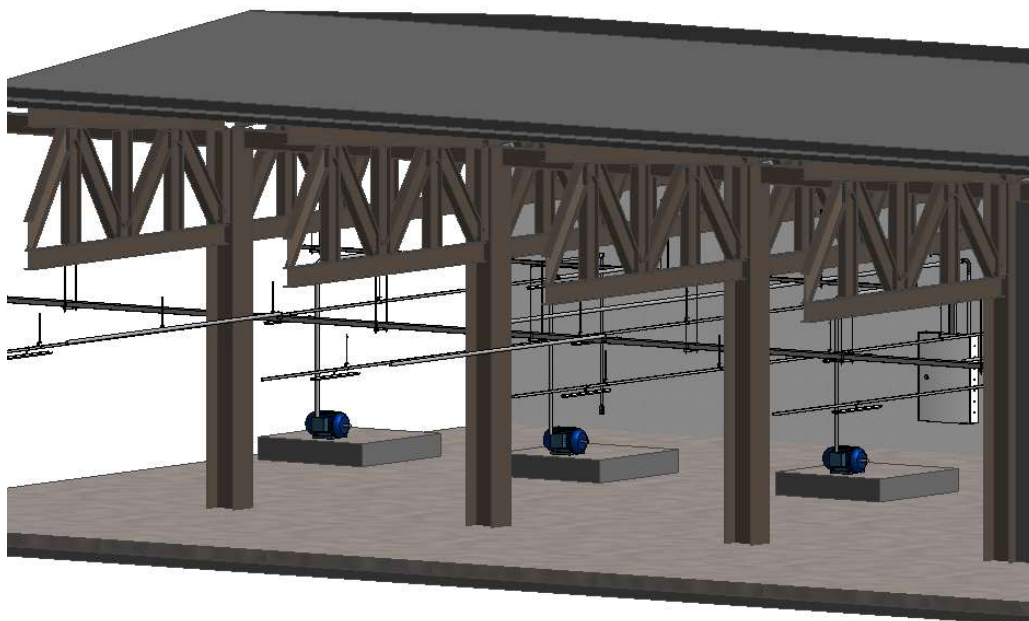
Fonte: Própria do autor

Neste galpão, houve a disposição dos motores e quadros elétricos, setorizando em quatro quadros de comando de motor, também chamados de CCMs. Também se inseriu sistemas de iluminação e tomadas, tornando possível a análise de quedas de tensão. Toda a distribuição passará pelo Quadro de Distribuição Central (QDC). A alimentação da concessionária chegará no QDC através de uma rede trifásica em 13,8kV e terá medição indireta, localizada num abrigo ao lado do poste. Haverá transformação aérea, que fornecerá à indústria uma tensão no secundário de 220/127V (tensão de linha e tensão de fase respectivamente). A configuração do transformador seguirá na ligação delta no primário e estrela aterrada no secundário.

A alimentação dos quadros de comando dos motores, os motores e de outras cargas seguirá através de infraestrutura aparente, dispostas em eletrodutos de aço galvanizado zincado e eletrocalhas lisas, com chapas que

podem variar de acordo com o tamanho empregado. Na Figura 25 é apresentada a vista 3D da instalação elétrica no interior do galpão modelado.

Figura 25-Infraestrutura elétrica alimentando os motores



Fonte: Própria do autor

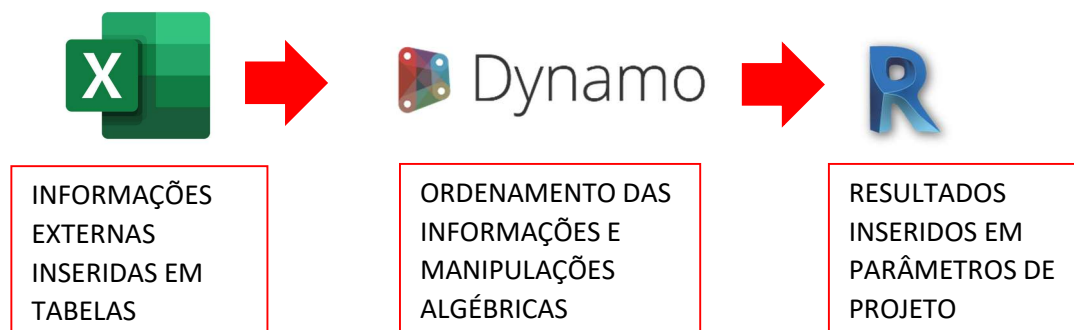
### 3.1.6. PROGRAMAÇÃO DYNAMO

Devido à grandes mudanças impostas no *software*, algumas funcionalidades inseridas não possuem correlação com outros parâmetros, em vista que o Revit não consegue interpretá-las. Um grande exemplo disso é o valor em *pu*, que não é disponibilizado na versão original e é vital o correto funcionamento para aplicar os conceitos de análise da partida do motor. Para contornar essas limitações, utilizou-se o Dynamo, que como já discutido, é capaz de manipular os valores de parâmetros inseridos, aplicar as operações pertinentes e retornar para o modelo os resultados calculados.

Uma das principais funcionalidades empregadas, é a utilização de planilhas eletrônicas, como o Excel, para fornecer informações externas do projeto ao Dynamo. Com isso, pode-se aplicar as tabelas do Apêndice B e correlacioná-las aos parâmetros pertinentes. A partir dessa função, torna-se possível o cálculo das reatâncias e resistências dos elementos e os cálculos de dimensionamento automático (como a inserção da proteção termomagnética).

Na Figura 26 apresenta-se um esquemático de como é a integração entre os *softwares*.

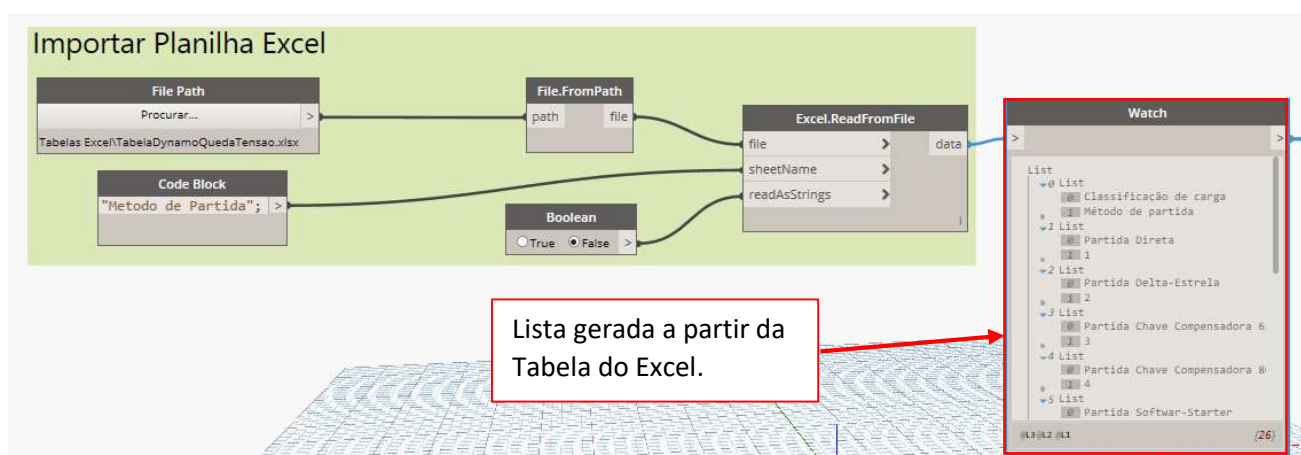
Figura 26-Diagrama de comunicação entre *softwares* – Excel, Dynamo e Revit



Fonte: Própria do Autor

A inserção da tabela no Dynamo é permitida através de alguns nodos próprios do *software*. Com a correta interligação entre eles, conforme a Figura 27, permite-se extrair listas. Essas listas contém os elementos, que estão dispostos em vetores, com funcionamento similar a uma linha do Excel, sendo que cada célula de uma mesma linha contém uma determinada informação. Assim, um único vetor pode conter uma quantidade indeterminada de elementos e cada um estará em uma posição específica, chamada de índices. As listas no Dynamo também contém sub-listas, que permitem criar camadas com vários vetores.

Figura 27-Importação de uma planilha para o Dynamo



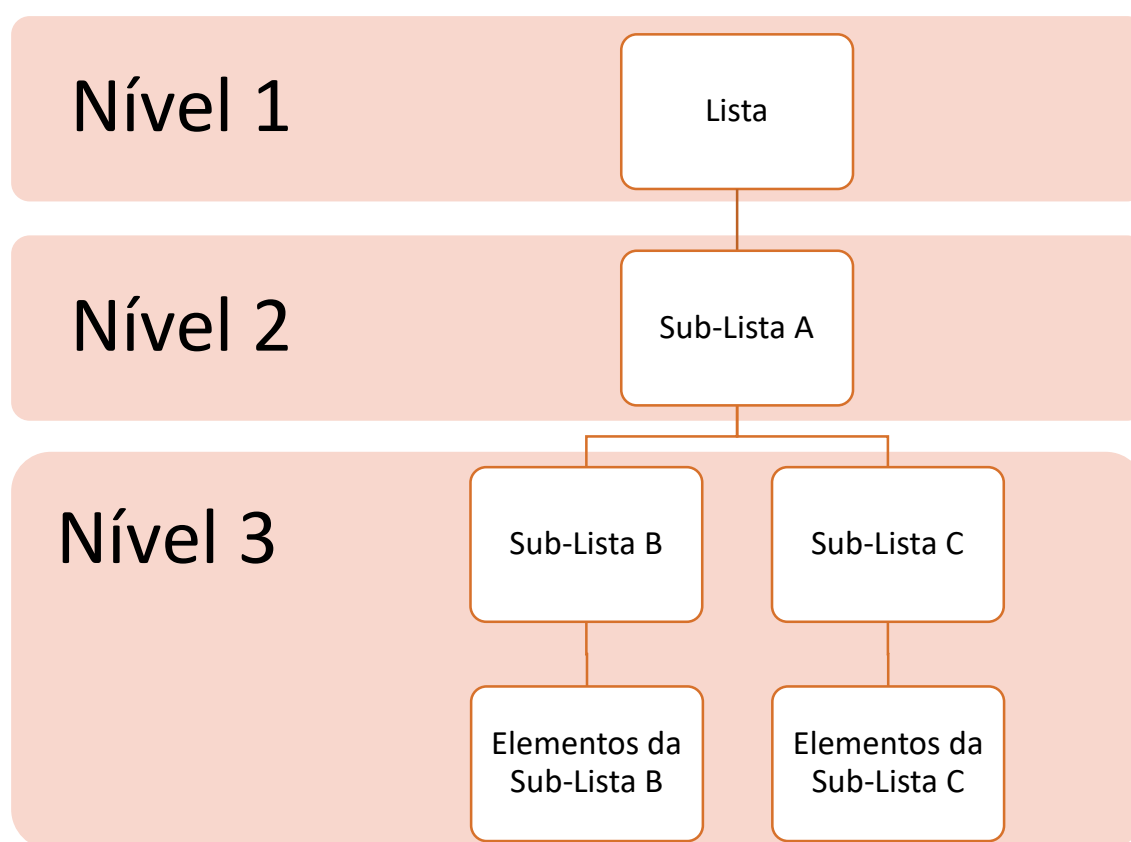
Fonte: Própria do Autor

As camadas da lista no Dynamo, que também são chamadas de níveis, permitem que os índices dos vetores sejam preenchidos com outros vetores.

Assim, a cada nível que é adicionado, a lista é ramificada. Uma lista sempre estará acompanhada de uma sub-lista, de forma que ao criar uma lista inicial, ela já terá uma e conseqüentemente estará no nível 2.

A sub-lista pode ter inúmeros elementos e, conseqüentemente, inúmeras sub-listas. A Figura 28 exemplifica a lista gerada utilizando o Excel, exibida na Figura 27.

Figura 28-Distribuição de listas, sub-listas e elementos



Fonte: Própria do Autor

Com os valores de referência obtidos a partir das tabelas de Excel, necessita-se associá-los à parâmetros do Revit. Para isso, precisa-se ordenar o vetor de forma que o valor seja corretamente organizado. Assim, cria-se uma rotina que verifica no modelo BIM se o parâmetro está sendo empregado, compara com a lista importada do Excel e retorna qual é a posição do índice que há essa correspondência. Na Figura 29, apresenta-se o ordenamento feito com base na lista gerada da Figura 27. Pode-se observar que em alguns casos não houve uma correspondência. Nessa situação, a rotina retorna no índice da sub-

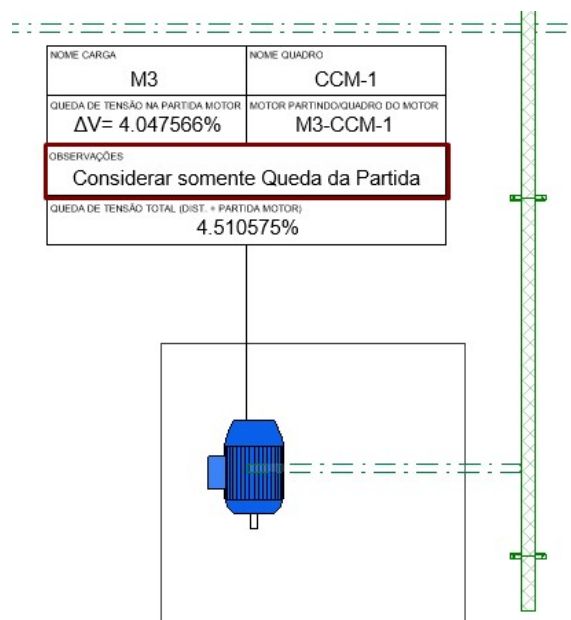




Por fim, a terceira função principal consiste em reunir todas as informações do projeto e calcular a corrente de partida do motor, com base na somatória de impedâncias à montante mais a impedância da máquina durante a operação de partida conforme a seção 2.2. Nessa parte é disponibilizada a opção para selecionar no projeto qual motor está partindo e qual é o ponto de análise que o projetista quer verificar. Esses pontos consistem em qualquer elemento elétrico suscetível à queda de tensão devido a partida do motor, necessitando apenas compartilhar um mesmo quadro com o motor em partida, por exemplo um quadro de distribuição geral. A partir disso, calcula-se a queda de tensão devido exclusivamente à partida do motor.

Para apresentar essas informações ao projetista, conforme é apresentado na Figura 23, soma-se a queda de tensão ocasionada exclusivamente devido a partida do motor com a queda de tensão que ocorre naturalmente (devido ao efeito Joule). O único caso que não ocorre essa soma é quando a carga analisada é a mesma que está partindo. Neste caso, aparecerá uma mensagem indicando para desconsiderar a soma realizada. A Figura 31 apresenta a nota indicada com o aviso para a desconsideração.

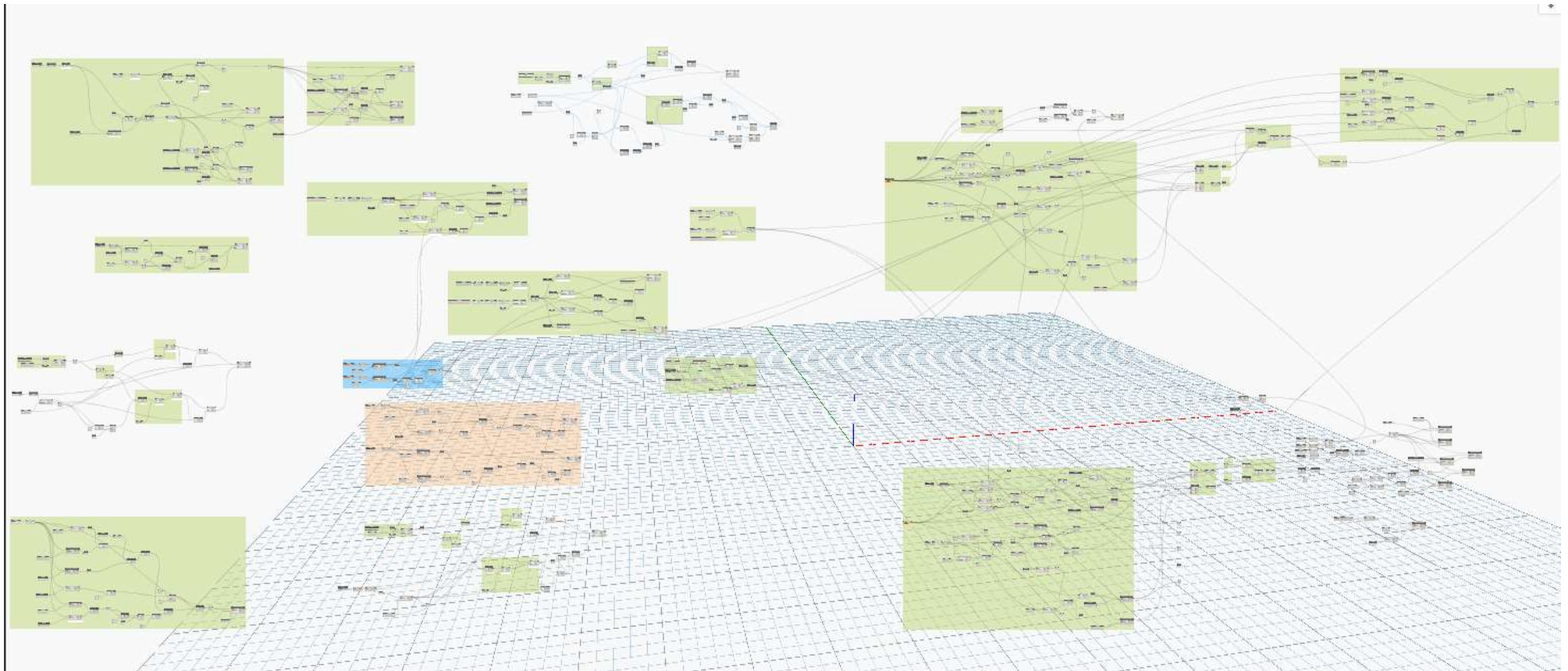
Figura 31-Indicação de partida e análise do mesmo motor



Fonte: Própria do autor

Na Figura 32 é apresentado um panorama geral da programação desenvolvida, contendo todas as três etapas descritas anteriormente.

Figura 32-Vista geral da programação realizada em Dynamo



Fonte: Própria do Autor

### 3.2. RESULTADOS OBTIDOS COM AS SIMULAÇÕES

Aplicando os conceitos descritos e utilizando as ferramentas apresentadas, realizou-se um projeto elétrico industrial com o propósito de coletar os resultados de quedas de tensão devido a partida de motores de indução trifásico. Com esses valores encontrados a partir da simulação, realiza-se os cálculos teóricos com o objetivo de validar os resultados obtidos nas simulações.

Como a teoria é aplicada à uma instalação previamente dimensionada, inicialmente se dimensiona a indústria com os critérios apresentados na NBR-5410, que consiste em analisar a corrente corrigida e a queda de tensão. Para isso, utilizou-se o dimensionamento automático do Revit, com algumas correções sendo necessárias para que os valores fossem fidedignos à norma brasileira vigente.

A instalação industrial dividiu-se em cinco linhas de produção. Para cada linha, adicionou-se um conjunto de motores assíncronos trifásicos cuja especificações do fabricante e modelo já foram apresentados anteriormente. Na Tabela 2, apresenta-se a distribuição dos motores nas linhas, suas potências e o quadro responsável pelo comando e proteção dos motores.

Tabela 2-Distribuição dos Motores na indústria e suas respectivas potências

| Linha de produção | Centro de Comando de Motor | Quantidade de Motores e potência de cada (em <i>Horse Power</i> ) |
|-------------------|----------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Linha 1           | CCM1                       | 2x50HP                                                            |
| Linha 2           | CCM2                       | 3x5HP + 1x1HP                                                     |
| Linha 3           | CCM3                       | 2x25HP                                                            |
| Linha 4           | CCM4                       | 1x12,5HP+1x20HP                                                   |
| Linha 5           | CCM5                       | 1x300HP                                                           |

Fonte: Própria do Autor

Alimentando os Centros de Comando dos motores, está o Quadro de Distribuição Central, ou QDC. A partir dele, ocorrerá toda a distribuição de energia que vem do medidor de entrada. Adiciona-se também, alimentado pelo QDC, um quadro de luz que será responsável por atender os pontos de

iluminação e tomadas. Na Figura 39 do Apêndice D, apresenta-se o diagrama unifilar geral da industrial, com as proteções e os circuitos de cada quadro. Nas figuras subsequências do Apêndice D (Figura 40, Figura 41, Figura 42, Figura 43 e Figura 44), apresenta-se as proteções e circuitos dos motores.

Como os cálculos descritos na seção 2.2 necessitam de informações externas, como a perda nos enrolamentos do transformador, as características

### 3.2.1. SIMULAÇÃO

A simulação consistiu em analisar dois pontos da instalação, utilizando o Motor 1 do CCM5 como motor em partida com três diferentes métodos de partida (partida direta, estrela-triângulo e chave compensadora de 65%). Os pontos analisados foram os próprios terminais do motor em partida e os terminais do Motor 1 do CCM1. Esses pontos podem ser identificados nos diagramas unifilares pertinentes (Figura 40 e Figura 44). As cargas empregadas no eixo de cada motor correspondem a um uso de 100% e os fatores de serviço de ambos foram considerados unitários.

Os valores de base adotados correspondem a potência nominal do transformador e da tensão nominal do secundário. É possível escolher outras bases para o cálculo, ficando à cargo do projetista a decisão, já que na programação desenvolvida há possibilidade de trabalhar com diferentes bases, sem alteração do resultado. Portanto tem-se os valores adotados de  $S_{base}=300\text{kVA}$  e  $V_{base}=0,22\text{kV}$ . Para a potência de curto-circuito no ponto de entrega da concessionária, adotou-se o valor de  $P_{cc}=200\text{MVA}$ .

Como os equacionamentos da seção 2.2 necessitam de valores de referência para o cálculo de impedâncias, utilizou-se as referências do Apêndice B como base, na sequência positiva. Assim, as impedâncias do transformador e dos circuitos, utilizaram as informações presentes neste suplemento. Como os cálculos dependem também das distâncias, extraiu-se do Revit os valores dos comprimentos de cada circuito envolvido na análise. Os resultados estão dispostos na Tabela 3.

Tabela 3 - Relação de distâncias

| De                 | Para    | Distância (metros) |
|--------------------|---------|--------------------|
| Medidor de entrada | QDG     | 9,1                |
| QDG                | CCM-1   | 52,5               |
| QDG                | CCM-5   | 63,7               |
| CCM-5              | MOTOR 1 | 16,7               |
| CCM-1              | MOTOR 1 | 19,1               |

Fonte: Própria do Autor

Os circuitos empregados, como já descrito anteriormente, estão apresentados nos diagramas unifilares do Apêndice D.

Com isso, executa-se a simulação selecionando o Motor 1 do CCM1 como ponto a ser analisado e o Motor 1 do CCM5 como motor em partida. Na Tabela 4 apresenta-se os resultados obtidos para três diferentes métodos de partida.

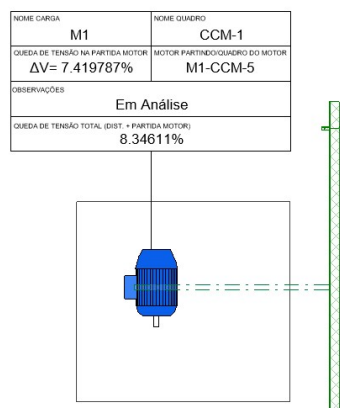
Tabela 4 - Queda de tensão no Motor 1 do CCM1

| Método de partida do Motor 1 do CCM5 | Queda de tensão devido à partida (%) | Queda de tensão total (%) | Corrente de partida (pu) |
|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Partida Direta                       | 7,42%                                | 8,35%                     | 1,5419                   |
| Partida Estrela-Triângulo            | 2,45%                                | 3,37%                     | 0,5088                   |
| Partida Chave-Compensadora 65%       | 3,12%                                | 4,04%                     | 0,6476                   |

Fonte: Própria do Autor

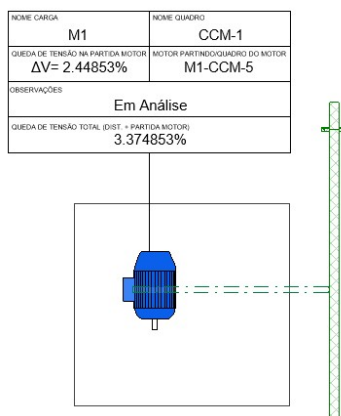
Os resultados apresentados na tabela acima também são exibidos na Figura 33, Figura 34 e Figura 35. Elas foram extraídas diretamente do Revit, sendo, portanto, a interface que o usuário terá para verificar as quedas de tensões provenientes da partida do motor. Contudo, a corrente de partida é disponibilizada apenas nos nodos visuais do Dynamo.

Figura 33 - Motor M1-CCM1 durante a partida direta do M1-CCM5



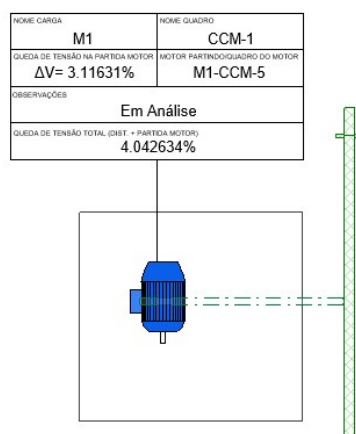
Fonte: Própria do Autor

Figura 34 - Motor M1-CCM1 durante a partida Estrela-Triângulo do M1-CCM5



Fonte: Própria do Autor

Figura 35 - Motor M1-CCM1 durante a partida chave-compensadora 65% do M1-CCM5



Fonte: Própria do Autor

Através dos cálculos teóricos apresentados no Apêndice A, constata-se que o *software* reproduziu fidedignamente o método, já que houve divergência na última casa decimal da simulação em ambas partidas. Essa divergência pode ter ocorrido devido à arredondamentos, já que no *software* trabalha-se com mais casas decimais.

Percebe-se também que a queda decorrente da partida do motor é substancialmente grande no método da partida direta, ao ponto de poder interferir no funcionamento do motor e excedendo, somente entre o quadro de comando do motor e o motor, os 7% de queda que a NBR-5410 exige de máximo (conforme item 6.2.7.1-c)(ABNT, 2004).

Também se executa outra simulação, similar a primeira, porém dessa vez o motor analisado é o mesmo que está partindo. Devido à essa condição, não terá combinações entre quedas, sendo analisado somente a queda de tensão devido à partida. Na Tabela 5, é apresentado o resultado da simulação. Como na simulação anterior o motor em partida é o mesmo para essa, torna-se dispensável apresentar a corrente de partida para os três métodos novamente.

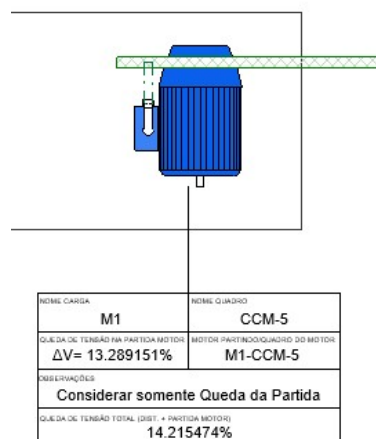
Tabela 5 - Queda de tensão nos terminais do Motor 1 do CCM5

| Método de partida do Motor 1 do CCM-5 | Queda de tensão devido à partida |
|---------------------------------------|----------------------------------|
| Partida Direta                        | 13,30%                           |
| Partida Estrela-Triângulo             | 4,39%                            |
| Partida Chave-Compensadora 65%        | 5,58%                            |

Fonte: Própria do Autor

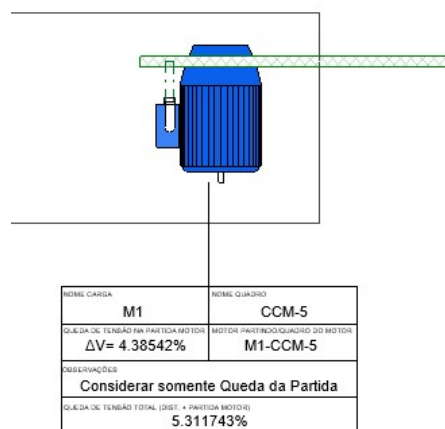
Do mesmo modo apresentado na simulação anterior, os resultados apresentados na tabela acima também são exibidos na Figura 36, Figura 37 e Figura 38. Da mesma forma que ocorreu anteriormente, a corrente de partida foi extraída dos nodos visuais do Dynamo.

Figura 36 - Motor M1-CCM5 durante a partida direta



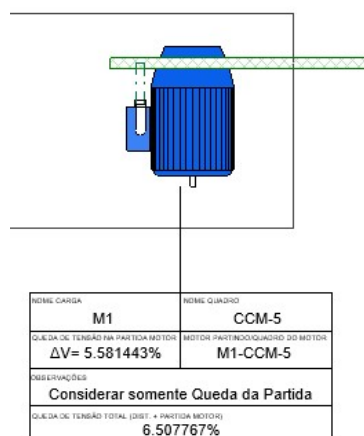
Fonte: Própria do Autor

Figura 37-Motor M1-CCM5 durante a partida Estrela-Triângulo



Fonte: Própria do Autor

Figura 38-Motor M1-CCM5 durante a partida Chave-compensadora 65%



Fonte: Própria do Autor

Verifica-se que as quedas de tensões estão compatíveis ao calculado teoricamente, disponibilizado no Apêndice A. Houve a mesma discrepância do caso anterior devido ao erro de arredondamento, principalmente no método Chave-Compensadora, porém a diferença entre ambos está abaixo de 1%, de forma que se pode considerar que os resultados obtidos com a simulação estão dentro do esperado.

Observa-se também que a queda de tensão obtida pelo método da partida direta excede o limite de 7% previsto na NBR-5410. Os demais métodos se encaixam nos limites estabelecidos, porém é preciso verificar o impacto do acionamento nas demais cargas conectadas na mesma entrada de energia, já que o acréscimo de corrente durante a partida é perceptível a todos os elementos da mesma instalação. Diante disso, caso exceda os limites de outros elementos durante o acionamento, torna-se necessário aplicar outros métodos de partida, como a soft-starter ou o inversor de frequência, para atenuar os efeitos na instalação.

#### 4. CONCLUSÕES

Após realizar as simulações com o Revit e a rotina desenvolvida em Dynamo, e compará-las com os cálculos teóricos, conclui-se que a ferramenta elaborada para a análise de quedas de tensões devido à partida de motores de indução trifásico, utilizando à análise das correntes de curto-circuito, opera de forma satisfatória, permitindo ao projetista identificar pontos que excedam os limites dos equipamentos e normativos e redimensionar o projeto caso necessário.

O fato de a ferramenta desenvolvida estar inserida no conceito BIM e abranger grande parte do uso industrial, predial e comercial, permite que seu uso seja disseminado e que outras evoluções possam ocorrer para abranger ainda mais situações. Também permite que estudantes possam realizar simulações e constatar que seus cálculos manuais são condizentes, em vista que no Dynamo dispõe de mostradores de valores para etapa realizada.

É importante ressaltar que apesar da facilidade fornecida ao usuário, o uso do modelo não é intuitivo, necessitando conhecer a localização das ferramentas e os parâmetros corretos a serem fornecidos para o sistema. Com isso, futuras versões do modelo podem ser desenvolvidas, como por exemplo a aplicação do conceito *plugin*, onde se criaria uma interface dinâmica e intuitiva, que seria de fácil instalação e fácil aplicabilidade.

A ferramenta proporciona inúmeras modificações e com isso novas funcionalidades podem ser empregadas, bastando adaptar as famílias, o modelo e a programação. Assim, permitiria ao usuário, por exemplo, expandir o número de motores partindo em simultâneo e analisar mais de um método de partida ao mesmo tempo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. NBR 5410: **Instalações Elétricas de baixa tensão**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

BRASIL. Decreto nº 9.983, de 22 de agosto de 2019. **Dispõe sobre a Estratégia Nacional de Disseminação do Building Information Modelling e institui o Comitê Gestor da Estratégia do Build Information Modelling**. Brasília, DF, 22 ago. 2019.

CAMPESTRINI, T. F.; GARRIDO, M. C.; JÚNIOR, R. M.; SCHEER, S.; FREITAS, M. C. D. **Entendendo BIM**. 1. ed. Curitiba. 2015.

Canal Energia, **Categoria IR3 Premium eleva nível de eficiência energética para motores elétricos no Brasil**. 2020. Disponível em: <<https://www.canalenergia.com.br/noticias/53156501/categoria-ir3-premium-eleva-nivel-de-eficiencia-energetica-para-motores-eletricos-no-brasil>>. Acesso em: 20 abr. de 2021.

CNI. **Brasil precisa de uma política industrial**. 2022. Disponível em: <<https://noticias.portaldaindustria.com.br/artigos/robson-braga-de-andrade/brasil-precisa-de-uma-politica-industrial/>>. Acesso em: 7 jan. 2023.

CONDE, J. **Como o Dynamo é Capaz de Otimizar Fluxos de Trabalho em Escritórios de Arquitetura**. 2019. Disponível em: <<https://blogs.autodesk.com/mundoaec/como-o-uso-do-dynamo-e-capaz-de-otimizar-fluxos-de-trabalho-01-programflow-png/>>. Acesso em: 18 fev. 2023.

Companhia Paulista de Força e Luz – CPFL SA. GED 2855. **Fornecimento em Tensão Primária 15kV, 25kV e 34,5kV**. Vol. 1. 2021. Disponível em: <[www.cpfl.com.br](http://www.cpfl.com.br)> Acessado em: 26 de abr. de 2022

ENEL SpA. **Fornecimento de energia elétrica em tensão secundária de distribuição**. 2014. Disponível em: <<https://www.enel.com.br>>. Acessado em: 26 de abr. de 2021.

FRANCHI, C. M. **Acionamentos Elétricos**. 4. ed. São Paulo: Ed. Érica, 2008.

KINDERMANN, G. **Curto-circuito**. 2. ed. Porto Alegre. Ed. Sagra Luzzatto, 1997.

MAMEDE FILHO, J. **Instalações Elétricas Industriais**. 9. ed. Ed.LTC, 2017.

MARDEGAN, C. **Curto-circuito para a seletividade**. In: Componentes simétricas. 2016. cap. IV.

PROCEEL. **Troca de motores como indutora de competitividade na indústria brasileira**. 2017. Disponível em: <[www.procelinfo.com.br](http://www.procelinfo.com.br)>. Acesso em: 02 jan. 2023.

ROBBA, E. J.; KAGAN, N.; SCHMIDT, H. P.; OLIVEIRA, C. C. B. **Introdução a Sistemas Elétricos de Potências: Componentes Simétricas**. 2. ed. São Paulo. Ed. EDGARD BLÜCHER, 1996.

SENA, P. C. P. **AUTOMAÇÃO DE PROCESSOS DE PROJETO E PROGRAMAÇÃO EM BIM: DYNAMO, PYTHON E C#**. 2019. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

UMANS, S. D. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7. ed. Porto Alegre. Ed. AMGH, 2014.

WEG: **W22 Motor Elétrico Trifásico, Catálogo Técnico Mercado Brasil**. 2022. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h9e/h49/WEG-w22-motor-eletrico-trifasico-50023622-brochure-portuguese-.pdf>>. Acesso em: 30 de ago. de 2022.

WEG. **Motores eficientes geram economia na Indústria**. 2023. Disponível em: <<https://valor.globo.com/patrocinado/weg/weg/noticia/2019/12/02/motores-eficientes-geram-economia-de-energia-na-industria.ghtml>>. Acesso em: 15 jan. 2023.

## APÊNDICE A – CÁLCULO TEÓRICO

A confirmação pelo cálculo teórico é requerida para verificar se a programação realizada está aplicando todos os conceitos corretamente, extraindo os valores do modelo e realizando a combinação de forma adequada. Assim, aplica-se os conceitos do Capítulo 2.2, onde define-se o passo a passo para encontrar a corrente de partida e a queda de tensão ocasionada pela partida do motor.

As bases para o cálculo em valor por unidade são as mesmas utilizadas no cálculo automatizado. A potência de curto-circuito no ponto de entrega também segue a mesma premissa.

1. Inicialmente, calcula-se a queda de tensão na partida do motor selecionado que, no caso, é o Motor 1 do CCM-5. Desta forma:

- a) Impedância reduzida do sistema no ponto de entrega da concessionária:

$$R_{us} \cong 0$$

$$X_{us} = \frac{P_b}{P_{cc}} = \frac{300kVA}{200.000kVA} = 0,0015 pu$$

$$\therefore \vec{Z}_{us} = 0 + j0,0015_{us} (pu)$$

- b) Impedância do transformador:

A partir da Tabela 7, do Apêndice A, tem-se que as perdas no cobre são de 3900 Watts. Logo, tem-se que:

$$R_{pt} = \frac{P_{cu}}{10 \times P_{nt}} = \frac{3900}{10 \times 300} = 1,3\% \text{ ou } 0,013 pu$$

Como os valores nominais do transformador são os mesmos (potência e tensão do secundário) dos valores de base, não é necessário realizar a mudança de base, logo:

$$r_{ut} = R_{pt} = 0,013 = 0,013 pu$$

A impedância, também fornecida na Tabela 7, é de 4,5%, ou seja:

$$X_{pt} = \sqrt{Z_{pt}^2 - R_{pt}^2} = \sqrt{0,045^2 - 0,013^2} = 0,043 pu$$

Realizando a troca de base, tem-se:

$$x_{ut} = X_{pt} \times \frac{P_b}{P_{nt}} \times \left( \frac{V_{nt}}{V_b} \right)^2 = 0,043 \times \frac{300}{300} \times \left( \frac{0,22}{0,22} \right)^2 = 0,043 \text{ pu}$$

Assim, a impedância do transformador, nas bases adotadas, é:

$$\vec{z}_{ut} = 0,013 + j0,043 \text{ pu}$$

c) Impedâncias dos circuitos:

i) Circuito entre o medidor de energia até o QDG.

Distância total = 9,1 metros.

Circuito:  $4 \times (3 \times 240 \text{ mm}^2 (\text{F}) + 240 \text{ mm}^2 (\text{N}) + 120 \text{ mm}^2 (\text{PE}))$ .

Resistência na sequência positiva: 0,0,0958 mΩ/m.

Reatância na sequência positiva: 0,0,1070 mΩ/m.

$$r_{cir1} = \left( \frac{R_{u\Omega} \times L_{cir1}}{1000 \times N_{cir1}} \right) \times \left( \frac{P_b}{1000 \times V_b^2} \right) = \left( \frac{0,0958 \times 9,1}{1000 \times 4} \right) \times \left( \frac{300}{1000 \times 0,0484} \right) = 0,0014 \text{ (pu)}$$

$$x_{cir} = \left( \frac{X_{u\Omega} \times L_{cir1}}{1000 \times N_{cir1}} \right) \times \left( \frac{P_b}{1000 \times V_b^2} \right) = \left( \frac{0,1070 \times 9,1}{1000 \times 4} \right) \times \left( \frac{300}{1000 \times 0,0484} \right) = 0,0015 \text{ (pu)}$$

$$\therefore \vec{z}_{b1} = 0,0014 + j0,0015 \text{ (pu)}$$

ii) Circuito entre o QDG até o CCM5.

Distância total = 63,7 metros.

Circuito:  $2 \times (3 \times 185 \text{ mm}^2 (\text{F}) + 95 \text{ mm}^2 (\text{PE}))$ .

Resistência na sequência positiva: 0,1226 mΩ/m

Reatância na sequência positiva: 0,1073 mΩ/m

$$r_{cir} = \left( \frac{R_{u\Omega} \times L_{cir2}}{1000 \times N_{cir2}} \right) \times \left( \frac{P_b}{1000 \times V_b^2} \right) = \left( \frac{0,1226 \times 63,7}{1000 \times 2} \right) \times \left( \frac{300}{1000 \times 0,0484} \right) = 0,0242 \text{ (pu)}$$

$$x_{cir2} = \left( \frac{X_{u\Omega} \times L_{cir2}}{1000 \times N_{cir2}} \right) \times \left( \frac{P_b}{1000 \times V_b^2} \right) = \left( \frac{0,1073 \times 63,7}{1000 \times 2} \right) \times \left( \frac{300}{1000 \times 0,0484} \right) = 0,0212 \text{ (pu)}$$

$$\therefore \vec{z}_{b2} = 0,0242 + j0,0212 \text{ (pu)}$$

iii) Circuito entre o CCM5 até os terminais do Motor 1.

Distância total = 16,7 metros.

Circuito:  $2 \times (3 \times 150 \text{ mm}^2 (\text{F}) + 95 \text{ mm}^2 (\text{PE}))$ .

Resistência na sequência positiva: 0,1502 mΩ/m.

Reatância na sequência positiva: 0,1074 mΩ/m.

$$r_{cir3} = \left( \frac{R_{u\Omega} \times L_{cir3}}{1000 \times N_{cir3}} \right) \times \left( \frac{P_b}{1000 \times V_b^2} \right) = \left( \frac{0,1502 \times 16,7}{1000 \times 2} \right) \times \left( \frac{300}{1000 \times 0,0484} \right) = 0,0077 (pu)$$

$$x_{cir3} = \left( \frac{X_{u\Omega} \times L_{cir3}}{1000 \times N_{cir3}} \right) \times \left( \frac{P_b}{1000 \times V_b^2} \right) = \left( \frac{0,1074 \times 16,7}{1000 \times 2} \right) \times \left( \frac{300}{1000 \times 0,0484} \right) = 0,0056 (pu)$$

$$\therefore \vec{z}_{cir} = 0,0077 + j0,0056 (pu)$$

d) Impedância do sistema até os terminais do motor:

$$\vec{z}_1 = \vec{z}_{us} + \vec{z}_{ut} + \sum \vec{z}_{cir} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \vec{z}_1 = 0,0463 + j0,0728 (pu)$$

e) Impedância do motor partindo:

$I_{nm} = 335A$  (Na base de potência de 254,87kVA e 440V).

$I_p = 8,2 \cdot I_{nm}$  (Dados do motor - Apêndice C).

Tensão Nominal do motor = 0,44kV (Dados do motor - Apêndice C).

Potência nominal do motor: 254,87kVA (Dados do motor - Apêndice C).

Assim, a reatância do motor na base de tensão e potência do motor é:

$$x_{pm} = \frac{I_{nm}}{I_p} = \frac{1}{8,2} = 0,1220 (pu)$$

Realizando a mudança de base, tem-se:

$$x_{um} = x_{pm} \times \left( \frac{P_b}{P_{nm}} \right) \times \left( \frac{V_{nm}}{V_b} \right)^2 = 0,1220 \times \left( \frac{300}{254,87} \right) \times \left( \frac{0,44}{0,22} \right)^2 = 0,5744 pu$$

f) Corrente de partida do motor (ou corrente de curto-circuito simétrica):

$$i_p = i_{cs} = \frac{1}{\vec{z}_{us} + \vec{z}_{ut} + \sum \vec{z}_{ub} + \sum \vec{z}_{cir} + \vec{z}_m} (pu) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow i_p = \frac{1}{0,6489} = 1,5411 (pu)$$

g) Corrente de partida utilizando o método Estrela-Triângulo.

Como esse método limita em 1/3 a corrente de partida, aplica-se um fator de 0,33 na corrente de curto simétrica encontrada. Sendo assim:

$$i_p(Y \rightarrow \Delta) = 1,5411 \times 0,33 = 0,5086 (pu)$$

- h) Corrente de partida utilizando o método da chave-compensadora, com ajuste de 65% da tensão nominal.

Nesse método aplica-se uma tensão reduzida, de forma que reduz a corrente de partida. Assim, para calcular essa corrente, aplica-se um fator de 0,65 elevado ao quadrado.

$$i_p(65\%) = (0,65^2) \times i_p = 0,6511 \text{ (pu)}$$

2. Após o cálculo da corrente de partida, analisa-se a queda de tensão decorrente. Inicialmente, é analisado o impacto no Motor 1 do CCM-1. O ponto de análise é verificado a partir do diagrama unifilar, apresentado na Figura 40. Para isso, realiza-se a somatória de impedâncias até o Quadro Geral de Distribuição (QDG), pois após este quadro não haverá acréscimos de correntes provenientes da partida do motor. Desta forma, tem-se:

$$\begin{aligned}\vec{Z}_1 &= \bar{Z}_{us} + \bar{Z}_{ut} + \bar{Z}_{cir1} \Rightarrow \\ \Rightarrow \vec{Z}_1 &= 0,0144 + j0,0460 \text{ (pu)}\end{aligned}$$

- a) Para a partida direta:

$$\Delta \dot{v}_{um} = \bar{Z}_1 \cdot i_{cs} = \sqrt{(0,0144)^2 + (0,0460)^2} \cdot 1,5411 = 0,0743 = 7,43\%$$

- b) Partida utilizando Estrela-Triângulo:

$$\Delta \dot{v}_{um} = \bar{Z}_1 \cdot i_p(Y \rightarrow \Delta) = \sqrt{(0,0144)^2 + (0,0460)^2} \cdot 0,5086 = 0,0245 = 2,45\%$$

- c) Partida utilizando chave compensadora, com tap de 65% da tensão nominal:

$$\begin{aligned}\Delta \dot{v}_{um} &= \bar{Z}_1 \cdot i_p(65\%) = \sqrt{(0,0144)^2 + (0,0460)^2} \cdot 0,6511 = 0,0314 \Rightarrow \\ \Rightarrow \Delta \dot{v}_{um} &= 3,14\%\end{aligned}$$

3. Para a análise da queda de tensão até o terminal do motor que está partindo (Motor 1 do CCM 1), necessita-se da somatória de impedâncias até o terminal dele. Desse modo, tem-se:

$$\begin{aligned}\vec{Z}_1 &= \bar{Z}_{us} + \bar{Z}_{ut} + \bar{Z}_{cir1} + \bar{Z}_{cir2} + \bar{Z}_{cir3} \Rightarrow \\ \Rightarrow \vec{Z}_1 &= 0,0463 + j0,0728 \text{ (pu)}\end{aligned}$$

- a) Para a partida direta:

$$\Delta \dot{v}_{um} = \bar{z}_1 \cdot i_{cs} = \sqrt{(0,0463)^2 + (0,0728)^2} \cdot 1,5411 = 0,1329 = 13,29\%$$

b) Partida utilizando Estrela-Triângulo:

$$\Delta \dot{v}_{um} = \bar{z}_1 \cdot i_p(Y \rightarrow \Delta) = \sqrt{(0,0463)^2 + (0,0728)^2} \cdot 0,5086 = 0,0439 = 4,39\%$$

a) Partida utilizando chave compensadora, com tap de 65% da tensão nominal:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{v}_{um} &= \bar{z}_1 \cdot i_p(65\%) = \sqrt{(0,0463)^2 + (0,0728)^2} \cdot 0,6511 = 0,0562 \Rightarrow \\ &\Rightarrow \Delta \dot{v}_{um} = 5,62\% \end{aligned}$$

## APÊNDICE B – TABELAS DE REFERÊNCIA

Tabela 6-Resistencia e reatância dos condutores de cobre (valores médios)

| Seção (mm²) | Impedância de Sequência Positiva (mΩ/m) |           | Impedância de Sequência Zero (mΩ/m) |           |
|-------------|-----------------------------------------|-----------|-------------------------------------|-----------|
|             | Resistência                             | Reatância | Resistência                         | Reatância |
| 1,5         | 14,8137                                 | 0,1378    | 16,6137                             | 2,9262    |
| 2,5         | 8,8882                                  | 0,1345    | 10,6882                             | 2,8755    |
| 4           | 5,5518                                  | 0,1279    | 7,3552                              | 2,8349    |
| 6           | 3,7035                                  | 0,1225    | 5,5035                              | 2,8       |
| 10          | 2,2221                                  | 0,1207    | 4,0222                              | 2,7639    |
| 16          | 1,3899                                  | 0,1173    | 3,189                               | 2,7173    |
| 25          | 0,8891                                  | 0,1164    | 2,6891                              | 2,6692    |
| 35          | 0,6353                                  | 0,1128    | 2,4355                              | 2,6382    |
| 50          | 0,445                                   | 0,1127    | 2,245                               | 2,5991    |
| 70          | 0,3184                                  | 0,1096    | 2,1184                              | 2,5681    |
| 95          | 0,2352                                  | 0,109     | 2,0352                              | 2,5325    |
| 120         | 0,1868                                  | 0,1076    | 1,9868                              | 2,5104    |
| 150         | 0,1502                                  | 0,1074    | 1,9502                              | 2,4843    |
| 185         | 0,1226                                  | 0,1073    | 1,9226                              | 2,4594    |
| 240         | 0,0958                                  | 0,107     | 1,8958                              | 2,4312    |
| 300         | 0,0781                                  | 0,1068    | 1,8781                              | 2,4067    |
| 400         | 0,0608                                  | 0,1058    | 1,8608                              | 2,3757    |
| 500         | 0,0507                                  | 0,1051    | 1,855                               | 2,3491    |
| 630         | 0,0292                                  | 0,1042    | 1,8376                              | 2,3001    |

Fonte:Mamede,2017

Tabela 7-Dados característicos de transformadores trifásicos em óleo para instalação interior ou exterior – classe 15kV-primário em estrela ou triângulo e secundário em estrela – 60hz

| Potência (kVA) | Tensão (V) | Perdas (W) |       | Rendimento (%) | Regulação (%) | Impedância (%) |
|----------------|------------|------------|-------|----------------|---------------|----------------|
|                |            | A Vazio    | Cobre |                |               |                |
| 15             | 220 a 440  | 120        | 300   | 96,24          | 3,32          | 3,5            |
| 30             | 220 a 440  | 200        | 570   | 96,85          | 3,29          | 3,5            |
| 45             | 220 a 440  | 260        | 750   | 97,09          | 3,19          | 3,5            |
| 75             | 220 a 440  | 390        | 1200  | 97,32          | 3,15          | 3,5            |
| 112.5          | 220 a 440  | 520        | 1650  | 97,51          | 3,09          | 3,5            |
| 150            | 220 a 440  | 640        | 2050  | 97,68          | 3,02          | 3,5            |
| 225            | 380 a 440  | 900        | 2800  | 97,96          | 3,63          | 4,5            |
| 300            | 220        | 1120       | 3900  | 97,96          | 3,66          | 4,5            |
| 300            | 380 a 440  | 1120       | 3700  | 98,04          | 3,61          | 4,5            |
| 500            | 220        | 1700       | 6400  | 98,02          | 3,65          | 4,5            |
| 500            | 380 a 440  | 1700       | 6000  | 98,11          | 3,6           | 4,5            |
| 750            | 220        | 2000       | 10000 | 98,04          | 4,32          | 5,5            |
| 750            | 380 a 440  | 2000       | 8500  | 98,28          | 4,2           | 5,5            |
| 1000           | 220        | 3000       | 12500 | 98,1           | 4,27          | 5,5            |
| 1000           | 380 a 440  | 3000       | 11000 | 98,28          | 4,29          | 5,5            |
| 1500           | 220        | 4000       | 18000 | 98,2           | 4,24          | 5,5            |
| 1500           | 380 a 440  | 4000       | 16000 | 98,36          | 4,16          | 5,5            |

Fonte:Mamede,2017

**Tabela 8-Capacidade de corrente para barras retangulares de cobre com  
pintura**

| Largura<br>mm | Espessura<br>mm | Seção<br>mm <sup>2</sup> | Peso<br>kg/m | Capacidade de corrente<br>Permanente | Resistência<br>mΩ/m | Reatância<br>mΩ/m | Capacidade de<br>corrente Permanente | Resistência<br>mΩ/m | Reatância<br>mΩ/m | Capacidade de<br>corrente Permanente | Resistência<br>mΩ/m | Reatância<br>mΩ/m |
|---------------|-----------------|--------------------------|--------------|--------------------------------------|---------------------|-------------------|--------------------------------------|---------------------|-------------------|--------------------------------------|---------------------|-------------------|
|               |                 |                          |              | Barra Pintada                        |                     |                   | Barra Pintada                        |                     |                   | Barra Pintada                        |                     |                   |
|               |                 |                          |              | Número de Barras por<br>Fase         |                     |                   | Número de Barras por<br>Fase         |                     |                   | Número de Barras por<br>Fase         |                     |                   |
|               |                 |                          |              | 1                                    |                     |                   | 2                                    |                     |                   | 3                                    |                     |                   |
| 12            | 2               | 23,5                     | 0,209        | 123                                  | 0,9297              | 0,2858            | 202                                  | 0,9297              | 0,2858            | 228                                  | 0,9297              | 0,2858            |
| 15            | 2               | 29,5                     | 0,262        | 148                                  | 0,7406              | 0,2774            | 240                                  | 0,7406              | 0,2774            | 261                                  | 0,7406              | 0,2774            |
| 15            | 3               | 44,5                     | 0,396        | 187                                  | 0,4909              | 0,2619            | 316                                  | 0,4909              | 0,2619            | 381                                  | 0,4909              | 0,2619            |
| 20            | 2               | 39,5                     | 0,351        | 189                                  | 0,5531              | 0,2664            | 302                                  | 0,5531              | 0,2664            | 313                                  | 0,5531              | 0,2664            |
| 20            | 3               | 59,5                     | 0,529        | 273                                  | 0,3672              | 0,2509            | 394                                  | 0,3672              | 0,2509            | 454                                  | 0,3672              | 0,2509            |
| 20            | 5               | 99,1                     | 0,882        | 319                                  | 0,2205              | 0,2317            | 560                                  | 0,2205              | 0,2317            | 728                                  | 0,2205              | 0,2317            |
| 20            | 10              | 199                      | 1,77         | 497                                  | 0,1098              | 0,2054            | 924                                  | 0,1098              | 0,2054            | 1320                                 | 0,1098              | 0,2054            |
| 25            | 3               | 74,5                     | 0,663        | 287                                  | 0,2932              | 0,2424            | 470                                  | 0,2932              | 0,2424            | 525                                  | 0,2932              | 0,2424            |
| 25            | 5               | 125                      | 1,11         | 384                                  | 0,1748              | 0,2229            | 662                                  | 0,1748              | 0,2229            | 839                                  | 0,1748              | 0,2229            |
| 30            | 3               | 89,5                     | 0,796        | 337                                  | 0,2441              | 0,2355            | 544                                  | 0,2441              | 0,2355            | 593                                  | 0,2441              | 0,2355            |
| 30            | 5               | 140                      | 1,33         | 447                                  | 0,1561              | 0,2187            | 760                                  | 0,1561              | 0,2187            | 944                                  | 0,1561              | 0,2187            |
| 30            | 10              | 299                      | 2,66         | 676                                  | 0,0731              | 0,19              | 1200                                 | 0,0731              | 0,19              | 1670                                 | 0,0731              | 0,19              |
| 40            | 3               | 119                      | 1,05         | 435                                  | 0,1836              | 0,2248            | 692                                  | 0,1836              | 0,2248            | 725                                  | 0,1836              | 0,2248            |
| 40            | 5               | 199                      | 1,77         | 573                                  | 0,1098              | 0,2054            | 952                                  | 0,1098              | 0,2054            | 1149                                 | 0,1098              | 0,2054            |
| 40            | 10              | 399                      | 3,55         | 850                                  | 0,0548              | 0,1792            | 1470                                 | 0,0548              | 0,1792            | 2000                                 | 0,0548              | 0,1792            |
| 50            | 5               | 249                      | 2,22         | 697                                  | 0,0877              | 0,1969            | 1140                                 | 0,0877              | 0,1969            | 1330                                 | 0,0877              | 0,1969            |
| 50            | 10              | 499                      | 4,44         | 1020                                 | 0,0438              | 0,1707            | 1720                                 | 0,0438              | 0,1707            | 2320                                 | 0,0438              | 0,1707            |
| 60            | 5               | 299                      | 2,66         | 826                                  | 0,0731              | 0,19              | 1330                                 | 0,0731              | 0,19              | 1510                                 | 0,0731              | 0,19              |
| 60            | 10              | 599                      | 5,33         | 1180                                 | 0,0365              | 0,1639            | 1960                                 | 0,0365              | 0,1639            | 2610                                 | 0,0365              | 0,1639            |
| 80            | 5               | 399                      | 3,55         | 1070                                 | 0,0548              | 0,1792            | 1680                                 | 0,0548              | 0,1792            | 1830                                 | 0,0548              | 0,1792            |
| 80            | 10              | 799                      | 7,11         | 1500                                 | 0,0273              | 0,153             | 2410                                 | 0,0273              | 0,153             | 3170                                 | 0,0273              | 0,153             |
| 100           | 5               | 499                      | 4,44         | 1300                                 | 0,0428              | 0,1707            | 2010                                 | 0,0428              | 0,1707            | 2150                                 | 0,0428              | 0,1707            |
| 100           | 10              | 988                      | 8,89         | 1810                                 | 0,0221              | 0,145             | 2850                                 | 0,0221              | 0,145             | 3720                                 | 0,0221              | 0,145             |
| 120           | 10              | 1200                     | 10,7         | 2110                                 | 0,0182              | 0,1377            | 3280                                 | 0,0182              | 0,1377            | 4270                                 | 0,0182              | 0,1377            |
| 160           | 10              | 1600                     | 14,2         | 2700                                 | 0,0137              | 0,1268            | 4130                                 | 0,0137              | 0,1268            | 5360                                 | 0,0137              | 0,1268            |
| 200           | 10              | 2000                     | 17,8         | 3290                                 | 0,0109              | 0,1184            | 4970                                 | 0,0109              | 0,1184            | 6430                                 | 0,0109              | 0,1184            |

Fonte: Mamede,2017

**Tabela 9-Capacidade de corrente para barras retangulares de cobre sem pintura**

| Largura<br>mm | Espessura<br>mm | Seção<br>mm <sup>2</sup> | Peso<br>kg/m | Capacidade de corrente<br>Permanente | Resistência<br>mΩ/m | Reatância<br>mΩ/m | Capacidade de<br>corrente Permanente | Resistência<br>mΩ/m | Reatância<br>mΩ/m | Capacidade de<br>corrente Permanente | Resistência<br>mΩ/m | Reatância<br>mΩ/m |
|---------------|-----------------|--------------------------|--------------|--------------------------------------|---------------------|-------------------|--------------------------------------|---------------------|-------------------|--------------------------------------|---------------------|-------------------|
|               |                 |                          |              | Barra Nua                            |                     |                   | Barra Nua                            |                     |                   | Barra Nua                            |                     |                   |
|               |                 |                          |              | Número de Barras por<br>Fase         |                     |                   | Número de Barras por<br>Fase         |                     |                   | Número de Barras por<br>Fase         |                     |                   |
|               |                 |                          |              | 1                                    |                     |                   | 2                                    |                     |                   | 3                                    |                     |                   |
| 12            | 2               | 23,5                     | 0,209        | 108                                  | 0,9297              | 0,2858            | 182                                  | 0,9297              | 0,2858            | 216                                  | 0,9297              | 0,2858            |
| 15            | 2               | 29,5                     | 0,262        | 128                                  | 0,7406              | 0,2774            | 212                                  | 0,7406              | 0,2774            | 247                                  | 0,7406              | 0,2774            |
| 15            | 3               | 44,5                     | 0,396        | 162                                  | 0,4909              | 0,2619            | 282                                  | 0,4909              | 0,2619            | 361                                  | 0,4909              | 0,2619            |
| 20            | 2               | 39,5                     | 0,351        | 162                                  | 0,5531              | 0,2664            | 264                                  | 0,5531              | 0,2664            | 296                                  | 0,5531              | 0,2664            |
| 20            | 3               | 59,5                     | 0,529        | 204                                  | 0,3672              | 0,2509            | 348                                  | 0,3672              | 0,2509            | 431                                  | 0,3672              | 0,2509            |
| 20            | 5               | 99,1                     | 0,882        | 274                                  | 0,2205              | 0,2317            | 500                                  | 0,2205              | 0,2317            | 690                                  | 0,2205              | 0,2317            |
| 20            | 10              | 199                      | 1,77         | 427                                  | 0,1098              | 0,2054            | 825                                  | 0,1098              | 0,2054            | 1180                                 | 0,1098              | 0,2054            |
| 25            | 3               | 74,5                     | 0,663        | 245                                  | 0,2932              | 0,2424            | 412                                  | 0,2932              | 0,2424            | 498                                  | 0,2932              | 0,2424            |
| 25            | 5               | 125                      | 1,11         | 327                                  | 0,1748              | 0,2229            | 586                                  | 0,1748              | 0,2229            | 795                                  | 0,1748              | 0,2229            |
| 30            | 3               | 89,5                     | 0,796        | 285                                  | 0,2441              | 0,2355            | 476                                  | 0,2441              | 0,2355            | 564                                  | 0,2441              | 0,2355            |
| 30            | 5               | 140                      | 1,33         | 379                                  | 0,1561              | 0,2187            | 627                                  | 0,1561              | 0,2187            | 896                                  | 0,1561              | 0,2187            |
| 30            | 10              | 299                      | 2,66         | 573                                  | 0,0731              | 0,19              | 1060                                 | 0,0731              | 0,19              | 1480                                 | 0,0731              | 0,19              |
| 40            | 3               | 119                      | 1,05         | 366                                  | 0,1836              | 0,2248            | 600                                  | 0,1836              | 0,2248            | 690                                  | 0,1836              | 0,2248            |
| 40            | 5               | 199                      | 1,77         | 482                                  | 0,1098              | 0,2054            | 836                                  | 0,1098              | 0,2054            | 1090                                 | 0,1098              | 0,2054            |
| 40            | 10              | 399                      | 3,55         | 715                                  | 0,0548              | 0,1792            | 1290                                 | 0,0548              | 0,1792            | 1770                                 | 0,0548              | 0,1792            |
| 50            | 5               | 249                      | 2,22         | 583                                  | 0,0877              | 0,1969            | 994                                  | 0,0877              | 0,1969            | 1260                                 | 0,0877              | 0,1969            |
| 50            | 10              | 499                      | 4,44         | 852                                  | 0,0438              | 0,1707            | 1510                                 | 0,0438              | 0,1707            | 2040                                 | 0,0438              | 0,1707            |
| 60            | 5               | 299                      | 2,66         | 688                                  | 0,0731              | 0,19              | 1150                                 | 0,0731              | 0,19              | 1440                                 | 0,0731              | 0,19              |
| 60            | 10              | 599                      | 5,33         | 989                                  | 0,0365              | 0,1639            | 1720                                 | 0,0365              | 0,1639            | 2300                                 | 0,0365              | 0,1639            |
| 80            | 5               | 399                      | 3,55         | 855                                  | 0,0548              | 0,1792            | 1450                                 | 0,0548              | 0,1792            | 1750                                 | 0,0548              | 0,1792            |
| 80            | 10              | 799                      | 7,11         | 1240                                 | 0,0273              | 0,153             | 2110                                 | 0,0273              | 0,153             | 2790                                 | 0,0273              | 0,153             |
| 100           | 5               | 499                      | 4,44         | 1080                                 | 0,0428              | 0,1707            | 1730                                 | 0,0428              | 0,1707            | 2050                                 | 0,0428              | 0,1707            |
| 100           | 10              | 988                      | 8,89         | 1490                                 | 0,0221              | 0,145             | 2480                                 | 0,0221              | 0,145             | 3260                                 | 0,0221              | 0,145             |
| 120           | 10              | 1200                     | 10,7         | 1740                                 | 0,0182              | 0,1377            | 2860                                 | 0,0182              | 0,1377            | 3740                                 | 0,0182              | 0,1377            |
| 160           | 10              | 1600                     | 14,2         | 2220                                 | 0,0137              | 0,1268            | 3590                                 | 0,0137              | 0,1268            | 4680                                 | 0,0137              | 0,1268            |
| 200           | 10              | 2000                     | 17,8         | 2690                                 | 0,0109              | 0,1184            | 4310                                 | 0,0109              | 0,1184            | 5610                                 | 0,0109              | 0,1184            |

Fonte: Mamede,2017

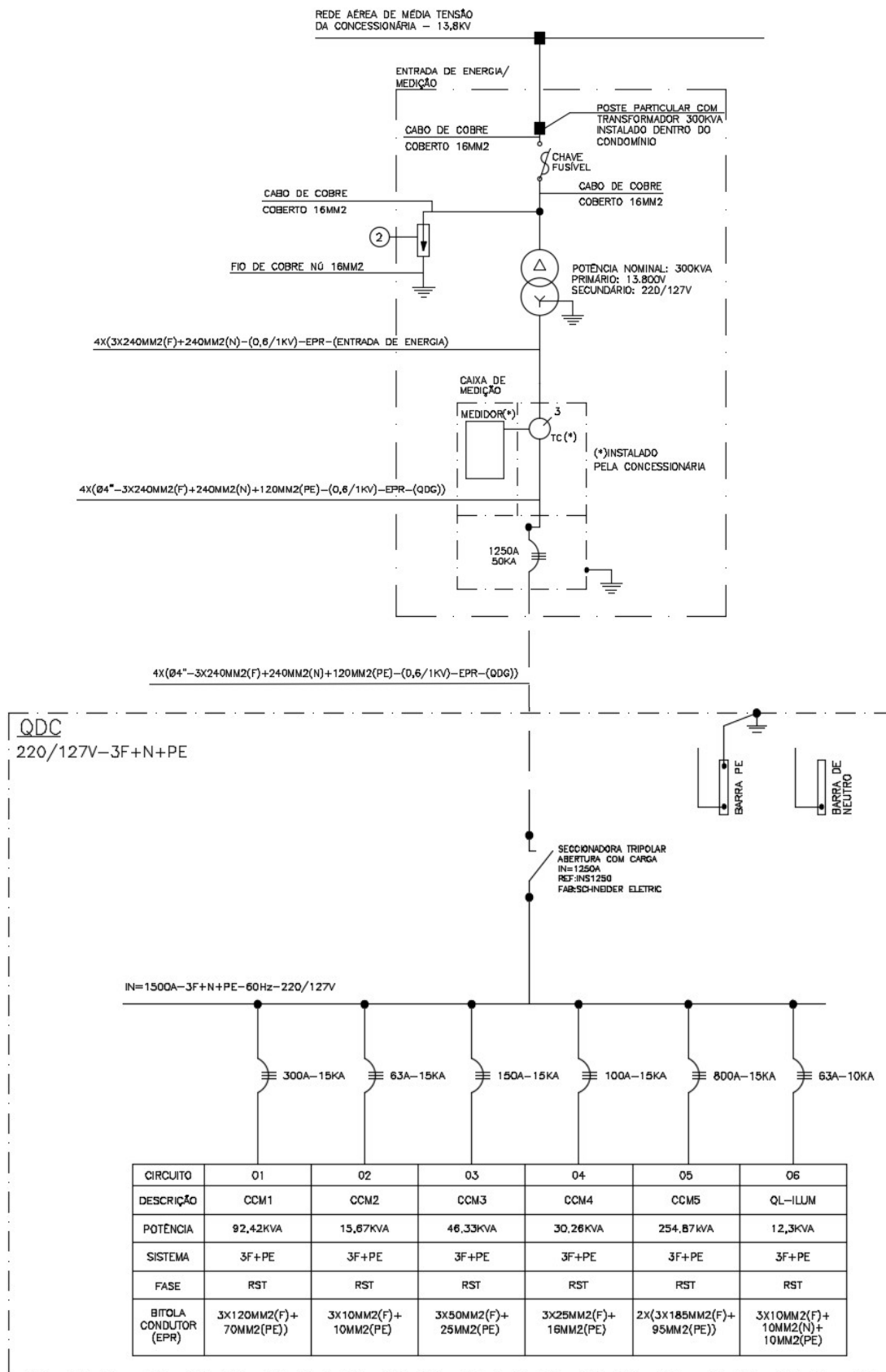
## APÊNDICE C – CATÁLOGO MOTOR WEG

### W22 IR3 Premium

| Potência  |      | Carcaça | Conjugado Nominal (kgfm) | Corrente com Rotor Bloqueado Ip/In | Conjugado de Partida Cp/Cn | Conjugado Máximo Cmax/Cn | Momento de Inércia J (kgm²) | Tempo máximo com rotor bloqueado (s) |      | Massa (kg) | Nível médio de pressão sonora dB(A) | Fator de Serviço | RPM  | % de Carga |      |      |                   |      |      | Tensão (V) | Corrente Nominal In (A) |  |
|-----------|------|---------|--------------------------|------------------------------------|----------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|------|------------|-------------------------------------|------------------|------|------------|------|------|-------------------|------|------|------------|-------------------------|--|
|           |      |         |                          |                                    |                            |                          |                             |                                      |      |            |                                     |                  |      | Rendimento |      |      | Fator de Potência |      |      |            |                         |  |
|           |      |         |                          |                                    |                            |                          |                             |                                      |      |            |                                     |                  |      | 50         | 75   | 100  | 50                | 75   | 100  |            |                         |  |
| kW        | HP   |         |                          |                                    |                            |                          |                             | Quente                               | Frio |            |                                     |                  |      |            |      |      |                   |      |      |            |                         |  |
| II Polos  |      |         |                          |                                    |                            |                          |                             |                                      |      |            |                                     |                  |      |            |      |      |                   |      |      |            |                         |  |
| 0,12      | 0,16 | 63      | 0,034                    | 6,6                                | 3,5                        | 4                        | 0,00012                     | 12                                   | 26   | 5,7        | 56                                  | 1,25             | 3460 | 50         | 58   | 62   | 0,48              | 0,6  | 0,68 | 220        | 0,747                   |  |
| 0,18      | 0,25 | 63      | 0,051                    | 6                                  | 2,8                        | 3                        | 0,00014                     | 10                                   | 22   | 6,2        | 56                                  | 1,25             | 3425 | 55         | 62   | 65,6 | 0,54              | 0,66 | 0,75 | 220        | 0,96                    |  |
| 0,25      | 0,33 | 63      | 0,071                    | 5,9                                | 3,1                        | 3,2                      | 0,00016                     | 20                                   | 44   | 6,7        | 56                                  | 1,25             | 3410 | 64         | 69   | 69,5 | 0,58              | 0,71 | 0,8  | 220        | 1,18                    |  |
| 0,37      | 0,5  | 63      | 0,107                    | 5,8                                | 2,5                        | 2,5                      | 0,0002                      | 17                                   | 37   | 8,2        | 56                                  | 1,25             | 3360 | 69         | 73   | 73,4 | 0,62              | 0,75 | 0,83 | 220        | 1,59                    |  |
| 0,55      | 0,75 | 71      | 0,156                    | 6,3                                | 2,4                        | 2,8                      | 0,0004                      | 8                                    | 18   | 10,9       | 60                                  | 1,25             | 3440 | 72,5       | 75,5 | 76,8 | 0,63              | 0,76 | 0,83 | 220        | 2,26                    |  |
| 0,75      | 1    | 71      | 0,213                    | 6,6                                | 3                          | 3,3                      | 0,00051                     | 10                                   | 22   | 11,7       | 60                                  | 1,25             | 3435 | 77         | 80   | 80,5 | 0,64              | 0,76 | 0,84 | 220        | 2,91                    |  |
| 1,1       | 1,5  | L80     | 0,311                    | 8,4                                | 3,8                        | 3,6                      | 0,00109                     | 19                                   | 42   | 15,5       | 62                                  | 1,25             | 3450 | 81         | 84   | 84   | 0,64              | 0,76 | 0,83 | 220        | 4,14                    |  |
| 1,5       | 2    | L80     | 0,427                    | 7,8                                | 3,8                        | 3,6                      | 0,00103                     | 16                                   | 35   | 16         | 62                                  | 1,25             | 3425 | 84         | 85   | 85,5 | 0,68              | 0,79 | 0,85 | 220        | 5,42                    |  |
| 2,2       | 3    | L90S    | 0,618                    | 7,8                                | 3,4                        | 3,1                      | 0,00233                     | 13                                   | 29   | 23,5       | 68                                  | 1,25             | 3470 | 86         | 86,5 | 86,5 | 0,69              | 0,8  | 0,85 | 220        | 7,82                    |  |
| 3         | 4    | L90L    | 0,843                    | 8,2                                | 4,2                        | 4,1                      | 0,00277                     | 11                                   | 24   | 23         | 68                                  | 1,25             | 3465 | 87         | 88   | 88,5 | 0,62              | 0,75 | 0,82 | 220        | 10,8                    |  |
| 3,7       | 5    | 100L    | 1,03                     | 8,2                                | 2,7                        | 3,9                      | 0,00638                     | 8                                    | 18   | 32,7       | 71                                  | 1,25             | 3510 | 86,4       | 88,3 | 88,5 | 0,69              | 0,8  | 0,86 | 440        | 6,38                    |  |
| 4,5       | 6    | 112M    | 1,25                     | 7,6                                | 2,2                        | 3                        | 0,00803                     | 12                                   | 26   | 42,4       | 66                                  | 1,25             | 3500 | 87         | 88   | 88,5 | 0,74              | 0,83 | 0,87 | 440        | 7,67                    |  |
| 5,5       | 7,5  | 112M    | 1,52                     | 8,2                                | 2,8                        | 3,5                      | 0,00945                     | 9                                    | 20   | 45,7       | 66                                  | 1,25             | 3515 | 87,9       | 89,4 | 89,5 | 0,64              | 0,76 | 0,83 | 440        | 9,72                    |  |
| 7,5       | 10   | 132S    | 2,07                     | 8,1                                | 2,5                        | 3,4                      | 0,02159                     | 12                                   | 26   | 66,6       | 68                                  | 1,25             | 3530 | 88,2       | 89,9 | 90,2 | 0,74              | 0,83 | 0,87 | 440        | 12,5                    |  |
| 9,2       | 12,5 | 132M    | 2,54                     | 8,1                                | 2,5                        | 3,4                      | 0,02689                     | 10                                   | 22   | 74         | 68                                  | 1,25             | 3530 | 89,6       | 90,8 | 91   | 0,76              | 0,85 | 0,89 | 440        | 14,9                    |  |
| 11        | 15   | 132M/L  | 3,03                     | 8,4                                | 3,4                        | 3,9                      | 0,03048                     | 13                                   | 29   | 88         | 68                                  | 1,25             | 3535 | 89,6       | 90,5 | 91   | 0,71              | 0,81 | 0,86 | 440        | 18,4                    |  |
| 15        | 20   | 160M    | 4,13                     | 7,6                                | 2,7                        | 3,2                      | 0,04259                     | 12                                   | 26   | 115        | 72                                  | 1,25             | 3540 | 90         | 90,8 | 91   | 0,74              | 0,83 | 0,87 | 440        | 24,9                    |  |
| 18,5      | 25   | 160M    | 5,08                     | 8,3                                | 3                          | 3,5                      | 0,06263                     | 9                                    | 20   | 119        | 72                                  | 1,25             | 3545 | 91         | 91,5 | 91,7 | 0,72              | 0,82 | 0,87 | 440        | 30,4                    |  |
| 22        | 30   | 160L    | 6,04                     | 9                                  | 3,4                        | 4                        | 0,07                        | 8                                    | 18   | 131        | 72                                  | 1,25             | 3550 | 91         | 91,5 | 91,7 | 0,7               | 0,8  | 0,86 | 440        | 36,6                    |  |
| 30        | 40   | 200M    | 8,21                     | 6,7                                | 2,8                        | 2,9                      | 0,17027                     | 18                                   | 40   | 219        | 76                                  | 1,25             | 3560 | 91,5       | 91,7 | 92,4 | 0,74              | 0,83 | 0,86 | 440        | 49,5                    |  |
| 37        | 50   | 200L    | 10,1                     | 7,6                                | 3,2                        | 2,9                      | 0,21283                     | 14                                   | 31   | 265        | 76                                  | 1,25             | 3560 | 92         | 92,4 | 93   | 0,75              | 0,83 | 0,86 | 440        | 60,7                    |  |
| 45        | 60   | 225S/M  | 12,3                     | 7,8                                | 2,2                        | 2,9                      | 0,29909                     | 12                                   | 26   | 393        | 79                                  | 1,25             | 3560 | 91,8       | 93   | 93,6 | 0,76              | 0,83 | 0,86 | 440        | 73,4                    |  |
| 55        | 75   | 225S/M  | 15                       | 7,9                                | 3                          | 3,5                      | 0,3251                      | 12                                   | 26   | 423        | 79                                  | 1,25             | 3565 | 92,3       | 93,5 | 93,6 | 0,8               | 0,86 | 0,89 | 440        | 86,6                    |  |
| 75        | 100  | 250S/M  | 20,5                     | 8,9                                | 3,2                        | 3,8                      | 0,43661                     | 12                                   | 26   | 500        | 79                                  | 1,25             | 3570 | 92,5       | 93,6 | 94,1 | 0,76              | 0,84 | 0,87 | 440        | 120                     |  |
| 90        | 125  | 280S/M  | 24,5                     | 7,7                                | 1,8                        | 2,7                      | 1,06645                     | 20                                   | 44   | 747        | 81                                  | 1,25             | 3575 | 92,8       | 94,3 | 95   | 0,78              | 0,85 | 0,88 | 440        | 141                     |  |
| 110       | 150  | 280S/M  | 30                       | 7,5                                | 2                          | 2,7                      | 1,15532                     | 15                                   | 33   | 753        | 81                                  | 1,25             | 3575 | 93,5       | 94,5 | 95   | 0,8               | 0,86 | 0,89 | 440        | 171                     |  |
| 132       | 175  | 315S/M  | 36                       | 7,4                                | 2                          | 2,8                      | 1,73847                     | 22                                   | 48   | 906        | 81                                  | 1,25             | 3575 | 93,6       | 95,2 | 95,4 | 0,8               | 0,86 | 0,89 | 440        | 204                     |  |
| 150       | 200  | 315S/M  | 40,8                     | 7,7                                | 2,1                        | 2,9                      | 2,10568                     | 15                                   | 33   | 975        | 81                                  | 1,25             | 3580 | 93,5       | 94,8 | 95,4 | 0,77              | 0,85 | 0,88 | 440        | 234                     |  |
| 185       | 250  | 315S/M  | 50,3                     | 7,7                                | 2,5                        | 3                        | 2,4691                      | 22                                   | 48   | 1053       | 81                                  | 1,25             | 3580 | 95,3       | 95,7 | 95,8 | 0,8               | 0,87 | 0,89 | 440        | 285                     |  |
| 200       | 270  | 355M/L  | 54,3                     | 8                                  | 1,6                        | 2,8                      | 3,53969                     | 24                                   | 53   | 1429       | 84                                  | 1,15             | 3585 | 94,5       | 95,6 | 95,8 | 0,8               | 0,87 | 0,9  | 440        | 304                     |  |
| 220       | 300  | 355M/L  | 59,8                     | 8,2                                | 2                          | 2,7                      | 3,86039                     | 18                                   | 40   | 1475       | 84                                  | 1,15             | 3581 | 94,8       | 95,6 | 95,8 | 0,81              | 0,88 | 0,9  | 440        | 335                     |  |
| 260       | 350  | 355M/L  | 70,6                     | 8                                  | 2,2                        | 2,7                      | 4,50378                     | 26                                   | 57   | 1605       | 84                                  | 1,15             | 3585 | 95,2       | 95,6 | 95,8 | 0,84              | 0,89 | 0,9  | 440        | 396                     |  |
| 300       | 400  | 355M/L  | 81,5                     | 8,4                                | 2                          | 2,5                      | 5,36165                     | 24                                   | 53   | 1743       | 84                                  | 1,15             | 3586 | 95,7       | 95,7 | 95,8 | 0,87              | 0,9  | 0,91 | 440        | 452                     |  |
| 330       | 450  | 355M/L  | 89,7                     | 8,4                                | 2,5                        | 2,5                      | 6,00505                     | 18                                   | 40   | 1860       | 84                                  | 1,15             | 3583 | 95,3       | 95,7 | 95,8 | 0,87              | 0,91 | 0,92 | 440        | 491                     |  |
| 370       | 500  | 355M/L  | 100                      | 9,5                                | 3,3                        | 3,6                      | 6,005                       | 24                                   | 53   | 1825       | 84                                  | 1,15             | 3588 | 95,6       | 95,8 | 95,8 | 0,81              | 0,86 | 0,88 | 440        | 576                     |  |
| Opçionais |      |         |                          |                                    |                            |                          |                             |                                      |      |            |                                     |                  |      |            |      |      |                   |      |      |            |                         |  |
| 0,25      | 0,33 | 71      | 0,071                    | 6,2                                | 2,9                        | 3,1                      | 0,00029                     | 24                                   | 53   | 6          | 60                                  | 1,25             | 3420 | 61         | 68   | 70   | 0,65              | 0,76 | 0,83 | 220        | 1,13                    |  |
| 0,37      | 0,5  | 71      | 0,105                    | 6,2                                | 2,7                        | 3,2                      | 0,00033                     | 21                                   | 46   | 6,5        | 60                                  | 1,25             | 3440 | 70         | 73   | 73,4 | 0,6               | 0,73 | 0,82 | 220        | 1,61                    |  |
| 0,55      | 0,75 | 80      | 0,156                    | 6,8                                | 2,7                        | 2,9                      | 0,0006                      | 25                                   | 55   | 11         | 62                                  | 1,25             | 3430 | 74         | 74,5 | 76,8 | 0,6               | 0,73 | 0,81 | 220        | 2,32                    |  |
| 0,75      | 1    | 80      | 0,211                    | 8                                  | 3,7                        | 3,9                      | 0,00065                     | 25                                   | 55   | 12,5       | 62                                  | 1,25             | 3470 | 79         | 81,5 | 82,5 | 0,61              | 0,73 | 0,82 | 220        | 2,91                    |  |
| 1,1       | 1,5  | 80      | 0,314                    | 8,4                                | 3,9                        | 3,7                      | 0,00087                     | 19                                   | 42   | 14         | 62                                  | 1,25             | 3415 | 81         | 84   | 84   | 0,64              | 0,76 | 0,83 | 220        | 4,14                    |  |
| 1,1       | 1,5  | 90S     | 0,31                     | 7,8                                | 2,6                        | 3                        | 0,00176                     | 24                                   | 53   | 18         | 68                                  | 1,25             | 3455 | 83         | 84,5 | 84,5 | 0,72              | 0,82 | 0,86 | 220        | 3,98                    |  |
| 1,5       | 2    | 90S     | 0,42                     | 8                                  | 3,5                        | 3,5                      | 0,00199                     | 17                                   | 37   | 19         | 68                                  | 1,25             | 3475 | 84,5       | 85,5 | 85,5 | 0,69              | 0,79 | 0,85 | 220        | 5,42                    |  |
| 3         | 4    | 100L    | 0,829                    | 8,9                                | 3                          | 4,1                      | 0,00638                     | 19                                   | 42   | 32         | 71                                  | 1,25             | 3525 | 85         | 88   | 88,5 | 0,68              | 0,8  | 0,86 | 440        | 5,17                    |  |
| 3,7       | 5    | 112M    | 1,03                     | 7,5                                | 2,5                        | 3,2                      | 0,00696                     | 26                                   | 57   | 38         | 66                                  | 1,25             | 3495 | 86,3       | 88   | 88,6 | 0,73              | 0,83 | 0,87 | 440        | 6,3                     |  |
| 4,5       | 6    | 132S    | 1,24                     | 8,3                                | 2,8                        | 3,9                      | 0,01709                     | 18                                   | 40   | 60         | 68                                  | 1,25             | 3540 | 85         | 87,8 | 89,6 | 0,67              | 0,79 | 0,85 | 440        | 7,75                    |  |
| 5,5       | 7,5  | 132M    | 1,51                     | 7,9                                | 2,6                        | 3,6                      | 0,01709                     | 15                                   | 33   | 60         | 68                                  | 1,25             | 3540 | 87,5       | 89,5 | 89,7 | 0,69              | 0,8  | 0,85 | 440        | 9,47                    |  |
| 5,5       | 7,5  | 132S    | 1,51                     | 7,9                                | 2,6                        | 3,6                      | 0,01709                     | 15                                   | 33   | 60         | 68                                  | 1,25             | 3540 | 87,5       | 89,5 | 89,7 | 0,69              | 0,8  | 0,85 | 440        | 9,47                    |  |
| 7,5       | 10   | 132M    | 2,07                     | 8,1                                | 2,5                        | 3,4                      | 0,02159                     | 12                                   | 26   | 67         | 68                                  | 1,25             | 3530 | 88,2       | 89,9 | 90,2 | 0,74              | 0,83 | 0,87 | 440        | 12,5                    |  |
| 11        | 15   | 132M    | 3,04                     | 8,4                                | 3,4                        | 3,9                      | 0,03048                     | 12                                   | 26   | 78         | 68                                  | 1,25             | 3530 | 89,6       | 90,5 | 91   | 0,71              | 0,81 | 0,86 | 440        | 18,4                    |  |
| 11        | 15   | 160M    | 3,03                     | 7,4                                | 2,6                        | 3,4                      | 0,04433                     | 14                                   | 31   | 104        | 72                                  | 1,25             | 3540 | 89,5       | 91,3 | 91,5 | 0,72              | 0,81 | 0,86 | 440        | 18,3                    |  |
| 15        | 20   | 160L    | 4,13                     | 7,6                                | 2,7                        | 3,2                      | 0,04259                     | 12                                   | 26   | 115        | 72                                  | 1,25             | 3540 | 90         | 90,8 | 91   | 0,74              | 0,83 | 0,87 | 440        | 24,9                    |  |
| 18,5      | 25   | 160L    | 5,08                     | 8,3                                | 3                          | 3,5                      | 0,06263                     | 9                                    | 20   | 119        | 72                                  | 1,25             | 3545 | 91         | 91,5 | 91,7 | 0,72              | 0,82 | 0,87 | 440        | 30,4                    |  |
| 22        | 30   | 180L    | 6,04                     | 7,2                                | 2,8                        | 2,9                      | 0,09145                     | 12                                   | 26   | 160        | 72                                  | 1,25             | 3545 | 91,5       | 91,7 | 92,4 | 0,75              | 0,83 | 0,87 | 440        | 35,9                    |  |
| 22        | 30   | 180M    | 6,04                     | 7,2                                | 2,8                        | 2,9                      | 0,09145                     | 12                                   | 26   | 160        | 72                                  | 1,25             | 3545 | 91,5       | 91,7 | 92,4 | 0,75              | 0,83 | 0,87 | 440        | 35,9                    |  |
| 30        | 40   | 200L    | 8,21                     | 6,7                                | 2,8                        | 2,9                      | 0,17027                     | 18                                   | 40   | 219        | 76                                  | 1,25             | 3560 | 91,5       | 91,7 | 92,4 | 0,74              | 0,83 | 0,86 | 440        | 49,5                    |  |
| 45        | 60   | 200L    | 12,3                     | 6,6                                | 2,8                        | 2,9                      | 0,21144                     | 18                                   | 40   | 265        | 76                                  | 1,25             | 3560 | 93,5       | 94   | 94   | 0,77              | 0,84 | 0,87 | 440        | 72,2                    |  |
| 45        | 60   | 250S/M  | 12,3                     | 8,5                                | 2,9                        |                          |                             |                                      |      |            |                                     |                  |      |            |      |      |                   |      |      |            |                         |  |

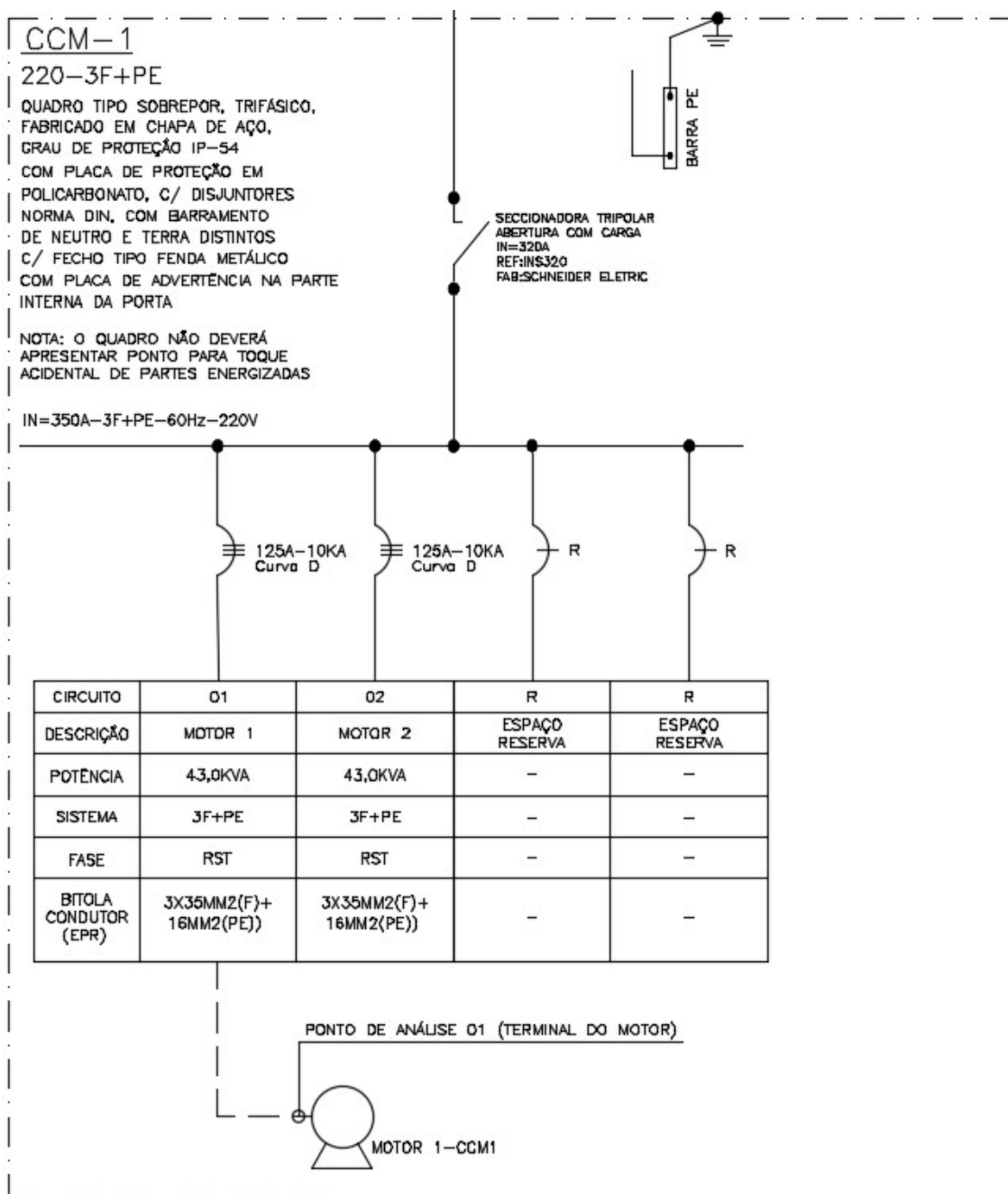
## APÊNDICE D - DIAGRAMA UNIFILAR DA INDÚSTRIA

Figura 39 - Diagrama Unifilar Geral



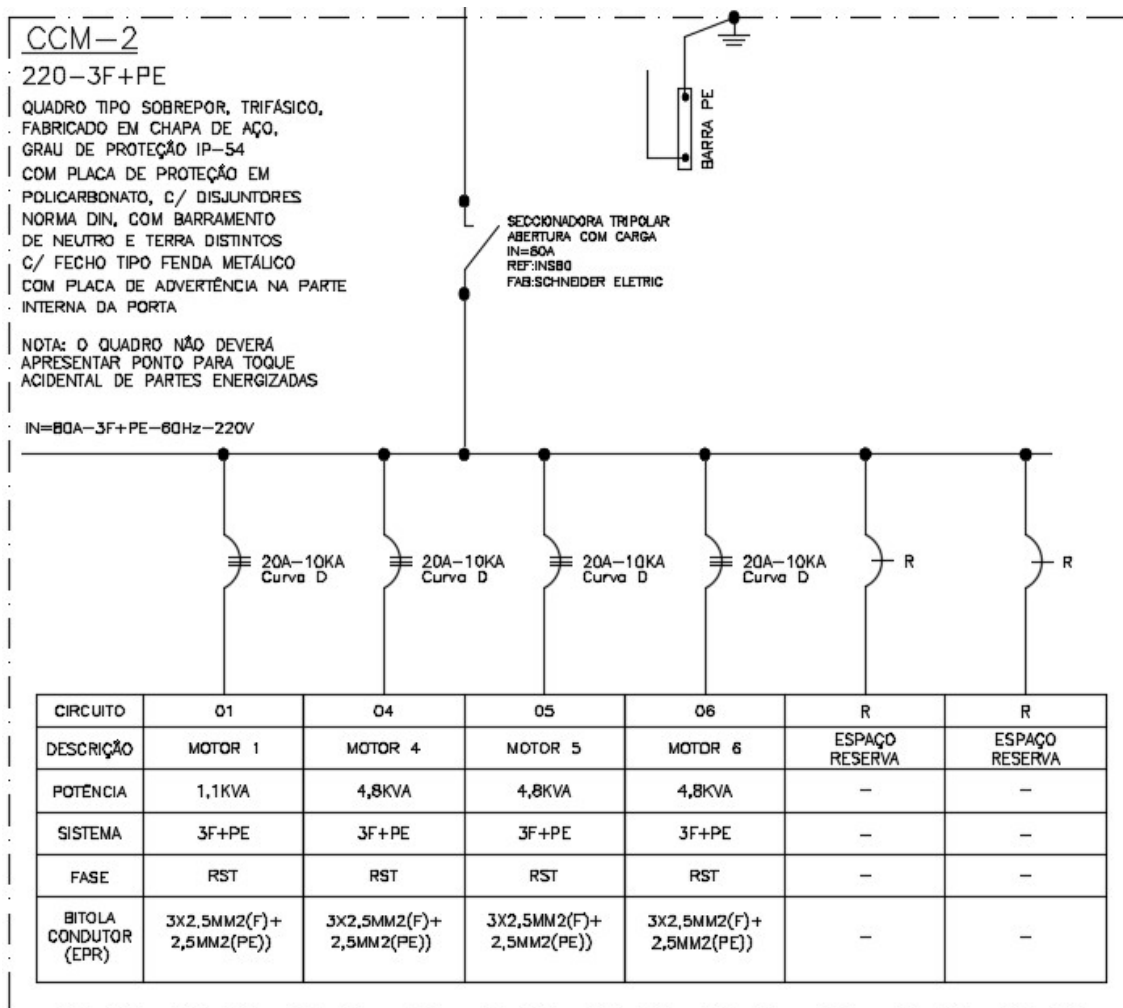
Fonte: Própria do Autor

Figura 40 - Diagrama Unifilar CCM-1



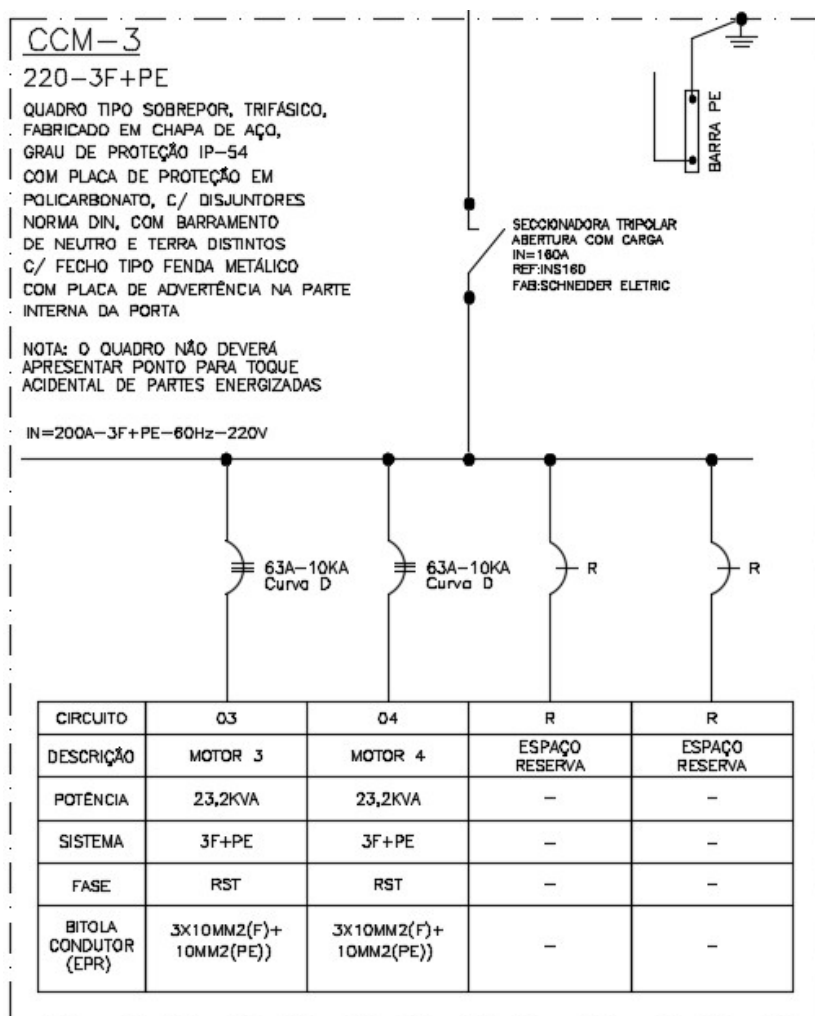
Fonte: Própria do Autor

Figura 41 – Diagrama Unifilar CCM-2



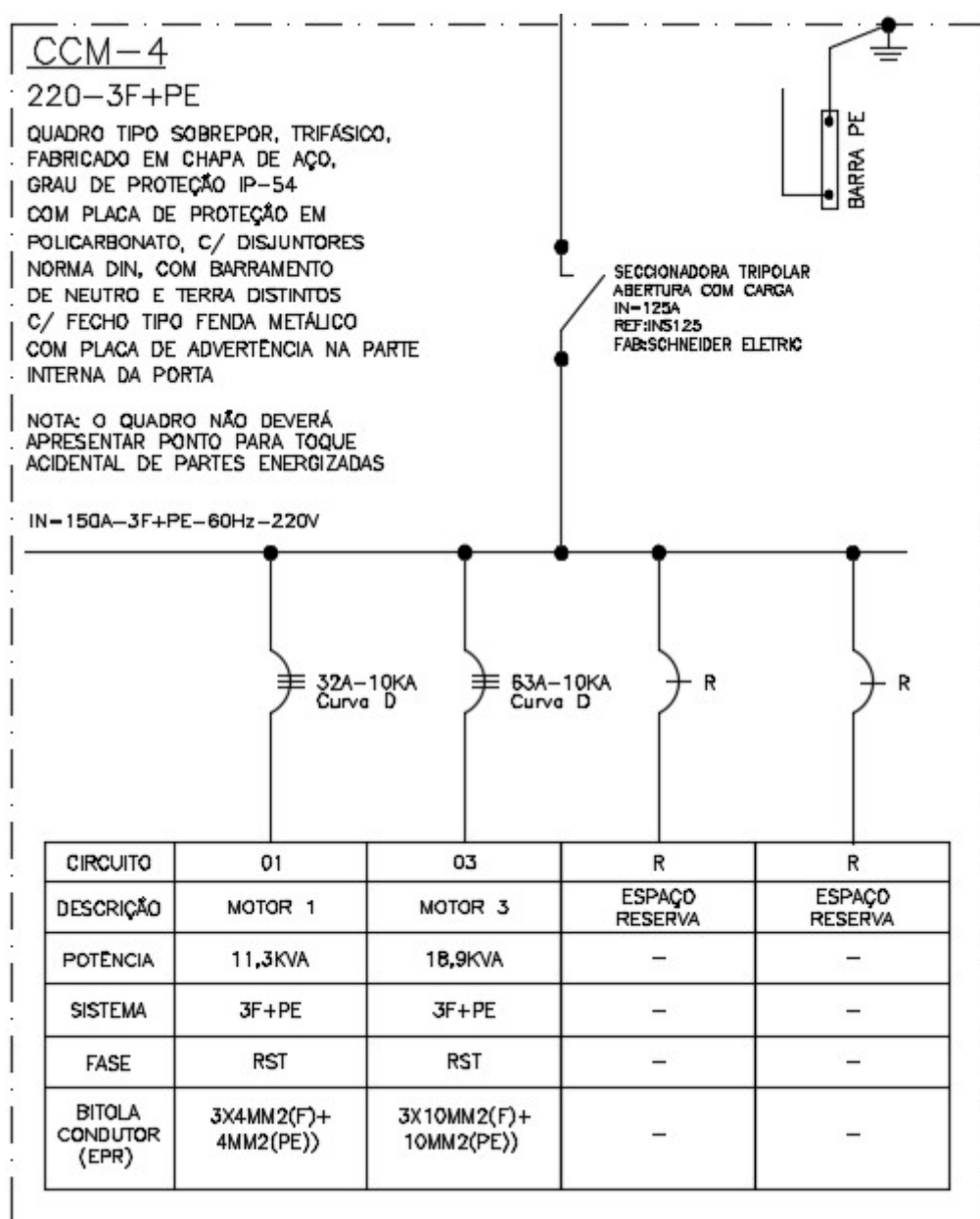
Fonte: Própria do Autor

Figura 42 - Diagrama Unifilar CCM-3



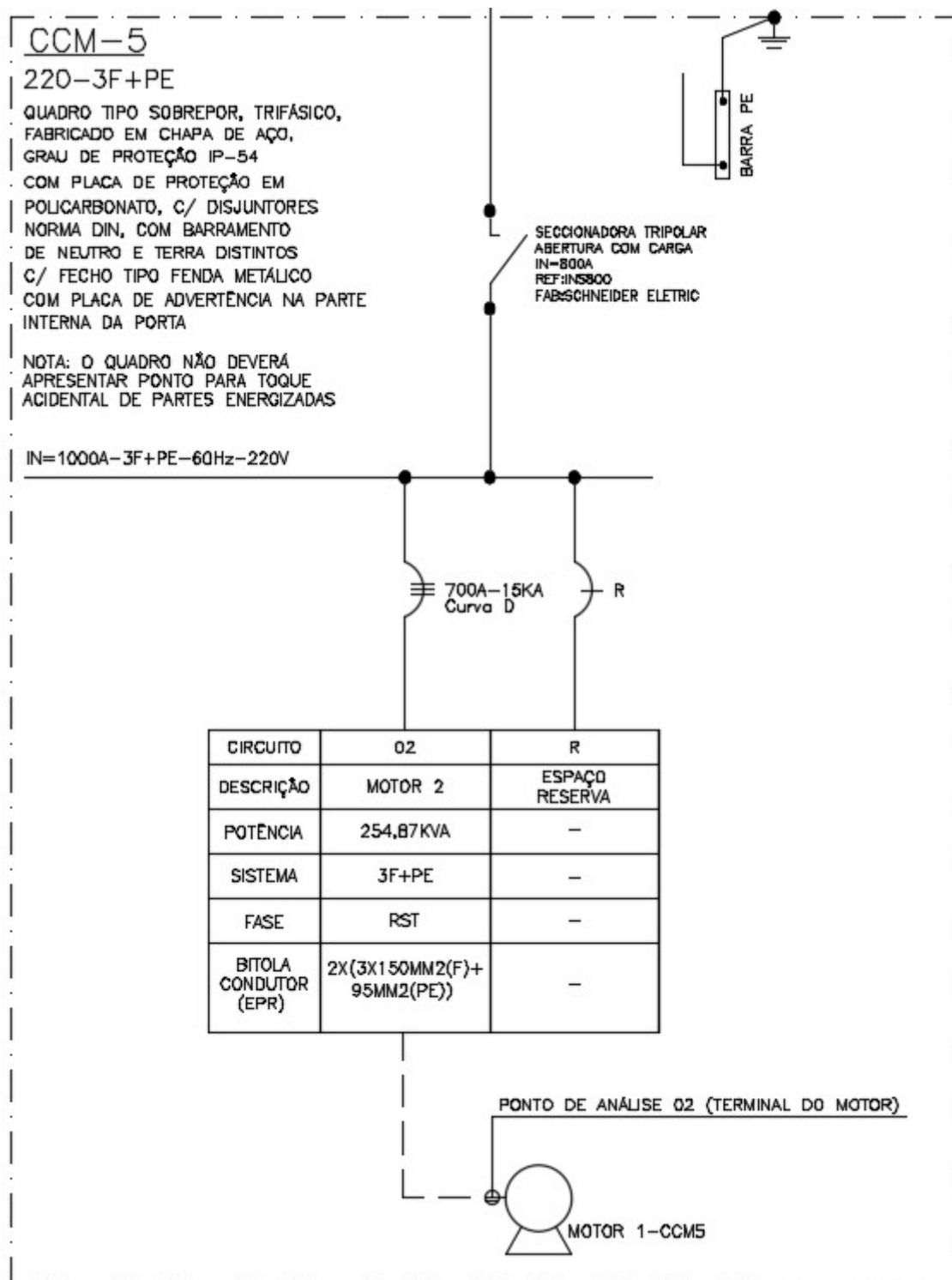
Fonte: Própria do Autor

Figura 43 - Diagrama Unifilar CCM-4



Fonte: Própria do Autor

Figura 44 – Diagrama Unifilar CCM 5



Fonte: Própria do Autor