

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS CORNÉLIO PROCÓPIO
DIRETORIA DE GRADUAÇÃO E EDUCAÇÃO PROFISSIONAL
ENGENHARIA ELÉTRICA

JOHN LENNON PAIVA RESENDE

**PROJETO E MONTAGEM DE UM LABORATÓRIO DE TESTES DE ROTINA
DE TRANSFORMADORES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2017

JOHN LENNON PAIVA RESENDE

**PROJETO E MONTAGEM DE UM LABORATÓRIO DE TESTES DE ROTINA
DE TRANSFORMADORES**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina TCC 2, do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Esp. Edmar Piacentini Junior

CORNÉLIO PROCÓPIO

2017



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Elétrica
Curso de Engenharia Elétrica



FOLHA DE APROVAÇÃO

John Lennon Paiva Resende

Projeto e montagem de bancada de testes de rotina de transformadores

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 17:30hs do dia 07/08/2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Esp. Edmar Piacentini Junior - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Luiz Marcelo Chiesse da Silva - (Membro)

Prof(a). Me(a). Marco Antonio Ferreira Finocchio - (Membro)

Prof(a). Esp. Carlos Alberto Paschoalino - (Membro)

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso.

Dedico este trabalho á dona Ednéia Lima Paiva, minha mãe,
responsável por tudo que consegui conquistar.

AGRADECIMENTOS

Gostaria primeiramente de agradecer a ele, o ser que deu a vida por nós várias vezes, mas voltou mais forte do que havia ido, um exemplo de perseverança e que tudo em nossas vidas pode ser alcançado com vontade e esforço. Aquele que podemos sempre contar na luta contra o mal. Son Goku.

Ao professor Edmar pela paciência na orientação, tornando possível a conclusão desta monografia.

Aos amigos que conquistei durante todos esses duros anos de pó de guaraná e café nas madrugadas (pelo menos no primeiro semestre).

A minha namorada que varou várias noites junto a mim, me dando apoio, cobrando, me xingando e às vezes me batendo, para que este trabalho fosse finalmente finalizado.

E é claro minha mãe, que mesmo quando não podia me ajudava e me incentivava para conseguir algo que ela não teve oportunidade de fazer, que chorou de tristeza ao me ver ir embora de casa a caminho de uma cidade longínqua e estranha, que chorava de felicidade ao me ver em minhas voltas pra casa, e chorava novamente em minhas idas, e que espero ver chorar apenas mais uma vez, de orgulho de ver seu único filho se formando e se tornando um engenheiro.

RESUMO

PAIVA, John Lennon Paiva Resende. **Projeto e montagem de um laboratório de testes de rotina de transformadores**. 2017. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

Os transformadores são equipamentos vitais e de alto custo para a distribuição e transmissão de energia elétrica. Portanto, é indispensável garantia de que não haja falhas construtivas nestes equipamentos, sendo necessário que essas máquinas elétricas passem por ensaios após sua fabricação. Foi projetada e construída, para este trabalho, uma bancada para os ensaios de rotinas de tensão aplicada, tensão induzida, perdas em carga e perdas a vazio. O projeto mostrou-se eficiente e atendeu bem seu objetivo.

Palavras-chave: Transformador. Ensaio de rotina. Mesa de comando.

ABSTRACT

PAIVA, John Lennon Paiva Resende. **Design and installation of a routine testing laboratory for transformers.** 2017. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

Transformers are vital and costly equipments for the distribution and transmission of electricity. So, it is indispensable to make sure that there are no constructive failures in these equipments, being necessary for these electric machines to run through tests after their manufacture. For this work, a bench was designed and built for routine tests of applied voltage, induced voltage, load losses and no load losses. The project proved to be efficient and fulfilled its objective.

Keyword: Transformer. Routine testing. Control panel.

LISTA DE ABREVIATURAS

fem	Força eletromotriz
I_p	Corrente no primário
I_s	Corrente no secundário
N_p	Número de espiras do primário
N_s	Número de espiras do secundário
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
V_p	Tensão no primário
V_s	Tensão no secundário

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira das Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute
ANSI	American National Standards Institute
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
NBR	Associação Brasileira de Normas Técnicas

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Esquema de um transformador mostrando o fluxo magnético no núcleo.....	15
Figura 2 - Representação de um sistema GTD: geração - transmissão - distribuição	16
Figura 3 - Núcleo de um transformador trifásico.....	17
Figura 4 - Núcleo de um transformador monofásico (i: intereixo; H: altura da janela).....	18
Figura 5 - Núcleo de um transformador trifásico	19
Figura 6 - Corte da chapa a 45°. O fluxo circula com menor relutância. .	19
Figura 7 - Seção transversal de núcleo com quatro dentes	20
Figura 8 - Canal de refrigeração entre pacotes do núcleo.....	20
Figura 9 - Chapas cortadas sendo empilhadas para formar o núcleo	21
Figura 10 - Núcleo e acessórios de um transformador trifásico de distribuição	22
Figura 11 - Colunas cintadas; seção do núcleo cintado	22
Figura 12 - Núcleo com culatra superior desmontado.....	22
Figura 13 - Transposição cíclica	24
Figura 14 - Bobina helicoidal	25
Figura 15 - Bobina em disco.....	25
Figura 16 - Bobina em disco.....	26
Figura 17 - Prensagem por calços	27
Figura 18 - Estufa de secagem.....	27
Figura 19 - Transformador a seco.....	28
Figura 20 - Transformadora a óleo.	29
Figura 21 - Analisador Digital Trifásico 9443.....	32
Figura 22 - Esquema do circuito elétrico geral da mesa de comando.	33
Figura 23 - Voltímetro digital e amperímetros analógicos para teste de tensão aplicada.....	38
Figura 24 - Amperímetros analógicos e frequencímetro digital, para o ensaio de tensão induzida.....	39
Figura 25 - Tela de monitoramento do software do JMAN, para o ensaio de perdas a vazio.....	39
Figura 26 - Tela de monitoramento do software do JMAN, para o ensaio de perdas em carga.....	40

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1.	Problema	13
1.2.	Justificativa	13
1.3.	Objetivos	14
1.3.1.	Objetivo Geral.....	14
1.3.2.	Objetivos específicos.....	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1.	Transformador	15
2.2.	Linhas de montagem de transformador.....	16
2.2.1.	Núcleo e elemento de montagem	17
2.2.2.	Bobinas	23
2.2.3.	Parte ativa	26
2.2.4.	Montagem final.....	28
2.3.	Ensaio	29
2.4.	Transformador de corrente.....	31
2.5.	Analizador digital trifásico TRANS4 9443	32
3	METODOLOGIA.....	33
3.1.	Projeto elétrico.....	33
3.2.	Montagem.....	36
3.3.	Testes e verificações.....	36
4	RESULTADOS OBTIDOS.....	38
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
	REFERÊNCIAS	42
	ANEXO A – Esquema elétrico completo da mesa de comando de ensaio.	44

1 INTRODUÇÃO

Transformadores são dispositivos criados para a conversão de energia elétrica ou potencial elétrico de um circuito a outro, sendo seu funcionamento baseado na indução magnética.

Segundo Fitzgerald (2006, p. 69), transformadores “consistem de dois ou mais enrolamentos, que são acoplados por meio de um fluxo magnético comum”. O enrolamento de entrada é chamado de primário, e o de saída secundário, e caso houver um terceiro enrolamento, é chamado de terciário. Seu funcionamento é baseado nas leis de Faraday e Lenz, onde é induzida uma corrente elétrica na bobina secundária do transformador, a partir de uma variação de fluxo elétrico na bobina primária (KOSOW, 1996).

Existem diversos tipos de transformadores, sendo estes classificados de acordo com vários critérios. Os mais importantes são: finalidade, tipo, material do núcleo e número de fases. Segundo a finalidade existem os transformadores de corrente, potência, distribuição e de força; os tipos são com dois ou mais enrolamentos e autotransformadores. O material do núcleo pode ser ferromagnético ou núcleo de ar; e o número de fases pode ser monofásico, trifásico e polifásico.

Os transformadores de potência são utilizados para abaixar ou elevar a tensão de uma rede elétrica, elevando ou reduzindo a corrente do circuito de modo que a potência do circuito não seja alterada. Esses transformadores podem ser divididos em dois grupos: transformadores de força ou distribuição. Os transformadores de força são usados para geração, transmissão e distribuição de energia em concessionárias e subestações de grandes indústrias. Sua potência varia de 5 a 300MVA, sua operação em alta tensão até 550kV e devem seguir as normas: ANSI / IEEE, IEC e ABNT (WEG, 2017).

Os transformadores de distribuição são utilizados na distribuição de energia, como rebaixador de tensão para a energia a ser entregue aos clientes finais (concessionárias, cooperativas, casas, e outras empresas em geral). Sua potência varia de 15 a 300kVA, o enrolamento de alta tensão de 15; 24,2 ou 36,2kV; o enrolamento de baixa tensão em 380/220V ou 220/127V, e devem seguir as normas: ABNT/IEC (WEG, 2017).

Os transformadores de distribuição são projetados e construídos de acordo com a necessidade de aplicação. Sua construção é feita desde o corte das chapas de silício para a montagem do núcleo, até a montagem da parte ativa no tanque. Depois de finalizado, é levado ao laboratório de ensaio e submetido a ensaios de rotina para certificar que não há nenhuma falha em sua construção e que esteja conforme todos os requisitos propostos pelas normas que deve atender (NBR5356, 1993).

Analisando a importância dos transformadores de distribuição, esse trabalho propõe o estudo, projeto e desenvolvimento de uma bancada de instrumentação de um laboratório de testes de rotina de transformadores, com capacidade de teste de transformadores de até 1MVA. O projeto será desenvolvido em parceria com uma empresa que fabrica transformadores e inclui a construção de uma mesa de controle com instrumentos de medição, controladores analógicos e digitais, e conexões para os cabos de ligações de alimentação e teste dos transformadores.

1.1. Problema

Como a montagem de um transformador envolve vários processos, uma grande quantidade de materiais, de variados tipos de ligações internas e externas, e até mesmo a qualidade da mão de obra utilizada na construção dos mesmos, é necessário efetuar uma variedade de testes para comprovar a qualidade dos transformadores para que cheguem em perfeitas condições de funcionamento aos devidos consumidores.

1.2. Justificativa

As normas NBR5356 e NBR5380 exigem que os transformadores, ao fim de sua montagem, passem por uma gama de testes, como por exemplo, ser submetidos a sobretensões e sobrecorrentes, cuja porcentagem varia de acordo com a classe do transformador. Esses testes devem mostrar que o transformador é capaz de suportar diversas adversidades, como as sobretensões e sobrecorrentes, que estão sujeitos a sofrer devido às descargas atmosféricas ou outros fatores.

Neste sentido, torna-se necessária a implementação de um laboratório de ensaios de transformadores, para que possam entrar no mercado operando nas condições estabelecidas pelas normas. Assim, este trabalho objetiva o desenvolvimento de uma mesa de comando para um laboratório de ensaios de transformadores.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Geral

Projetar e construir uma mesa de controle, para utilização no laboratório de ensaio de transformadores da empresa.

1.3.2. Objetivos específicos

- Aprofundar a pesquisa bibliográfica sobre transformadores, bem como os materiais que o envolvem e suas características e também sobre os ensaios aplicados na fase final da montagem do transformador.
- Especificar os componentes utilizados na mesa de comando do laboratório de ensaio dos transformadores.
- Desenvolver o circuito elétrico empregado na construção da bancada.
- Confeccionar a mesa de comando.
- Testar, corrigir e modificar a mesa de comando.
- Documentar o trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Transformador

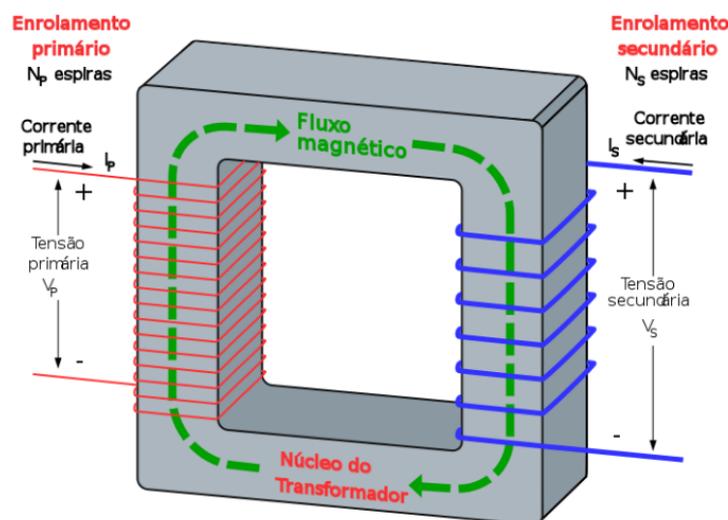
Nesse capítulo será explicado o funcionamento de uma linha de montagem de transformadores de força de modo geral, bem como suas principais partes construtivas.

Transformador é um equipamento de operação estática que através de uma indução eletromagnética transfere energia de um circuito, chamado primário, para um ou mais circuitos denominados secundário e terciário, alterando os valores da tensão e corrente e mantendo a mesma frequência (MAMEDE, 2005).

O funcionamento do transformador é explicado através da Lei de Faraday da Indução Eletromagnética, a qual mostra que em um circuito atravessado por uma corrente variável forma-se um campo magnético em volta do condutor. Quando um circuito fechado é atravessado por um campo magnético variável, induz-se uma fem (força eletromotriz), fazendo com que se forme uma corrente elétrica no circuito (KOSOW, 1996).

A Figura 1 mostra um circuito magnético fechado representando um transformador na sua forma mais simples.

Figura 1- Esquema de um transformador mostrando o fluxo magnético no núcleo.

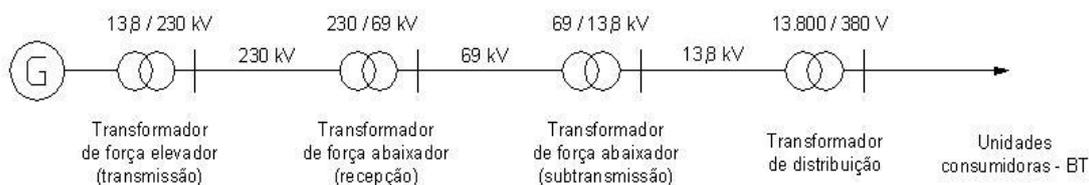


Fonte: Daniels (1976).

No enrolamento primário circula uma corrente alternada I_p , gerando um campo magnético que atravessa o enrolamento secundário. Assim é gerada uma corrente alternada I_s , quando o circuito secundário estiver fechado, com a mesma forma da corrente que atravessa o circuito primário, mas com tensão igual ou diferente, para mais ou para menos, de acordo com a relação no número de espiras dos circuitos (N_s/N_p). As bobinas são montadas em uma estrutura de material ferromagnético para aumentar o acoplamento.

Os transformadores são classificados de acordo com o posicionamento que ocupam no sistema elétrico, como pode ser observado na Figura 2. A figura mostra um esquema de geração, transmissão, sub-transmissão e distribuição de energia elétrica.

Figura 2 - Representação de um sistema GTD: geração - transmissão - distribuição.



Fonte: Adaptado de MAMEDE 2005.

2.2. Linhas de montagem de transformador

Os transformadores são construídos com diversas características, que irão depender da necessidade de aplicação. Características como: tipo de carga, potência, corrente, frequência, tensões de trabalho e o ambiente que se pretende instalar. Há vários tipos de transformadores, como: transformadores de força, de distribuição, subterrâneos, subestações móveis e a seco.

Seu processo de fabricação e a linha de produção são, de maneira geral, semelhantes nas fábricas, porém, apresentando pequenas diferenças quanto aos recursos técnicos disponíveis, que muitas vezes implicam a qualidade final do equipamento (MAMEDE, 2005).

O seu processo de fabricação pode ser descrito pelas seguintes etapas:

- Montagem do núcleo;
- Bobinagem;
- Montagem da parte ativa (composta pelo núcleo e pelas bobinas);
- Tratamento térmico (dependendo do tipo de transformador);
- Montagem final;
- Ensaios.

Esse capítulo irá descrever essas etapas, bem como as características das principais partes dos transformadores.

2.2.1. Núcleo e elemento de montagem

O núcleo é composto por:

- Lâminas de material ferroso sobrepostas no formato do núcleo;
- Armadura;
- Tirantes;
- Sapatas;
- Cinta de fibra de vidro.

Alguns desses elementos podem ser identificados na Figura 3.

Figura 3 - Núcleo de um transformador trifásico.



Fonte: Autoria própria.

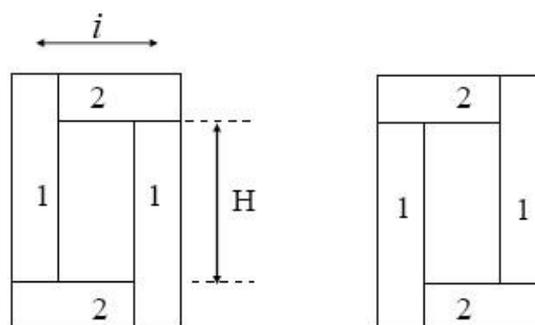
O núcleo é constituído por chapas de aço silício de grãos orientados, montadas uma sobreposta a outra.

As chapas são cortadas de uma bobina de aço silício em lâmina, fornecida em várias espessuras, de acordo com sua necessidade. As bobinas são fabricadas de acordo com padrões internacionais, e classificadas de acordo com sua corrente de excitação e perdas por histerese. Essa classificação é feita segundo a AISI (*American Iron and Steel Institute*), designadas pela letra M associada a um número. As chapas são feitas de uma liga de ferro com 5% de silício, cuja função é reduzir as perdas por histerese e aumentar a resistividade do núcleo, permitindo, desta forma, reduzir as correntes parasitas.

As chapas são laminadas a frio, e em seguida é feito um tratamento térmico, que faz com que os grãos magnéticos sejam orientados no mesmo sentido da laminação. Uma fina camada de material isolante é inserida sobre as lâminas e sua fabricação é feita dentro de limites máximos de perdas eletromagnéticas (RIES, 1977).

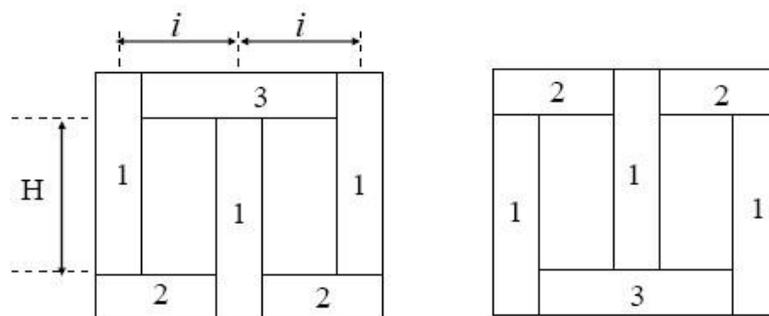
O núcleo é formado pelas colunas e culatras, como são mostradas nas Figuras 4 e 5, em que as chapas utilizadas têm o corte transversal a 90°. As figuras mostram as camadas sobrepostas montadas de maneira a evitar os pequenos entreferros coincidentes na montagem.

Figura 4 - Núcleo de um transformador monofásico (i: intereixo; H: altura da janela).



Fonte: RIES (1977).

Figura 5 - Núcleo de um transformador trifásico.



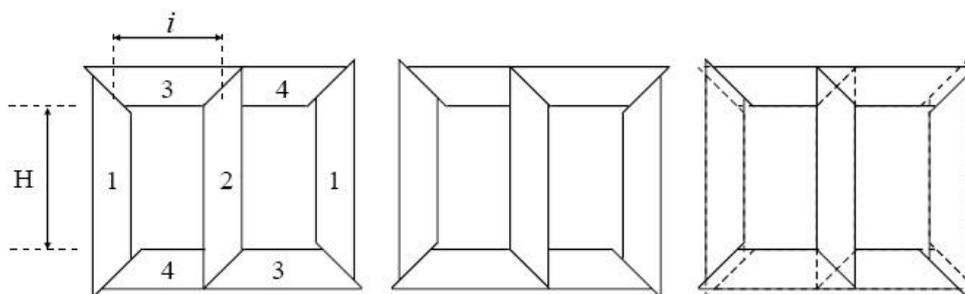
Fonte: RIES (1977).

O corte das chapas é feito segundo a especificação do projeto, de acordo com cada transformador. É feita uma programação de corte das bobinas de aço silício, para o melhor aproveitamento da largura da bobina. Na primeira etapa é executado o corte longitudinal nas chapas na largura necessária. Em seguida é feito o corte transversal, deixando as chapas nas dimensões e formatos desejados, e por fim, é feita a remoção das rebarbas, a fim de evitar curtos-circuitos entre chapas adjacentes.

Nas Figuras 4 e 5 observa-se que as chapas tem um corte de 90° em suas extremidades. Em chapas de grãos orientados, tal fato faz com que o fluxo nos cantos não percorra todas as chapas no sentido da orientação dos grãos, o que resulta em uma maior corrente de magnetização e maior perda magnética nos cantos. Por isso é feito um corte de 45° nos cantos e a montagem é feita como mostrada na Figura 6, a fim de reduzir estas perdas.

Na Figura 6 pode ser observado que as junções das lâminas são desencontradas reduzindo assim, o efeito do entreferro, que representam uma relutância magnética muito grande, aumentando a força magnetomotriz de excitação e, portanto, a corrente de excitação.

Figura 6 - Corte da chapa a 45°. O fluxo circula com menor relutância.

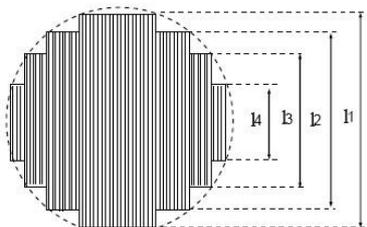


Fonte: RIES (1977).

Idealmente a seção transversal do núcleo deveria ser circular, para uma melhor distribuição do fluxo. Como este tipo de construção é antieconômico, são empregadas as seguintes soluções:

- Para transformadores pequenos é utilizada seção quadrada ou retangular.
- Para transformadores de médio e grande porte é utilizada a seção tipo cruz, onde as chapas são cortadas em dois ou mais tamanhos escalonados, de forma a serem empilhadas de maneira que a seção fique inscrita em uma circunferência. Assim tem-se um melhor aproveitamento das chapas, além de aumentar a superfície de refrigeração do núcleo, diminuindo as perdas e a corrente de excitação. A Figura 7 mostra a seção tipo cruz com quatro degraus.

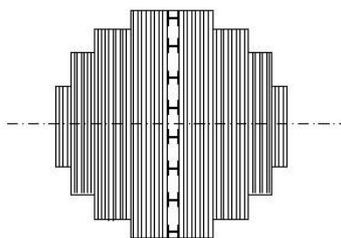
Figura 7 - Seção transversal de núcleo com quatro dentes.



Fonte: RIES (1977).

Em transformadores de alta potência, o núcleo é montado com separadores feitos de material isolante entre pacotes de lâminas, criando canais de óleo para melhor refrigeração do núcleo, mostrado na Figura 8.

Figura 8 - Canal de refrigeração entre pacotes do núcleo.



Fonte: RIES (1977).

Após o corte é feita a montagem do núcleo, em que as chapas são empilhadas de modo que resultam nas colunas e culatras (Figura 9), de acordo com a especificação do projeto.

Em núcleos de grande seção, além do verniz que isola as chapas, são colocadas folhas de papelão isolante de 0,3mm de espessura a cada 15 mm de pacote de chapas, para reforçar a isolação, evitando o curto-circuito entre as lâminas devido a sobretensão transitória.

Figura 9 - Chapas cortadas sendo empilhadas para formar o núcleo.

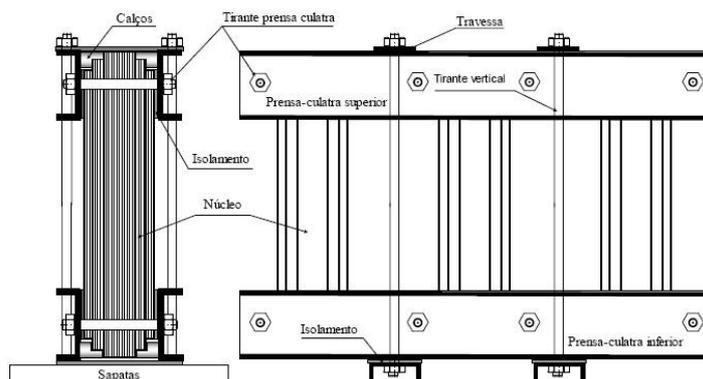


Fonte: Autoria própria.

Após o empilhamento das chapas, é feita a prensagem das mesmas com as armaduras e os tirantes. A prensagem é feita através de furos previamente feitos nas colunas ou culatras, que será também um canal no núcleo melhorando sua refrigeração. Porém, o estrangulamento nesta região dos furos estreita o fluxo, aumentando as perdas e a corrente de magnetização.

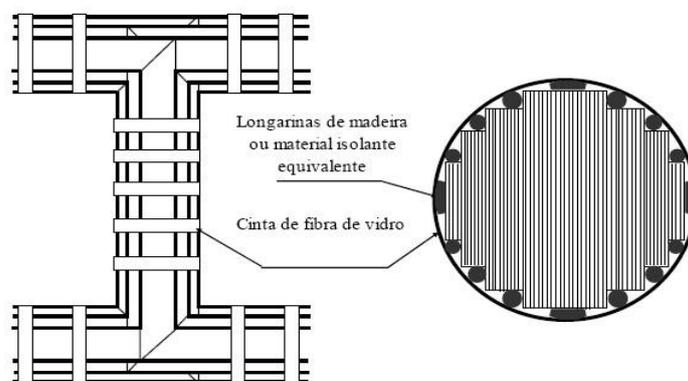
Após a prensagem é passada uma resina em todo o núcleo, para a melhor sustentação. Após a secagem da resina, o núcleo é colocado em pé (na Figura 10 é mostrado um núcleo trifásico em pé), e em suas colunas são amarradas cintas de fibra de vidro para garantir que suas chapas não se desprendam e também para garantir uma sustentação extra, como mostrado na Figura 11.

Figura 10 - Núcleo e acessórios de um transformador trifásico de distribuição.



Fonte: RIES (1977).

Figura 11 - Colunas cintadas; seção do núcleo cintado.



Fonte: RIES (1977).

Então o núcleo é pintado pra não ocorrer oxidação em suas partes metálicas, e a culatra superior do núcleo é desmontada para a colocação das bobinas como mostrado na Figura 12.

Figura 12 – Núcleo com culatra superior desmontado.



Fonte: Autoria própria.

2.2.2. Bobinas

As bobinas são os componentes mais complexos do transformador, e constituem a parte mais importante de seu projeto, já que estão sujeitas aos altíssimos esforços derivados das forças eletromagnéticas que ocorrem durante curtos-circuitos no sistema elétrico em que o transformador faz parte. Devem possuir características de isolamento para sua classe de tensão e temperatura de operação compatível com sua classe de temperatura.

As bobinas podem ser montadas com diferentes tipos e formatos de material, como:

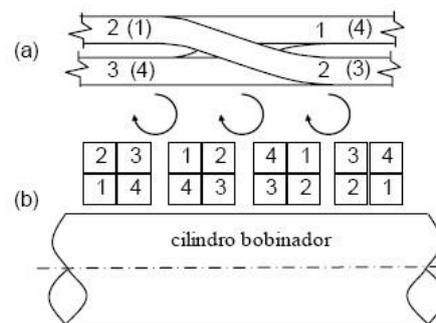
- Fios de diversas bitolas de cobre ou alumínio.
- Fios de seção circular, quadrada ou retangular.
- Lâminas de alumínio ou cobre.

Há diversas formas de se construir uma bobina, feitas de acordo com o tipo e a potência do transformador. Em transformadores a óleo normalmente os enrolamentos das bobinas de alta e de baixa são feitas de fios enrolados de maneira contínua do início ao fim da bobina. Já nos transformadores a seco, as bobinas de baixa são feitas de lâminas e as de alta são feitas de fios e divididos em várias partes, chamadas de panquecas. As panquecas são montadas em uma base, uma sobre a outra, em uma ordem específica, e então é feita a emenda e soldagem do final de uma panqueca com o início da outra.

Os fios de seção circular normalmente são usados até 8mm^2 , pois acima disso costuma ser usada a forma retangular. Em seções maiores, usam-se dois ou mais condutores enrolados em paralelo. Nesse caso, é necessário fazer a transposição entre eles, sendo que todos os condutores devem ter o mesmo comprimento, e devem ocupar relativamente o fluxo disperso em todas as posições, no sentido radial, em igual número de vezes. Com isso é garantido que os condutores tenham a mesma resistência ôhmica e a mesma reatância de dispersão. Desse modo, a corrente é distribuída igualmente entre os condutores em paralelo.

Na Figura 13 pode-se observar como é feita uma espira com transposição de 4 condutores em paralelo. Em (a) é observado como os condutores são bobinados em um cilindro bobinador. Na imagem (a) os condutores com números entre parênteses são os que se encontram por baixo. Na imagem (b), os condutores são mostrados em uma vista lateral, detalhando uma transposição cíclica.

Figura 13 - Transposição cíclica.



Fonte: RIES (1977).

Os condutores quando usados em paralelos, normalmente são isolados com tiras de papel Kraft ou fio de seda. A espessura do isolador é determinada de acordo com o dielétrico nos enrolamentos das bobinas. Esse isolamento é projetado não somente para tensão de operação nominal, mas também para sobretensões, a que os transformadores estão sujeitos, tanto em operações, como nos ensaios de laboratórios em que são simuladas as possíveis ocorrências em operações.

Em operação o transformador está sujeito a dois tipos de sobretensões:

- Sobretensões transitórias, causada por descargas atmosféricas e chaveamento (manobras do sistema);
- Sobretensões de curtos-circuitos no sistema.

Essas sobretensões são simuladas em laboratório conforme observado no tópico 2.3.

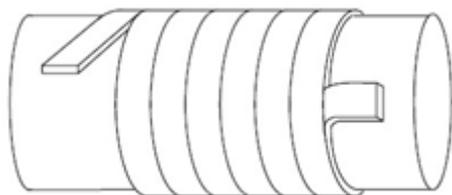
Os fios normalmente são de cobre eletrolítico ou de alumínio, isolados com esmalte, fitas de algodão ou papel especial. O isolamento tem as seguintes classes:

- Classe A – limite: 105°C;
- Classe E – limite: 120°C;
- Classe B – limite: 130°C;
- Classe F – limite: 155°C;
- Classe H – limite: 180°C.

Há dois tipos de enrolamentos:

- Helicoidal, ou em camadas. As espiras são feitas de maneira a ficarem sucessivas e adjacentes, tendo uma bobina única ao final (Figura 14).
- Em discos. São constituídas de várias seções ou pequenas bobinas enroladas de forma espiral, e posteriormente ligadas em série (Figura 15).

Figura 14 - Bobina helicoidal.



Fonte: RIES (1977).

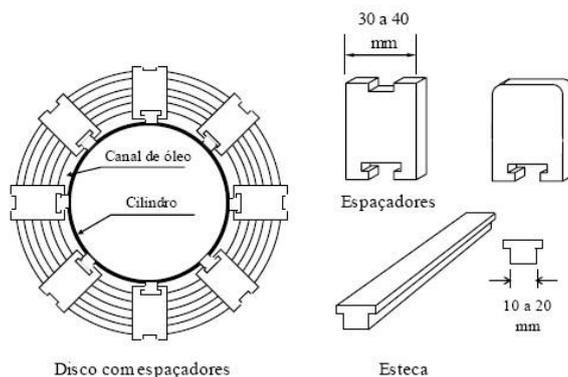
Figura 15 - Bobina em disco.



Fonte: RIES (1977).

As bobinas são construídas sobre um cilindro que serve de base. São colocados longarinas ou estecas sobre o cilindro de madeira, papelão ou fibra de vidro, conforme mostrado na Figura 16. Os espaçadores possuem um formato que possibilita seu encaixe nas longarinas, evitando que os mesmos não saiam de sua posição.

Figura 16 - Bobina em disco.



Fonte: RIES (1977).

Os canais criados entre os discos pelos espaçadores têm duas funções: isolamento entre discos e em transformadores a óleo, permitir a passagem de óleo refrigerante. A dimensão desses espaçamentos varia de acordo com a necessidade do projeto.

Ao final de suas montagens, as bobinas passam por um tratamento de secagem das colas e vernizes que são utilizados para fixação dos isolantes nas bobinas, e também para a retirada de umidade que os materiais absorvem do ambiente. Esse tratamento é realizado em uma estufa, com temperatura entre 90 a 100°C e durante 24 a 36 horas.

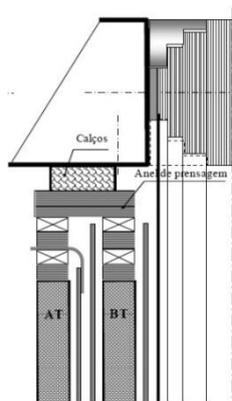
2.2.3. Parte ativa

A parte ativa deve constituir um conjunto mecanicamente rígido, capaz de suportar condições adversas de funcionamento.

Após a secagem das bobinas, elas são montadas no núcleo uma sobre a outra concentricamente, sendo que a bobina de baixa normalmente é posta na parte interna, entre o núcleo e a bobina de alta. Depois de acertadas as bobinas nos lugares, elas são calçadas e é montada novamente a culatra superior do núcleo.

Com a culatra montada, é instalada a viga superior e feita a prensagem das chapas da culatra. As bobinas são prensadas no núcleo através de parafusos presos na armadura e calços, para a fixação. A Figura 17 mostra um corte da parte ativa com os detalhes dos materiais isolantes.

Figura 17 - Prensagem por calços.



Fonte: RIES (1977).

A parte ativa de transformadores a óleo, após seu término, novamente é levada para a estufa para retirada de toda a água absorvida pelo ambiente, para não contaminação do óleo e melhor isolamento. Os processos de secagem variam de acordo com cada fabricante, podendo ser desde a secagem por ar quente até a secagem através de solvente. O tempo de secagem pode variar de 10 horas a 5 dias, dependendo do tamanho do transformador. A Figura 18 mostra uma estufa de secagem.

Figura 18 - Estufa de secagem.



Fonte: Autoria própria.

Após a secagem, os parafusos devem ser reapertados e deve-se verificar a prensagem das bobinas, pois o material isolante perde uma grande quantidade de água, diminuindo assim o seu tamanho.

2.2.4. Montagem final

Concluindo os processos da montagem da parte ativa nos transformadores a seco, são montados os barramentos de ligação e os equipamentos de monitoramento solicitados pelo cliente, finalizando assim a montagem do transformador a seco (na Figura 19 tem-se um exemplo de transformado a seco finalizado).

Figura 19 – Transformador a seco.



Fonte: Megabarre Transformadores (2015).

Já nos transformadores a óleo, a parte ativa é colocada dentro do tanque. Então são feitas todas as instalações dos equipamentos de monitoramento, ligações das entradas e saídas do transformador e a vedação para que não haja vazamento do óleo. Após esse processo é colocada a tampa no tanque (parafusada ou soldada), e o mesmo é preenchido com óleo isolante na quantidade adequada ao projeto do transformador. Com as buchas e acessórios instalados, o transformador a óleo é finalizado (A Figura 20 mostra um exemplo de transformador a óleo finalizado).

Figura 20 – Transformadora a óleo.



Fonte: Megabarre Transformadores (2015).

Após a finalização, o transformador é levado ao laboratório onde é submetido a ensaios que serão melhor descritos no próximo tópico.

Terminados os ensaios e a inspeção, o transformador é embalado e armazenado, esperando o transporte para seu destino.

2.3. Ensaios

Segundo a norma NBR-5380 (1993), os ensaios devem ser realizados pelo fabricante, cabendo ao comprador o direito de designar um inspetor para assistir os ensaios. Este procedimento consiste em determinar as características do transformador e dos acessórios, de acordo com um procedimento especificado.

Todos os componentes externos e acessórios que podem ter influência no funcionamento do transformador devem estar instalados durante os ensaios.

Para todas as características, exceto as de isolamento, os ensaios são baseados em condições nominais, a menos que seja especificado de outra forma de acordo com o ensaio.

Os ensaios baseiam-se nas seguintes normas:

- NBR 5356 - Transformador de Potência: Especificação;

- NBR 5380 - Transformador de Potência: Método de Ensaio;
- NBR 10295 - Transformadores de Potência Secos;
- IEC 76;
- ANSI;
- IEEE.

A ABNT classifica os ensaios em três tipos:

- Ensaio de Rotina: Deve ser executado em todas as unidades de produção, e consiste dos seguintes ensaios:
 - Medição da resistência dos enrolamentos;
 - Relação de tensão;
 - Medição da resistência de isolamento;
 - Medição da polaridade;
 - Deslocamento angular e frequência de fases;
 - Medição das perdas em vazio;
 - Medição das perdas em carga;
 - Corrente de excitação;
 - Impedância de curto-circuito;
 - Ensaio dielétrico;
 - Estanqueidade e resistência à pressão (se transformador a óleo);
 - Verificação do funcionamento dos acessórios;
 - Verificação da espessura e aderência da pintura da parte externa.
- Ensaio de Tipo: Somente é executado mediante especificação do cliente, ou quando solicitado pela seção de projetos, e conta com os seguintes ensaios:
 - Elevação de temperatura;
 - Tensão suportável nominal de impulso atmosférico;
 - Nível de ruído;
 - Ensaio do óleo isolante;

- Medição da potência absorvida pelos motores das bombas de óleo e ventiladores;
- Ensaio Especial: Só é executado mediante a compra do cliente, ou quando solicitado pela seção de projetos, sendo eles os seguintes:
 - Ensaio de curto-circuito;
 - Impedância de sequência zero em transformadores trifásicos;
 - Medição de harmônicos na corrente de excitação;
 - Análise cromatográfica dos gases dissolvidos no óleo isolante;
 - Fator de potência do isolamento;
 - Vácuo interno;
 - Tensão de radiointerferência (RIV);
 - Verificação do esquema de pintura das partes internas e externas do transformador;
 - Medida da resposta em frequência e impedância terminal: este ensaio é o único não previsto em norma, por ser recente. Por isso quando solicitado devem ser definidas suas especificações de modo que o fabricante e o cliente estejam em comum acordo.

2.4. Transformador de corrente

O transformador de corrente (ou TC) é um equipamento cuja função é constatar ou medir a corrente elétrica que circula no enrolamento primário, e reproduz parte desta corrente em seu circuito secundário, sendo esta com proporções definidas e sem alterar a posição vetorial. O uso do TC se faz necessário por ser inviável a utilização de altas correntes em circuitos eletrônicos ou em um instrumento de medição, sendo preciso então reduzir tais correntes, a ponto de serem passíveis de utilização (TOROID, 2015).

Uma das características necessárias para a especificação do TC é a relação nominal, a qual se dá através da divisão da corrente nominal primária, pela corrente secundária. As relações mais utilizadas no mercado são de $xx/5A$ e $xx/1A$, ou seja, a corrente do primário é amostrada e tem como saída no secundário 5A ou 1A (SIEMENS, 2006).

O TC é amplamente utilizado em sistemas elétricos, pois informa as condições reais de corrente em regime normal, picos e faltas de energia, proporcionando um maior controle sobre o sistema. Também possui outra grande vantagem, que é a isolação entre o medidor e o circuito a ser medido (TOROID, 2015, P. 1).

Neste trabalho serão utilizados diferentes tipos de TCs, de diversas especificações. Estes TCs serão usados para rebaixar os valores das tensões e correntes que serão medidos nos transformadores ensaiados, de modo que possa ser feita a leitura por meio de aparelhos utilizados na bancada.

2.5. Analisador digital trifásico TRANS4 9443

O Analisador Digital Trifásico TRANS4 9443 (Figura 21), é um wattímetro que recebe a leitura das correntes e tensões do transformador em ensaio, calcula e exibe todos os dados lidos em um computador. Essas leituras são feitas com o auxílio de TPs e TCs (transformador de potencial e transformador de corrente respectivamente), diminuindo os valores das tensões e correntes de modo que o aparelho possa fazer as leituras desejadas.

Figura 21 - Analisador Digital Trifásico 9443.



Fonte: Autoria própria.

O Analisador Digital Trifásico 9443 tem três conexões de entradas de corrente e três de tensão, para análise de circuitos trifásicos. Ele tem uma entrada para ser conectada ao computador, utilizando um conversor de RS485 para USB. Também conta com um software que exibe as medidas e valores necessários para o ensaio, na tela do computador, e ao finalizar o ensaio, gera um relatório com os dados obtidos.

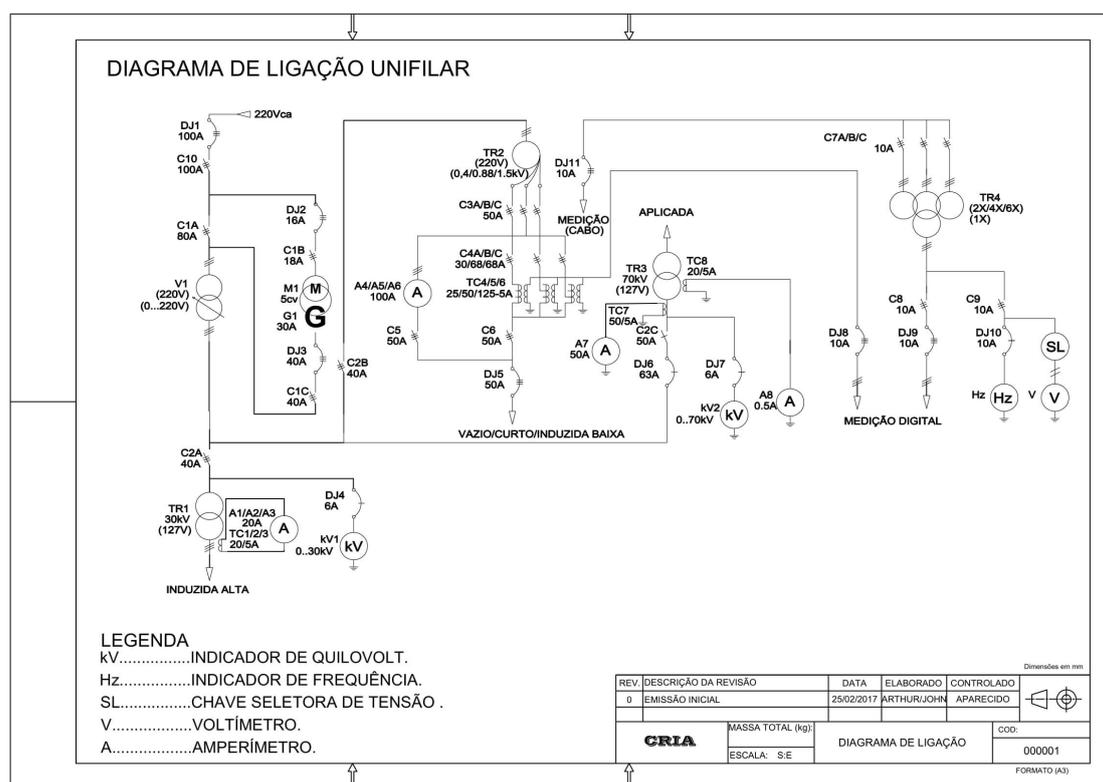
3 METODOLOGIA

O procedimento metodológico desenvolvido no seguinte trabalho pode ser dividido em três etapas:

3.1. Projeto elétrico

Primeiramente foi elaborado o projeto elétrico com os materiais disponíveis em estoque. O mesmo foi revisado pelo engenheiro responsável e realizado os ajustes necessários. O projeto final é apresentado na Figura 22.

Figura 22 – Esquema do circuito elétrico geral da mesa de comando.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 22 é mostrado o esquema elétrico unifilar geral da mesa de ensaios de alguns testes de rotina. O esquema completo é mostrado no Anexo A.

Pode-se observar no diagrama que a alimentação do sistema passa por um disjuntor geral (DJ1) de 100A e por uma contatora (C10), que energiza o sistema quando a chave geral (CH6) é ligada. A saída da contatora (C10) então é ramificada para duas partes do circuito. A ramificação da direita alimenta um motor (M1) que está acoplado a um gerador de 220V com frequência de 120Hz, utilizado pra o ensaio de tensão induzida. O circuito do motor é protegido por um disjuntor de 16A e somente entra em funcionamento por meio de uma botoeira no painel com o contato de selo, que comuta a contatora (C1B), liberando o seu funcionamento.

O circuito do gerador (G1) acoplado ao motor é protegido por um disjuntor de 40A (DJ3) e passa por uma contatora (C1C) acionada por um contato de selo. Em funcionamento o circuito é ligado ao variador (V1).

A ramificação da esquerda que sai da contatora (C10) passa por uma contatora (C1A), ligada diretamente no variador (V1), junto ao circuito do gerador (G1).

O variador (V1) eleva e abaixa a tensão em sua saída de 0 a 220V, tanto em 60Hz, a frequência da rede que vem pela comutadora (C1A), quanto em 120Hz, gerado pelo gerador (G1). O mesmo possui um motor elétrico (M2) comandado por uma chave seletora (CH7), que controla a subida e descida da tensão na saída. Esta chave está ligada em série com um pedal, que energiza a chave (CH7) quando pressionado, e quando não pressionado fecha o circuito do motor (M2), a fim de que diminua a tensão de saída do variador (V1) a zero, para a segurança do usuário.

A saída do variador (V1) é ligada a três contadoras, sendo que a primeira (C2A) alimenta um TP elevador (TR1) por onde é feito o ensaio de tensão induzida pela alta do transformador em teste. O monitoramento deste ensaio é feito através de três amperímetros (A1/A2/A3) e um voltímetro (kV1), ambos analógicos, localizado no painel frontal da mesa de comando. A leitura dos amperímetros é feita por três TCs (TC1/2/3) montados na saída do TP (TR1), o voltímetro mede a entrada de uma das fases do mesmo, e mostra o valor da saída do TP com base na em sua relação de transformação.

A segunda ramificação na saída do variador V1 é ligada a uma contatora (C2B), que alimenta um autotransformador com três variações (taps): 400V,

880V e 1500V. A saída de cada tap é ligada a uma contatora (C3A/B/C), selecionada através de uma chave seletora (CH4).

As saídas das três contadoras são ligadas juntas e ramificam para duas malhas que se juntam novamente. A primeira passa por três amperímetros analógicos localizados no painel frontal da mesa de comando e vai diretamente para a tomada de saída de teste. Este circuito é usado para o ensaio de tensão induzida pela baixa do transformador em teste, habilitado por uma contatora (C5), comandada por uma botoeira localizada no painel frontal da mesa de comando.

A segunda ramificação que sai das contadoras dos taps do autotransformador passa por três contadoras (C4A/B/C), que são ligadas a três TCs (TC4/5/6) com três taps (relações) de 25A, 50A e 125A para 5A. As contadoras selecionam qual relação de corrente vai ser usada através do comando de uma chave seletora. As saídas dos transformadores de corrente se unem e passam por outra contatora (C6), que é habilitada por uma botoeira de contato de selo. Este circuito tem a finalidade de efetuar o ensaio de curto-circuito e a vazio. A saída da contatora (C6) é ligada junto a saída da contatora (C5) na tomada de saída para os ensaios. Esta saída de teste é protegida por um disjuntor (DJ5) de 50A.

Os TCs (TC4/5/6) abaixam a corrente do circuito para que possa ser feita a leitura da corrente por um medidor eletrônico (JMAN), protegido por um disjuntor (DJ8) de 10A.

A terceira ramificação do circuito após o variador (V1), é feita apenas por uma fase, alimentando um TP (TR3) monofásico elevador, de saída ligada ao transformador em teste para o ensaio de aplicada. Este circuito é habilitado através da contatora (C2C) comandada por uma botoeira de contato de selo, e é protegido por um disjuntor (DJ6) de 63A.

O monitoramento deste ensaio é feito através de um voltímetro digital, ligado à entrada do TP (TR3), para controlar a tensão aplicada; um amperímetro ligado a um TC montado na entrada do TP (TR3), pra monitorar a corrente do circuito; e um mili amperímetro, ligado a um transformador de corrente localizado no TP (TR3), para monitorar se há fuga de corrente na saída do transformador em teste. Estes medidores são localizados no painel frontal da mesa de comando.

Em paralelo ao circuito de ligação dos ensaios, há um circuito para a medição das tensões geradas no transformador em teste. Este circuito é ligado ao transformador em teste através da tomada (T11). Esta medição passa por um TP (TR4) abaixador com três relações; 2/1, 4/1 e 6/1. A relação é selecionada através de uma chave seletora, que habilita uma das três contadoras (C7A/B/C), fechando o circuito da relação desejada. Na saída do TP (TR4) há duas ramificações, onde a primeira passa por uma contadora (C8) que vai para o medidor digital (JMAN), protegido por um disjuntor (DJ9) de 10A. A segunda ramificação passa por uma contadora (C9) ligada a um freqüencímetro e uma chave seletora (CH8), ligado a um voltímetro (V). A chave seletora (CH8) seleciona qual o par de fases das três que chegam da contadora (C9) vai ser monitorado pelo voltímetro (V).

3.2. Montagem

O projeto foi adaptado a duas mesas de comando usadas, onde em uma foram realocados os instrumentos já existentes para um lado do painel frontal, e no outro lado foram alocados os instrumentos de medições, botoeiras, chaves e o sinaleiro, referentes aos ensaios de tensão aplicada e induzida. As botoeiras utilizadas para os ensaios de curto-circuito e a vazio, junto ao JMAN, foram alojadas a outra mesa de comando, junto ao computador utilizado para a ligação do JMAN.

Com os instrumentos organizados e instalados nas mesas de comando, foram fixadas as contadoras dentro da mesa de comando, as tomadas de entrada e saída de energização, e as de comando e monitoramento na parte de trás da mesa de comando.

Como tudo fixado, foram feitos os cabeamentos e suas ligações.

3.3. Testes e verificações

Após a montagem do projeto, foram verificadas todas as ligações e conexões. Então o circuito de comando foi energizado e testado o

funcionamento das chaves, botoeiras, selos e se as contadoras estavam fechando corretamente os circuitos de ligação.

Com os comandos e fechamentos verificados, o circuito de ligação foi energizado. Primeiramente foi testado o circuito do gerador, alimentando o motor acoplado ao mesmo e observando a frequência mostrada no frequencímetro, que correspondeu ao esperado de 120Hz. Então foi alimentado o circuito do variador elevando-se a tensão de saída do mesmo, observando a tensão indicada no voltímetro da mesa de comando e confirmando as leituras com outro multímetro calibrado na saída do variador.

O próximo circuito testado foi o de ensaio de tensão induzida da alta. Primeiramente foi ligada a contadora (C1A), que energiza diretamente o variador, depois foi fechado o circuito que energiza o TP elevador (TR1), subindo a tensão aplicada no transformador e observando a tensão de saída através do voltímetro da mesa de comando e confirmando a leitura com outro TP abaixador ligado na saída do TP (TR1). Foi feita também a leitura com um multímetro calibrado, com a relação do transformador abaixador foi feita a equivalência da tensão observada e comparada com a leitura do voltímetro da mesa de comando. Este procedimento foi feito da mesma maneira para os testes dos circuitos do TP (TR3) e nos circuitos de saída de 880V e 1500V do transformador (TR2). Já na saída de 400V foi possível fazer sua verificação apenas com o multímetro ligado na mesma.

Posteriormente foi testado o circuito de teste através do fechamento da contadora (C5) e assim verificado se a tensão estava chegando corretamente até a saída de teste. Então foi feito o mesmo teste utilizando o fechamento da contadora (C6), e o fechamento das contadoras (C4A), (C4B) E (C4C), uma de cada vez mudando a chave que as seleciona.

Os medidores de corrente nesta fase de teste não foram verificados, pois não havia carga ligada na saída para teste, sendo assim, sem circulação de corrente os amperímetros mantinham-se em zero.

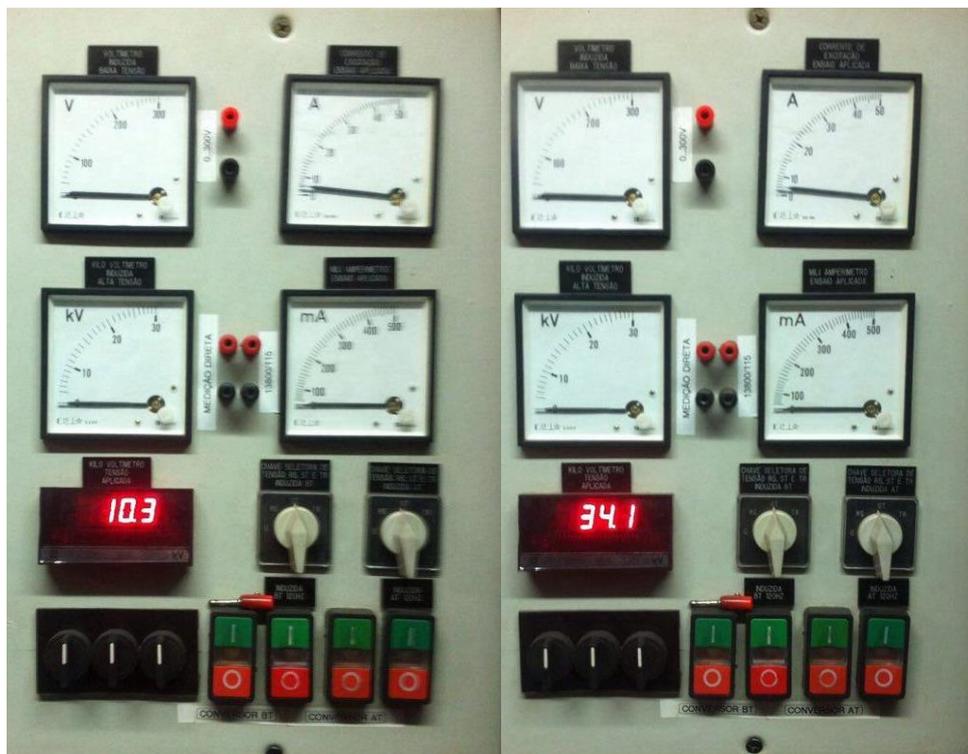
Com todo o circuito funcionando corretamente, foram testados os cabos ligados ao aparelho JMAN, e então com o software devidamente instalado e o cabo de comunicação do aparelho ligado ao computador foram verificadas suas leituras e comparadas as leituras feitas pelo multímetro.

4 RESULTADOS OBTIDOS

Com todos os equipamentos já verificados, foi iniciado o ensaio de um transformador que já havia sido ensaiado anteriormente sem a bancada.

O primeiro ensaio foi o de tensão aplicada pela baixa tensão do transformador em teste, foram aplicados 10.300V na baixa, como pode ser observado na Figura 23, e contabilizado 60 segundos, observando os amperímetros se havia corrente de fuga. Depois foi feito o ensaio de tensão aplicada na alta tensão, e foi aplicada uma tensão de 34.100V, como pode ser observado na Figura 23, e feito o mesmo procedimento do ensaio anterior.

Figura 23 – Voltímetro digital e amperímetros analógicos para teste de tensão aplicada.



Fonte: Autoria própria.

O próximo ensaio realizado foi o ensaio de tensão induzida. Neste teste foi aplicado o dobro da tensão nominal no enrolamento de baixa tensão do transformador, neste caso 400V. Na Figura 24 nota-se que a tensão indicada no voltímetro é de 100V, porém esse valor deve ser multiplicado por 4, pois a tensão lida pelo voltímetro passa pelo transformador (TR4) que nesse caso

está com o tap de relação 4X1 acionado. Este ensaio é feito a 120Hz (observado na Figura 24) para não forçar o transformador em teste. Depois que é alcançada a tensão desejada através do variador, é feita uma contagem de 60 segundos e observa-se o amperímetro do painel frontal da mesa de comando se não há fuga de corrente.

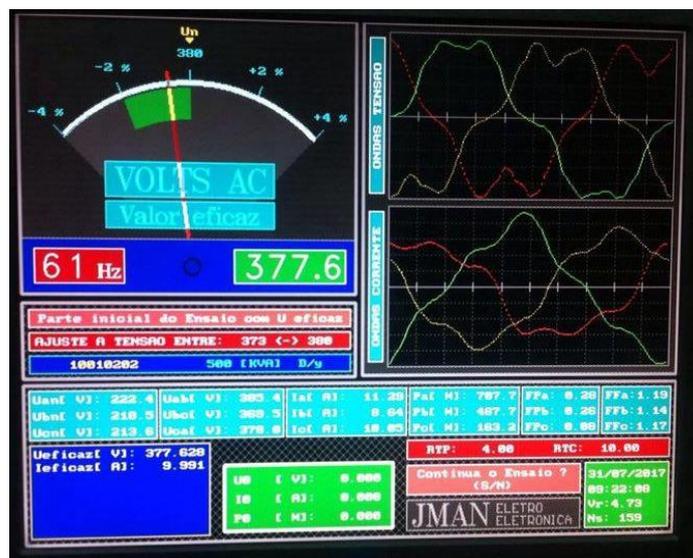
Figura 24 – Amperímetros analógicos e freqüencímetro digital, para o ensaio de tensão induzida.



Fonte: Autoria própria.

O ensaio seguinte foi o de perdas a vazio. Para este ensaio utiliza-se o software do computador junto ao JMAN para fazer o acompanhamento. Neste ensaio é aplicado corrente nominal pelo lado da baixa tensão do transformador em teste, e então são observadas através do software, as perdas do entreferro, a corrente de magnetização e se as correntes estão em equilíbrio. Na Figura 25 pode ser observada uma tela do software em funcionamento.

Figura 25 – Tela de monitoramento do software do JMAN, para o ensaio de perdas a vazio.



Fonte: Autoria própria.

O último ensaio foi o de curto-circuito ou perdas em carga, também feito com o auxílio do software do JMAN. Neste ensaio foi curto-circuitado o lado de baixa tensão, e então aplicada uma tensão trifásica na alta tensão, até que a corrente nominal do transformador fosse alcançada. Foi observado o valor da tensão necessária para o valor da corrente nominal, os equilíbrios das correntes e das tensões e as formas de ondas senoidais, como mostrado na Figura 26.

Figura 26 – Tela de monitoramento do software do JMAN, para o ensaio de perdas em carga.



Fonte: Autoria própria.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi proposto o projeto e execução da montagem de uma mesa de comando para alguns dos ensaios de rotina de transformadores de média potência, como o de tensão aplicada, tensão induzida, perdas em carga e a vazio, para a melhoria do laboratório de ensaio da empresa parceira deste trabalho.

O projeto foi feito com base nos materiais disponíveis, e na aquisição de novos materiais com o menor custo possível. O projeto inicial contava com uma única mesa de controle para os quatro ensaios. Porém, ao fim do projeto do circuito elétrico e da listagem dos materiais faltantes, foi solicitado pela empresa que o projeto fosse executado em uma mesa de comando usada, com os comandos de outros ensaios de rotina. Foram reorganizados os aparelhos já existentes na mesa de comando e organizado os que seriam instalados. Os aparelhos restantes foram alocados em uma segunda mesa de comando menor, junto ao computador que seria utilizado para as leituras do JMAN.

Com os comandos reorganizados, foi necessária uma pequena mudança no projeto, onde foram adicionadas mais três chaves seletoras para facilitar as manobras ao fazer os ensaios. Estas chaves foram colocadas de modo que as duas mesas tivessem o controle: do tap do transformador (TR2), para selecionar o valor da tensão aplicada no transformador em teste; do tap do transformador (TR4), para controle da relação de tensão lida pelos aparelhos; e do controle do variador. Estas mudanças foram feitas para facilitar o momento em que os ensaios forem feitos, para que cada mesa funcione de forma independente.

Os resultados obtidos foram satisfatórios, as mesas de comando funcionaram da maneira esperada, os ensaios realizados ocorreram sem nenhum imprevisto, e os valores obtidos são iguais aos valores ensaiados anteriormente.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-5356:** Transformador de Potência. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-5380:** Transformador de Potência. Rio de Janeiro, 1993.

DANIELS, A. R. **Introduction to Electrical Machines.** Macmillan, London 1976.

FITZGERALD, A. E., KINGSLEY Jr., Charles, UMANS, Stephen D. **Máquinas Elétricas: Com introdução à eletrônica de potência.** Porto Alegre: Brookman, 2006.

KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e Transformadores.** Porto Alegre: Editora Globo, 1996.

KULKNARNI, S. V.; KHAPARDE, S. A. **Transformer Engineering: Design and Practice.** CRC Press, 2004.

MAMEDE, J. **Manual de Equipamentos Elétricos.** Rio de Janeiro: LTC, 2005. 778 p. ISBN 85-216-1436-5.

MEGABARRE TRANSFORMADORES. **Catálogo.** 2015. Disponível em: <http://files.megabarre.com.br/catalogs/catalog_20151028_catalogo_mbtrafo_web.pdf>. Acesso em: 20 de abril de 2017.

RIES, W. **Apostila de Transformadores.** Rio de Janeiro: Editora Independente, 1977.

SIEMENS. **Transformadores de corrente,** 2006. Disponível em: <<http://w3.siemens.com.br/automation/br/pt/dispositivos-baixa-tensao/transformadores/transformadores-de-corrente/pages/transformador-de-corrente.aspx>>. Acesso em: 20 abril 2017.

TOROID. **Produtos**, 2015. Disponível em: <<http://www.toroid.com.br/produtos/transformadores-de-corrente/>>. Acesso em: 20 abril 2017.

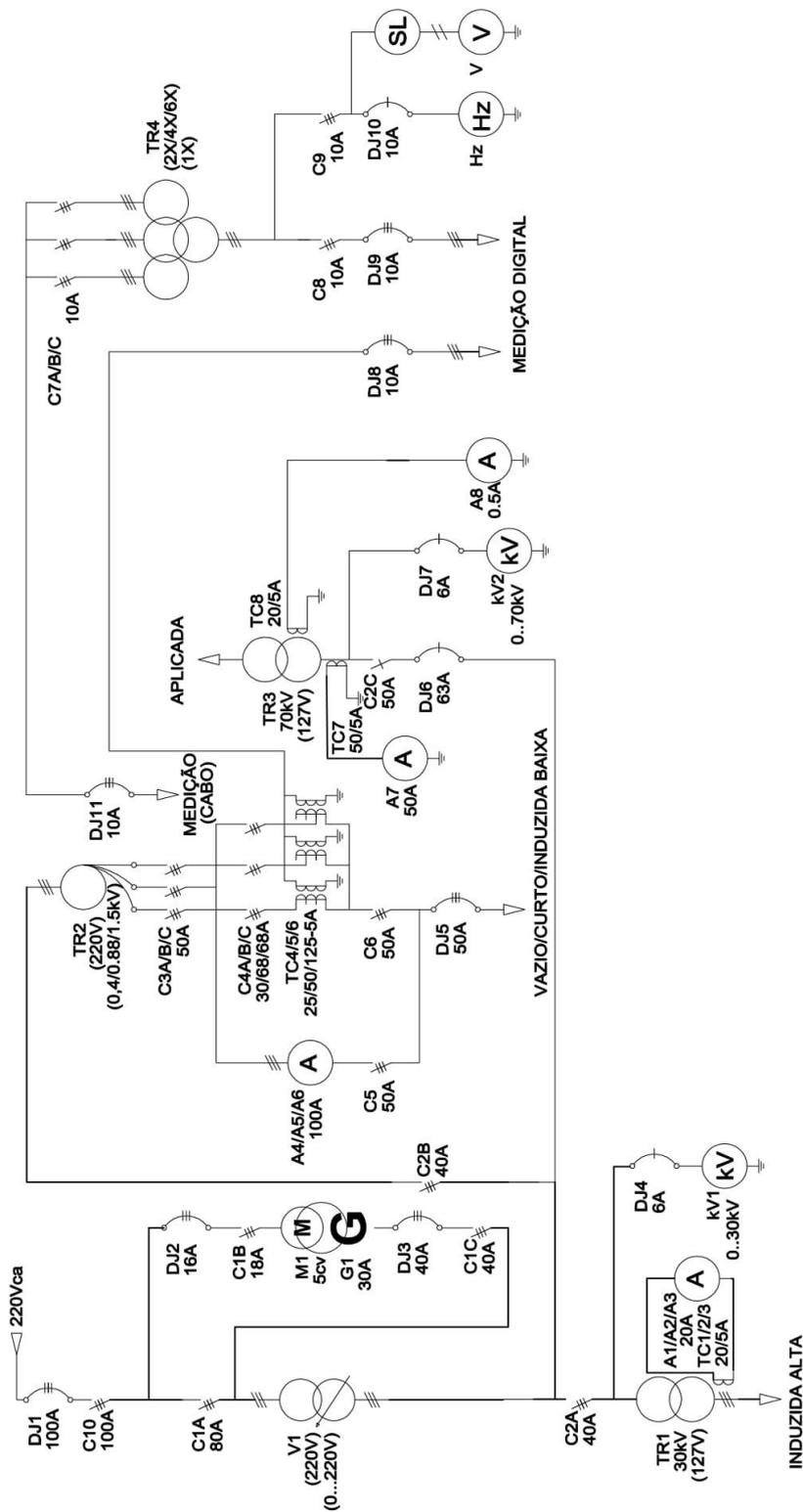
WEG. **DT-11: Características e Especificações de Transformadores de Distribuição e Força**. WEG Equipamentos Elétricos S.A.

WEG. **Transformadores de Distribuição**, 2017. Disponível em: <<http://old.weg.net/br/Produtos-e-Servicos/Geracao-Transmissao-e-Distribuicao-de-Energia/Transformadores/Transformadores-de-Distribuicao>>. Acesso em: 20 abril 2017.

WEG. **Transformadores de Força**, 2017. Disponível em: <<http://old.weg.net/br/Produtos-e-Servicos/Geracao-Transmissao-e-Distribuicao-de-Energia/Transformadores/Transformadores-de-Forca>>. Acesso em: 20 abril 2017.

ANEXO A – Esquema elétrico completo da mesa de comando de ensaio.

DIAGRAMA DE LIGAÇÃO UNIFILAR



- LEGENDA**
- KV.....INDICADOR DE QUILOVOLT.
 - HZ.....INDICADOR DE FREQUÊNCIA.
 - SL.....CHAVE SELETORA DE TENSÃO.
 - V.....VOLTÍMETRO.
 - A.....AMPÉRÍMETRO.

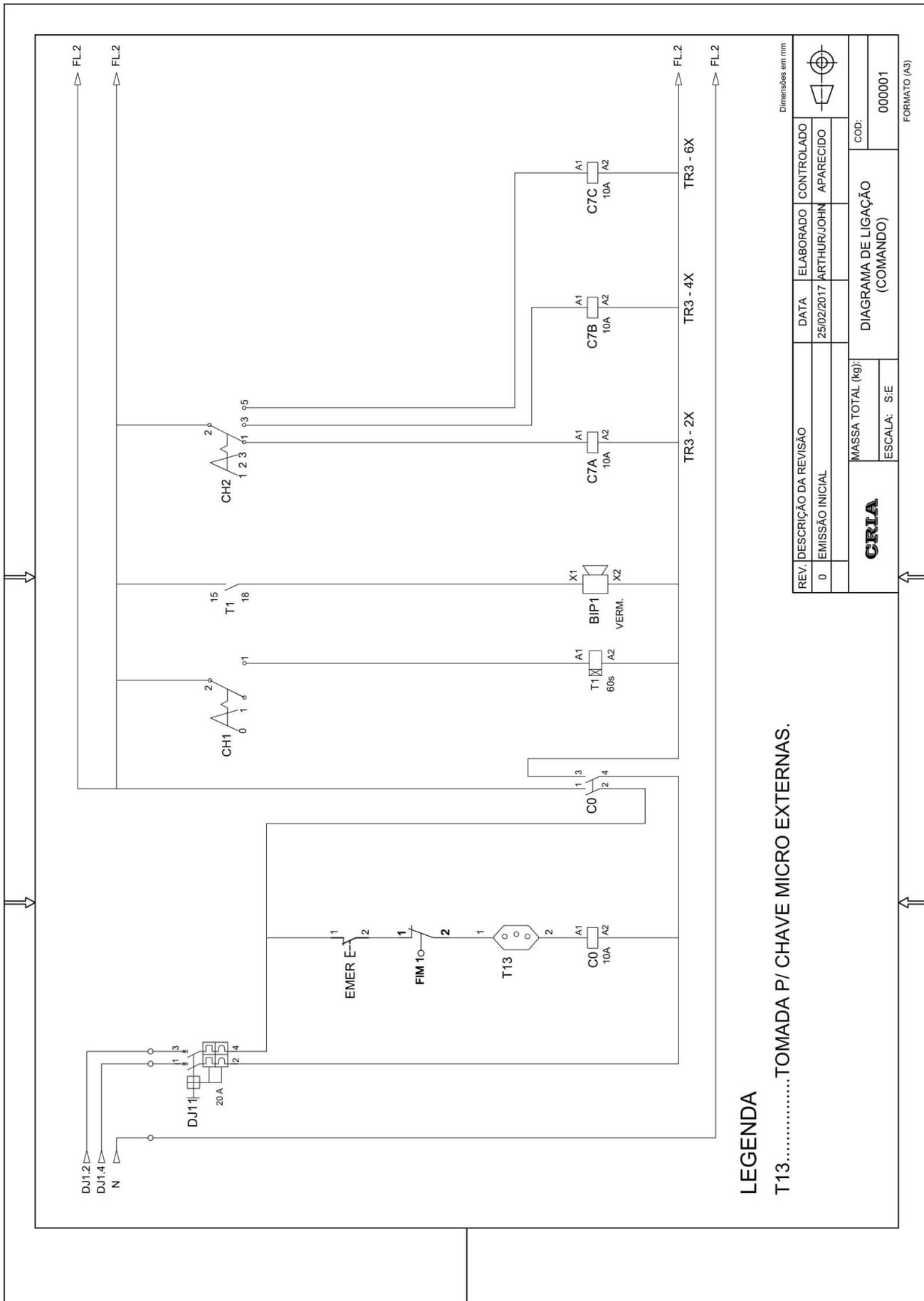
Dimensões em mm

REV	DESCRIÇÃO DA REVISÃO	DATA	ELABORADO	CONTROLADO
0	EMIÇÃO INICIAL	25/02/2017	ARTHUR/JOHN	APARECIDO

CRRIA	MASSA TOTAL (kg):	000001
	ESCALA: S:E	

DIAGRAMA DE LIGAÇÃO

FORMIATO (A3)



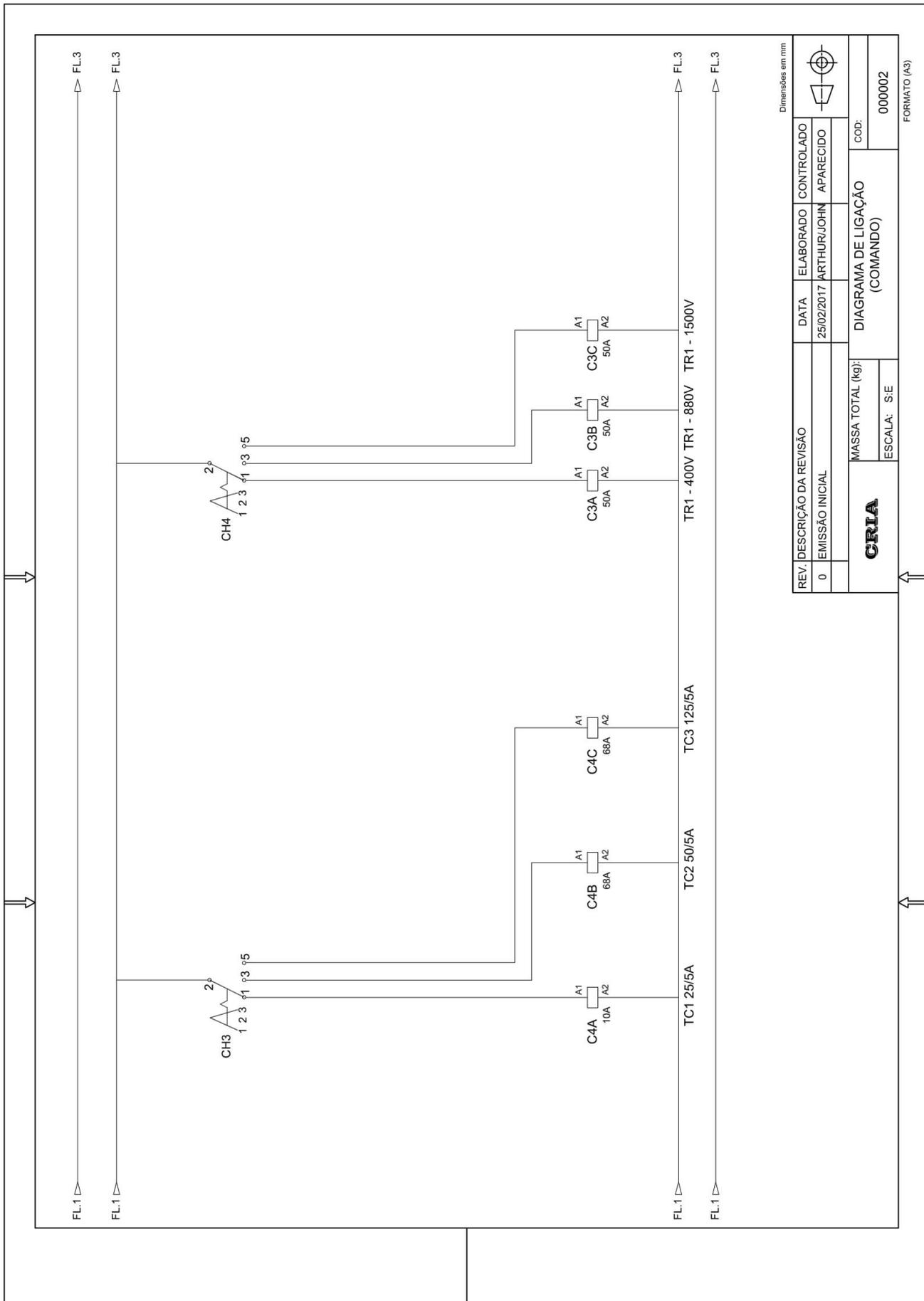
LEGENDA

T13.....TOMADA P/ CHAVE MICRO EXTERNAS.

REV		DESCRÇÃO DA REVISÃO		DATA	ELABORADO	CONTROLADO
0	EMISSÃO INICIAL			25/02/2017	ARTHUR/JOHN	APARECIDO
CRIA		MASSA TOTAL (kg):		COD:		
		ESCALA: S:E		000001		
FORMATO (A3)						

Dimensões em mm

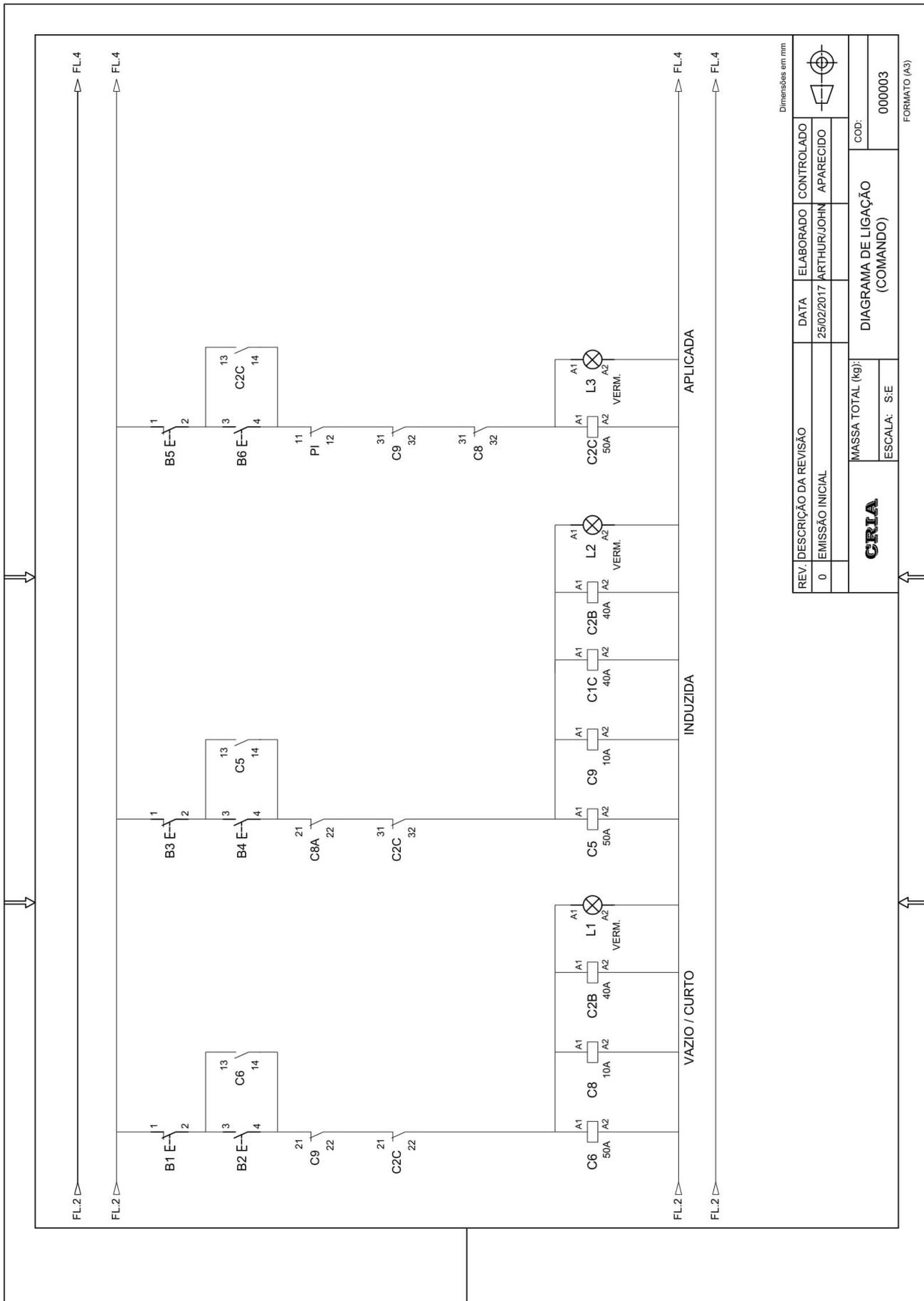




Dimensões em mm

REV	DESCRIÇÃO DA REVISÃO	DATA	ELABORADO	CONTROLADO
0	EMIÇÃO INICIAL	25/02/2017	ARTHUR/JOHN	APARECIDO

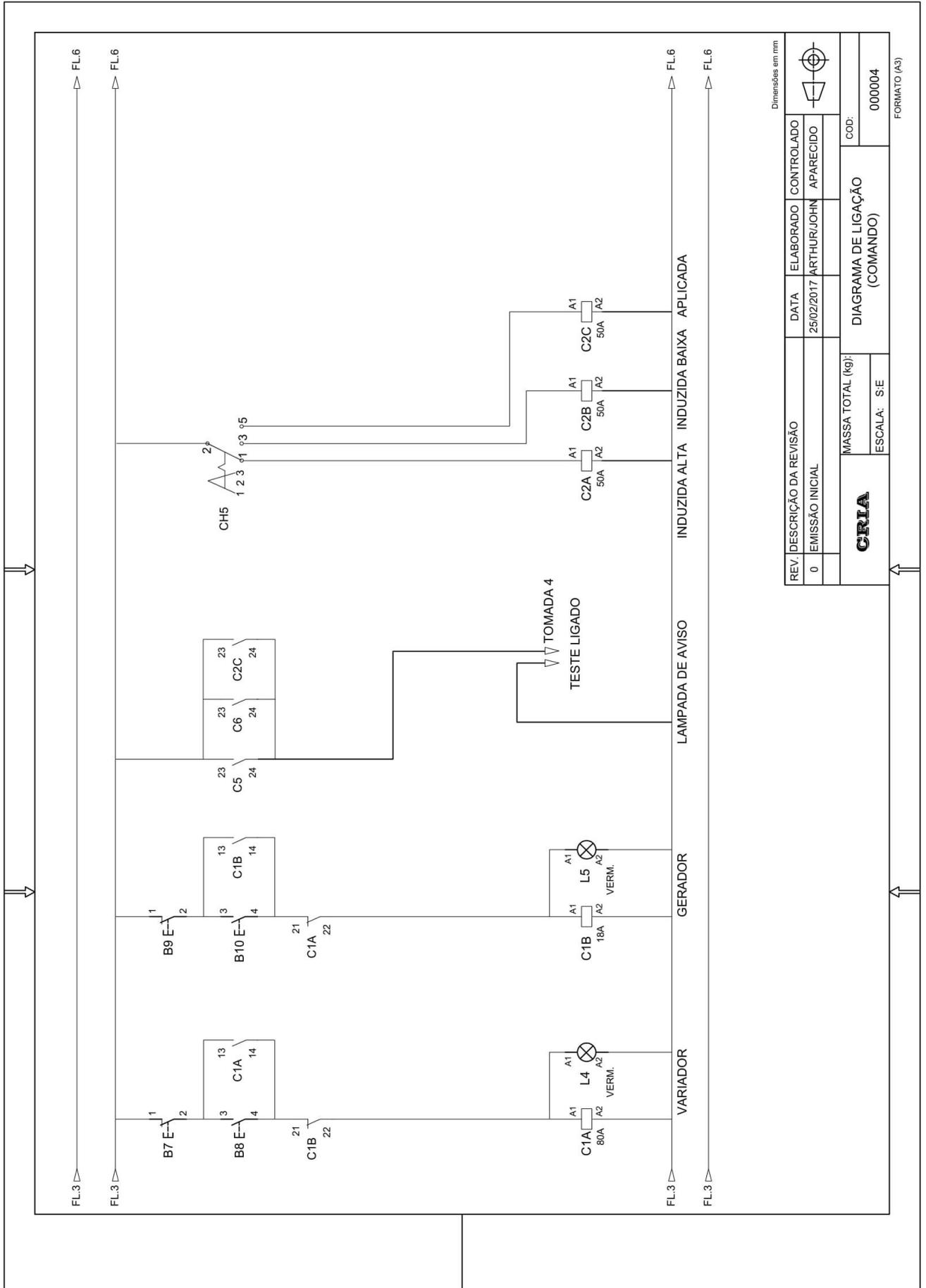
CRIA	DIAGRAMA DE LIGAÇÃO	COD:
	(COMANDO)	
MASSA TOTAL (kg):	000002	
ESCALA: S:E	FORMATO (A3)	



REV	DESCRIÇÃO DA REVISÃO	DATA	ELABORADO	CONTROLADO
0	EMIÇÃO INICIAL	25/02/2017	ARTHUR/JOHN	APARECIDO

Dimensões em mm

CRIA	DIAGRAMA DE LIGAÇÃO (COMANDO)	COD: 000003
MASSA TOTAL (kg): ESCALA: S: E		FORMATO (A3)

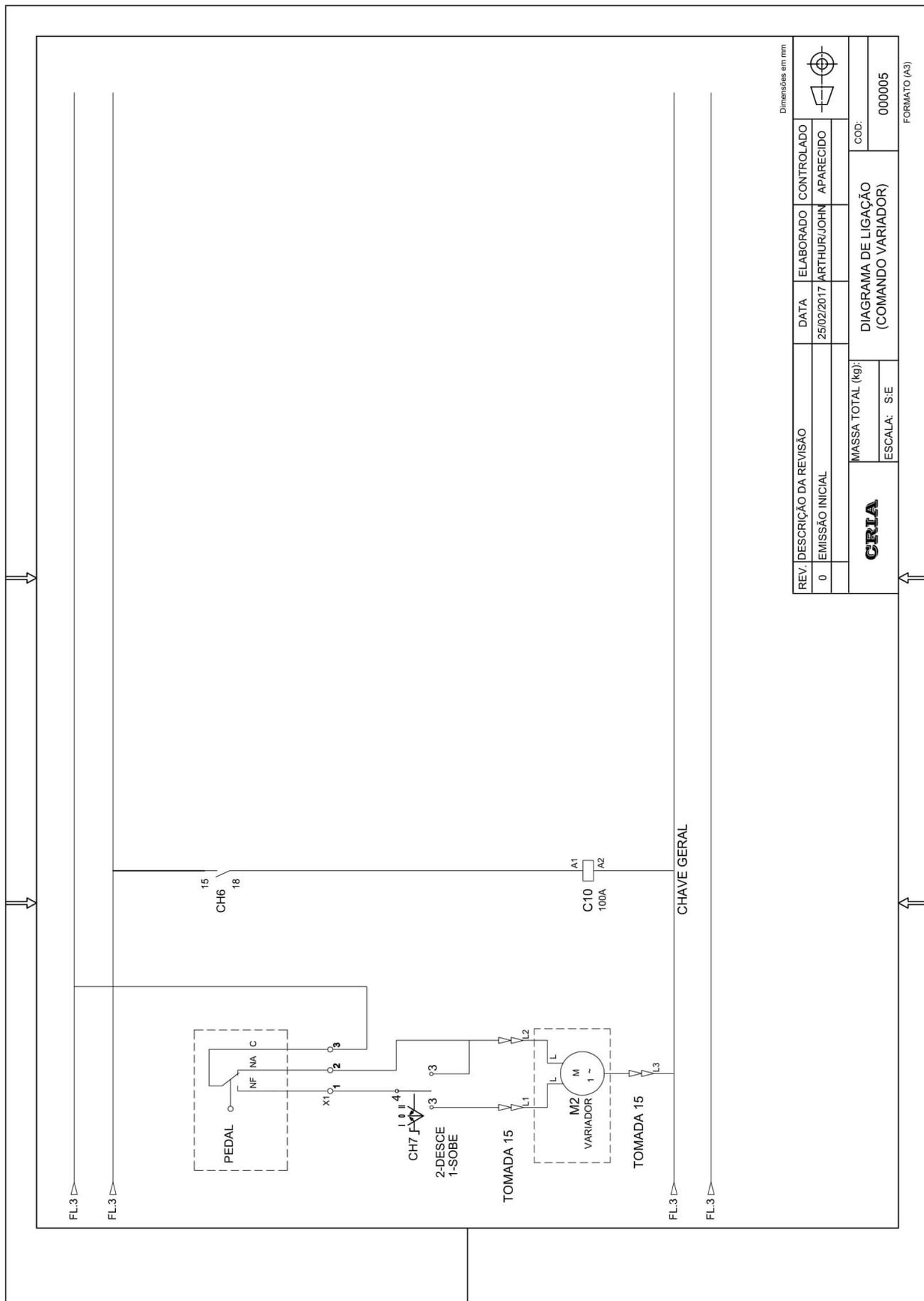


Dimensões em mm

REV	DESCRIÇÃO DA REVISÃO	DATA	ELABORADO	CONTROLADO
0	EMIÇÃO INICIAL	25/02/2017	ARTHUR/JOHN	APARECIDO

CRIA	DIAGRAMA DE LIGAÇÃO (COMANDO)	COD: 000004
	ESCALA: S: E	

FORMATO (A3)

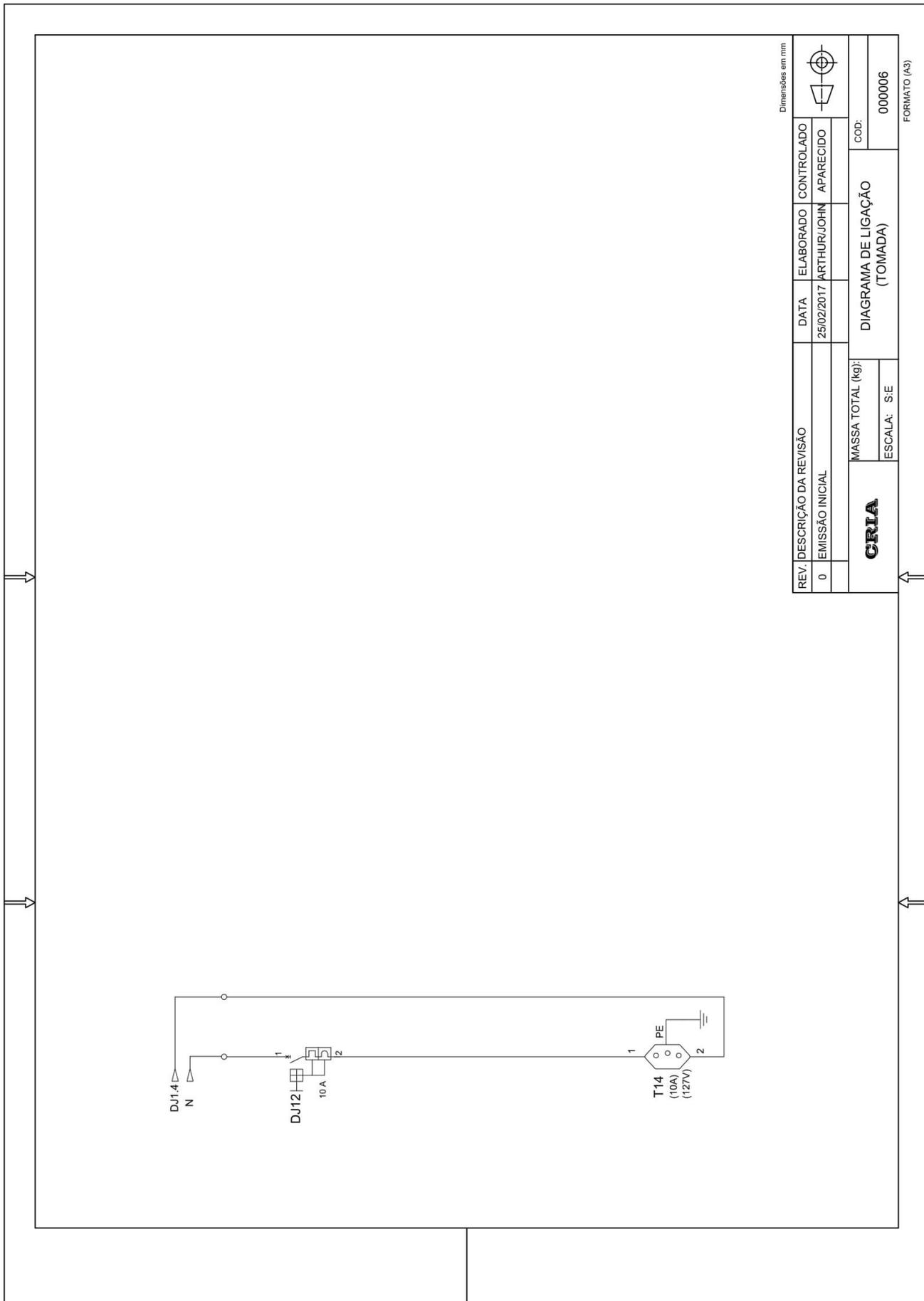


Dimensões em mm

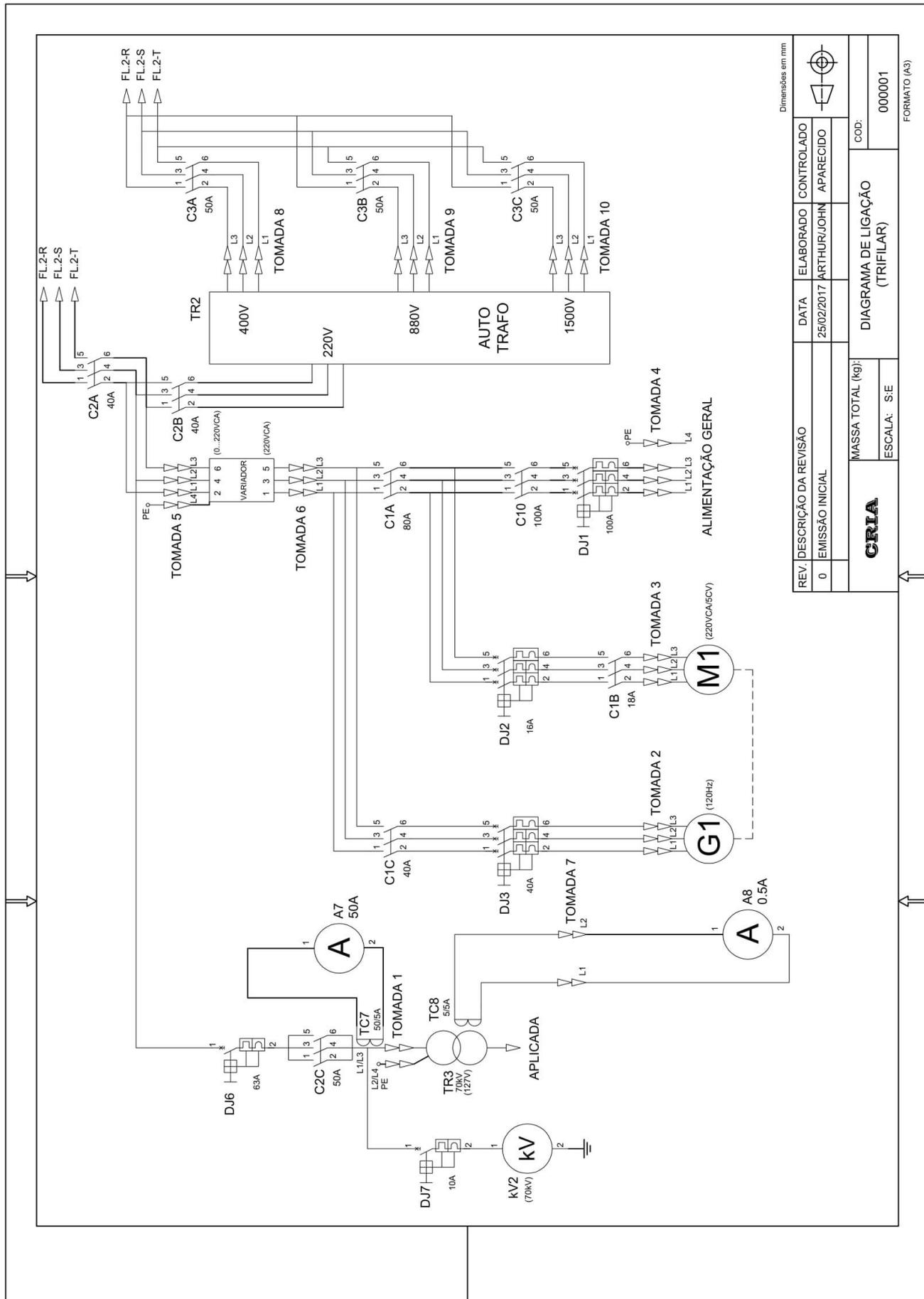
REV	DESCRIÇÃO DA REVISÃO	DATA	ELABORADO	CONTROLADO
0	EMIÇÃO INICIAL	25/02/2017	ARTHUR/JOHN	APARECIDO

CFRIA	DIAGRAMA DE LIGAÇÃO (COMANDO VARIADOR)	COD: 000005
	MASSA TOTAL (kg): ESCALA: S:E	

FORMATO (A3)



REV		DESCRIÇÃO DA REVISÃO	DATA	ELABORADO	CONTROLADO	Dimensões em mm	
0	EMIÇÃO INICIAL		25/02/2017	ARTHUR/JOHN	APARECIDO		
		CFR	DIAGRAMA DE LIGAÇÃO (TOMADA)		COD:		000006
		MASSA TOTAL (kg):			ESCALA: S:E		FORMATO (A3)

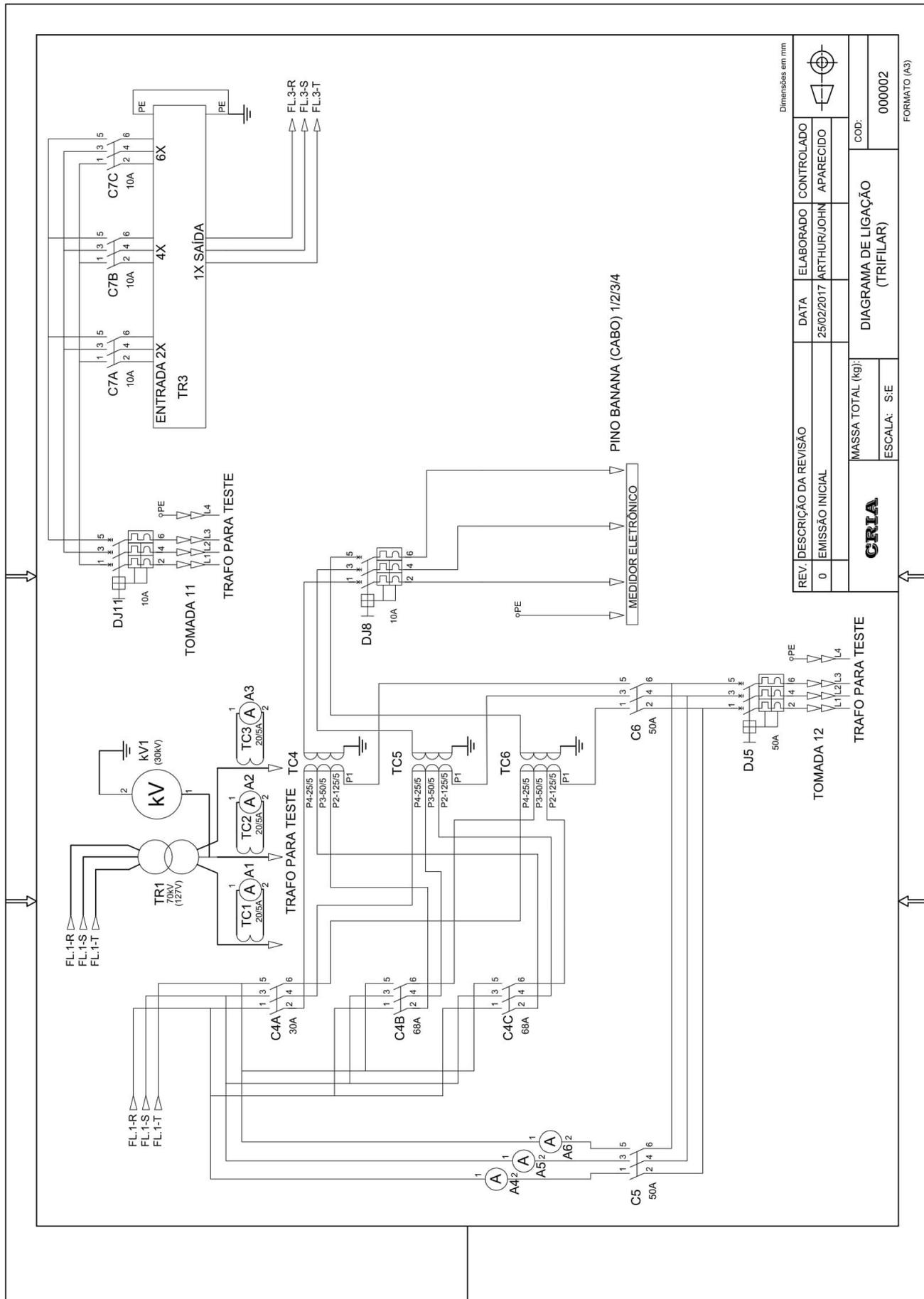


Dimensões em mm

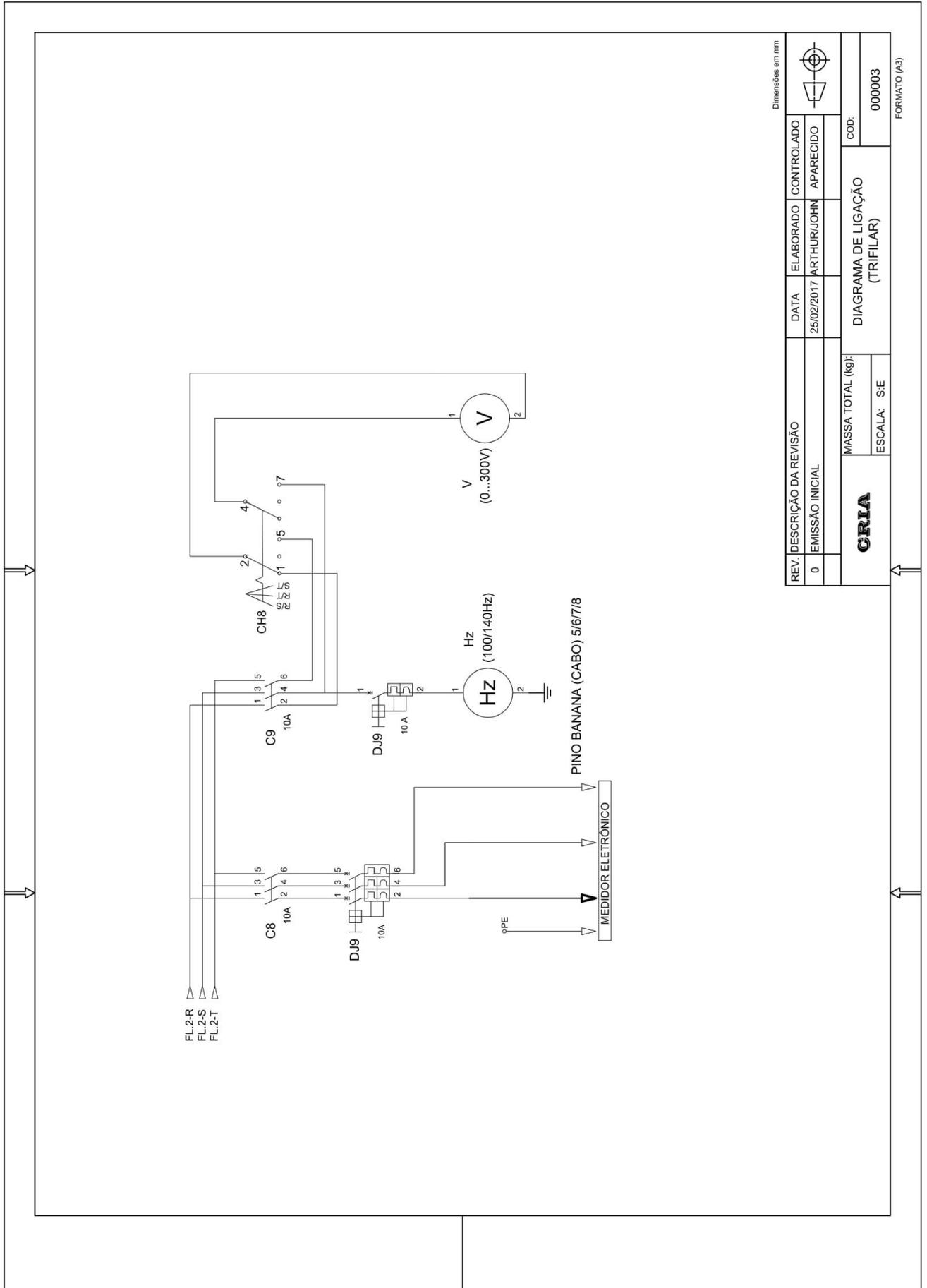
REV	DESCRIÇÃO DA REVISÃO	DATA	ELABORADO	CONTROLADO
0	EMIÇÃO INICIAL	25/02/2017	ARTHUR/JOHN	APARECIDO

CRIA	DIAGRAMA DE LIGAÇÃO (TRIFILAR)	COD: 000001
	MASSA TOTAL (kg): ESCALA: S: E	

FORMATO (A3)



REVISÃO		DATA	ELABORADO	CONTROLADO
0		25/02/2017	ARTHUR/JOHN	APARECIDO
REVISÃO		DIMENSÕES em mm		
0				
REVISÃO		FORMATO (A3)		
0				
REVISÃO		COD:		
0		000002		
REVISÃO		DIAGRAMA DE LIGAÇÃO (TRIFILAR)		
0				
REVISÃO		MASSA TOTAL (kg):		
0		ESCALA: S: E		
REVISÃO				
0				



Dimensões em mm

REV	DESCRIÇÃO DA REVISÃO	DATA	ELABORADO	CONTROLADO
0	EMIÇÃO INICIAL	25/02/2017	ARTHUR/JOHN	APARECIDO

CRIA	MASSA TOTAL (kg):	DIAGRAMA DE LIGAÇÃO (TRIFILAR)	COD: 000003
	ESCALA: S: E		

FORMATO (A3)