



GSI - ENGENHARIA E CONSULTORIA LTDA.

Nº GSI ART058-09 - CD 382-09



ANÁLISE DOS DIVERSOS TIPOS DE ACIONAMENTO PARA OS SISTEMAS DE TRACÇÃO AC

Miskulin, M.S.
Cogo, J.R.

Artigo colocado para publicação na FEC da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) ficando com a referência:

PUBLICAÇÃO

FEC 109/85

Revisão 0 - Emissão Inicial

Documentos de Referência: ART499-07 - CD 262-07

Páginas: capa + 43 N° pág inicial 1 N° pág final 43

Distribuição Disponível para o Site da GSI

Rev.	Data/Autor	Data/Verificado	Data/Aprovado	Data/Emissão Original	Observações
0	10.01.09 - JRC	10.01.09 - JRC	10.01.09 - JRC	10.01.09 - JRC	Para Informação
a					
b					
c					

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO GERAL	2
2 - ANÁLISE DOS DIVERSOS TIPOS DE ACIONAMENTOS PARA OS SISTEMAS DE TRACÇÃO AC	2
2.1 - INTRODUÇÃO.....	2
2.2 - VEÍCULO COM ALIMENTAÇÃO AC E CONTROLE DC	4
2.3 - VEÍCULOS COM ALIMENTAÇÃO AC E CONTROLE AC TRIFÁSICO (USO DE MOTOR INDUÇÃO TRIFÁSICO)	7
3 - TIPOS DE TRANSFORMADORES USADOS EM TRACÇÃO AC	9
3.1 - INTRODUÇÃO.....	9
3.2 - TIPOS DE PROJETOS	9
3.3 - CONSTRUÇÃO E DIMENSIONAMENTOS.....	11
3.4 - EFEITO DO CURTO-CIRCUITO EM TRANSFORMADORES DE TRACÇÃO.....	13
3.5 - EFEITO DOS SURTOS DE TENSÃO EM TRANSFORMADORES DE TRACÇÃO.....	13
3.6 - EFEITO DOS HARMÔNICOS EM TRANSFORMADORES DE TRACÇÃO	13
3.7 - EMPREGO DE TRANSFORMADORES EM PONTES CONVERSoras A TIRISTOR	14
4 - ANÁLISE DE PONTES CONVERSoras USADAS EM TRACÇÃO.....	17
4.1 - INTRODUÇÃO.....	17
4.2 - CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS	17
4.3 - PONTES CONVERSoras SEMICONTROLADAS USADAS EM TRACÇÃO COM CONTROLE POR ÂNGULO DE FASE.....	25
4.4 - ASYMMETRICAL BRIDGE CIRCUIT (LUB)	30
5 - BIBLIOGRAFIA	43

1 - INTRODUÇÃO GERAL

Os conversores estáticos podem desempenhar nos veículos a tração elétrica as seguintes funções básicas:

- a - Conversão da tensão de alimentação AC disponível no veículo em uma tensão na qual exista vantagens para o sistema.
- b - Possibilita uma regulação contínua e rápida na tensão de alimentação dos motores, possibilitando neste um torque contínuo. Com isto tira-se toda vantagem da aderência entre as rodas e os trilhos, compensando desta forma alguma tendência de patinação nas rodas. No caso do uso do motor assíncrono (de indução) isto é mais acentuado ainda, uma vez que este motor desenvolve seu torque conforme solicitação e sua velocidade é inversamente proporcional ao torque. Tem-se ainda com um controle estático contínuo a não necessidade de resistência de partida e, praticamente nenhuma energia é consumida neste estágio, representando com isso só uma economia de 15% a 21% em relação aos equipamentos convencionais. Além disto, as subestações não sofrem mais o efeito de cargas bruscas o que pode permitir seu dimensionamento mais exato e econômico.
- c - Em tração os conversores podem ser empregados, por exemplo, com comutador principal (contator), retificador e inversor controlado, conversor estático com comutação forçada para controle nos 4 quadrantes e ainda como choper dc.

O uso de conversores estáticos pode em sistemas de tração, com alimentação AC no pantógrafo da locomotiva, propiciar um controle bastante eficiente nas máquinas aí empregadas.

2 - ANÁLISE DOS DIVERSOS TIPOS DE ACIONAMENTOS PARA OS SISTEMAS DE TRAÇÃO AC

2.1 - INTRODUÇÃO

Os fatores importantes na escolha do sistema de controle em tração são: o sistema de alimentação (tensão de alimentação, fio de contato com a rede) é o tipo da máquina (motor de tração).

Dividindo-se primeiramente os veículos naqueles de operação AC (em corrente alternada) e naqueles de operação DC (em corrente contínua), pode-se providenciar uma subdivisão de acordo com o tipo de acionamento empregado. A FIGURA 1 ilustra isto e inclui os antigos sistemas com regulação de tensão eletromecânica para fins de comparação.

No caso dos veículos com alimentação AC, os motores são operados internamente otimizando as variações de tensões pelo uso das facilidades as quais a tensão do sistema possa ser transformada. A variante A_3 é usada quase que exclusivamente hoje em dia tendo o uso de A_4 como acréscimo. Isto por eles providenciarem as propriedades básicas para um esforço de tração contínuo, e conseqüentemente, melhorando as propriedades de aderências.

A variante A_4 tem adicionadas algumas vantagens para o motor assíncrono trifásico (MIT) em que seu peso é reduzido e o comutador é omitido.

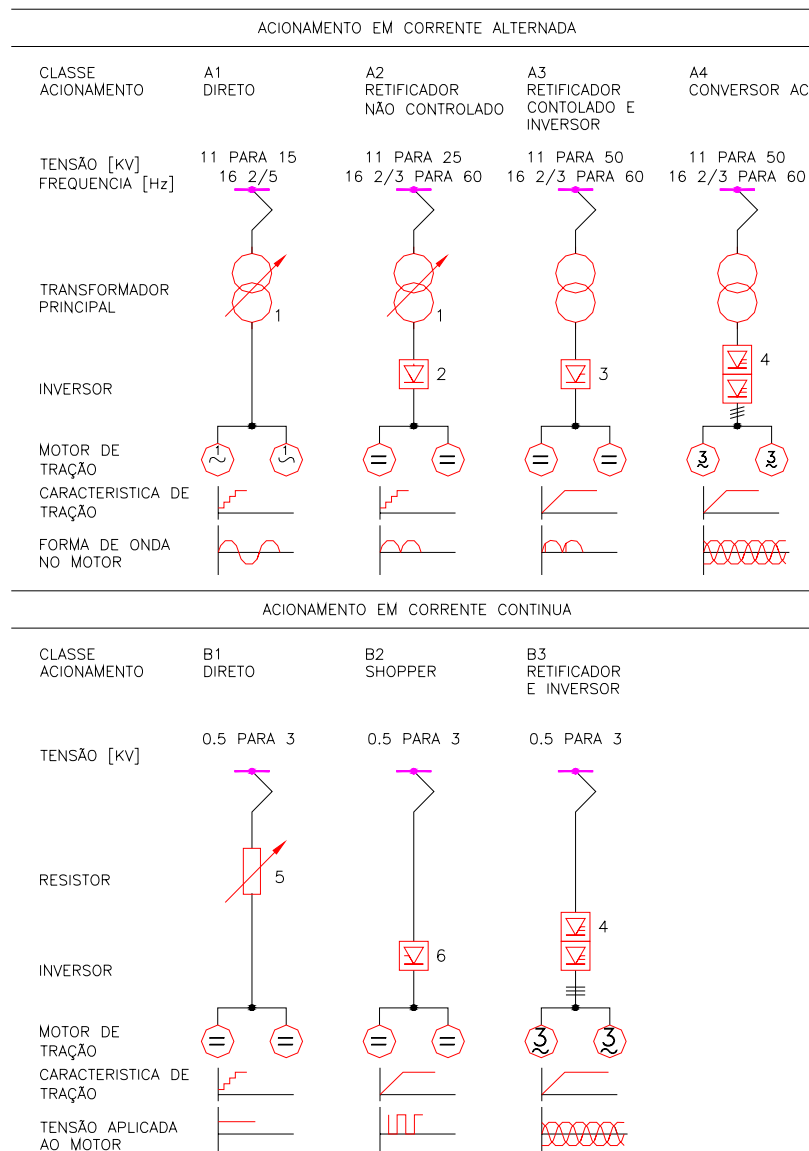


FIGURA 1 - CLASSIFICAÇÃO DO ACIONAMENTO EM SISTEMAS DE TRACÇÃO AC E DC

Os controles B_2 e B_3 são os veículos com alimentação DC que também oferecem a vantagem de um controle contínuo no processo de tração e também apresentam alta eficiência nas partidas podendo se dispensar resistores de partida. É portanto possível uma efetiva utilização da frenagem (energia) durante toda a variação de velocidade.

Na FIGURA 1 tem-se:

- 1 - Transformador com comutador de “taps”;
- 2 - Retificador não controlado;
- 3 - Retificador controlado e inversor;
- 4 - Conversor estático (retificador controlado e inversor);
- 5 - Resistor chaveado por contactor;
- 6 - Chopper.

2.2 - VEÍCULO COM ALIMENTAÇÃO AC E CONTROLE DC

Nos veículos com tração elétrica alimentados por tensão monofásica AC o controle DC através de pontes conversoras com controle do ângulo de disparo é amplamente utilizado; tanto para a frequência industrial como para $16 \frac{2}{3}$ [Hz].

Na FIGURA 2 a seguir tem-se o circuito básico com controle DC usado em veículos com alimentação AC.

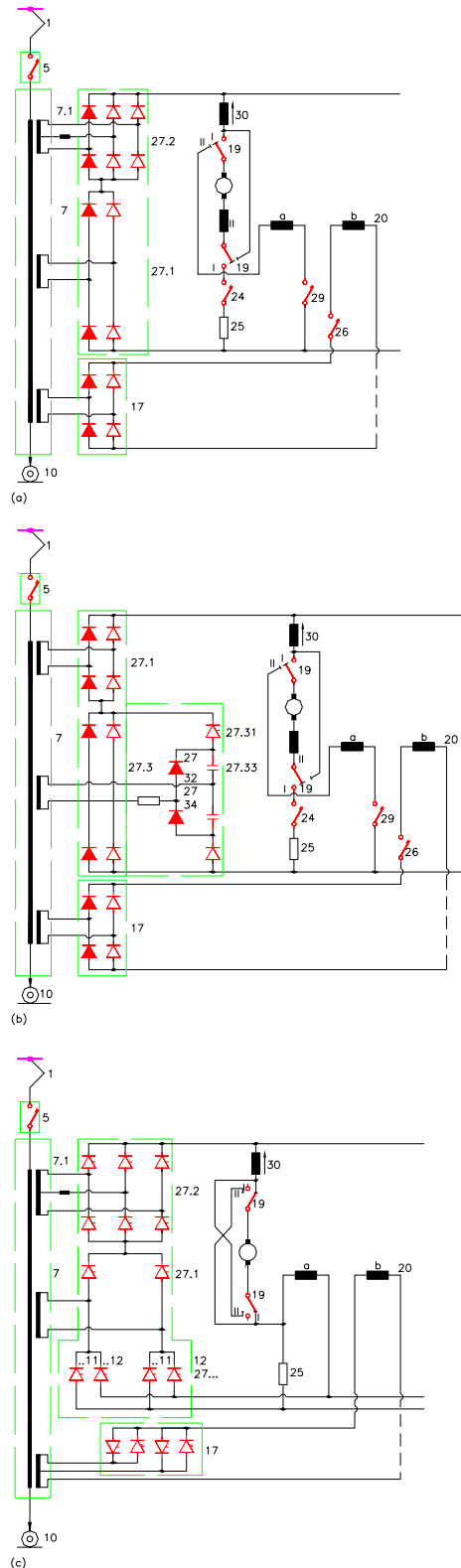


FIGURA 2 - TIPOS DE CONTROLE USADOS EM ACIONAMENTOS AC
 a - CONTROLE COM ÂNGULO DE FASE EM QUATRO ESTÁGIOS
 b - CONTROLE COM ÂNGULO DE FASE EM DOIS ESTÁGIOS
 c - CONTROLE COM ÂNGULO DE FASE EM QUATRO ESTÁGIOS E FRENAGEM REGENERATIVA

Na FIGURA 2 tem-se:

- 1 - Pantógrafo;
- 5 - Disjuntor a ar;
- 7 - Transformador principal;
- 7.1 - Reator de comutação;
- 10 - Anel de aterramento;
- 17 - Conversor para o sistema de excitação;
- 19 - Chave inversora de marcha;
- 20 - Motor de tração;
- 20.a - Campo série;
- 20.b - Campo shunt;
- 24 - Contator de frenagem;
- 25 - Resistor de frenagem;
- 26 - Contator para excitação externa;
- 27.1 - Ponte conversora para controle de corrente de armadura;
- 27.2 - Ponte conversora com controle de ângulo de fase para o circuito da armadura;
- 27.3 - Ponte conversora para o circuito de armadura com controle por setor;
- 27.11 - Tiristores de frenagem;
- 27.12 - Tiristores de campo de motorização por frenagem;
- 27.31 - Tiristor de bloqueio;
- 27.32 - Diodo de proteção;
- 27.34 - Resistor de carga;
- 29 - Chave de isolamento do motor;
- 30 - Reator de alisamento;
- I - Tração no sentido de marcha à frente;
- II - Tração no sentido de marcha à ré;

Podem-se destacar deste circuito as características:

- a - Conexão direta dos componentes semi-condutores na corrente de ramo, isto é, não existem fusíveis e reator para distribuição de corrente;
- b - Integração de componente semicondutor no circuito RC para proteção de sobre tensão;
- c - Substancial redução da resistência térmica pela adição apropriada de um dissipador e aumento da área de contato entre os componentes semicondutores e seus fixadores;
- d - A simplicidade do circuito de disparo. Os pulsos de disparo são obtidos a partir da comparação direta da tensão de alimentação com a tensão de saída.

Uma alternativa para trabalhar na frequência industrial é o circuito conversor com controle de setor (FIGURA 2b) que apresenta algumas vantagens em 50 e 60 [Hz].

Uma característica principal deste circuito é que os tiristores podem ser ligados em qualquer ponto do ciclo positivo da forma de onda da tensão e também, serem desligados sem que a tensão passe por zero.

O controle de seção permite a redução ou mesmo elimina a defasagem entre a tensão principal e a corrente fundamental.

A escolha entre o controle por ângulo de fase ou por setor depende da tolerância de interferência permitida na rede como pode ser visto nas formas de onda que ilustram o comportamento com controle. Nota-se que o controle por ângulo de fase no capítulo 4 injeta pouco harmônico de corrente na rede enquanto o controle por setor melhora o fator de potência.

O circuito da FIGURA 2.c oferece a destacada vantagem da regeneração de energia durante as frenagens. Sendo, portanto os conversores totalmente controlados. As vantagens econômicas deste tipo de freio podem ser atrativas quando os veículos viajam em baixos declives. Esta energia pode ser aproveitada na utilização de aparelhos visando conforto do passageiro.

2.3 - VEÍCULOS COM ALIMENTAÇÃO AC E CONTROLE AC TRIFÁSICO (USO DE MOTOR INDUÇÃO TRIFÁSICO)

O inversor DC para AC, com tensão DC no circuito intermediário, em comparação com outros circuitos requer uma alta tecnologia no que se refere a sua solicitação da rede, isto é, consumo de potência reativa e interferência. Ele é dividido no inversor monofásico do lado principal e inversor trifásico do lado de controle, estes sendo conectados por um link dc com circuito filtro ressonante, banco de capacitores e chaves estáticas para limitação de surto de tensão.

Os dois inversores facilitam a troca de energia da frenagem durante motorização para frenagem regenerativa e vice-versa sem necessidade de chaveamento. O conversor de quatro - quadrante (inversor principal) permite que a captação e transmissão da corrente no veículo seja regulada em fase com a tensão da alimentação principal. A potência reativa para magnetização do transformador principal é obtida do link intermediário via conversor da entrada através de deslocamento dos pulsos do inversor principal é possível suprimir quase totalmente os harmônicos de baixa frequência no lado do sistema de suprimento de energia sem dificuldades.

Em locomotivas industriais onde a necessidade de um funcionamento ideal é secundário fase ao econômico o conversor de quatro-quadrante pode ser substituído por um retificador comutado pela rede.

Para a alimentação de potência ao motor o módulo do circuito inversor usado no controle de inversão é idêntico ao usado para o conversor de quatro-quadrantes. A função do inversor numa mudança sem inércia é conectar o pólo positivo ao negativo da tensão intermediária para a saída.

Para obter da tensão contínua a qual é proporcional à frequência do controle, o inversor é controlado em modo sub-harmônico. Assim sendo, é possível usar um MIT simples e robusto com retor em gaiola para aplicação em tração. Combinando com uma especificação apropriada, pequeno peso e alto desempenho o motor pode contribuir para reduzir estragos nas rodas e trilhos.

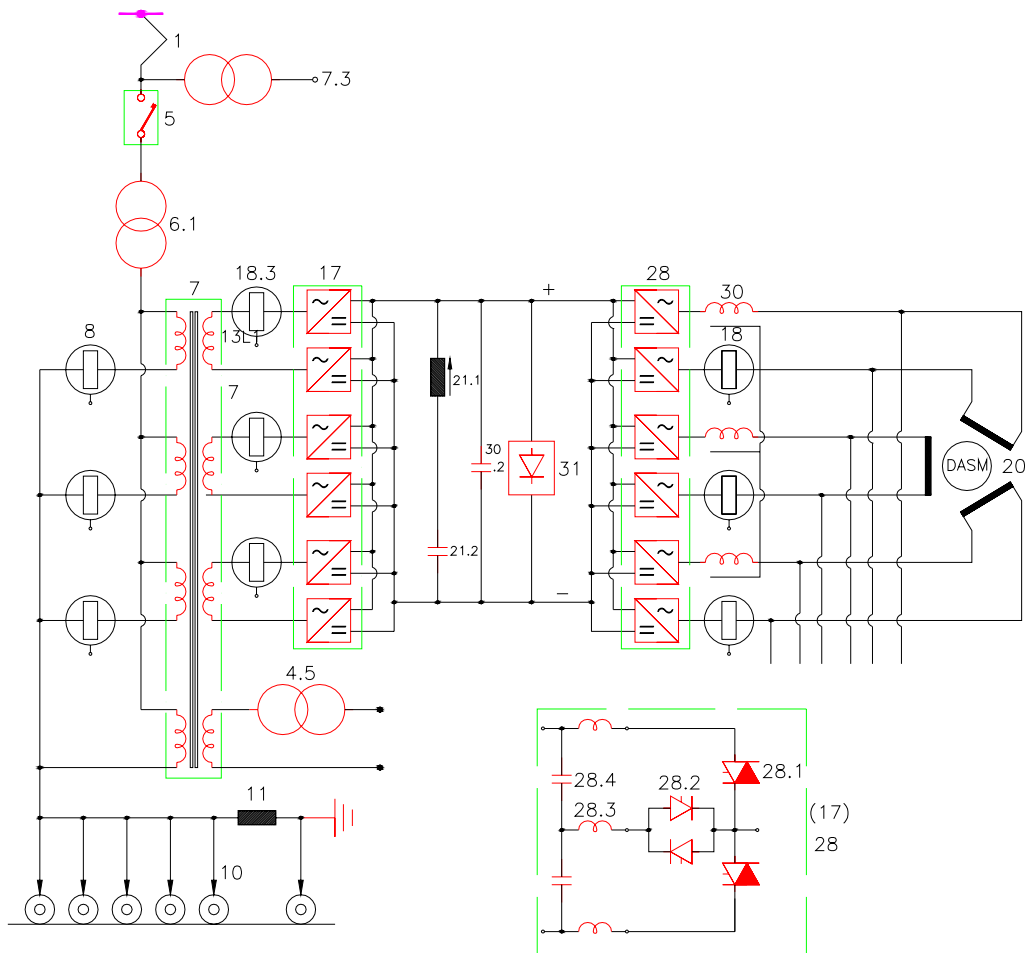


FIGURA 3 - CIRCUITO BÁSICO DO CONTROLE DO MOTOR TRIFÁSICO COM CIRCUITO DC INTERMEDIÁRIO E ALIMENTAÇÃO DO VEÍCULO EM TENSÃO AC

Na FIGURA 3 tem-se:

- 1 - Pantógrafo;
- 5 - Disjuntor a ar extra rápido;
- 6.1 - Transformador de corrente;
- 7 - Transformador principal;
- 8 - Sistema de medição de corrente por efeito Hall;
- 10 - Anel de aterramento;
- 11 - Reator de aterramento;
- 17 - Conversor de quatro - quadrantes;
- 18 - Sistema de medição de corrente por efeito Hall do inversor;
- 18.3 - Sistema de medição de corrente por efeito Hall do conversor de quatro - quadrantes;
- 20 - Motor de indução trifásico para tração;
- 21.1 - Reator do filtro;
- 21.2 - Capacitor do filtro;

- 28 - Inversor;
- 28.1 - Tiristor principal;
- 28.2 - Tiristor de desligamento;
- 28.3 - Reator de comutação;
- 28.4 - Capacitor de comutação;
- 30 - Reator de equalização de fase;
- 30.2 - Capacitor de sustentação de tensão;
- 31 - Chave estática de eliminação de junto;
- 45 - Transformador de corrente auxiliar;
- 73 - Transformador de potencial.

3 - TIPOS DE TRANSFORMADORES USADOS EM TRAÇÃO AC

3.1 - INTRODUÇÃO

Desde a introdução dos retificadores nos transportes em trilhos, as subseqüentes eletrificações se sucederam nas freqüências de 50 [Hz], e 162/3 [Hz].

Inicialmente os projetos de transformadores para tração de veículos na freqüência de $16 \frac{2}{3}$ [Hz], eram de difícil construção, mas tornou possível o projeto de transformadores mais apropriados para as freqüências de 50 e 60 [Hz].

Os transformadores para tração de veículos requerem projetos especializados e devem ser ajustados para as peculiaridades técnicas dos veículos.

O uso do alumínio em aplicação de projetos com economia de peso é muitas vezes pré-requisito para viabilidade do mesmo.

Existem particulares problemas no projeto e fabricação dos transformadores para tração de veículos. Estes problemas são originários da natureza da carga e das forças dinâmicas próprias do movimento do veículo.

Os problemas especiais originários da natureza da carga podem ser subdivididos em:

- Problemas de curto-circuito;
- Problemas de surto de tensão;
- Problemas de harmônicos;
- Interação entre enrolamentos devido acoplamentos de fluxo de dispersão;
- Abastecimento de um grande número de Taps na alta ou baixa tensão.

3.2 - TIPOS DE PROJETOS

3.2.1 - TRANSFORMADORES COM MUDANÇA DE “TAP” NO LADO DA BAIXA TENSÃO

A tensão é ajustada no lado secundário por trocas de Taps. Os transformadores deste tipo são usados costumeiramente em veículos de tração com retificadores a diodo.

3.2.2 - TRANSFORMADOR COM DERIVAÇÃO NA ALTA TENSÃO

A tensão é ajustada no lado de alta tensão de um autotransformador por uma troca de Tap e a relação de transformação é fixa. Esta variante é também usada em locomotivas com retificadores a diodo.

3.2.3 - TRANSFORMADOR RETIFICADOR

Os tiristores são alimentados em uma seqüência através de várias bobinas secundárias com relação de transformação fixada.

3.2.4 - TRANSFORMADOR RETIFICADOR PARA PONTES CONVERSoras CONTROLADAS

Estes transformadores além de obedecerem a normas internacionais (I.E.C.), em seu projeto devem ser levadas em consideração as seguintes condições de operação:

- Flutuação da tensão no fio de contato (pantógrafo);
- Diferentes capacidades de curto-circuito do sistema alimentador;
- Regime próprio de auto-fechamento devido à instabilidade vertical do pantógrafo;
- Condições climáticas especiais, tal como quando operando em túneis longos e áreas tropicais;
- Intensidade de curto-circuito e solicitação por surtos de tensão.

Suas limitações, próprias de projetos em veículos são:

- Limite de peso;
- Lugar de encaixe (fixação);
- No caso de veículos com retificadores, devem ser criadas condições especiais para um compromisso entre o fator de potência exigido, e sua repercussão no Sistema de potência e nos circuitos de sinalização;
- No caso de transformadores alimentando sistema inversor de multipulsos, condições simétricas para os sistemas de bobinas e as altas impedâncias, se existirem, no lado de alta tensão, assumem certa importância.
- Todo transformador em tração de veículos tem bobinas ou Taps adicionais para alimentar várias instalações secundárias (conversores, sistemas auxiliares, excitação de bobinas) e para alimentar potências no trem (ar condicionado, iluminação, etc.), as quais não podem ser desordenadamente influenciadas pelas correntes nos enrolamentos (bobinas) de tração.
- Para proteger os conversores (sobretensões não podem ser transferidas capacitivamente), o transformador conversor não deve ser constituído por proteção na forma de neutro isolado.

3.3 - CONSTRUÇÃO E DIMENSIONAMENTOS

3.3.1 - NÚCLEO

A liberdade na escolha das dimensões do núcleo é limitada pelo lugar a ser instalado o transformador. Estas dimensões são determinadas pela altura da sala de máquinas e corredores se montado dentro do veículo.

Quando determinando a efetiva utilização magnética, em instalações de tração de veículos deve ser considerado:

- O aumento de tensão de operação, a qual pode às vezes atingir 120% da tensão nominal;
- Os circuitos DC de comandos das rotas não podem ser afetados pelo decréscimo da componente DC no surto da corrente de partida.

Para a frequência de $16 \frac{2}{3}$ [Hz], o formato do núcleo mais utilizado é o núcleo laminado radialmente com braços de retorno distribuídos ao redor de uma circunferência. A FIGURA 3.1 ilustra.

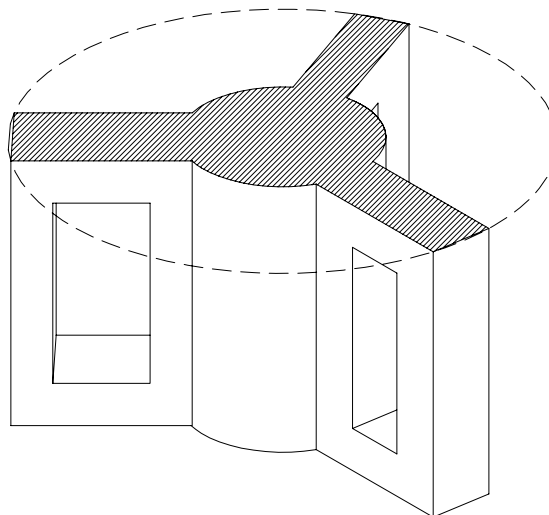


FIGURA 3.1 - NÚCLEO ESPECIAL PARA TRAÇÃO

A configuração esquematizada em 3.1, apresenta vantagens como:

- Pequena massa resultando da diminuição da altura total;
- A parte ativa do núcleo não requer partes adicionais, a não ser poucos reforços e parafusos;
- A parte ativa do transformador é fixada no tanque por um simples parafuso no centro;
- Utiliza pequenos volumes de óleo.

Contudo, principalmente para 50 e 60 [Hz], um estudo para cada tipo de projeto deve ser feito.

3.3.2 - ENROLAMENTOS

A exigência nas considerações sobre impedância, desacoplamentos e simetria influenciam o projeto de enrolamentos em maior ou menor extensão, dependendo da aplicação. Para tração é dada importância para a robustez mecânica do projeto, sobre toda proteção contra vibrações e insensibilidade às influências climáticas.

Nos transformadores para aplicações em tração deve-se, contudo, ser cuidadosamente feitas considerações com relação às exigências térmicas. Na verdade as perdas adicionais do transformador retificador afetam apenas ligeiramente a temperatura nos enrolamentos, em vista da elevada intensidade dos harmônicos produzidos pela carga (ponte tiristorizada).

Mas uma verificação pode ser feita visando observar se os condutores não estão sujeitos a sobre-aquecimentos próprios nos diversos acoplamentos. Os transformadores de tração para baixa tensão ou enrolamentos com função auxiliares são muitas vezes super-dimensionados com relação a curto-circuito.

A fim de aumentar a robustez e dar longa vida ao transformador, o enrolamento é impregnado com verniz isolante, o mesmo acontecendo depois com o conjunto núcleo-enrolamento.

Os transformadores podem ser de construção aberta. A parte interna dos tanques tem contato com a atmosfera via uma almofada de ar, deste modo tem-se uma ventilação suave. Este tipo de transformador não necessita desumidificadores de ar e conservadores de óleo, porém deve-se tomar cuidado quanto à corrosão.

Os equipamentos de controle são limitados a um termômetro ou termostato e uma chave de pressão para monitorias a bomba a óleo.

Construções abertas deste tipo têm provado seu valor em transformadores estacionários muito bem.

3.3.3 - TANQUE

A necessidade de redução da massa para o uso em tração é um ponto em favor do uso do alumínio ao invés do aço para a confecção do tanque.

Mas as vantagens proveniente do pequeno peso é contrabalanceada pelo alto custo do alumínio, e um estudo para casos particulares deve ser feito.

Cuidados especiais devem ser tomados com o coeficiente de expansão do alumínio e com as soldas (funções) que neste material podem não vedar o óleo frente às vibrações.

O lugar onde o transformador é instalado é de particular importância na quantidade da massa do tanque.

Se instalado dentro da locomotiva, o núcleo e as bobinas ficam de pé sobre a locomotiva. Se instalado no baixo do assoalho, o tanque deve transmitir forças de reação para as bases da locomotiva através de elementos apropriados e facilidade de suspensão.

Estas funções adicionais do tanque necessitam estruturas especiais. Neste caso uma robustez ainda maior é necessária devido possíveis choques com sólidos que atinjam esta área.

3.4 - EFEITO DO CURTO-CIRCUITO EM TRANSFORMADORES DE TRACÇÃO

No passado, o grande número de curto-circuito a que os transformadores de tração estavam sujeitos, consistia num se seus maiores riscos. Estes eram originados de muitas causas como: centelhamentos no coletor das máquinas de Corrente Contínua (MCC), faltas nos cabos ou nos comutadores de Taps e ainda nos retificadores de mercúrio.

Historicamente os centelhamentos nas MCC e as faltas nos cabos não vêm contribuindo significativamente para o prejuízo do transformador. E os curtos-circuitos nos retificadores, com o uso do retificador a diodo e tiristor, foram virtualmente eliminados. A maior causa de danos no transformador vinha sendo sem dúvida a operação faltosa nos Taps quando este estava em carga. Antes dos revolucionários tiristores que resolveram este problema, um estudo vinha sendo executado sobre o uso do enrolamento “tipo sanduíche” ou o tipo concêntrico para essas mudanças de Tap.

3.5 - EFEITO DOS SURTOS DE TENSÃO EM TRANSFORMADORES DE TRACÇÃO

O transformador em tração está sujeito a perigosos surtos associados com centelhamentos, saltos do pantógrafo e cortes de correntes devido à operação de disjuntores.

Na prática este problema tem sido amenizado com o uso da proteção de surto colocada na entrada da alta tensão. Contudo o projeto dos transformadores deve prever que ele seja aprovado por ensaios de surtos estipulados pelo I.E.C.

3.6 - EFEITO DOS HARMÔNICOS EM TRANSFORMADORES DE TRACÇÃO

Quando os transformadores para tração eram usados com retificadores a mercúrio e a diodos o problema de harmônicos não era muito acentuado. Mas com o uso das pontes tiristorizadas, as quais produzem muito mais harmônicos, este problema deve ser bem examinado. Tipicamente o terceiro harmônico com magnitude de até 35% da componente fundamental são possíveis diante determinadas condições de carregamento. Estas componentes de alta frequência podem causar altas perdas por corrente de Foucault no enrolamento do transformador. Esta perda aumenta com o quadrado da frequência da corrente e assim harmônicos de ordem mais elevada, mesmo com pequena magnitude podem causar sobre aquecimentos. Este problema pode ser grave nos transformadores que operam continuamente com carga máxima e com grandes ângulos de disparos nos conversores.

Uma solução para este problema consiste na diminuição da bitola dos condutores do enrolamento. Mas esta redução apesar de diminuir a perda também afeta a robustez em relação ao curto circuito.

Nos projetos de transformadores existe então sempre a necessidade de uma decisão em cima do compromisso entre a capacidade de curto-circuito e capacidade de suportar harmônicos.

3.7 - EMPREGO DO TRANSFORMADOR EM PONTES CONVERSoras A TIRISTOR

Com o uso dos tiristores todos os Taps que eram necessários para controles de pontes a diodo foram eliminados e com isto os riscos de curto-circuito nestes Taps, o transformador passou a ser quase que simplesmente dois enrolamentos adequadamente arranjados, como indica a FIGURA 3.2.

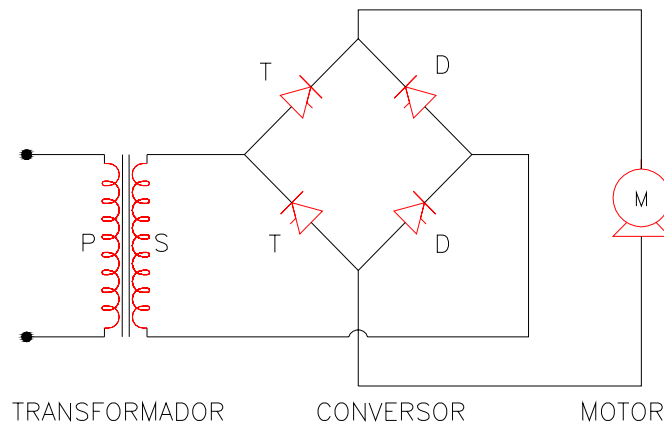


FIGURA 3.2 - TRANSFORMADOR ALIMENTANDO PONTE MONOFÁSICA SEMI-CONTROLADA

O circuito, apresentado em 3.2, contudo, não pode ser usado na prática em tração por causa do baixo fator de potência apresentado. Isto obriga os circuitos projetados a usar alguma forma de controle seqüencial nos conversores. Este necessita o uso de um circuito mais complicado tal como o mostrado na FIGURA 3.3.

No circuito da FIGURA 3.3 existem dois transformadores e circuitos conversores em série. Os conversores são controlados separadamente e em seqüência, como resultado um melhor fator de potência é obtido. Este circuito ainda precisa ser aumentado para alimentar um número maior de motores. Assim tem-se na FIGURA 3.4 o conversor para locomotiva com quatro motores.

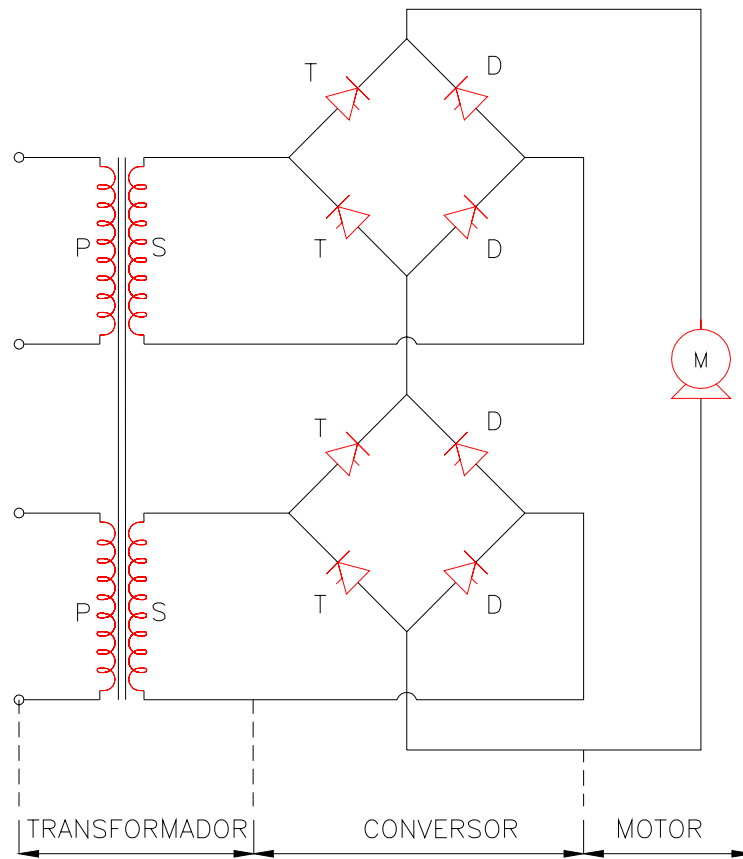


FIGURA 3.3 - TRANSFORMADOR ALIMENTANDO CONVERSOR DUPLO COM SEQÜÊNCIA DE CONTROLE

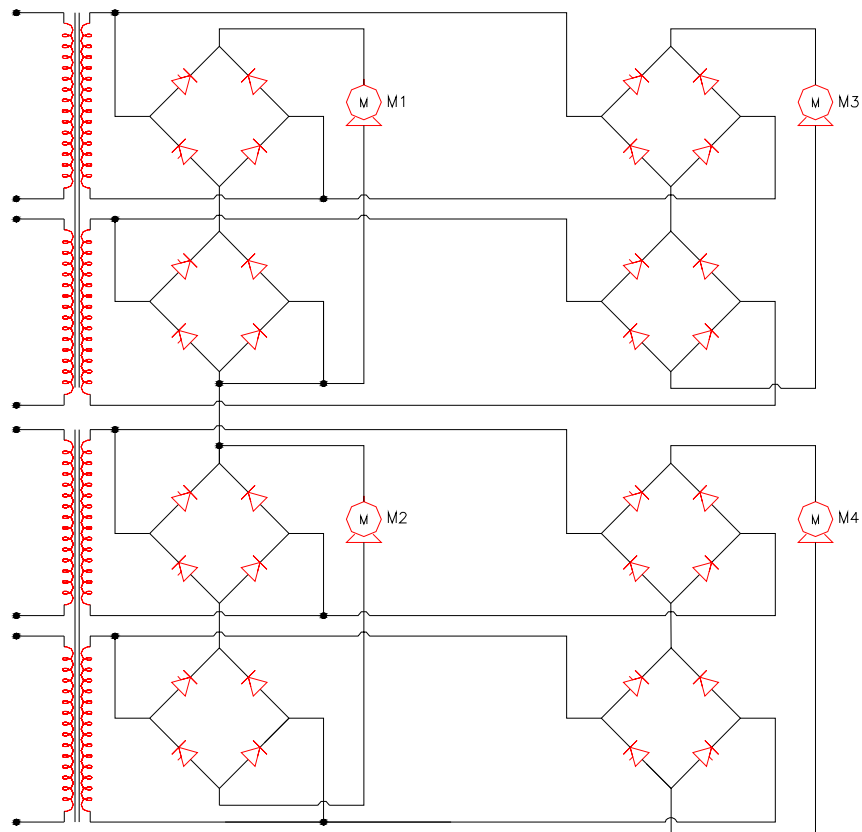


FIGURA 3.4 - TRANSFORMADOR ALIMENTANDO CONVERSOR COM QUATRO PONTES PARA QUATRO MOTORES

Na FIGURA 3.4 devem ser adicionados enrolamentos para circuitos auxiliares, excitação de motores e circuitos destinados ao conforto dos passageiros.

A FIGURA 3.5 a seguir mostra uma situação prática com o transformador tendo sete enrolamentos de saída.

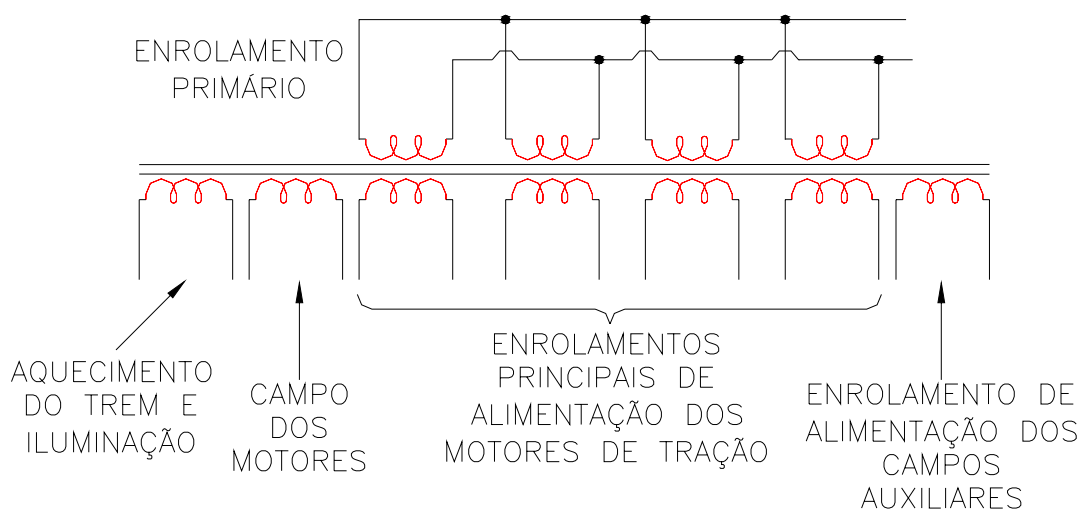


FIGURA 3.5 - TRANSFORMADOR PARA TRAÇÃO AC ILUSTRANDO OS ENROLAMENTOS ENVOLVIDOS

A FIGURA 3.5 mostra claramente os problemas presentes no projeto deste transformador. O primeiro problema sério é o número de enrolamentos primários envolvidos. Para se construir um enrolamento perfeito mecanicamente a bitola dos fios é de bitola considerável. Isto equivale a dizer que o transformador terá uma potência mínima e às vezes ficar sobre-dimensionado, tendo neste caso grande penalidade pelo alto custo e peso.

Um transformador com sete enrolamentos de saída requer considerações cautelosas no ponto de vista de operação.

Idealmente se espera que os enrolamentos se comportem separadamente, mas de fato, eles estão acoplados e o desempenho de algum enrolamento pode ser afetado pelo carregamento de um outro. Isto pode ocorrer até em operação normal (sem que haja falhas). Se o controle seqüencial dos conversores estiver sendo usado, então as correntes nos 4 secundários serão diferentes.

Com isto tem o aparecimento de um fluxo de dispersão assimétrico, o qual pode criar sobre aquecimentos se o transformador não tiver sido projetado para essas condições.

Muita atenção deve ser dada para o fato que variações nos carregamentos dos enrolamentos de tração podem alterar a tensão e injetar harmônicos nos enrolamentos destinados à alimentação de campos ou circuitos de controle eletrônicos. Isto é um problema para o projetor do conversor que é quem tem de assegurar que este funcione sobre todas as circunstâncias.

4 - ANÁLISE DE PONTES CONVERSoras USADAS EM TRAÇÃO

4.1 - INTRODUÇÃO

Em alguns acionamentos de pequena potência, são empregadas pontes monofásicas semi controladas por motivos econômicos, como por exemplo em sistemas de excitação de máquinas síncronas e partes auxiliares de circuitos eletrônicos. Todavia, para grandes potências esse tipo de ponte tem seu uso bastante comum em sistemas de tração.

4.2 - CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

A ponte monofásica semicontrolada, FIGURA 4.1, contém dois tiristores e dois diodos. Os disparos nos tiristores são defasados de 180° . Para uma faixa de disparo de $\alpha=0^\circ$ até $\alpha=180^\circ$, a tensão contínua de saída varia de zero até o valor máximo (idealmente).

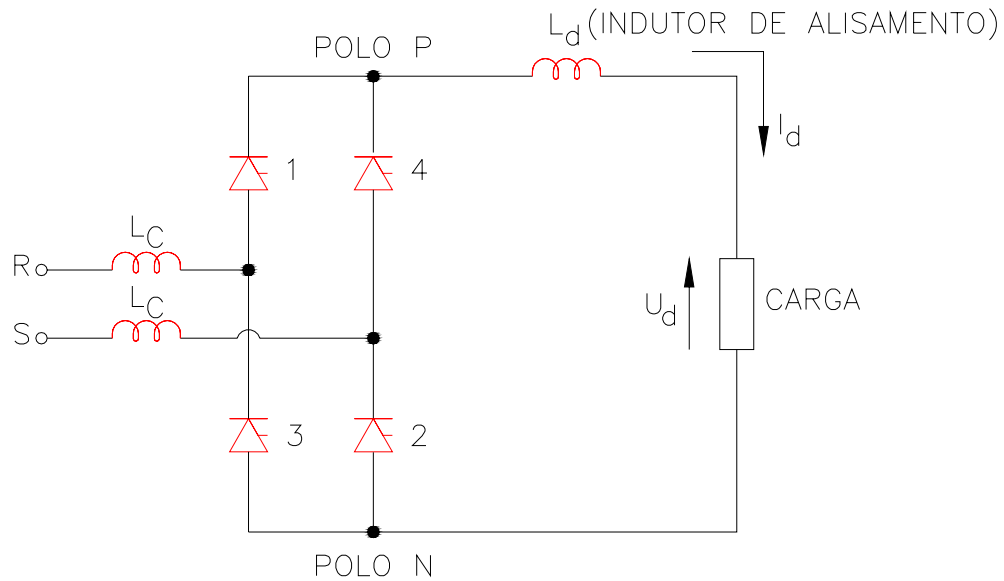


FIGURA 4.1 - PONTE MONOFÁSICA SEMICONTROLADA

4.2.1 - DESCRIÇÃO SUCINTA DO FUNCIONAMENTO DO CIRCUITO

4.2.1.1 - DESPREZANDO-SE O EFEITO DA COMUTAÇÃO ($L_C = 0$)

A FIGURA 4.2 a seguir, ilustra o comportamento de tensões e correntes do circuito da FIGURA 4.1 para $\alpha = 60^\circ$, supondo-se que a corrente na carga seja constante (alto valor de indutância no circuito de carga).

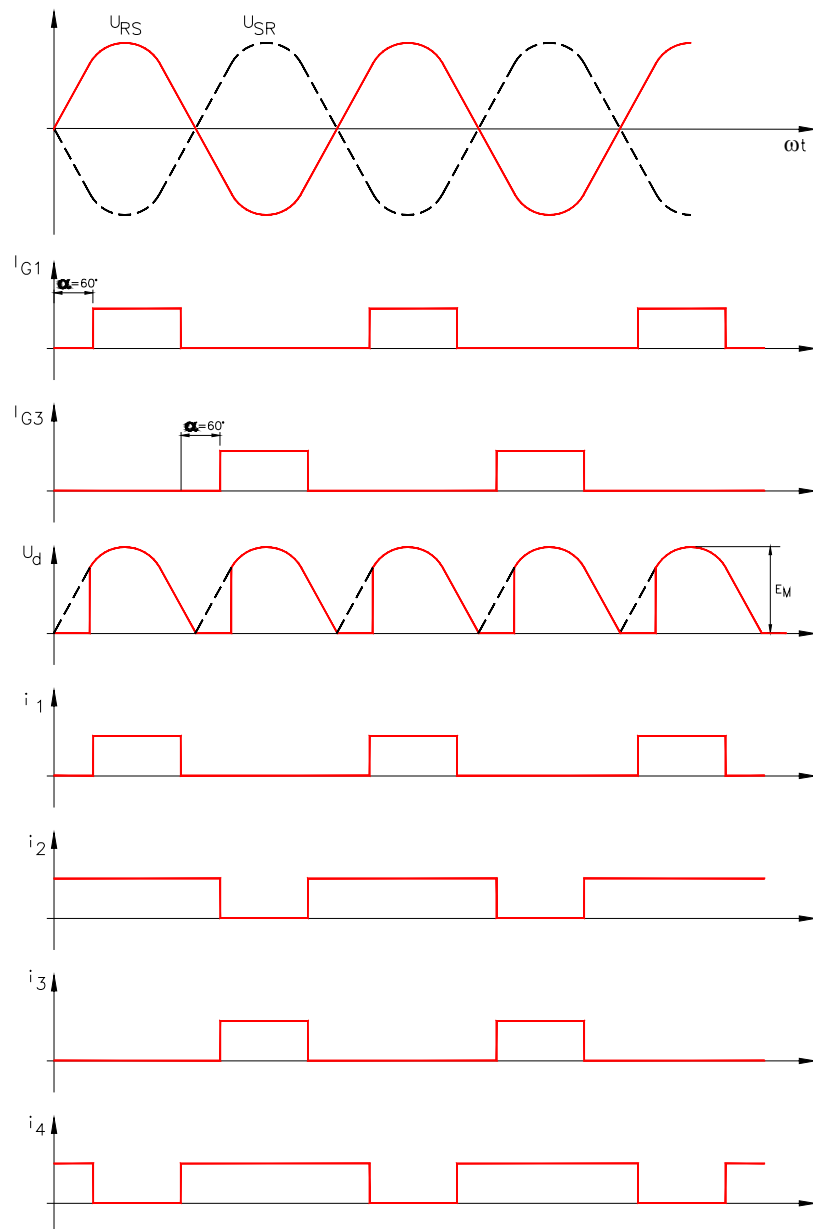


FIGURA 4.2 - TENSÕES E CORRENTES DE UMA PONTE MONOFÁSICA SEMICONTROLADA PARA $\alpha = 60^\circ$ (DESPREZANDO O EFEITO DA COMUTAÇÃO)

Com o disparo do tiristor 1, a tensão U_{RS} da rede é aplicada na carga e circula corrente pelo tiristor 1, pela carga e de volta a rede, através do diodo 2.

Quando a tensão alternada se anula, os diodos 2 e 4 assumem a condução de corrente, funcionando como diodos de descarga da energia armazenada na indutância, durante este intervalo de tempo e tensão U_d é nula.

Tão logo o tiristor 3 seja disparado, a rede assume o fornecimento de corrente (tensão U_{SR}). A corrente circula pelo tiristor 3, pela carga e pelo diodo 4 de volta a rede, neste período U_d é nula.

Quando a tensão U_{SR} se anula, os diodos 2 e 4 voltam a funcionar como diodos de descarga, assumindo a condução da corrente.

A FIGURA 4.3 mostra as mesmas variações de tensão e corrente para $\alpha = 120^\circ$. Observa-se que para um ângulo de disparo maior, o tempo de condução dos tiristores diminui e o dos diodos aumenta, assumindo que a indutância é suficiente para manter a corrente circulando pela carga e pelos diodos 2 e 4.

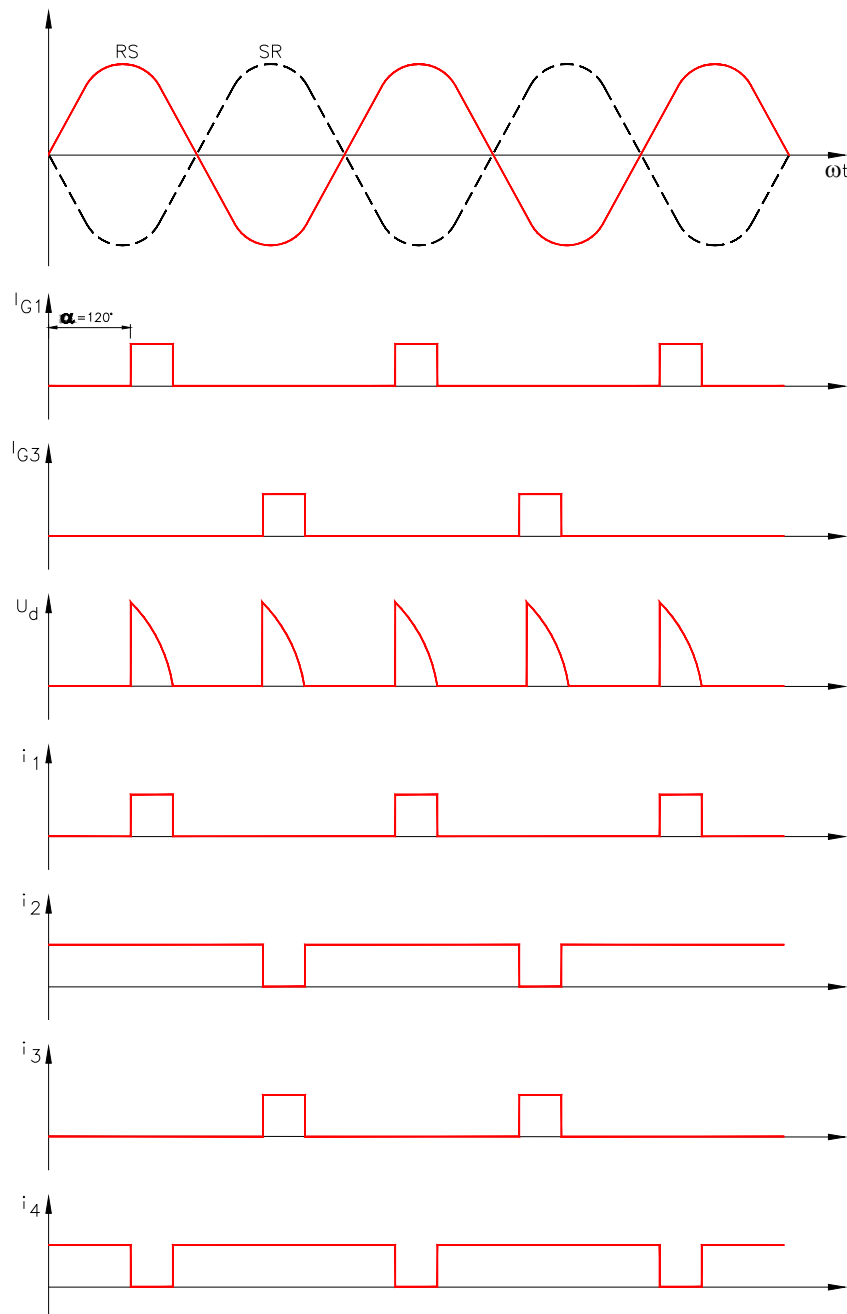


FIGURA 4.3 - TENSÕES E CORRENTES DE UMA PONTE MONOFÁSICA SEMICONTROLADA PARA $\alpha = 120^\circ$ (DESPREZANDO O EFEITO DA COMUTAÇÃO)

4.2.1.2 - CONSIDERANDO-SE O EFEITO DA COMUTAÇÃO ($L_C \neq 0$)

A FIGURA 4.4 a seguir, ilustra o comportamento das tensões e correntes do circuito da FIGURA 4.1 para $\alpha = 60^\circ$, supondo-se que a corrente na carga seja constante e $L_C \neq 0$.

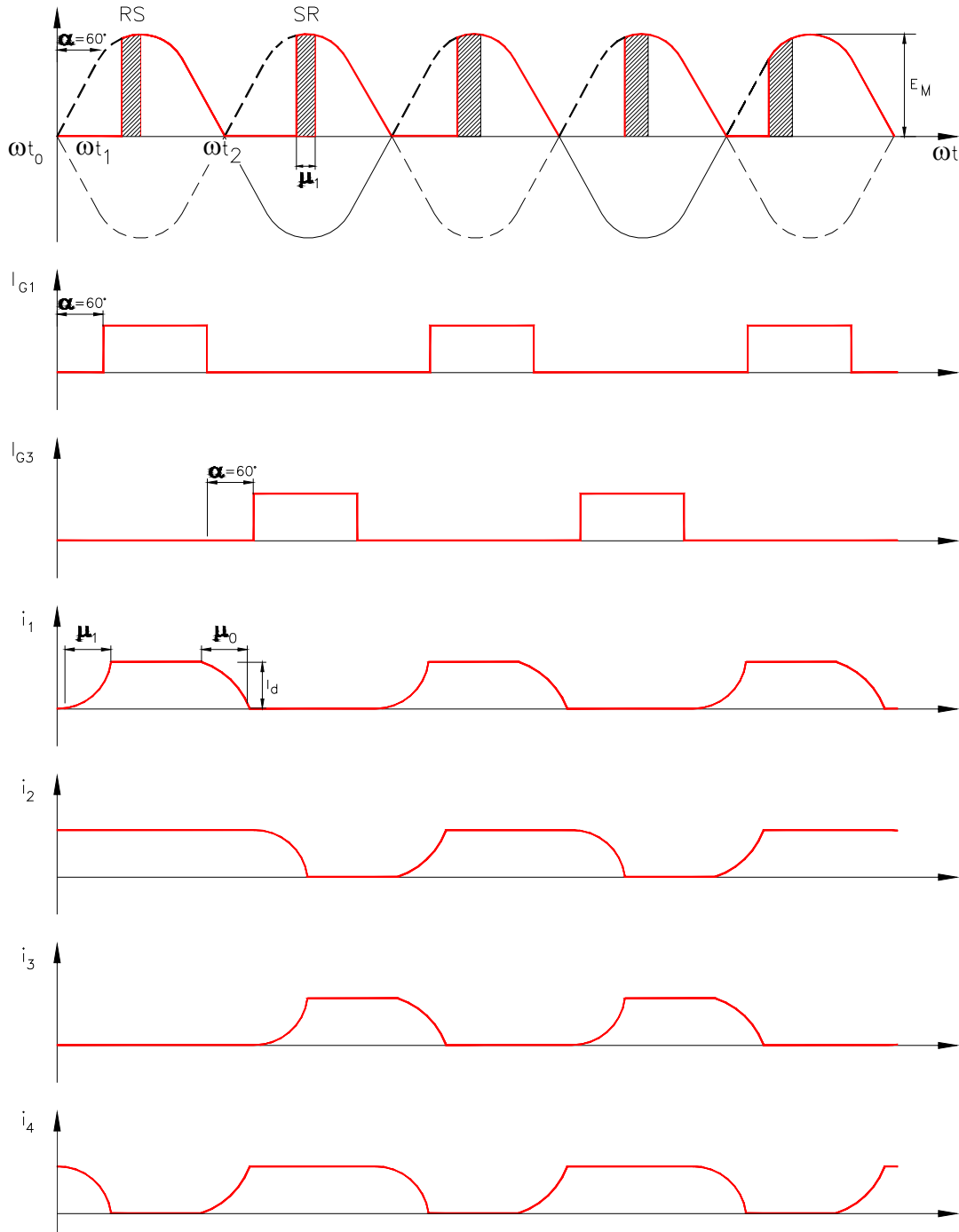


FIGURA 4.4 - TENSÕES E CORRENTES DE UMA PONTE MONOFÁSICA SEMICONTROLADA PARA $\alpha = 60^\circ$ (CONSIDERANDO O EFEITO DA COMUTAÇÃO)

No instante anterior a wt_0 estão conduzindo o tiristor 3 e o diodo 4. Em wt_0 , a tensão U_{SR} torna-se menor que a tensão U_{RS} , provocando que o potencial do pólo N seja maior que o do pólo P. Como a fase SR é a mais negativa, o diodo 2 ficará polarizado diretamente e forçará uma comutação de corrente com o tiristor 3, tendendo a bloqueá-lo. Após a comutação os diodos 2 e 4 estarão conduzindo.

Em wt_1 é enviado um pulso para disparar o tiristor 1. Como a tensão RS é mais positiva que a tensão SR, haverá uma comutação entre o tiristor 1 e o diodo 4, com uma tendência ao bloqueio de diodo 4. Este ângulo de comutação pe denominado de u_1 . Ao terminar a comutação, conduzem o tiristor 1 e o diodo 2. O circuito equivalente para esta comutação está mostrado na FIGURA 4.5.

A partir de wt_2 a tensão RS torna-se mais negativa, isto significa que o diodo 4 ficará novamente polarizado diretamente, pois a tensão de anodo SR está a um potencial maior que RS. Logo existirá uma nova comutação entre o tiristor 1 e o diodo 4. O circuito equivalente é o mesmo da comutação anterior.

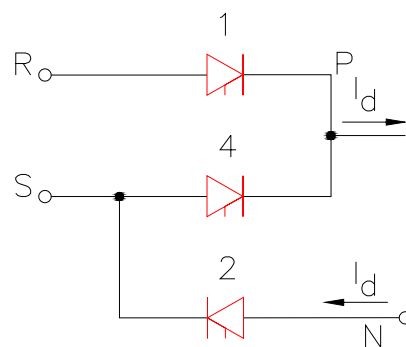


FIGURA 4.5 - CIRCUITO EQUIVALENTE DURANTE A COMUTAÇÃO DO TIRISTOR 1 E O DIODO 4

Para o cálculo da corrente de comutação considere o circuito da FIGURA 4.6.

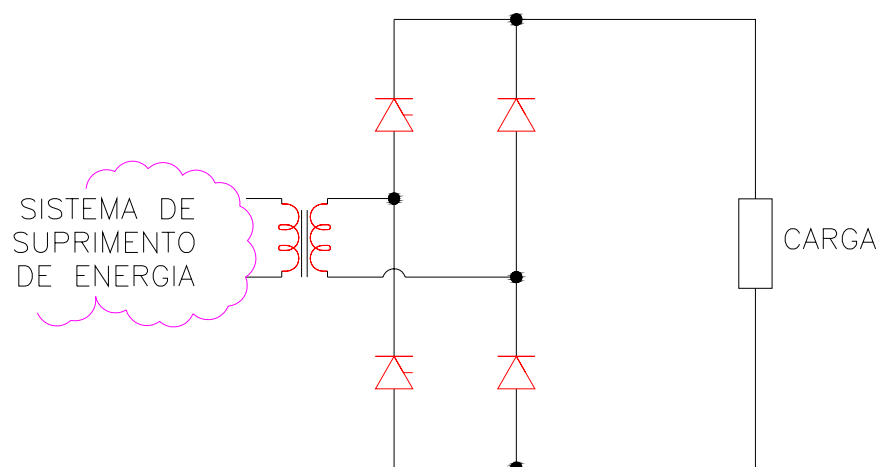


FIGURA 4.6 - CIRCUITO UTILIZADO PARA ANÁLISE DE COMUTAÇÃO

O circuito equivalente, aquele mostrado em 4.6 é indicado na FIGURA 4.7.

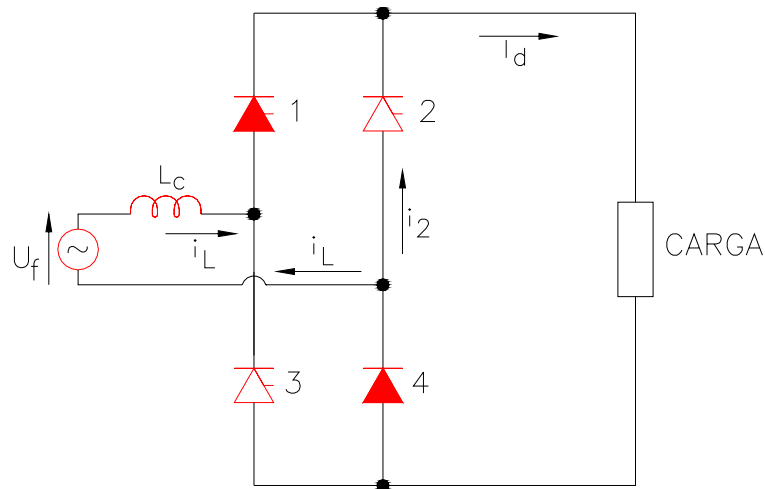


FIGURA 4.7 - CIRCUITO UTILIZADO PARA O CÁLCULO DA COMUTAÇÃO

Admitindo que o diodo 4 e o tiristor 1 estão em condução, no instante correspondente a $\omega t = 180^\circ$, a tensão da ponte tende a tornar-se negativa e a corrente de linha i_L começa a diminuir. A partir deste instante existe uma queda de tensão na bobina L_C , que tende a manter i_L circulando pelo tiristor 1. Todavia a indutância L_C não consegue manter esta corrente, indefinidamente. Será admitido que o intervalo de tempo necessário para a corrente i_L , sair do valor I_d e chegar a zero, corresponde a μ_0 . Logo:

$$i_L = I_d \text{ e } i_2 = 0 \text{ (1)}$$

para $(180^\circ) < \omega t \leq (180^\circ + \mu_0)$

$$i_L = I_d - i_2 \text{ e } i_2 \neq 0 \text{ (2)}$$

assim:

$$e_f - L_c \frac{di_L}{dt} = e_f - L_c \frac{d}{dt}(I_d - i_2) \text{ (3)}$$

De (2) tem-se:

$$\frac{di_L}{dt} = - \frac{di_2}{dt} \text{ (4)}$$

Logo:

$$e_f - L_c \frac{di_L}{dt} = 0 \dots\dots\dots (5)$$

Como

$$e_f = E_{\max} \text{sen } \theta \dots\dots\dots (6)$$

tem-se:

$$\frac{di_L}{dt} = E_{\max} \text{sen}(wt) = E_{\max} \text{sen } \theta \dots\dots\dots (7)$$

$$\theta = wt \dots\dots\dots (8)$$

Logo:

$$d\theta = wdt \dots\dots\dots (9)$$

De (7) e (9) tem-se:

$$\frac{w di_L}{d\theta} = E_{\max} \text{sen } \theta \dots\dots\dots (10)$$

$$\int_{I_d}^0 di_L = \int_{180^\circ}^{(180^\circ + \mu_0)} E_{\max} \text{sen } \theta d\theta \dots\dots\dots (11)$$

Logo:

$$I_d = \frac{E_m}{wL_c} (1 - \cos \mu_0) \dots\dots\dots (12)$$

Para a comutação entre os diodos 2 e 4 e o tiristor 3 tem-se; analogamente:

$$I_d = \frac{E_m}{wL_c} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \mu_1)] \dots\dots\dots (13)$$

Sendo:

μ_0 - ângulo de comutação do tiristor 1 com o diodo 2;

μ_1 - ângulo de comutação dos diodos 2 e 4 com o tiristor 3;

α - ângulo de disparo dos tiristores 1 e 3.

Por outro lado o valor médio da tensão nos terminais da carga é dado por:

- sem comutação:

$$U_{d\alpha 0} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{180^{\circ}} E_m \operatorname{sen}\theta \, d\theta \dots\dots\dots (14)$$

$$U_{d\alpha 0} = \frac{E_m}{\pi} (1 - \cos \alpha) \dots\dots\dots (15)$$

- com comutação

$$U_{d\alpha} = \int_{\alpha}^{180^{\circ}} \left(E_m \operatorname{sen}\theta - L_c \frac{di_L}{dt} \right) d\theta \dots\dots\dots (16)$$

Logo:

$$U_{d\alpha} = U_{d\alpha 0} - 2f L_c I_d \dots\dots\dots (17)$$

Onde:

f - frequência da rede

4.3 - PONTES CONVERSoras SEMICONTROLADAS USADAS EM TRAÇÃO COM CONTROLE POR ÂNGULO DE FASE

No caso de sistemas de tração AC há que se levar em conta que a tensão de suprimento de energia é coletada da linha AC pelo pantógrafo e alimenta o transformador da locomotiva. A FIGURA 4.8 ilustra.

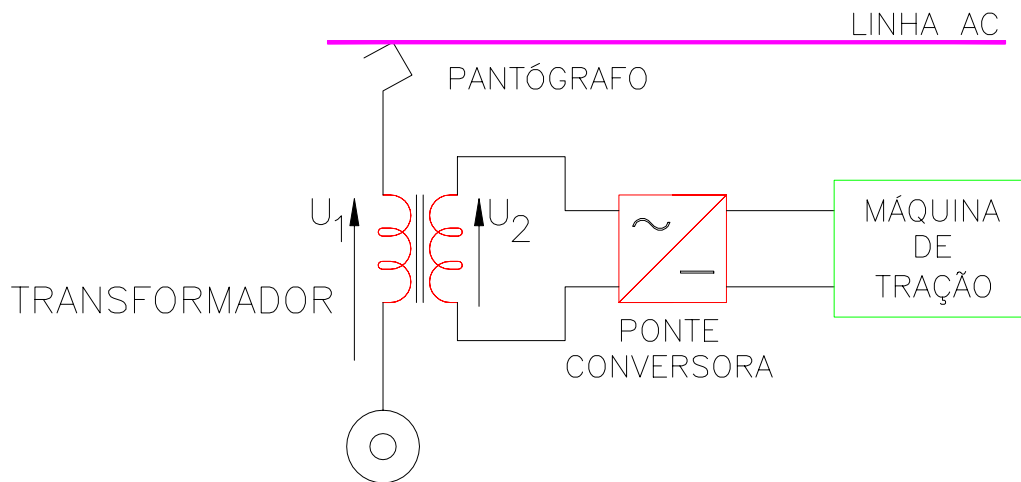


FIGURA 4.8 - DIAGRAMA BÁSICO DE SUPRIMENTO AO SISTEMA DE TRAÇÃO

A tensão da rede U_1 é convenientemente abaixada para um valor de tensão U_2 a qual é aplicada a ponte conversora. Naturalmente para evitar ondulações de tensão na forma de onda de corrente, entre a ponte conversora e a máquina de tração existem reatores de alisamento. A FIGURA 4.9 ilustra.

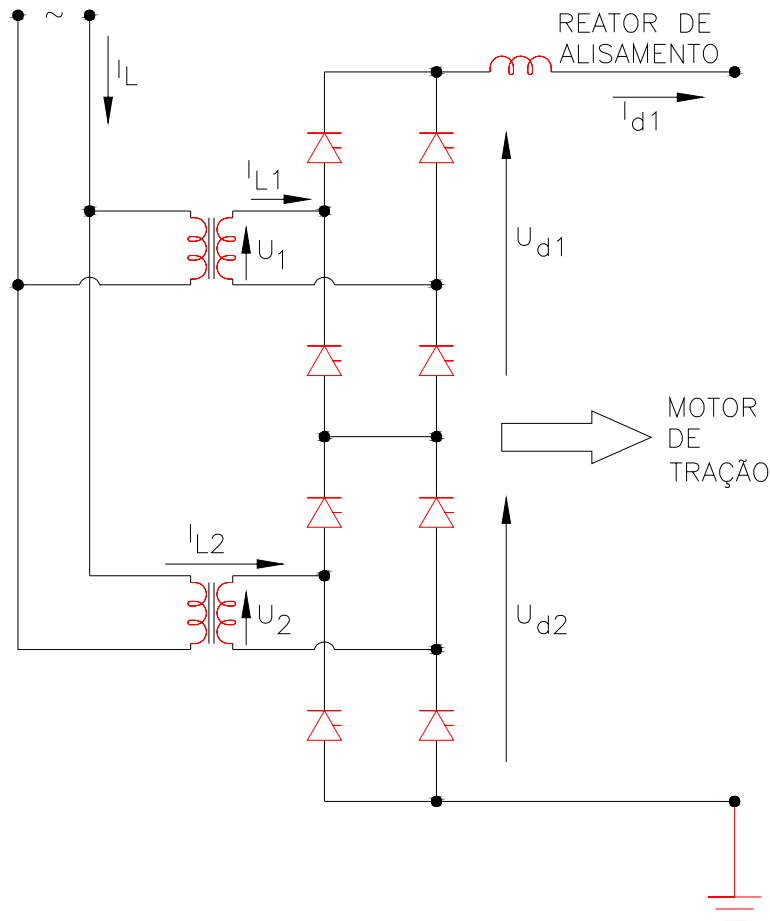


FIGURA 4.9 - SISTEMA DE CONVERSÃO AC/DC PARA TRAÇÃO

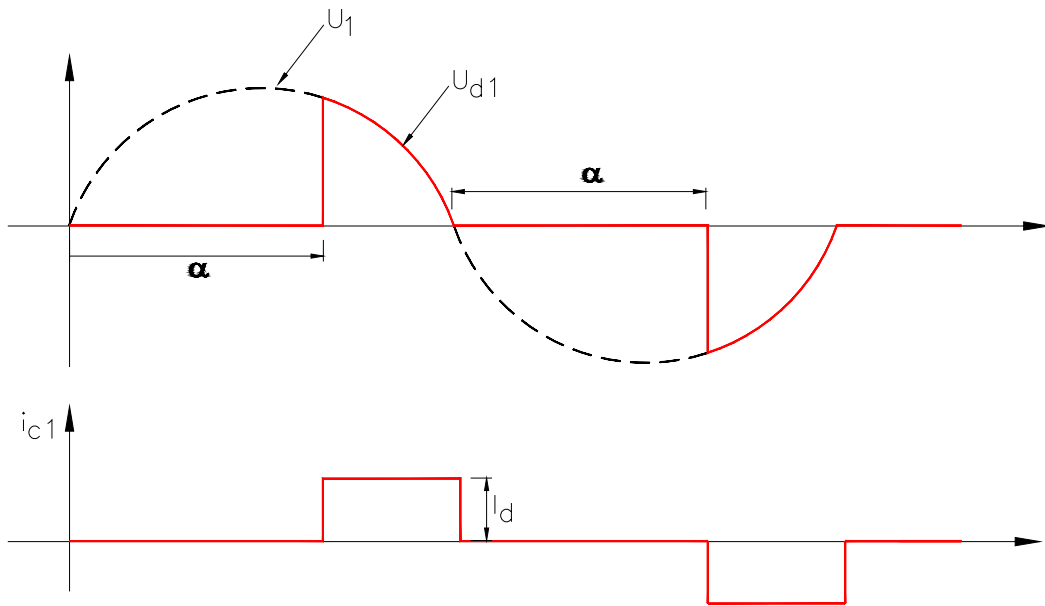


FIGURA 4.10 - FORMA DE ONDA DE TENSÃO E CORRENTE DE SAÍDA DE UMA PONTE CONVERSORA.

Na FIGURA 4.9 tem-se duas pontes conversoras ligadas em série. Cada ponte conversora tem capacidade de atender até a metade da tensão necessária a armadura do motor. A FIGURA 4.10 ilustra a tensão de saída de uma ponte conversora.

No caso das duas pontes em operação com ângulo α_1 e α_2 respectivamente tem-se a forma de onda da tensão $U_d = U_{d1} + U_{d2}$ na saída da ponte conversora.

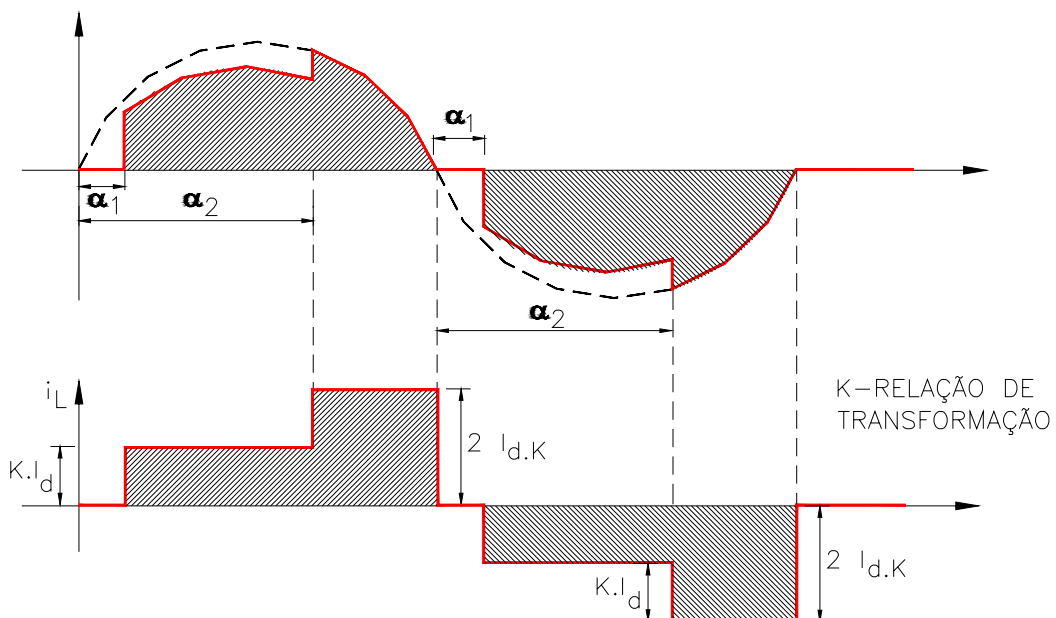


FIGURA 4.11 - FORMA DE ONDA DE TENSÃO DE SAÍDA E CORRENTE DE ENTRADA DAS PONTES CONVERSoras

Naturalmente a análise de cada uma das pontes pode ser vista nos itens anteriores.

A conexão série de pontes conversoras indicada basicamente neste item e praticamente no capítulo 2, caracteriza-se por ser a solução padrão típica para sistemas AC, principalmente, devido a sua simplicidade e excelente comportamento operacional. Todavia no caso de exigência de um melhor fator de potência e redução de harmônicos de correntes, estas pontes não se aplicam.

Uma alternativa é aquela indicada na FIGURA 2.2.b. Neste circuito os tiristores somente não podem ser ligados em qualquer instante do ciclo positivo da onda de tensão, mas também podem ser desligados sem ter que esperar a onda de tensão passar pelo zero. Qualquer número de setor pode ser removido em meio ciclo. O controle de setor permite a redução ou mesmo a eliminação do controle de fase entre a tensão AC de suprimento e a componente fundamental da corrente e, portanto da potência reativa.

Na FIGURA 4.11 tem-se:

- A - Controle com ângulo de fase - ponte semi controlada - tensão e corrente no primário.
- B - Controle por setor - tensão e corrente no primário.
- C - Tensão de saída da ponte conversora no sistema com controle de ângulo de fase.
- D - Tensão de saída da ponte conversora no sistema com controle por setor.
- E - Característica λ de fator de potência.
- E.I - Controle por setor.
- E.II - Controle por ângulo de fase.
- U_d - Tensão DC de saída.
- U_{pr} - Tensão primária AC.
- I_{pr} - Harmônico fundamental da corrente primária.
- U_{di} - Tensão de saída nos terminais da ponte conversora.
- α - Ângulo de disparo.
- β - Ângulo de desligamento.

Desta forma têm-se as seguintes vantagens;

- Conexão série de ponte controlada por setor (com desligamento forçado) e ponte assimétrica com chaveamento entre o modo de onda completa e o modo de passagem livre.
- Adição de dois equipamentos de desligamento, cada comprimindo dois bancos de capacitores com os tiristores de desligamento associados e diodos de desconexão.

A FIGURA 4.11 ilustra as formas de onda de tensão e corrente nos dois (com e sem controle de ângulo de fase), e o item a seguir destaca o controle com ângulo de fase e desligamento forçado.

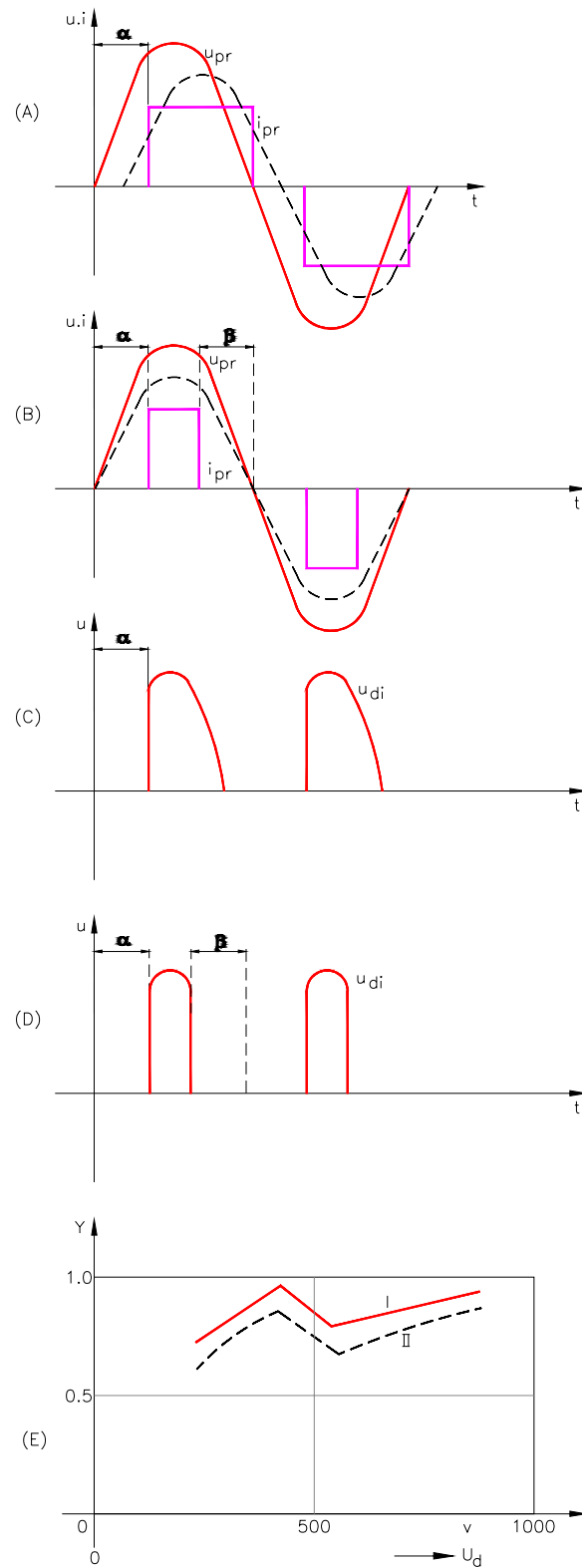


FIGURA 4.11 - FORMAS DE ONDA, DE TENSÃO E CORRENTE, COMPARATIVAS ENTRE OS SISTEMAS COM PONTE SEMI CONTROLADA E CONTROLE DE ÂNGULO DE FASE

4.4 - ASYMMETRICAL BRIDGE CIRCUIT (LUB)

4.4.1 - INTRODUÇÃO

Na alimentação de motores de C.C. para uso em tração através de linhas aéreas monofásicas, é possível se obter uma melhoria do fator de potência com a utilização do LUB.

A FIGURA 4.12, ilustra o circuito equivalente de um LUB.

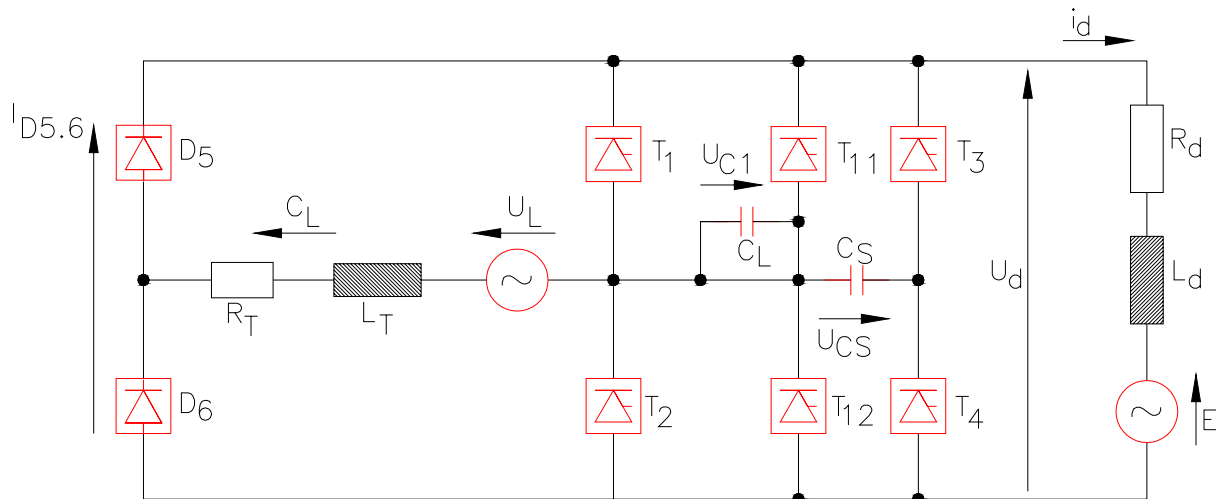


FIGURA 4.12 - CIRCUITO EQUIVALENTE DE UM LUB

O capacitor C_L causa o desligamento dos tiristores principais T_1 e T_2 através do disparo de um dos tiristores de desligamento T_{11} ou T_{12} ; enquanto o capacitor C_S armazena energia que está acumulada na indutância do lado A.C., durante a auto comutação.

O cálculo exato das características de controle do circuito mostrado na FIGURA 1 somente é possível através de uma simulação digital, por causa da indutância L_d (valor do qual depende a corrente) e da não linearidade das características da válvula. Assim sendo, não é possível o cálculo analítico completo do estado estável do LUB.

Uma boa maneira de se determinar os valores dos parâmetros do circuito é omitir todos aqueles que têm menos importância. Isto é geralmente possível e de fácil obtenção.

Somente após todos os efeitos importantes possíveis de se ocorrer no circuito ideal terem sido determinados, uma simulação digital do circuito real é possível.

4.4.2 - DESCRIÇÃO DO FUNCIONAMENTO PARA O CIRCUITO IDEAL

As suposições a seguir são necessárias para um melhor entendimento do circuito da FIGURA 4.12.

- a - Todas as perdas nos lados A.C. e D.C. e também a indutância L_T são desconsideradas ($R_T = R_d = X_T = 0$).
- b - A tensão de alimentação é uma onda perfeitamente senoidal
- c - A indutância de alisamento L_d é elevada, de tal forma que toda componente alterada da corrente de carga pode ser desprezada ($L_d \rightarrow \infty$).
- d - Todas as válvulas são isentas de perdas e supostas ideais. Também com respeito aos seus intervalos de comutação.
- e - A tensão de carga \underline{E} é perfeitamente contínua.

Com a suposição d, o capacitor de desligamento C_L pode ser desprezado, de tal forma que os tiristores principais T_1 e T_2 são capazes de bloquear em qualquer instante (observar demonstração a seguir, item 4.4.3).

4.4.3 - ANÁLISE DO BLOQUEIO DOS TIRISTORES PRINCIPAIS

OBS: Na análise que segue, foram desprezados os transitórios devido à chaveamento de carga capacitiva. Para um melhor entendimento do exposto, segue um desenvolvimento sucinto do assunto:

Seja o circuito da FIGURA 3.14 a seguir:

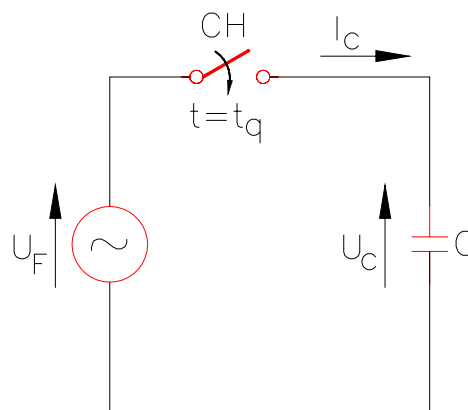


FIGURA 4.13 - FONTE DE TENSÃO ALTERNADA ALIMENTANDO CARGA PURAMENTE CAPACITIVA.

Onde:

U_F - Fonte de tensão alternada

Ch - Chave interruptora

C - Capacitor

I_c - Corrente no circuito para regime permanente

t_1 - Instante no qual a chave interruptora é fechada

t_2 - Término do regime transitório

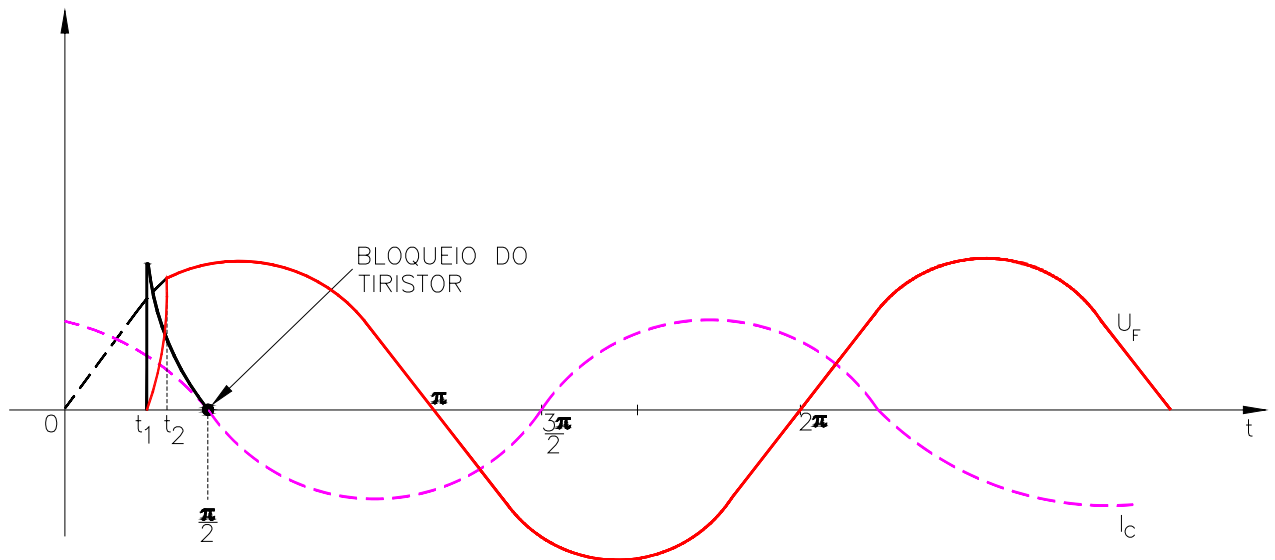


FIGURA 4.14 - FORMAS DE ONDA DO CIRCUITO DA FIGURA 2, PARA UM CHAVEAMENTO DURANTE $-\frac{\pi}{2} < t < \frac{\pi}{2}$

Para um chaveamento dentro do intervalo de $\pi (2m - \frac{1}{2}) < \pi (2m + \frac{1}{2})$ ($m = 0, 1, 2, 3, \dots$) o bloqueio do tiristor (vide circuito equivalente da FIGURA 6) ocorre quando a corrente se anula, ou seja, em $\pi (2m + \frac{1}{2})$.

Por outro lado, para um chaveamento dentro do intervalo de $\pi (2m + \frac{1}{2}) < t < \pi (2m + \frac{3}{2})$ o bloqueio do tiristor ocorre instantaneamente, como ilustra a FIGURA 4-15.

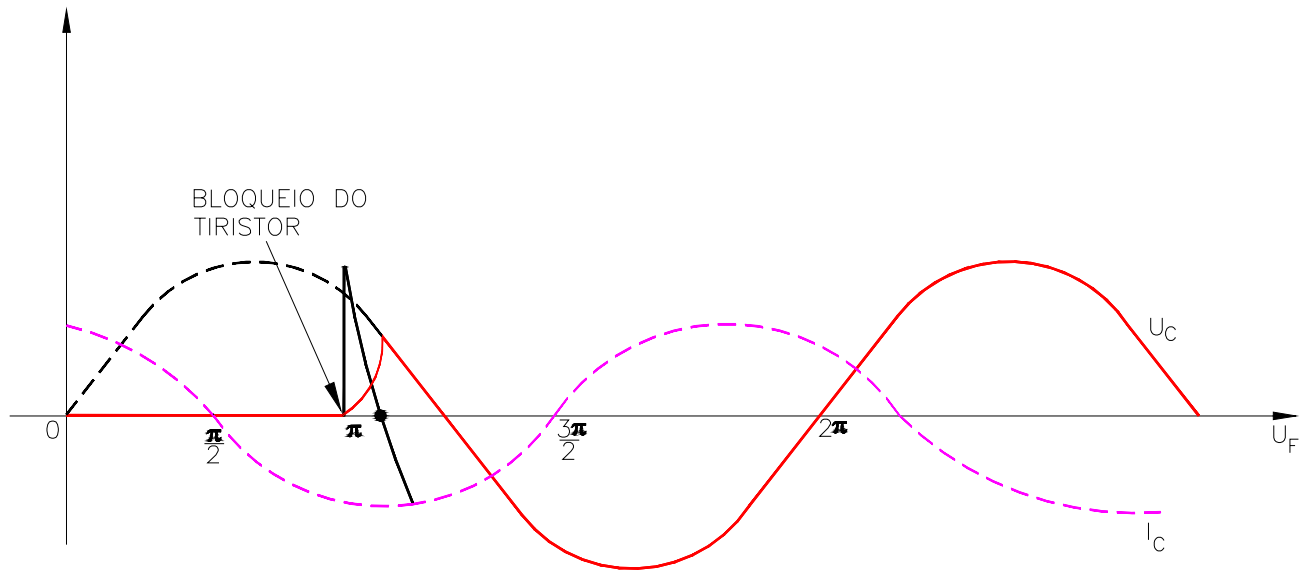


FIGURA 4.15 - FORMAS DE ONDA DO CIRCUITO DA FIGURA 2, PARA UM CHAVEAMENTO DURANTE $\frac{\pi}{2} < t < \frac{3\pi}{2}$

Para o circuito da FIGURA 4.12, a lógica de disparo dos tiristores T_{11} e T_{12} é de tal forma, que os tiristores principais T_1 e T_2 , sejam capazes de bloquear em qualquer instante está ilustrada na FIGURA 4.16.

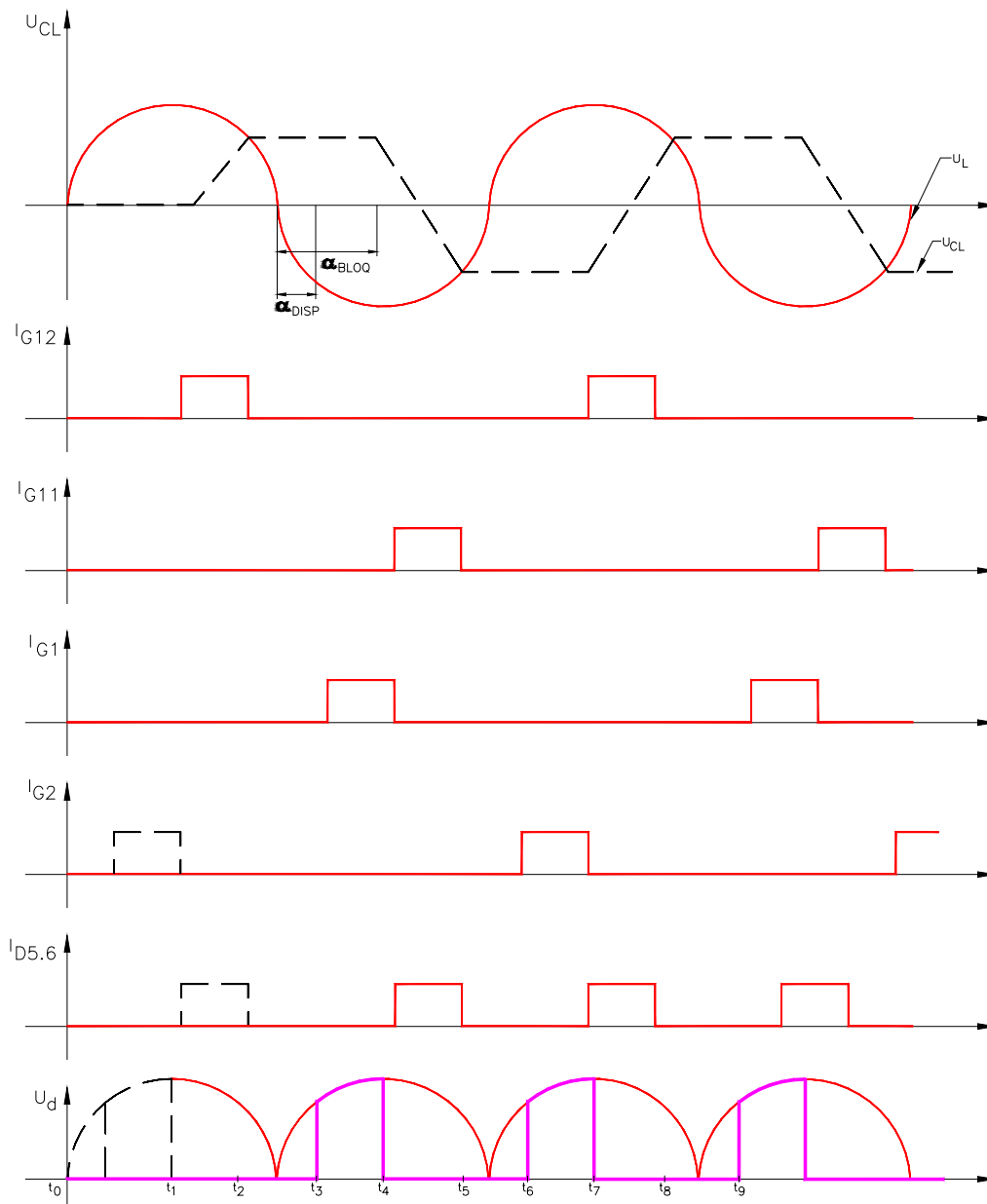


FIGURA 4.16 - LÓGICA DE DISPARO DE T_{11} E T_{12}

Baseando-se nas formas de onda da FIGURA 4.16, pode-se escrever o funcionamento do circuito:

a - $t = t_1$: Nesse instante o tiristor T_{12} é disparado com a finalidade de carregar o capacitor C_L , como ilustra a FIGURA 4.17.

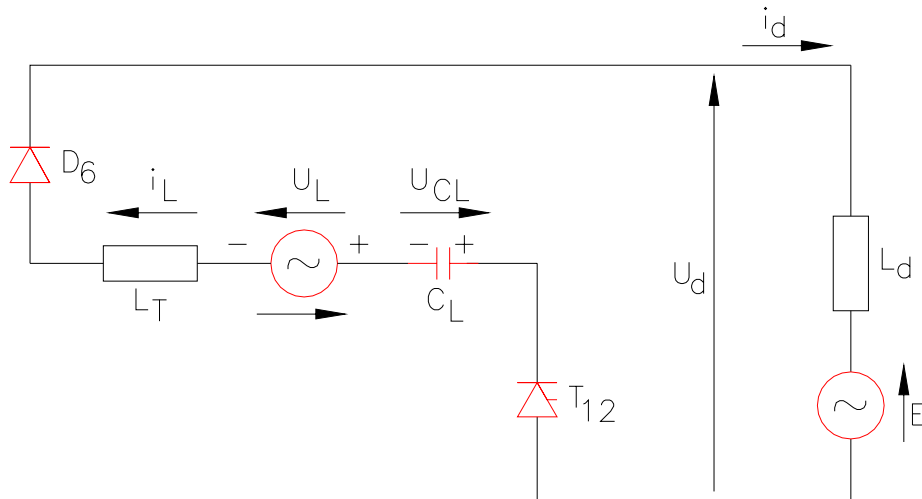


FIGURA 4.17 - CIRCUITO EQUIVALENTE PARA $t_1 < t < t_2$

Observando-se a FIGURA 4.17, pode-se perceber que o capacitor ao atingir a tensão da fonte em módulo, a corrente que circula no circuito se nula e conseqüentemente ocorre o bloqueio espontâneo de T_{12} . Este carregamento de capacitores nesta polaridade tem a finalidade de bloquear o tiristor principalmente T_1 , pelo disparo de T_{11} .

b - $t = t_3$: Nesse instante, o tiristor T_1 é disparado e a carga fica submetida à tensão da fonte U_L .

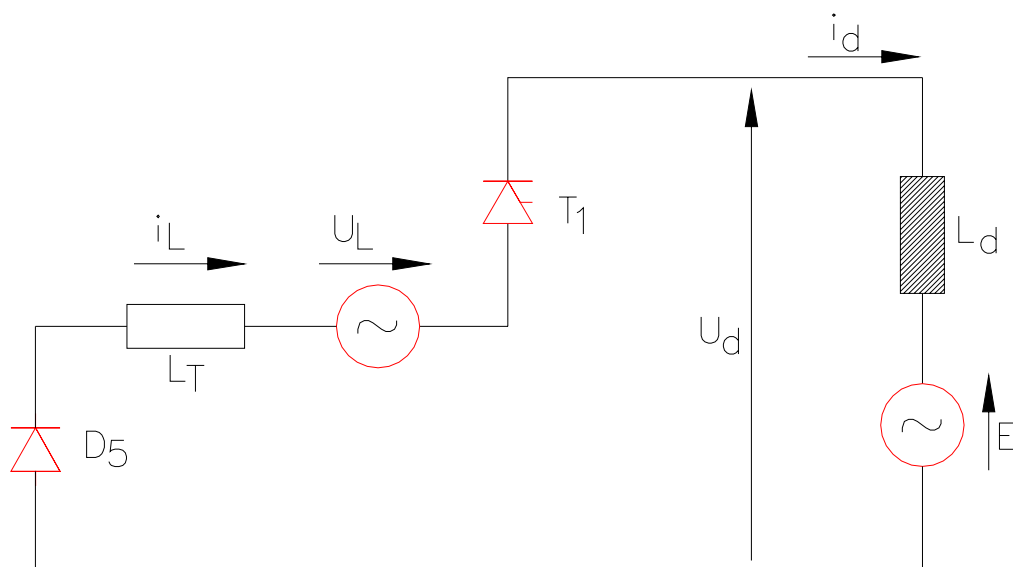
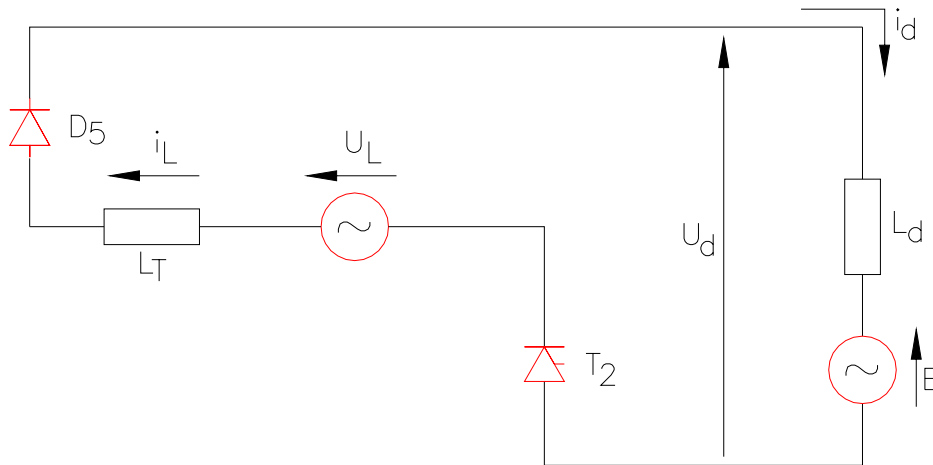
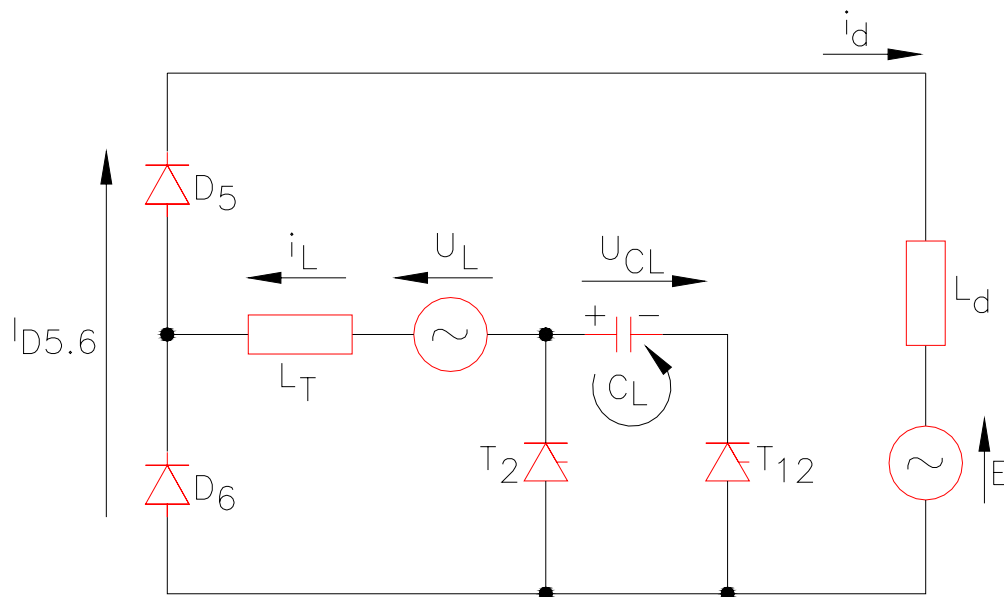


FIGURA 4.18 - CIRCUITO EQUIVALENTE PARA $t_3 < t < t_4$

c - $t = t_4$: Nesse instante, o tiristor T_{11} é disparado com a finalidade de bloquear o tiristor principal T_1 .

FIGURA 4.20 - CIRCUITO EQUIVALENTE PARA $t_6 < t < t_7$

e - $t = t_8$: Nesse instante, o tiristor T_{12} é disparado, com a finalidade de bloquear o tiristor principal T_2 .

FIGURA 4.21 - CIRCUITO EQUIVALENTE PARA $t_8 < t < t_9$

Observa-se que o capacitor C_L se descarrega através de T_2 provocando o seu bloqueio, e em seguida assume a tensão da fonte. Nesse instante, a corrente que circula no circuito se anula provocando o bloqueio espontâneo de T_{12} .

Com bloqueio de T_2 , os diodos D_5 e D_6 assumem instantaneamente a corrente da carga e a situação é análoga àquela descrita no item c.

Portanto os tiristores principais T_1 e T_2 podem ser bloqueados (pelos tiristores T_{11} e T_{12}) e iniciados a qualquer instante desde que exista polaridade propícia na fonte para o início da condução. Desta forma T_1 e T_2 junto com C_L , T_{11} e T_{12} podem ser representadas por tiristores de dois gatilhos, um para início, outro para bloqueio na condução, como ilustra a FIGURA 4.22.

4.4.4 - ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO CAPACITOR C_S

O circuito simplificado do LUB fica com a conclusão de 4.4.3, reduzido a:

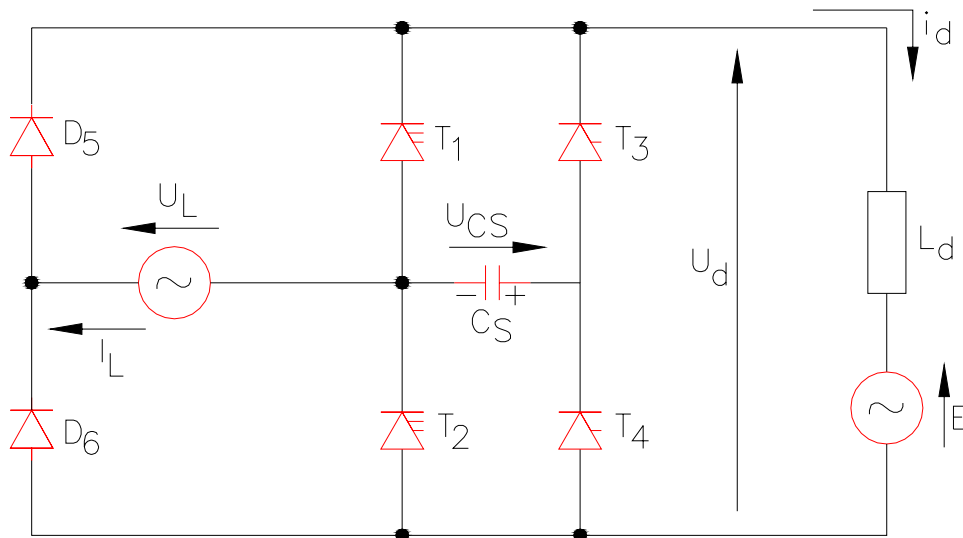


FIGURA 4.22 - CIRCUITO SIMPLIFICADO DO LUB

Tomando-se como base apenas o circuito simplificado da FIGURA 4.22, e o fato dos elementos T_1 e T_2 serem capazes de disparar e bloquear a qualquer instante, como demonstrado anteriormente, é feita análise do seu funcionamento:

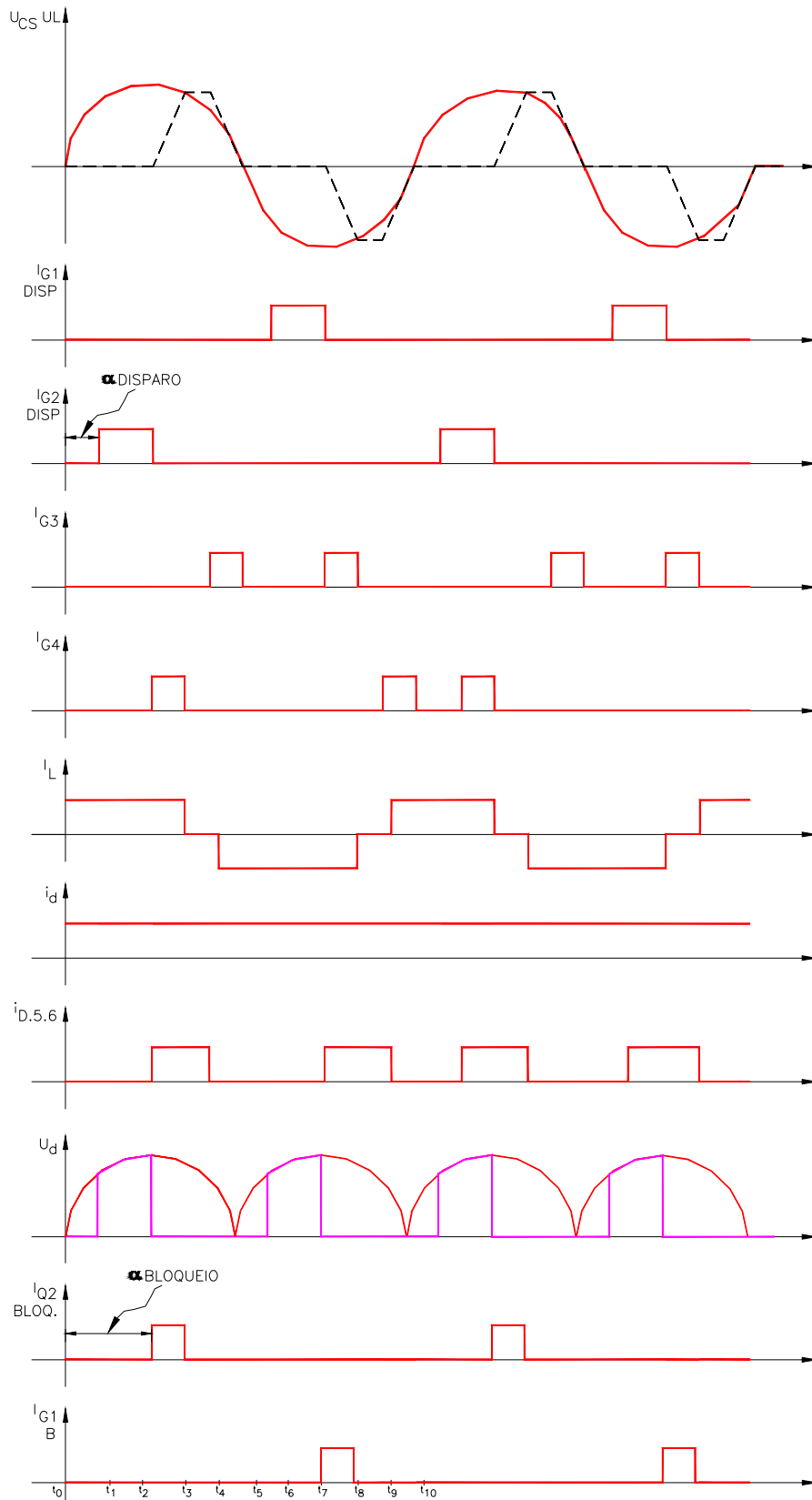


FIGURA 4.23 - FORMAS DE ONDAS REFERENTES AO CIRCUITO SIMPLIFICADO DO LUB

a - $t = t_1$: Instante no qual ocorre o disparo de T_2 (ver FIGURAS 4.22 e 4.23)

b - $t_1 < t < t_2$: Nesse intervalo de tempo, a carga fica submetida á tensão da fonte. O circuito equivalente para este intervalo é ilustrado na FIGURA 4.14.

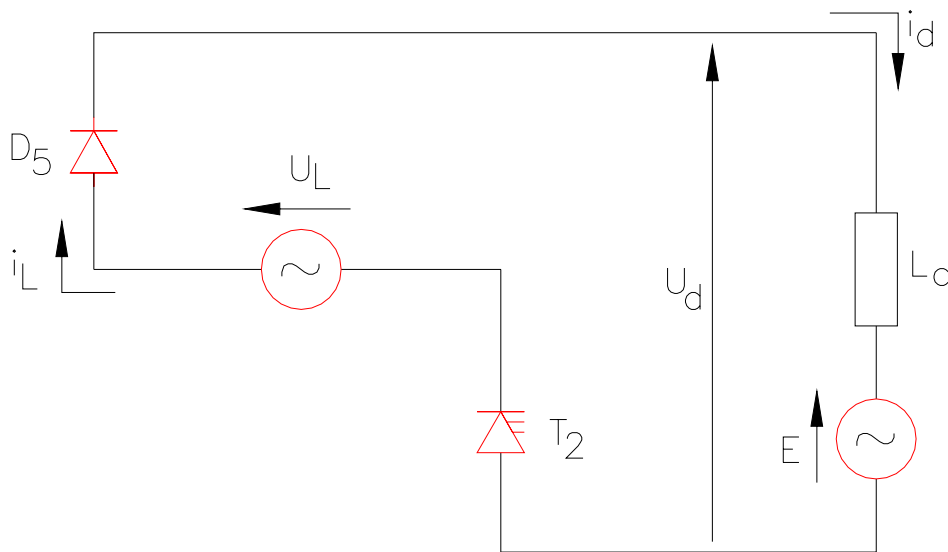


FIGURA 4.24 - CIRCUITO EQUIVALENTE PARA $t_1 < t < t_2$

c - $t = t_2$: Instante na qual ocorre o bloqueio de T_2 e o disparo de T_4 .

Supondo que o capacitor C_S se carrega instantaneamente, esse mesmo instante, os diodos D_5 e D_6 assumem a corrente da carga até $t = t_4$.

d - $t = t_3$: Instante no qual o capacitor C_S assume a tensão da rede provocando o bloqueio natural de T_4 .

e - $t = t_4$: Instante no qual ocorre o disparo de T_3 , afim de descarregar o capacitor C_S .

f - $t_4 < t < t_5$: O circuito equivalente para este intervalo, é ilustrado na FIGURA 4.25.

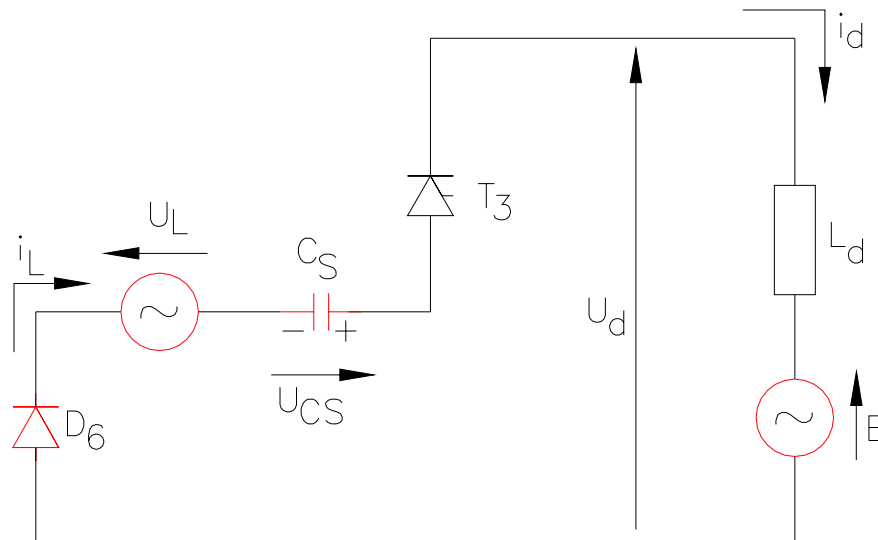


FIGURA 4.25 - CIRCUITO EQUIVALENTE PARA $t_4 < t < t_5$

g - $t = t_5$: Nesse instante o capacitor assume o valor da rede e a corrente se anula o que provoca o bloqueio natural de T_3 .

h - $t = t_6$: Instante no qual ocorre o disparo de T_1 .

i - $t_6 < t < t_7$: Nesse intervalo de tempo, a carga fica submetida a tensão da fonte. O circuito equivalente para esse intervalo é ilustrado na FIGURA 4.26.

j - $t = t_7$: Instante no qual ocorre o bloqueio de T_1 e disparo de T_3 .

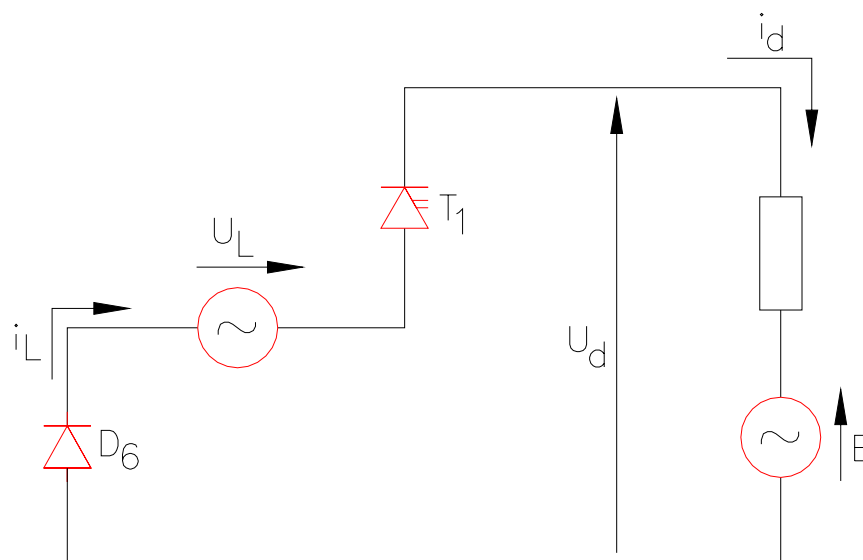


FIGURA 4.26 - CIRCUITO EQUIVALENTE PARA $t_6 < t < t_7$

Supondo que o capacitor C_S se carrega instantaneamente, nesse mesmo instante, os diodos D_5 e D_6 assumem a corrente da carga até $t = t_g$

$K - t = t_8$: Instante no qual o capacitor C_S assume a tensão da rede provocando o bloqueio natural de T_3 .

$b - t = t_9$: Instante no qual ocorre o disparo de T_4 a fim de descarregar o capacitor C_S .

$m - t_g < t < t_{10}$: O circuito equivalente para este intervalo, é ilustrado na FIGURA 4.27.

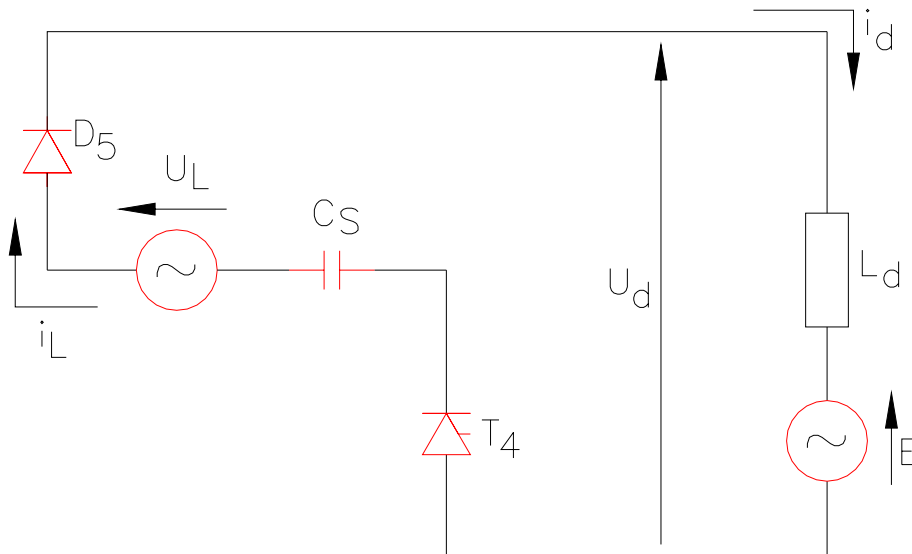


FIGURA 4.27 - CIRCUITO EQUIVALENTE PARA $t_g < t < t_{10}$

$n - t = t_{10}$: Nesse instante, o capacitor assume o valor da rede e a corrente se anula, provocando o bloqueio espontâneo de T_4 .

5 - BIBLIOGRAFIA

- [1] - Calculation of the electrical quantities of converters circuits shown in this case for a quenching, asymmetrical bridge circuits - LUB - IFAC symposium 1977.
- [2] - Transformer for traction duty - The evolution of transformer for thyristor drives - B.B.R. 12-77.
- [3] - Multi-Step line and Self-commutated single phase bridge converter - IFAC symposium 1977.
- [4] - Thyristor in Railway traction - Krvel & Kjaer Application notes.
- [5] - Simulador Analógico para Avaliação do Comportamento Transitório da Linha de Alimentação de um Sistema Monofásico de Tração Elétrica Controlada a Tiristores Souza, Carlos R. e Miskulin, Mauro S.
5º Congresso Brasileiro de Automática - 1984
Campina Grande Pg 338 a 343.
- [6] - Simplified Analysis and Design of an AC/DC power Conversion. System for traction drives. Bellini, A. and Figalli, G
IEE, PAS VOL IA-17 nº2 - March/April - 1982
Pg 167 a 173.
- [7] - Transformers and Smoothing Reactors for AC traction Vehicles.
Bohli, W.V.; Deny, H.M. and Muller, W
Brown Boveri Rev. 12-77 pag. 740-750.
- [8] - Brown Boveri Review
Dezembro de 1982, Volume 69 - Baden / Switzerland.
- [9] - Brown Boveri Review
Dezembro de 1977, Volume 64 - Baden / Switzerland.