

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
MINAS GERAIS - *CAMPUS* AVANÇADO ITABIRITO
ENGENHARIA ELÉTRICA

Vinícius do Prado Menezes

**OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE ACIONAMENTO DE MOTORES CC
PARA ABERTURA DE CAÇAMBA EM ESCAVADEIRAS ELÉTRICAS**

Itabirito - MG

2024

VINÍCIUS DO PRADO MENEZES

**OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE ACIONAMENTO DE MOTORES CC
PARA ABERTURA DE CAÇAMBA EM ESCAVADEIRAS ELÉTRICAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Minas Gerais - *Campus* Avançado Itabirito para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Me. Helvécio de Almeida Júnior

Itabirito - MG
2024

M543o Menezes, Vinícius do Prado.

Otimização do sistema de acionamento de motores CC para abertura de caçamba em escavadeiras elétricas / Vinícius do Prado Menezes. – 2024.
58 f. : il.

Orientador: Helvécio de Almeida Júnior.
Monografia (Graduação) – Instituto Federal Minas Gerais.
Campus Avançado Itabirito, 2024.

1. Escavadeira elétrica - Manutenção. 2. Caçambas (*Dipper trip*) - Retificação. 3. Retificador semicontrolado. I. Almeida Júnior, Helvécio. II. Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus* Avançado Itabirito. III. Título.

CDU 621.878.23

Catálogo: Andresa Aredes Ferreira CRB-6/MG-003262/0



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS
Campus Avançado Itabirito
Diretoria de Ensino
Docentes do Campus Avançado Itabirito
Rua José Benedito, 139 - Bairro Santa Efigênia - CEP 35450-000 - Itabirito - MG
- www.ifmg.edu.br

**Ata da Defesa de TCC do aluno Vinícius do Prado
Menezes, realizada em 17 de Maio de 2024**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Minas Gerais - Campus Avançado Itabirito para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Aprovado em 17/05/2024 pela banca examinadora:

Prof. Me. Helvécio de Almeida Júnior
Orientador (presidente da banca avaliadora)

Prof. Me. Gabriel Cambraia Soares
Membro avaliador

Prof. Me. William Caires Silva Amorim
Membro avaliador

Itabirito, 17 de maio de 2024.



Documento assinado eletronicamente por **Helvécio de Almeida Junior, Professor**, em 17/05/2024, às 18:46, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **William Caires Silva Amorim, Professor**, em 17/05/2024, às 18:47, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Gabriel Cambraia Soares, Professor EBTT**, em 17/05/2024, às 18:47, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador **1928027** e o código CRC **0C8F3685**.

Dedico esta monografia à memória de duas grandes pessoas: meu pai, Márcio Menezes e meu anjinho, Miguel Menezes. À minha querida esposa, Fátima Vasquez, meu amado filho Antônio Menezes e minha mãe, Irani Menezes.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pelo dom da vida e por estar sempre guiando e iluminando meus passos, nos momentos bons e difíceis da vida. Sou meramente grato pela minha esposa, pelo seu amor e por ser minha grande incentivadora a vencer todos os desafios, inclusive nas dificuldades ao qual passamos juntos durante estes últimos anos. Ao meu amado filho Antônio, que mesmo pequeno, consegue me passar energia e fôlego para vencer todos os obstáculos, além de proporcionar momentos de alegria e felicidade. Ao meu anjinho Miguel, por ser minha estrela, iluminando nossa família lá no céu, juntamente com seu vovô Márcio. A esse grande homem, meu pai, Márcio Menezes, que me ensinou a ter perseverança e humildade em todos os aspectos, no âmbito pessoal e profissional. A minha querida mãe, por nunca perder a fé durante todos os desafios e por me acolher com todo seu amor e carinho durante toda minha vida, principalmente neste período de graduação. Aos meus irmãos, cunhados e sobrinhos, por estarem sempre torcendo pelas minhas vitórias. Aos meus amigos e colegas da faculdade, especialmente os que fizeram parte da minha classe pelos ensinamentos e companheirismo. Aos professores pela paciência e doutrinação, principalmente ao professor Helvécio de Almeida Júnior, pela diretriz neste trabalho.

“Faça teu melhor, na condição que você tem, enquanto você não tem condições melhores, para fazer melhor ainda!”.

Mario Sergio Cortella

RESUMO

Este trabalho apresenta um modelo de utilização do conversor CA-CC para aplicação em sistema de abertura e fechamento da caçamba (*dipper trip*) utilizado em escavadeiras elétricas a cabo de grande porte da fabricante Caterpillar. Este sistema utiliza motor CC para girar um tambor composto por cabo de aço permitindo que o operador do equipamento despeje o material que está sendo carregado pelo implemento. O sistema original do equipamento é projetado por uma ponte retificadora não controlada, e composto por contatores, bancada de resistores, e demais dispositivos elétricos. Como este circuito utiliza chave contatora, e utiliza de forma constante, geralmente ocasiona desgastes excessivos das peças, riscos acidentais operacionais e alto custo de manutenção devido a substituições repentinas. Afim de reduzir estes problemas de manutenção / operação, foi desenvolvido um projeto elétrico de retificação CA-CC através de um simulador, empregando SCR's ao invés de diodos, e um circuito de controle, baseado no circuito integrado, no lugar do circuito de comando dos contatores.

O projeto desenvolvido condiz na substituição do sistema de retificação não controlada original do equipamento em un sistema semicontrolado. Um retificador semicontrolado é um dispositivo eletrônico que converte corrente alternada em corrente contínua, controlando parcialmente o processo de retificação. Ele é composto por componentes semicondutores, como o SCR. Este é um dispositivo semicondutor utilizado para controlar o fluxo de corrente elétrica em circuitos de corrente contínua. Quando uma pequena corrente é aplicada ao terminal da porta, o SCR é ativado. Uma vez ativado, o SCR continua conduzindo corrente mesmo que o sinal de controle seja removido, até que a corrente de ânodo seja reduzida abaixo de um certo nível, ou até que a polaridade da tensão seja revertida. Isso torna o SCR útil em aplicações de controle de potência, como em retificadores e controle de velocidade de motores. Para que haja o disparo para os SCR's do projeto, utiliza-se um circuito integrado TCA 785, permitindo o controle eficiente da condução de corrente. Além disso, oferece proteção contra sobrecorrente e outras condições de falha, garantindo operações seguras e confiáveis em sistemas de retificação e controle de potência.

Palavras-chave: Retificador semicontrolado, SCR, TCA 785, *dipper trip*, escavadeira.

ABSTRACT

This work presents a model for using the AC-DC converter for application in the bucket opening and closing system (*dipper trip*) used in large cable electric excavators from the manufacturer Caterpillar. This system uses a DC motor to rotate a drum made up of a steel cable, allowing the equipment operator to dump the material being loaded by the implement. The original equipment system is designed by an uncontrolled rectifier bridge, and consists of contactors, a resistor bank, and other electrical devices. As this circuit uses a contactor switch, and is used constantly, it generally causes excessive wear on parts, accidental operational risks and high maintenance costs due to sudden replacements. In order to reduce these maintenance/operation problems, an AC-DC rectification electrical project was developed through a simulator, using SCR's instead of diodes, and a control circuit, based on the integrated circuit, instead of the control circuit of the contactors.

The project developed involves replacing the equipment's original uncontrolled rectification system with a semi-controlled system. A semi-controlled rectifier is an electronic device that converts alternating current into direct current, partially controlling the rectification process. It is composed of semiconductor components, such as the SCR. This is a semiconductor device used to control the flow of electrical current in direct current circuits. When a small current is applied to the gate terminal, the SCR is activated. Once activated, the SCR continues to conduct current even if the control signal is removed, until the anode current is reduced below a certain level, or until the voltage polarity is reversed. This makes the SCR useful in power control applications, such as rectifiers and motor speed control. To trigger the project's SCRs, a TCA 785 integrated circuit is used, allowing efficient control of current conduction. Additionally, it offers protection against overcurrent and other fault conditions, ensuring safe and reliable operations in rectification and power control systems.

Keywords: Semi-controlled rectifier, SCR, TCA 785, dipper trip, excavator.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Carregadeira Caterpillar 994K.	13
Figura 2 – Caminhão Caterpillar 777G.	13
Figura 3 – Escavadeira Caterpillar 7295.	14
Figura 4 – DPT (Transformador de Potência Principal).	14
Figura 5 – Transformador de abertura de caçamba DTT: Visão interna	15
Figura 6 – Componentes da caçamba: (1) Portinhola; (2) Barra de abertura; (3) Alavanca de abertura	16
Figura 7 – Abertura da caçamba: (A) Alavanca de abertura da caçamba; (B) Caçamba aberta	16
Figura 8 – Contator de abertura de caçamba	17
Figura 9 – Contator danificado	17
Figura 10 – Retificador trifásico em ponte	20
Figura 11 – Formas de onda e tempo de condução dos diodos	21
Figura 12 – (a) retificador trifásico semicontrolado; (b) retificador trifásico controlado	22
Figura 13 – Ponte trifásica mista	23
Figura 14 – Forma de onda quando $\alpha = 0^\circ$	25
Figura 15 – Forma de onda quando $\alpha = 30^\circ$	26
Figura 16 – Forma de onda quando $\alpha = 90^\circ$	27
Figura 17 – TCA 785 e suas portas correspondentes	28
Figura 18 – Formas de onda das portas do TCA 785	30
Figura 19 – Configuração dos pinos e símbolo do SCR	31
Figura 20 – Curva característica de um SCR real	32
Figura 21 – Circuito para análise de disparo do SCR	33
Figura 22 – Curva representativa do atraso no disparo do SCR	34
Figura 23 – Circuito para análise de bloqueio do SCR	34
Figura 24 – Conjunto de abertura da caçamba	36
Figura 25 – Transformador DTT e suas ligações	36
Figura 26 – Ligação elétrica da bancada de resistores RE10 e seus respectivos valores de regulação	37
Figura 27 – Controle do <i>joystick</i> do operador	37
Figura 28 – Esquemático ligação sistema de abertura de caçamba 7295	38
Figura 29 – Circuito retificador não controlado da escavadeira 7295, desenvolvido no software <i>Proteus</i>	39
Figura 30 – Circuito de disparo dos gatilhos	41
Figura 31 – Saída para disparo do <i>gate</i> de cada SCR por fase	43
Figura 32 – Sinais de tensão retificador não controlado	45
Figura 33 – Valores correspondentes de tensão de pico de cada sinal	46
Figura 34 – Velocidade do motor durante retenção da caçamba	47

Figura 35 – Velocidade do motor durante abertura da caçamba	47
Figura 36 – Tensão de sincronismo do TCA 785	48
Figura 37 – Geração de rampa dente de serra dos capacitores por fase	49
Figura 38 – Cruzamento entre sinais capacitivos por fase e sinal do potenciômetro de <i>gate</i>	50
Figura 39 – Correlação entre o sinal de disparo e sinal trifásico da fonte	51
Figura 40 – Sinal de saída na carga comparado ao sinal trifásico da fonte	51
Figura 41 – Velocidade do motor nominal durante retenção da caçamba do circuito semi- controlado	52
Figura 42 – Sinal de disparo para $\alpha=60^\circ$	52
Figura 43 – Sinal de saída da carga para $\alpha=60^\circ$	53
Figura 44 – Velocidade do motor para $\alpha=60^\circ$	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CI - Circuito Integrado

PLC - *Programmable Logic Controller* ou Controlador Lógico Programável

IGBT - *Insulated Gate Bipolar Transistor* ou Transistor Bipolar de Porta Isolada

DPT - *Drive main power transformer* ou Transformador de Potência Principal

DTT - *Dipper Trip Transformer* ou Transformador de Abertura da Caçamba

PWM - *Pulse Width Modulation* ou Modulação por Largura de Pulso

DTR - *Dipper Trip Rectifier* ou Retificador de Abertura da Caçamba

SP - *Surge Suppressor* ou Supressor de Surto

SCR - *Silicon Controlled Rectifier* ou Retificador Controlado de Silício

DTC - *Dipper Trip D/C Contactor* ou Contator D/C de Abertura da Caçamba

DTFR - *Dipper Trip Field Resistors* ou Resistores de Campo da Abertura da Caçamba

DTM - *Dipper Trip Motor* ou Motor de Abertura da Caçamba

GTO - *Gate Turn Off* ou Desligamento pelo Gatilho

MCT - *Metal-oxide-semiconductor Control Thyristor* ou Tiristor Controlado por Metal-óxido-semicondutor

IRM - *Maximum Reverse Current* ou Corrente Reversa Máxima

ZAC - *A-C Control Cabinet* ou Gabinete de Controle A-C

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivos	18
1.1.1	<i>Objetivo geral</i>	18
1.1.2	<i>Objetivos específicos</i>	18
1.2	Justificativa	18
1.3	Organização do Texto	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	Retificadores CA-CC	20
2.1.1	<i>Retificadores trifásicos com diodos</i>	20
2.1.2	<i>Retificadores trifásicos controlados</i>	21
2.2	TCA 785	27
2.3	SCR	30
2.4	Sistema de abertura da caçamba (<i>dipper trip</i>) em escavadeira Caterpillar 7295	35
3	METODOLOGIA	39
3.1	Circuito retificador não controlado a diodo utilizado na escavadeira a cabo 7295	39
3.2	Projeto do circuito retificador semicontrolado aplicável à escavadeira 7295	40
4	RESULTADOS	45
4.1	Retificador trifásico não controlado - circuito original do equipamento	45
4.2	Retificador trifásico semicontrolado - circuito projetado	48
5	CONCLUSÃO	54
	REFERÊNCIAS	55
	ANEXO A – ESQUEMÁTICO DO PROJETO NO SOFTWARE <i>PROTEUS</i>	56

1 INTRODUÇÃO

A mineração é uma atividade que demanda grandes quantidades de trabalho físico e muitas vezes envolve condições perigosas para os trabalhadores. Portanto, a automação e a mecanização foram naturalmente introduzidas para aumentar a eficiência, melhorar a segurança e reduzir os custos. Desde a Revolução Industrial, a mineração tem sido uma das indústrias líderes na adoção de tecnologias avançadas para otimizar seus processos. A demanda por remover terra, perfurar rochas e transportar grandes volumes de minério, entre outras tarefas, começou a exceder a capacidade dos seres humanos, mesmo com o uso de máquinas manuais apropriadas para mineração.

A história da mineração é marcada pela constante busca por melhorias tecnológicas para aumentar a eficiência e a segurança das operações. Enquanto no passado as máquinas a vapor foram um marco na mecanização da mineração, atualmente vemos uma ampla gama de tecnologias avançadas sendo aplicadas, como veículos autônomos, sistemas de monitoramento remoto, drones, inteligência artificial e análise de dados para otimizar os processos de extração, transporte e processamento de minerais. Essas inovações têm como objetivo aumentar a produtividade, reduzir os custos operacionais e minimizar os impactos ambientais.

Devido às demandas extremas e às condições muitas vezes adversas encontradas nas operações de mineração, as máquinas utilizadas devem ser robustas, poderosas e de alta qualidade. Elas precisam lidar com grandes volumes de material, operar em terrenos difíceis e suportar cargas pesadas. Além disso, a confiabilidade é fundamental, pois qualquer tempo de inatividade pode resultar em perdas significativas de produção. Por isso, as empresas de mineração investem pesadamente em equipamentos de ponta e em manutenção regular para garantir o desempenho ideal de suas máquinas.

Os equipamentos móveis são separados em máquinas de infraestrutura (tratores e motoniveladoras), transporte (caminhões) e máquinas de carregamento (carregadeiras e escavadeiras). Os tratores de esteiras são equipamentos que se baseiam em sistemas de transmissão mecânica para movimentar as esteiras. Eles são úteis em áreas de difícil acesso, especialmente em atividades de escavação e terraplanagem, além de auxiliarem no reboque de outras máquinas. Dessa forma, essa máquina complementa o desempenho de outros equipamentos utilizados na mineração.

A carregadeira, por sua vez, é utilizada em diversos setores e tem a função de coletar e transportar uma grande quantidade de materiais soltos, representado na Figura 1. Esse equipamento pode ser utilizado em conjunto com tratores, escavadeiras e caminhões fora de estrada, proporcionando eficiência energética e praticidade no seu uso. Este equipamento é robusto e eficiente, sendo de grande importância na mineração. Ele é ideal para nivelar, alisar ou movimentar materiais, podendo ser utilizada em diversos tipos de terreno. É uma ferramenta indispensável na fase posterior à extração, pois auxilia no processo de recuperação da área explorada e na reposição adequada do solo.

Figura 1 – Carregadeira Caterpillar 994K.



Fonte: CATERPILLAR, 2022.

Os caminhões fora de estrada frequentemente desempenham um papel crucial na mineração, demonstrado na Figura 2. Afinal, ao utilizá-los, é possível transportar uma grande quantidade de resíduos de um local a outro em questão de minutos. De maneira geral, são empregados em trabalhos de terraplanagem, demolição e escavação, pois são essenciais para o transporte de resíduos. Assim, o caminhão fora de estrada é altamente versátil, especialmente devido à sua balsa articulada, o que torna o trabalho mais prático. É importante ressaltar que é recomendável utilizar uma escavadeira para depositar os resíduos em sua balsa.

Figura 2 – Caminhão Caterpillar 777G.



Fonte: CATERPILLAR, 2022.

As escavadeiras, como o próprio nome indica, tem como foco a fase de escavação da atividade mineradora, unindo força, agilidade e precisão. Tem como função executar tarefas de drenagem e apoio em depósitos de resíduos; escavar e mover grandes quantidades de solo; drenar e dragar canais e riachos; transportar e quebrar pedras; carregar caminhões e remover detritos (CATERPILLAR, 2011).

Figura 3 – Escavadeira Caterpillar 7295.



Fonte: CATERPILLAR, 2011.

A escavadeira a cabo modelo 7295, vide Figura 3 , possui diversos subsistemas responsáveis por movimentos e trabalhos do equipamento, grande parte dos acionamentos são eletricamente controlados por um PLC (Controlador Lógico Programável). O equipamento é alimentado com uma tensão CA de 7.200V, trifásico, frequência de 60 Hz e com potência de pico de 2.152 kW. Este equipamento dispõe de um transformador principal (Figura 4), com a função de abaixar a tensão de 7.200V para 900V para alimentar os IGBT's (Transistor Bipolar de Porta Isolada) de entrada do inversor; e demais transformadores auxiliares, com aplicabilidade para iluminação, para o circuito de comando, e para o sistema de abertura de caçamba (*dipper trip*), este último mostrados nas Figura 5 (CATERPILLAR, 2011).

Figura 4 – DPT (Transformador de Potência Principal).



Fonte: Próprio autor.

Figura 5 – Transformador de abertura de caçamba DTT: Visão interna



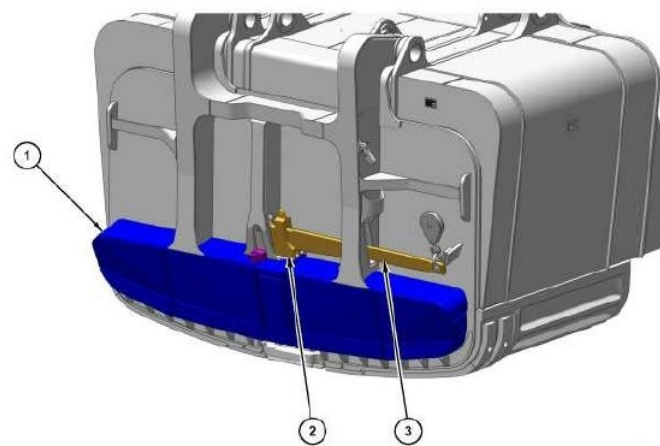
Fonte: Próprio autor.

O equipamento subdivide-se em diversos sistemas, sendo os principais: Elevação da caçamba, escavação da caçamba, locomoção do equipamento, giro do carro superior, todos estes movimentados através de motores de indução trifásicos. Diferentemente dos demais sistemas da escavadeira, o processo de abertura de caçamba é realizado através de motor de corrente contínua. Para isto, o equipamento utiliza retificação por ponte de diodos para converter o sinal de tensão de 110V oriundos do secundário do Transformador de Abertura da Caçamba (DTT) em tensão contínua (CATERPILLAR, 2011).

O sistema é basicamente composto pela ponte retificadora (DTR's), pelos supressores de surto (SP's), contator de acionamento (DTC), bancada de resistores (DTFR). Esta bancada de resistores, para este circuito, tem a finalidade de regular a velocidade de saída do motor CC no qual seu eixo de saída é acoplado num tambor de cabo de aço, acionando a portinhola da caçamba, fazendo com que a mesma abra no momento de descarregamento de material (Figuras 6 e 7).

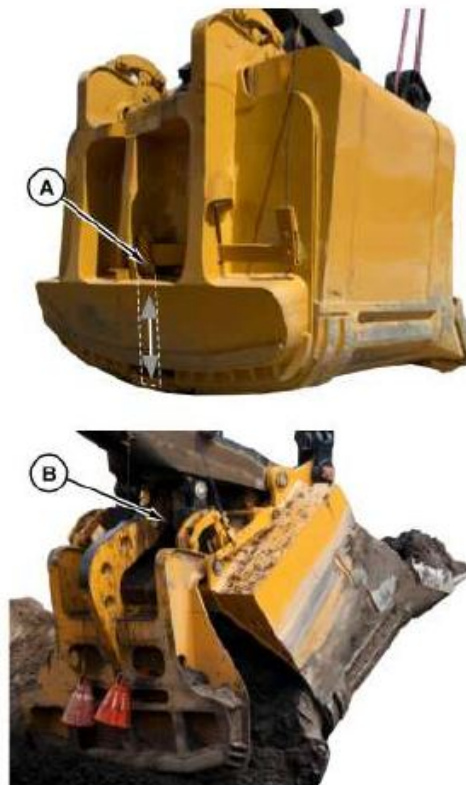
Ao solicitar a abertura da caçamba, o motor enrola o cabo de aço conectado à barra de abertura (2). Durante este movimento mecânico, a alavanca de abertura (3) é destravada, permitindo a abertura da portinhola (1) da caçamba (Figura 6). A Figura 7 retrata o destravamento da alavanca de abertura (A) e o movimento da portinhola da caçamba se abrindo (B), descarregando material. Para efetuar este movimento, o operador do equipamento realiza um comando manual no *joystick* da cabine, permitindo o fechamento do contator de abertura da caçamba. (CATERPILLAR, 2022)

Figura 6 – Componentes da caçamba: (1) Portinhola; (2) Barra de abertura; (3) Alavanca de abertura



Fonte: CATERPILLAR, 2022.

Figura 7 – Abertura da caçamba: (A) Alavanca de abertura da caçamba; (B) Caçamba aberta



Fonte: CATERPILLAR, 2022.

O uso contínuo deste contator pode levar a desgastes mecânicos na sua estrutura. Esse desgaste resulta em substituições frequentes e até mesmo antecipadas do equipamento, além de

aumentar os riscos de acidentes tanto para os usuários que operam o equipamento quanto para os que realizam a sua manutenção. Em média, este contator deveria obter 5000 horas de operação, porém esta vida útil é reduzida para 1000 horas de utilização.

Para mitigar esses problemas, é importante implementar medidas de manutenção preventiva, como inspeções regulares e trocas de peças desgastadas antes que causem problemas maiores, como demonstrados nas Figuras 8 e 9 (CATERPILLAR, 2022). Este trabalho propõe um modelo de retificação CA-CC controlada, eliminando principalmente a utilização destes contatores, proporcionando ganho produtivo e redução de custos materiais.

Figura 8 – Contator de abertura de caçamba



Fonte: Próprio autor.

Figura 9 – Contator danificado



Fonte: Próprio autor.

1.1 Objetivos

1.1.1 *Objetivo geral*

Elaborar um modelo de conversão CA-CC para aplicação no sistema de abertura da caçamba de escavadeiras a cabo, em substituição do modelo utilizado no mesmo, com o intuito de reduzir a frequência de troca de componentes e o constante ajuste na velocidade de saída do motor.

1.1.2 *Objetivos específicos*

- **Melhoria da confiabilidade:** Desenvolver um sistema de conversão CA-CC mais confiável, reduzindo a frequência de falhas e, conseqüentemente, a necessidade de troca de componentes;
- **Estabilidade de operação:** Projetar um sistema que mantenha a estabilidade na operação do motor, minimizando os ajustes necessários na velocidade de saída. Isso contribui para um funcionamento mais consistente e eficiente da escavadeira;
- **Aumento da vida útil dos componentes:** Desenvolver um modelo que reduza o desgaste dos componentes do sistema de abertura da caçamba, prolongando sua vida útil e minimizando a necessidade de manutenção corretiva;
- **Facilidade de ajuste e manutenção:** Criar um sistema de fácil ajuste e manutenção, permitindo uma configuração simples da velocidade de operação e simplificando os procedimentos de manutenção preventiva;
- **Compatibilidade com padrões de segurança:** Garantir que o novo modelo de conversão atenda aos padrões de segurança exigidos para operações em escavadeiras, protegendo tanto os operadores quanto o equipamento contra possíveis falhas ou acidentes.

1.2 Justificativa

O sistema de abertura de caçamba em escavadeiras a cabo utiliza motor CC para acionar o dromo de abertura, pois necessita de ajuste rápido do torque de saída do motor. Como é um modelo mais arcaico, emprega componentes de porte e potência elevados, com maior risco de ocorrer acidentes pessoais e materiais. Alguns clientes que possuem o equipamento, adquirem mais de uma unidade do contator para evitar perdas de tempo de reparo.

Neste projeto será substituído o método de conversão CA-CC de ponte retificadora composta por diodos para uma retificação semicontrolada, com o controle de disparos dos SCR's efetuado por TCA 785 em cada fase do circuito.

1.3 Organização do Texto

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. No primeiro capítulo, é realizada a introdução do trabalho, trazendo a descrição da escavadeira a cabo Caterpillar 7295 e dos componentes do sistema de abertura da caçamba, o objetivo geral, o objetivo específico e a justificativa para elaboração do projeto.

O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre os componentes principais que compõem o projeto. Cita também sobre retificadores CA-CC, enaltecendo principalmente os retificadores trifásicos não controlados e semicontrolados, além de explicar em detalhes do funcionamento elétrico do sistema de abertura da caçamba da escavadeira 7295.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia usada para o desenvolvimento do protótipo do projeto, bem como foi realizada sua montagem e configuração para seu funcionamento, sendo demonstrados a realização do protótipo no software *Proteus*.

O quarto capítulo expõe os resultados mediante as simulações realizadas no simulador *Proteus*, apontando cada detalhe da elaboração e compreensão do sistema projetado.

O quinto capítulo apresenta a conclusão do trabalho, apontando o que houve de mais relevante durante o desenvolvimento deste trabalho e sugerindo propostas de continuidades para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os conceitos de retificadores trifásicos CA-CC, TCA 785, SCR e sistema de abertura de caçamba *dipper trip*.

2.1 Retificadores CA-CC

Os retificadores CA-CC tem por objetivo obter um sinal de saída contínua a partir de uma fonte de corrente alternada. Para realizar esta conversão são utilizadas chaves eletrônicas como diodos, mas estas não permitem controlar o ângulo de disparo, por isso é necessário utilizar elementos mais complexos como tiristores. (RUIZ, 2016).

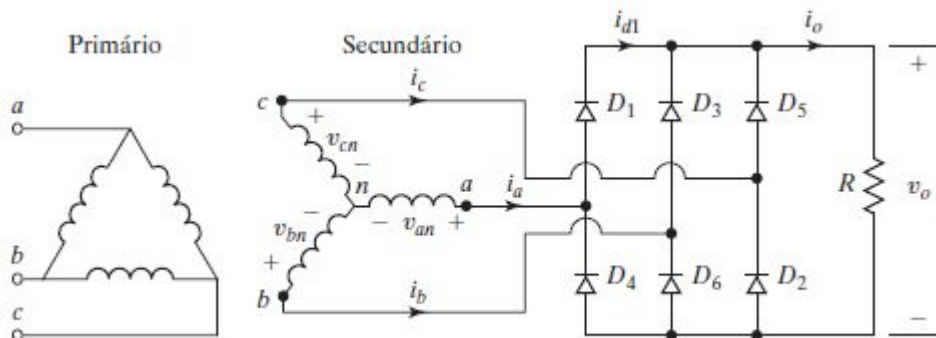
Estes circuitos que utilizam estes dispositivos de controle do ângulo de disparo são denominados de retificadores controlados. Há também circuitos retificadores que possuem um conjunto de elementos de comutação controlados e não controlados, chamados de retificadores semicontrolados (RUIZ, 2016).

2.1.1 Retificadores trifásicos com diodos

Os diodos têm uma aplicação abrangente em retificadores. Um retificador é um circuito que transforma um sinal de corrente alternada em um sinal que flui em uma única direção, ou seja, é um conversor de corrente alternada para contínua (RASHID, 2014).

Considerando v_s como uma tensão de entrada de corrente alternada, a forma de onda da tensão de saída v_o tem o mesmo formato, entretanto, a parte negativa será representada como um valor positivo, ou seja, $v_o = |v_s|$, para retificador de onda completa. Existem duas classificações para os retificadores a diodos: monofásicos e trifásicos (RASHID, 2014). Para este trabalho, iremos destacar os retificadores trifásicos.

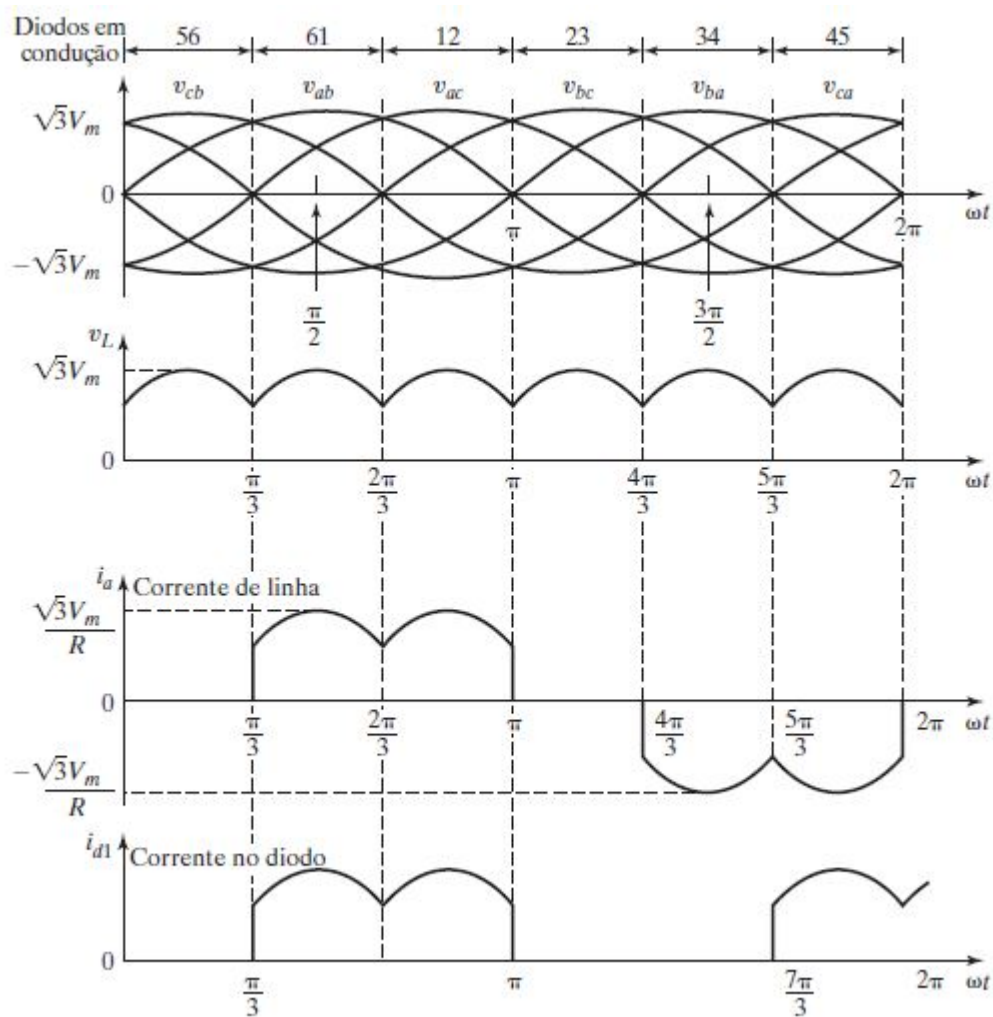
Figura 10 – Retificador trifásico em ponte



Fonte: RASHID, 2014.

Em cargas de alta potência, o retificador trifásico em ponte é comumente utilizado, sendo determinado como onda completa. Ele pode operar com ou sem um transformador e apresenta uma ondulação de seis pulsos na tensão de saída. Os diodos são numerados de acordo com a sequência de condução (vide Figura 10) , com cada um conduzindo por 120° , nesta sequência: D1-D2, D3-D2, D3-D4, D5-D4, D5-D6 e D1-D6, sendo que o par de diodos conectado entre as fases de alimentação com a maior tensão instantânea será responsável pela condução, e sua tensão de linha é $\sqrt{3}$ vezes a tensão de fase da fonte (RASHID, 2014). O modelo de circuito retificador trifásico com diodos e sua forma de onda estão demonstrados nas Figuras 10 e 11.

Figura 11 – Formas de onda e tempo de condução dos diodos



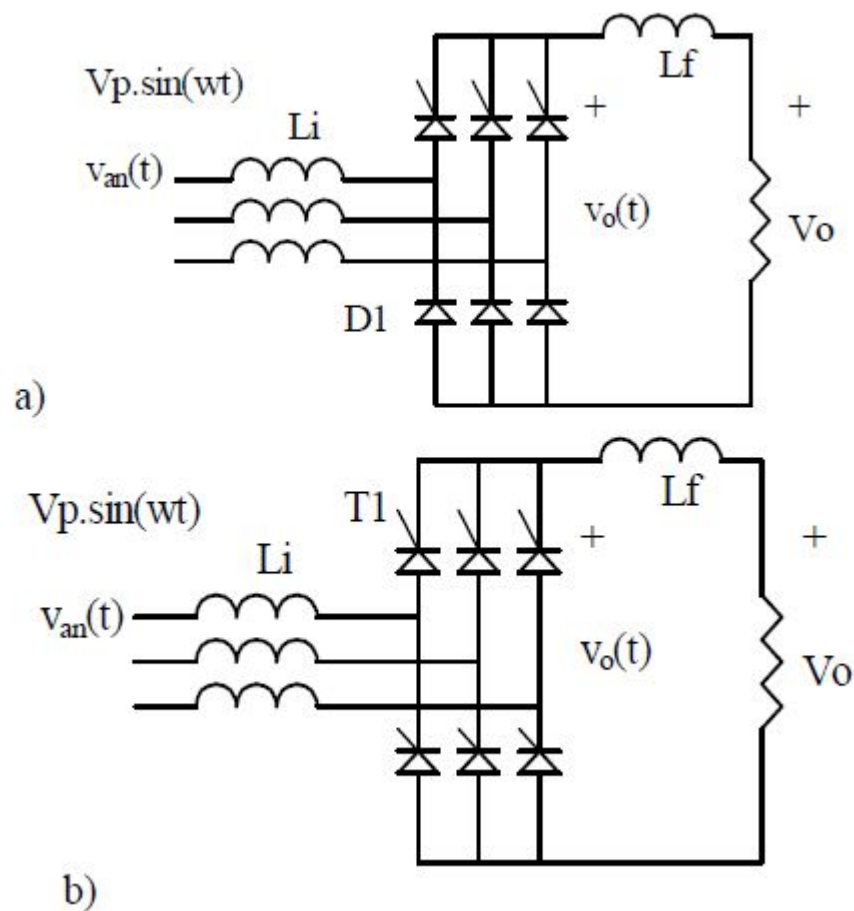
Fonte: RASHID, 2014.

2.1.2 Retificadores trifásicos controlados

Os retificadores trifásicos CA-CC que utilizam tiristores para conversão da corrente elétrica geralmente utilizam-se dois modelos: (a) retificadores semicontrolados e (b) retifica-

dores totalmente controlados, como demonstrado na Figura 12. Observe que a diferença entre retificadores controlados, semicontrolados e não controlados é o tipo de chave usada. Assim, no tipo não controlado existem apenas dispositivos não controlados, que são diodos, enquanto no tipo controlado existem apenas tiristores, cuja condução pode ser controlada por um gatilho. No retificador semicontrolado, existe uma combinação de dispositivos controlados e não controlados (POMILIO, 1998).

Figura 12 – (a) retificador trifásico semicontrolado; (b) retificador trifásico controlado



Fonte: POMILIO, 1998

Além disso, no caso desses retificadores, a versão semicontrolada não possibilita a reversão da tensão instantânea no barramento CC. É viável instalar um diodo de roda livre que entra em funcionamento quando essa tensão é anulada. Na falta do diodo, ocorre condução através do último tiristor acionado e do diodo do mesmo ramo (POMILIO, 1998).

Para um ângulo de partida de zero, as formas de onda são idênticas às do retificador de diodo. A faixa de controle varia de 0° a 60° . É importante notar que a condução do diodo não depende do ângulo de partida. A forma de onda da corrente na rede é assimétrica, significando que há desequilíbrio entre as fases do sistema trifásico. Esse desequilíbrio pode resultar em

componentes espectrais de ordem par, o que não é desejável em sistemas de potência, pois pode causar distorção harmônica e afetar o funcionamento de equipamentos sensíveis. A presença de componentes espectrais de ordem par pode levar a uma série de problemas, como aumento das perdas de energia nos condutores, aquecimento excessivo de transformadores e motores, interferência em equipamentos de comunicação e controle, entre outros. Em sistemas de retificadores trifásicos controlados, é essencial garantir uma operação balanceada e controlada para evitar a geração de componentes harmônicos indesejáveis na rede elétrica. Isso pode ser alcançado por meio de algoritmos de controle sofisticados e monitoramento contínuo do sistema para detectar e corrigir qualquer desequilíbrio que possa surgir. (POMILIO, 1998). A tensão média no barramento CC é dado por:

$$V_{medio} = \frac{3}{2\pi} V_{linha} (1 + \cos \alpha) \quad (2.1)$$

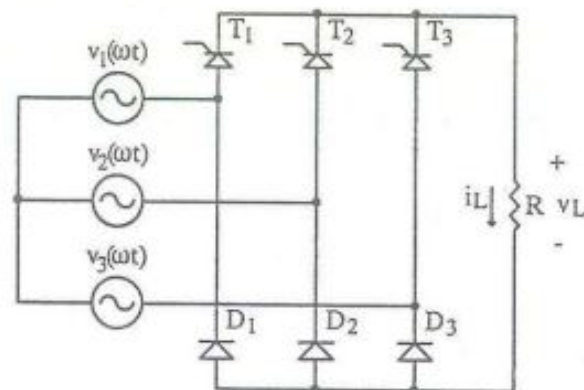
Sendo,

- V_{medio} : Tensão média no barramento de saída CC;
- V_{linha} : Tensão de linha trifásica;
- α : ângulo de disparo.

Em aplicações onde não se deseja operação em dois quadrantes, é aconselhável utilizar o retificador semicontrolado em vez do totalmente controlado. Isso reduz o custo do conversor por várias razões: os circuitos de controle são mais simples e apenas 3 tiristores são utilizados (BARBI, 2005).

Para analisarmos as próximas formas de onda, utilizaremos a Figura 13, onde destacam-se os tiristores T_1 , T_2 e T_3 e os diodos D_1 , D_2 e D_3

Figura 13 – Ponte trifásica mista



Fonte: BARBI, 2005.

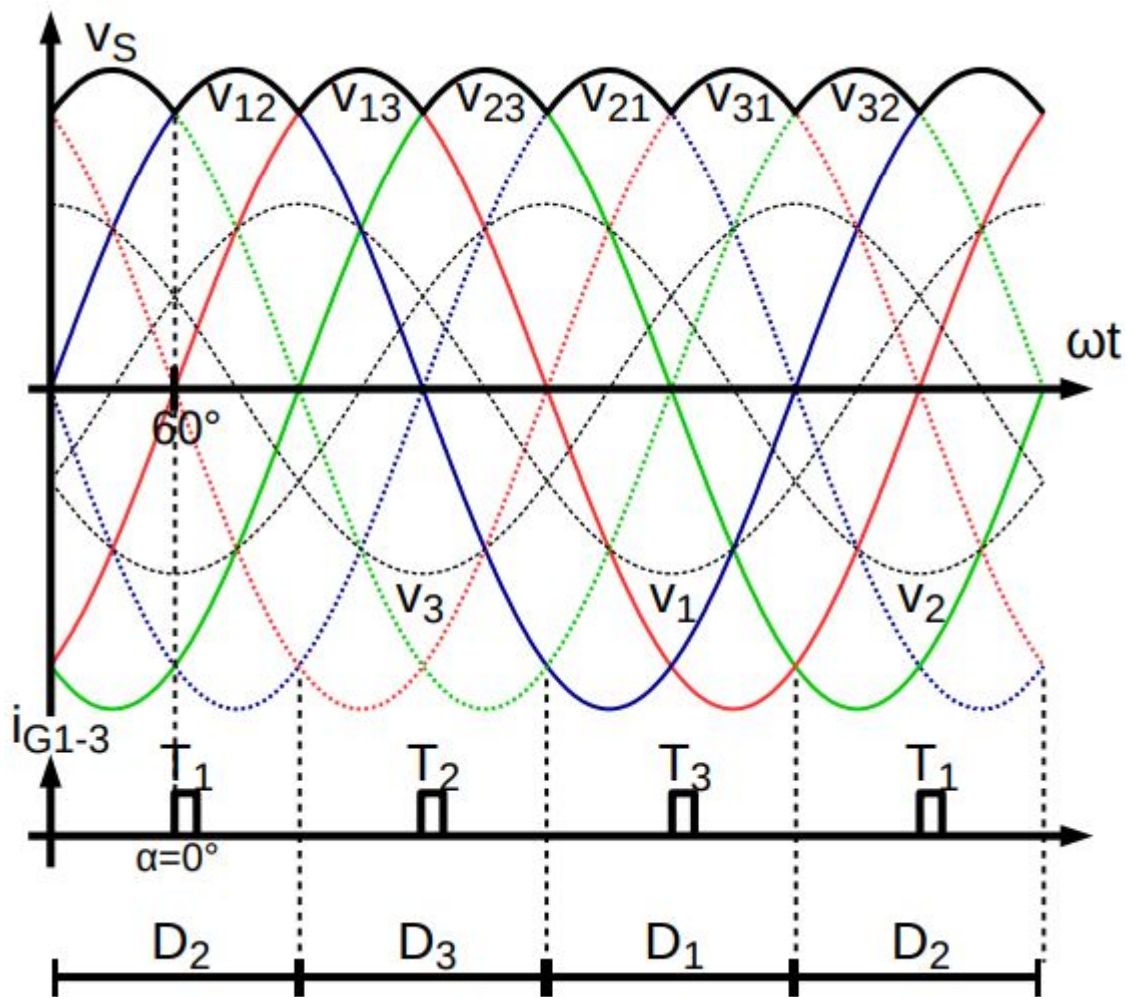
As Figuras 14, 15 e 16 representam as formas de onda correspondentes para cada valor de α , e como o circuito retificador irá se comportar para tais valores. Nestes gráficos estão demonstrados as tensões entre fases (V_{12} , V_{13} , V_{23} , ...), pulso retangular de disparo de cada SCR (T_1 , T_2 e T_3) e os diodos (D_1 , D_2 e D_3), conforme circuito da Figura 13 (LIBERT, 2007).

A utilização de diodos na metade inferior da ponte retificadora, em vez de SCR's podem proporcionar vantagens em termos de custos em algumas aplicações específicas. Aqui estão algumas razões pelas quais isso pode ser verdade (AHMED, 2000):

- **Custo inicial mais baixo:** Os diodos são dispositivos semicondutores mais simples e, geralmente, mais baratos do que os SCRs. Portanto, a utilização de diodos na metade inferior da ponte pode resultar em economia de custos na aquisição dos componentes.
- **Menor complexidade de controle:** Os diodos não necessitam de circuitos de controle complexos como os SCRs. Isso pode reduzir os custos associados aos circuitos de controle e à eletrônica de potência.
- **Facilidade de manutenção:** Como os diodos têm menos partes móveis e são mais simples em termos de design, eles podem ser mais fáceis de manter e substituir em caso de falha, o que pode reduzir os custos de manutenção ao longo do tempo.

No entanto, é importante notar que a escolha entre diodos e SCR's depende das necessidades específicas da aplicação. Em algumas situações, os SCR's podem oferecer benefícios adicionais, como controle de potência mais preciso e capacidade de operação em modo de comutação suave. Portanto, ao considerar os custos, também é essencial avaliar outros aspectos, como desempenho, eficiência e requisitos de controle do sistema. Contudo, a frequência de ondulação na saída é apenas três vezes a frequência da linha. A tensão de saída inclui uma contribuição adicional da metade inferior não controlada da ponte. Os SCR's entram no estado ligado quando são ativados e voltam a ficar desligados devido ao disparo de outro SCR (AHMED, 2000).

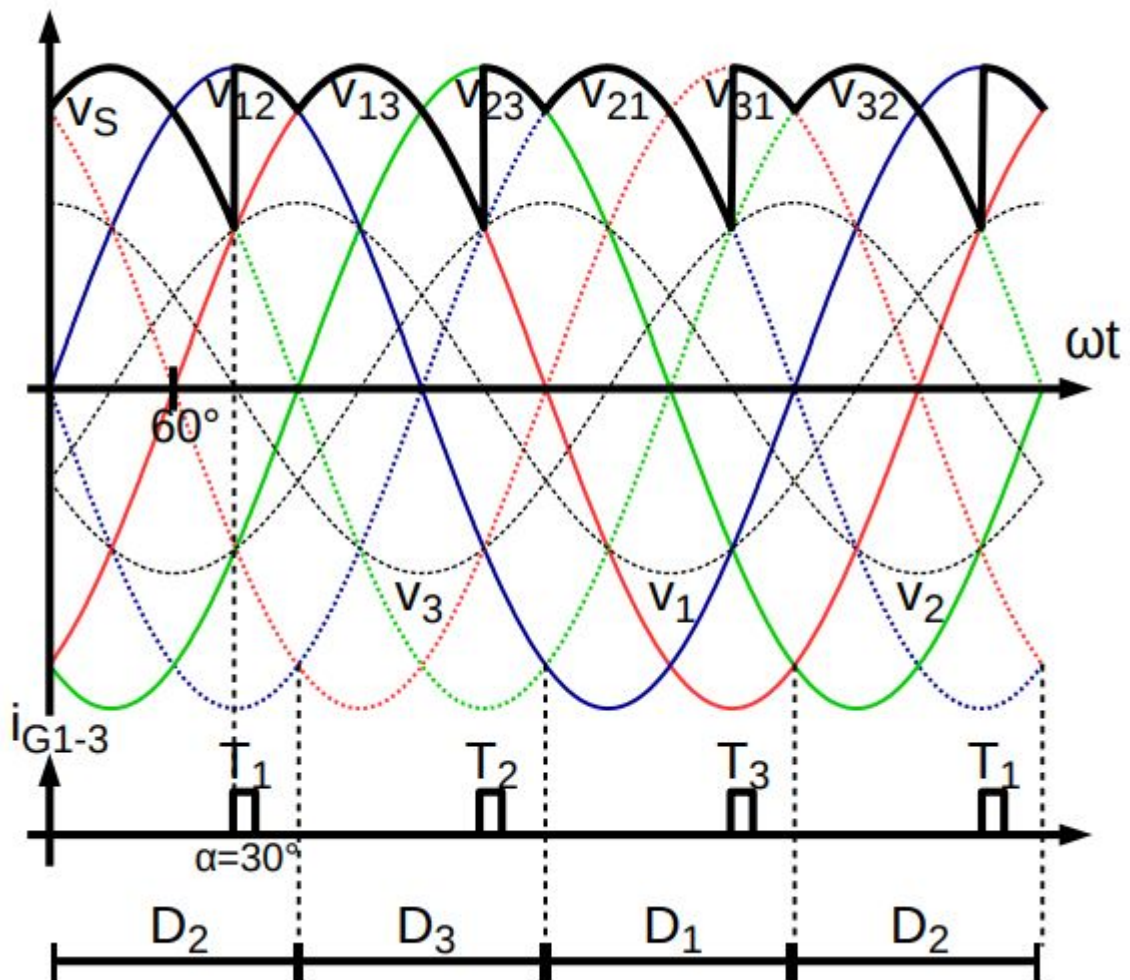
Quando o valor de $\alpha = 0^\circ$, o circuito se comporta como um retificador a diodos. Nela pode-se observar que durante o início do ciclo senoidal do circuito, o diodo D_2 entra em condução, até o momento em que o SCR T_1 é disparado, formando o par de condução D_2 - T_1 . No fim do ciclo de condução de D_2 , a tensão de linha V_{13} conduz o diodo D_3 , até que o SCR T_2 é disparado, interrompendo V_{13} e conduzindo V_{23} , e assim por diante como retratado na Figura 14 (LIBERT, 2007).

Figura 14 – Forma de onda quando $\alpha = 0^\circ$ 

Fonte: LIBERT, 2007.

Já com um ângulo de disparo $\alpha = 30^\circ$, a forma da onda da tensão de saída possui seis pulsos por ciclo. A corrente de saída é sempre contínua e a tensão nunca se torna negativa. A forma da onda da tensão de saída é igual a V_{12} ou V_{13} sempre que o T_1 estiver ligado. A sequência de disparo e as formas de onda de tensão, supondo uma carga indutiva grande, são mostradas na Figura 15. Cada par de SCR e diodo conduz por 120° inteiros. A frequência de ondulação é apenas três vezes a frequência da fonte AC, o que é uma desvantagem do semiconversor, comparado a uma ponte completamente controlada, que tem uma frequência de ondulação seis vezes a frequência da fonte (AHMED, 2000).

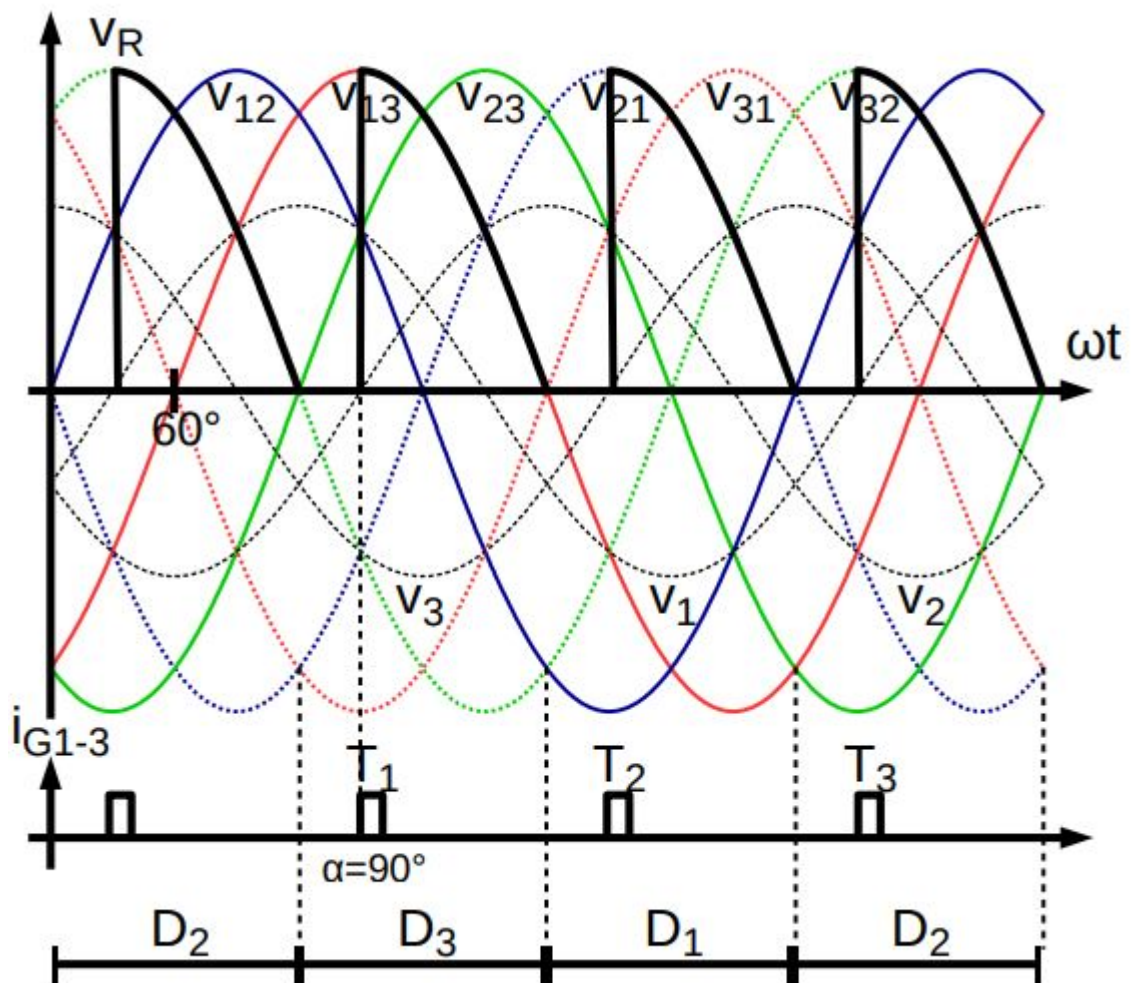
Figura 15 – Forma de onda quando $\alpha = 30^\circ$



Fonte: LIBERT, 2007.

E por fim, para um ângulo de $\alpha = 90^\circ$, a tensão de saída tende a se tornar negativa durante parte do ciclo. A tensão de saída é nula durante esse período e entra em estado desligado, interrompendo a condução do par de SCR e diodo. A Figura 16 mostra as formas de onda de tensão. A sequência de disparo dos SCRs e o tempo de condução dos diodos também são apresentados (AHMED, 2000).

Suponha que a corrente de saída seja contínua e sem ondulação. Em $30^\circ + \alpha$, o SCR T_1 entra em estado ligado; T_1 e D_3 conduzem a corrente de saída, tornando a tensão de saída igual a V_{13} . Quando o T_2 entra em estado ligado, a corrente de saída flui através do T_2 e do D_1 , fazendo com que a tensão de saída seja igual a V_{21} . Esse processo se repete a cada 120 graus, sempre que um SCR entra em estado ligado (AHMED, 2000).

Figura 16 – Forma de onda quando $\alpha = 90^\circ$ 

Fonte: LIBERT, 2007.

Durante a análise dos gráficos, vemos que no período de semiciclo positivo, a tensão proveniente da fonte de alimentação é aplicada na carga somente após o disparo do T_1 , que conduzirá a corrente de carga junto com o D_2 . Durante o intervalo entre o início do semiciclo negativo e o disparo do T_2 , a corrente circula de forma livre através do T_1 e D_1 ou do D_1 e D_2 . Após o disparo do T_2 , que junto com o D_1 conduzirá a corrente de carga, a tensão na carga é restabelecida até o início do próximo semiciclo positivo. Do início do semiciclo positivo até o novo disparo do T_1 , a circulação livre ocorre através do T_2 e D_2 ou do D_1 e D_2 , dependendo da configuração (EEEP, 2012).

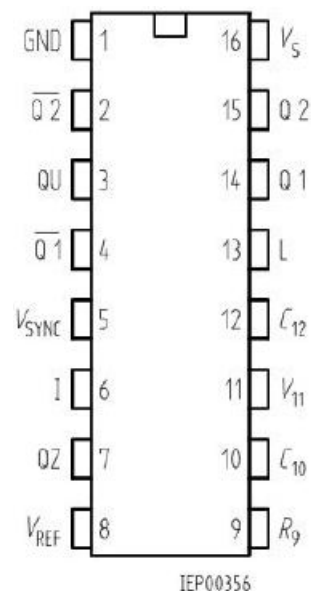
2.2 TCA 785

Com a crescente demanda por dispositivos eletrônicos em uma ampla gama de aplicações, houve um desenvolvimento significativo de circuitos integrados de disparo. Esses circuitos

são projetados para fornecer pulsos de controle precisos em uma variedade de cenários, desde aplicações simples até sistemas mais complexos. Os circuitos integrados de disparo desempenham um papel fundamental no desenvolvimento de projetos eletrônicos, tornando-os mais confiáveis, eficientes e compactos (ALMEIDA, 1996), gerando sinais de disparos sincronizados, sendo necessário o complemento de alguns componentes externos, como resistores e capacitores (BRITO; COSTA; FREITAS, 2010). Ao utilizar circuitos integrados de disparo dedicados, os projetistas podem contar com funcionalidades específicas projetadas para garantir a operação confiável do sistema. Isso inclui a proteção contra condições adversas, como ruído elétrico, flutuações de alimentação e condições ambientais extremas. Muitos circuitos integrados de disparo são projetados para fornecer pulsos de saída precisos e estáveis, garantindo que as operações do sistema ocorram no momento certo e com a duração correta. Isso é crucial em aplicações onde o tempo é crítico, como em sistemas de controle de motor e automação industrial (RUIZ, 2016).

Ao incorporar várias funções de disparo em um único chip, os circuitos integrados de disparo permitem que os projetistas reduzam o número de componentes discretos em seus projetos, resultando em placas de circuito mais compactas e simplificadas. Isso também ajuda a reduzir custos de fabricação e montagem. Ao escolher os circuitos integrados de disparo corretos para uma aplicação específica, os projetistas podem otimizar o consumo de energia e maximizar a eficiência do sistema como um todo. O circuito integrado TCA 785 utilizado no projeto é de modelo da Siemens. A Figura 17 mostra a pinagem do circuito integrado TCA 785 (RUIZ, 2016).

Figura 17 – TCA 785 e suas portas correspondentes



Fonte: SIEMENS, 2003.

Este modelo consiste de 16 portas, sendo que 6 destas são dedicadas ao sinal de saída. O Quadro 1, adaptado do *datasheet* da Siemens, retrata todas as 16 portas do CI, a simbologia e o

significado de cada uma.

Quadro 1 - Numeração dos pinos, símbolos e funcionalidades do TCA 785

<i>Pino</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Funcionalidade</i>
1	GND	Aterramento
2	$\overline{Q_2}$	Saída 2 invertida
3	QU	Saída U
4	$\overline{Q_1}$	Saída 1 invertida
5	V_{sync}	Tensão de sincronismo
6	I	Inibidor
7	QZ	Saída Z
8	V_{REF}	Tensão de estabilização
9	R_9	Resistência de rampa
10	C_{10}	Capacitância de rampa
11	V_{11}	Tensão de controle
12	C_{12}	Extensão do pulso
13	L	Pulso longo
14	Q1	Saída 1
15	Q2	Saída 2
16	V_s	Tensão de alimentação

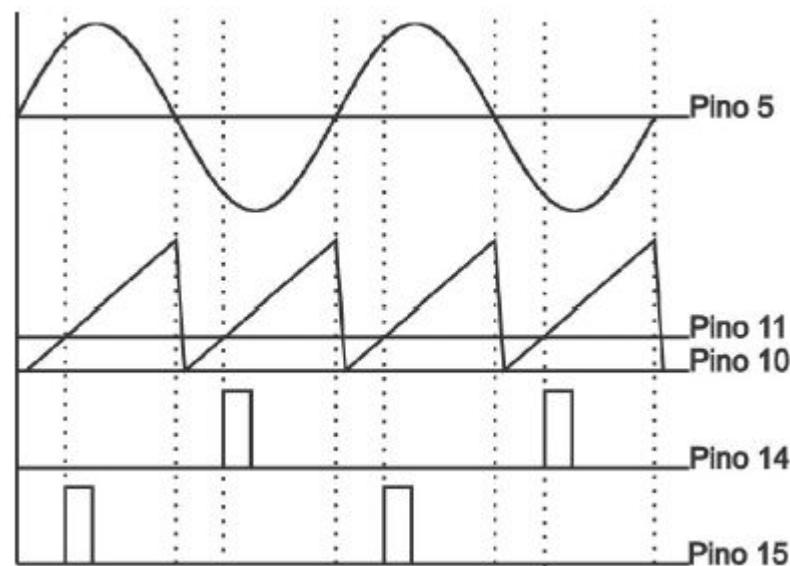
Fonte: Adaptado de SIEMENS, 2003.

O sinal de sincronismo no terminal 5 é atingido por uma alta impedância. Logo após, um detector de passagem por zero recebe este sinal e envia para o sincronizador. Este por sua vez controla o gerador de rampa, sendo que o capacitor C_{10} (pino 10) é carregado por uma corrente constante, oriunda do resistor R_9 (pino 9). Se a tensão de rampa V_{10} exceder a tensão de controle V_{11} (pino 11), um sinal é processado pela unidade lógica do CI. Dependendo do valor de V_{11} (pino 11), seu ângulo de disparo pode ser variado dentro de um ângulo da fase 0° a 180° . Em cada semiciclo de onda, um pulso positivo com duração média de $30 \mu s$ surge nas portas de saída Q_1 e Q_2 (pinos 14 e 15 respectivamente). A duração do tempo deste pulso de onda é controlado por um capacitor C_{12} (pino 12), podendo ser estendido até 180° . Caso este pino 12 (C_{12}) for aterrado, os pulsos terão uma duração entre o ângulo de disparo e 180° . (RUIZ, 2016).

Os pinos das portas 2 e 4 fornecem os sinais complementares a Q_1 e Q_2 . A porta de saída Q_z (pino 7) condiz com a lógica "NOR" entre Q_1 e Q_2 . Quando o pino 6 (inibidor) estiver aterrado, desabilitam as saídas do CI.

A tensão contínua de alimentação é regulada internamente para 3,1V, deixando a operação do CI resistente as oscilações de tensão de alimentação e permitindo que o mesmo tenha tensões de alimentação entre 8 a 18 Vcc. O consumo de corrente do TCA 785 é de aproximadamente 6,5 mA. (RUIZ, 2016).

Figura 18 – Formas de onda das portas do TCA 785



Fonte: BRITO, 2010

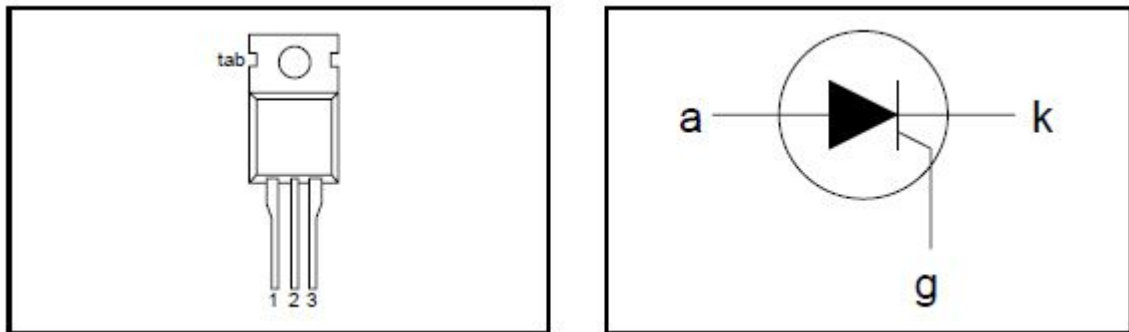
A Figura 18 ilustra a tensão nos principais pontos do circuito integrado. No primeiro gráfico, a onda de referência é aplicada ao pino 5 do CI. Esse sinal controla o gerador de rampa, cuja forma de onda é obtida no pino 10 e mostrada no segundo gráfico, juntamente com a tensão de controle. Quando a tensão da rampa é igual à tensão de controle, ocorre um pulso positivo no pino 15 se a onda de controle estiver no semiciclo positivo, ou um pulso positivo no pino 14 se a onda de referência estiver no semiciclo negativo (RUIZ, 2016).

2.3 SCR

Os tiristores são dispositivos eletrônicos empregados em circuitos de potência por onde é necessário controlar o acionamento da chave (*gate*). São alguns exemplos: retificador controlado por silício (SCR), TRIAC, GTO (desligamento pelo *gate*), MCT (tiristor controlado por metal-óxido-semicondutor). O SCR contém 3 terminais: catodo (pino 1), anodo (pino 2) e *gate* (pino 3), como demonstrado na Figura 19.

A condução do SCR é feita através de uma corrente positiva no sentido anodo para o catodo. Após a energização do dispositivo, o sinal do *gate* não é mais necessário para manter a corrente no anodo. O SCR continuará a conduzir enquanto a corrente do anodo permanecer positiva e estiver acima do valor mínimo de corte. Como acontece com os diodos, os SCR's apresentam resistência variável de acordo com a variação da temperatura (RUIZ, 2016).

Figura 19 – Configuração dos pinos e símbolo do SCR



Fonte: Philips Semicondutores, 1997.

Quando não há corrente na porta (*gate*), o SCR se comporta como um interruptor aberto e não conduz corrente entre o anodo e o catodo. Isso significa que ele é capaz de bloquear tensões quando não está ativado. No momento em que uma corrente é aplicada à porta, o SCR é "disparado" e passa a conduzir corrente entre o anodo e o catodo, e permanecerá conduzindo mesmo que a corrente na porta seja removida, até que a corrente principal seja interrompida ou invertida (EEEP, 2012).

Portanto, para um SCR ideal, ele deve ser capaz de bloquear tensões quando não há corrente na porta e, quando ativado, conduzir corrente apenas na direção desejada (EEEP, 2012).

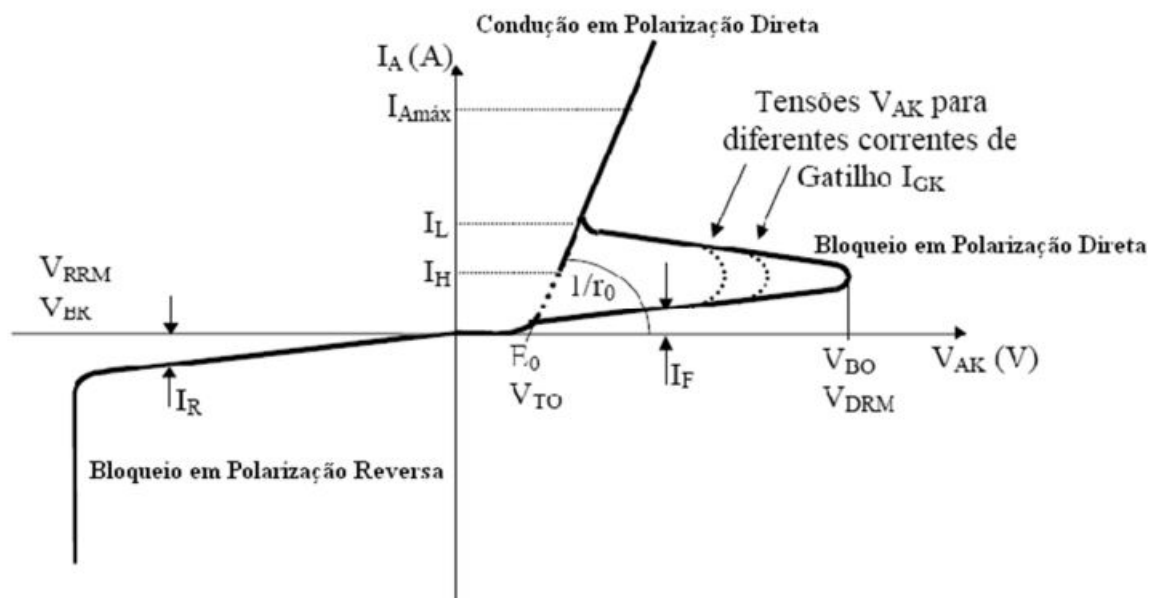
Os SCR's têm limites de tensão e corrente que podem suportar. Esses limites são chamados de características estáticas reais, como ilustrado na Figura 20. As regiões da curva próxima ao eixo V_{AK} representam as características do SCR no estado de bloqueio, enquanto as regiões da curva mais externas ao eixo V_{AK} mostram as características do SCR com a corrente de gatilho I_{GK} , para ambas as polarizações. Podemos observar na Figura 20 que a curva característica de um SCR real apresenta três regiões distintas (JUNIOR, 2005):

- **Bloqueio em polarização reversa:** quando uma tensão reversa é aplicada ao SCR (ou seja, a polaridade da tensão aplicada é oposta à direção normal da corrente), ele deve ser capaz de bloquear essa tensão e impedir que a corrente flua entre o anodo e o catodo. Isso é uma característica crucial para garantir a segurança e o funcionamento adequado de circuitos que usam SCR, especialmente em aplicações onde o dispositivo pode estar sujeito a inversões de polaridade ou a picos de tensão. Um SCR ideal deve ser capaz de suportar essa condição de bloqueio em polarização reversa para evitar danos ao dispositivo e ao circuito (JUNIOR, 2005).
- **Bloqueio em polarização direta:** o SCR conduzirá corrente quando uma tensão suficiente for aplicada entre o anodo e a porta (*gate*). Em condições ideais, um SCR deve ser capaz de bloquear correntes em polarização direta antes que o gatilho adequado seja aplicado ao

terminal do *gate*. Essa capacidade de bloqueio em polarização direta é uma característica importante do SCR, pois permite que ele seja controlado de forma eficaz, garantindo que não conduza corrente até que seja intencionalmente ativado. Assim, um SCR ideal deve ser capaz de bloquear corrente em polarização direta até que um sinal de gatilho apropriado seja aplicado ao terminal do *gate*, permitindo a condução controlada da corrente através do dispositivo. Isso é fundamental para muitas aplicações de controle de potência, onde o SCR é usado como um interruptor controlado (JUNIOR, 2005).

- **Condução em polarização direta:** o SCR conduzirá corrente quando uma tensão adequada é aplicada entre o anodo e o catodo e um pulso de disparo é aplicado no terminal do *gate*. Quando a tensão direta aplicada excede uma certa voltagem de disparo conhecida como tensão de ruptura (*breakover voltage*), e um pulso de disparo é aplicado ao *gate*, o SCR entra no estado de condução. Uma vez que o SCR é disparado, ele continua conduzindo corrente mesmo que o sinal de disparo seja removido. A corrente só é interrompida quando a corrente no anodo cai abaixo de um certo valor mínimo conhecido como corrente de retenção (*holding current*) ou quando a polaridade da tensão é revertida. Durante a condução em polarização direta, o SCR apresenta uma queda de tensão relativamente baixa entre o anodo e o catodo, o que o torna eficiente para aplicações de controle de potência, como em retificadores controlados, circuitos de comutação e reguladores de tensão (JUNIOR, 2005).

Figura 20 – Curva característica de um SCR real



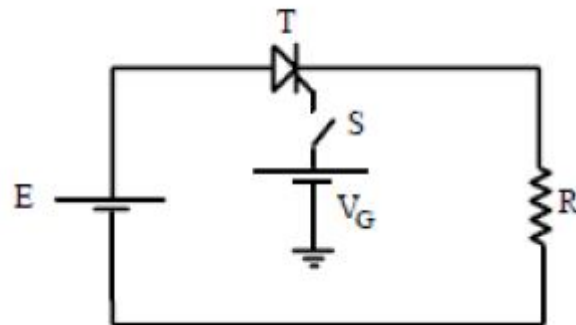
Fonte: CORRADI JUNIOR, 2005.

A corrente I_L (*latching current* ou corrente de retenção) é a corrente mínima necessária para manter um SCR em condução após ele ter sido ativado por uma corrente de gatilho inicial.

Uma vez que o SCR tenha sido disparado pela corrente de gatilho, ele continuará conduzindo até que a corrente principal através dele caia abaixo de um certo valor, chamado de corrente de retenção. O SCR não entrará em condução se a corrente de gatilho I_{GK} for interrompida antes que a corrente de ânodo I_A atinja esse valor. Já a corrente I_H (*holding current* ou corrente de manutenção) uma vez retirada a corrente de gatilho, a corrente mínima de ânodo I_A necessária para manter o SCR em condução é chamada corrente de manutenção. A tensão de *breakdown* V_{BR} é a tensão reversa máxima que o SCR suporta, em vez que, a tensão de *breakover* V_{BO} é a tensão direta que faz o SCR conduzir, sem a necessidade de sinal no *gate*. O I_{Amax} é a corrente máxima de ânodo que não danifica o SCR, podendo ser expressa como valor RMS, médio, de pico ou instantânea (JUNIOR, 2005).

As características dinâmicas do SCR estão diretamente relacionadas ao comportamento transitório do componente durante os processos de ativação e bloqueio. Primeiramente, analisa-se o comportamento do SCR no momento em que é disparado o gatilho. Supõe-se que no instante t_0 o interruptor S é fechado e a fonte V_G fornece a corrente I_G ao gatilho (EEEP, 2012). O circuito analisado para avaliação do disparo do SCR e as formas de onda do atraso deste disparo estão demonstradas nas Figuras 21 e 22.

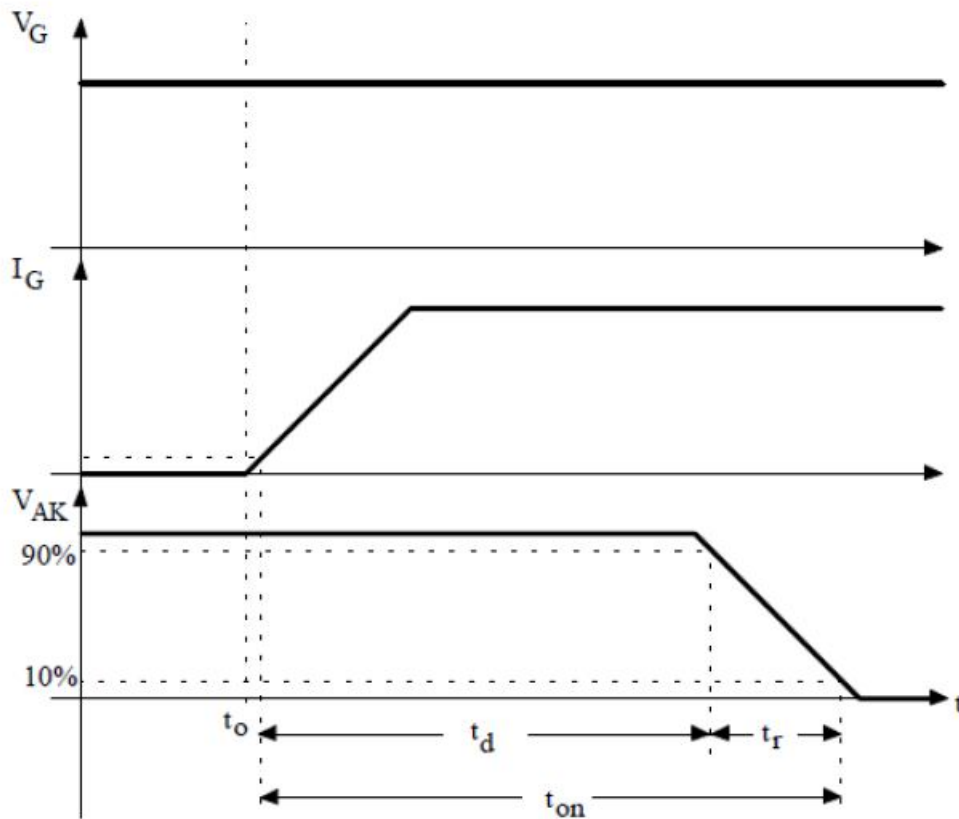
Figura 21 – Circuito para análise de disparo do SCR



Fonte: EEEP, 2012.

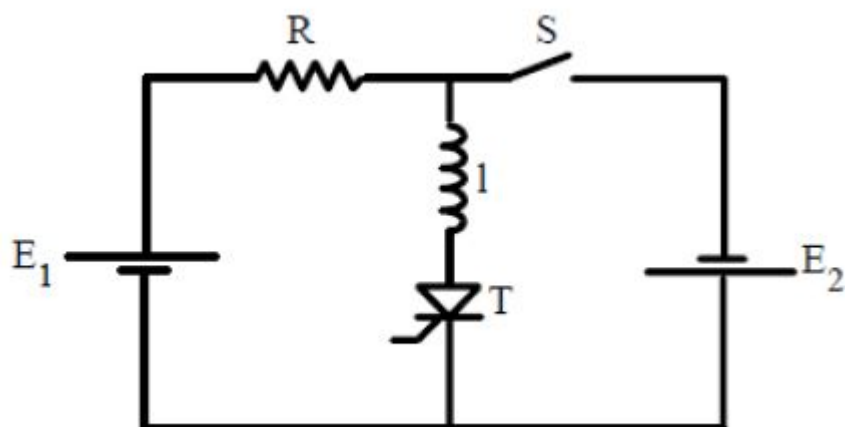
O fechamento t_{on} é calculado somando o tempo de atraso t_d com o tempo de recuperação t_r . Esse período de tempo é fundamental para que o SCR comece a conduzir corretamente após o disparo. O tempo de atraso t_d é o principal fator que contribui para o tempo de fechamento e é diretamente influenciado pela intensidade da corrente de gatilho I_G e pela rapidez com que essa corrente aumenta. O tempo de queda da tensão anodo-catodo t_r , por outro lado, não depende da corrente I_G . Apenas os detalhes técnicos envolvidos na fabricação do componente afetam a diminuição de V_{AK} (EEEP, 2012).

Figura 22 – Curva representativa do atraso no disparo do SCR



Fonte: EEEP, 2012.

Figura 23 – Circuito para análise de bloqueio do SCR



Fonte: EEEP, 2012.

Com referência ao bloqueio do SCR, analisa-se agora o circuito da Figura 23. O indutor L é responsável pela influência no decrescimento da corrente do SCR. Quando o SCR conduz

corrente de carga, o interruptor S abre. Quando $t = t_0$, o interruptor S é fechado e o processo de bloqueio do SCR é iniciado. No instante $t = t_1$, o interruptor S é aberta novamente e o SCR é bloqueado. A recuperação do SCR permite que o mesmo bloqueie efetivamente, e a tensão reversa precisa ser mantida por um tempo igual ou superior a t_q . Isto é necessário para que o SCR possa atingir o equilíbrio térmico e permanecer bloqueado até que a corrente seja aplicada em seu gatilho. A corrente reversa máxima (IRM) possui um valor finito que depende das características do SCR e do circuito. O tempo t_q varia de $5 \mu\text{s}$ para SCRs rápidos a $50 - 40 \mu\text{s}$ para SCRs lentos. (EEEP, 2012)

Para que o SCR seja ativado, é necessário que ele conduza uma quantidade suficiente de corrente, conhecida como corrente de retenção I_L (*Latching Current*). O SCR não será ativado se a corrente de gatilho I_{GK} for eliminada antes que a corrente de ânodo I_A atinja o valor da corrente de retenção I_L . Uma vez removida a corrente de gatilho, a corrente de ânodo I_A mínima necessária para manter o SCR ativado é chamada de corrente de manutenção I_H (*Holding Current*). Se a corrente de ânodo for menor que a corrente de manutenção, as barreiras de potencial se reestabelecem e o SCR entra em bloqueio. A corrente de retenção é maior do que a corrente de manutenção ($I_L > I_H$). O valor de I_L geralmente é de duas a três vezes a corrente de manutenção I_H . Ambas as correntes diminuem com o aumento da temperatura e vice-versa. É devido a essa razão que afirmamos que o SCR atua como uma chave de retenção (ou bloqueio), pois, uma vez ativado, permanece nesse estado enquanto a corrente de ânodo I_A for superior à corrente de manutenção ($I_A > I_H$), mesmo na ausência de corrente no gatilho (I_{GK}). (JUNIOR, 2005)

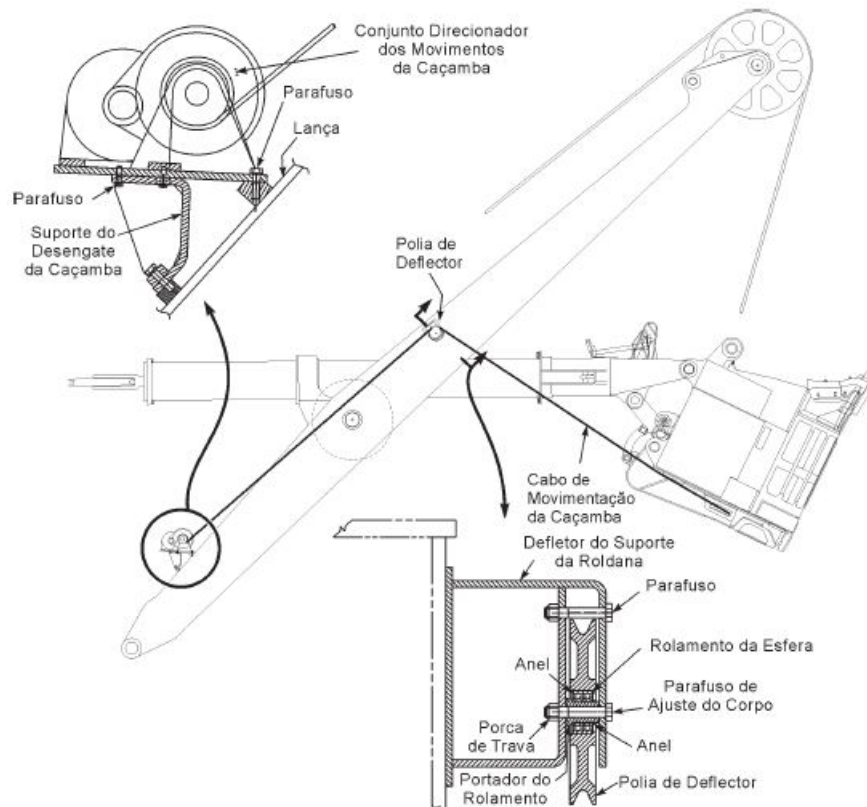
2.4 Sistema de abertura da caçamba (*dipper trip*) em escavadeira Caterpillar 7295

O sistema de abertura da caçamba equipado nas escavadeiras a cabo 7295 da Caterpillar utiliza o modelo de retificador trifásico CA-CC não controlado por diodos. A Figura 5 ilustrada no capítulo 1 mostra o esquemático completo do sistema do *dipper trip*. Nesta seção do capítulo 2 será corroborado cada componente deste circuito e suas funcionalidades. (BUCYRUS, 2011b).

A Figura 24 exhibe o conjunto físico instalado na lança do equipamento (BUCYRUS, 2012). O sistema *dipper trip* é basicamente composto por:

- Transformador DTT;
- Sistema de conversão de sinal (retificador não controlado);
- *Dipper trip assembly* (motor CC juntamente com o tambor do cabo de aço);
- Cabo de aço (*Trip rope*);
- Portinhola da caçamba.

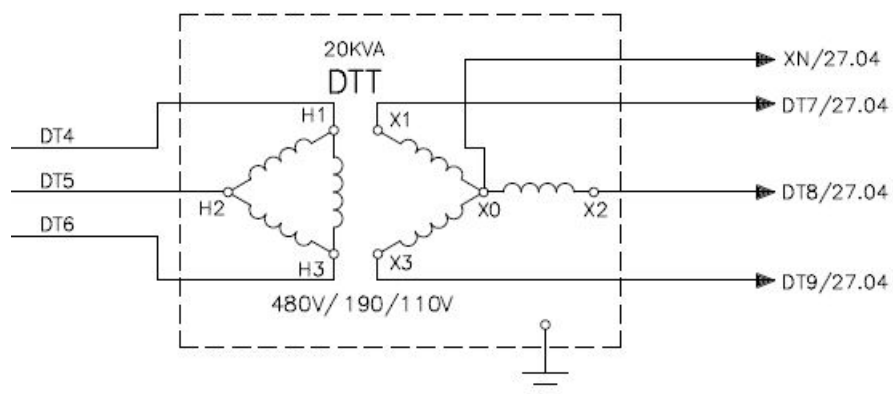
Figura 24 – Conjunto de abertura da caçamba



Fonte: Adaptado de BUCYRUS, 2011.

O sinal de tensão de 110 V_{AC} oriundo do transformador DTT (Figura 25) chega em paralelo aos supressores de surto SP's em cada fase. Estes supressores de surto têm a função de proteção contra sobretensões transitórias, principalmente quando há a partida elétrica do sistema. (BUCYRUS, 2012).

Figura 25 – Transformador DTT e suas ligações

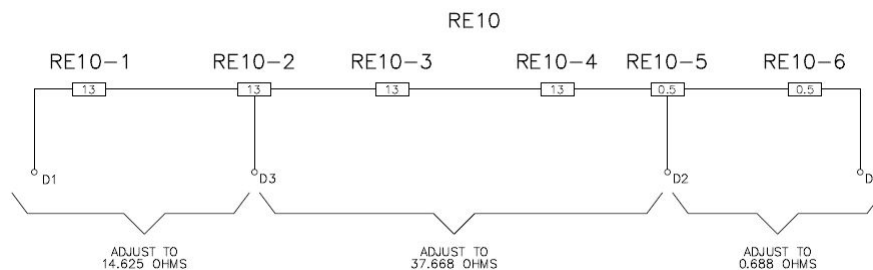


Fonte: BUCYRUS, 2011.

Em paralelo com os supressores de surto está conectada a ponte retificadora CA-CC não controlada a diodos. Esta ponte converte o sinal 110 V_{AC} de entrada em sinal 110 VCC contínuo. Esta conversão é importante para o restante do circuito pois o motor elétrico responsável pela abertura e fechamento da caçamba funciona em tensão contínua. Este conjunto de ligações é localizada na casa de máquinas do equipamento, sendo alojado no Gabinete de Controle Auxiliar (ZAC) (BUCYRUS, 2012).

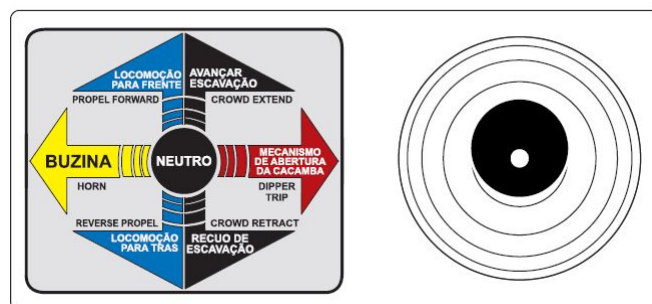
Em paralelo a este retificador, temos em série um filtro RC para remoção de ruídos. Em sequência encontra-se o sistema de proteção para o motor DTM, composta por um fusível de 100A e um relé de sobrecarga, e subsequente há uma bancada de resistores RE10 controlado por um contator DTC. Esta bancada de resistores irá monitorar a velocidade de abertura da caçamba pelo motor DTM. A regulagem desta velocidade é realizado manualmente pela equipe de manutenção, variando a resistência desta bancada (BUCYRUS, 2012). O esquemático elétrico fornecida pela fabricante demonstra os valores de resistência padrões para esta aplicação (Figuras 26 e 28).

Figura 26 – Ligação elétrica da bancada de resistores RE10 e seus respectivos valores de regulagem



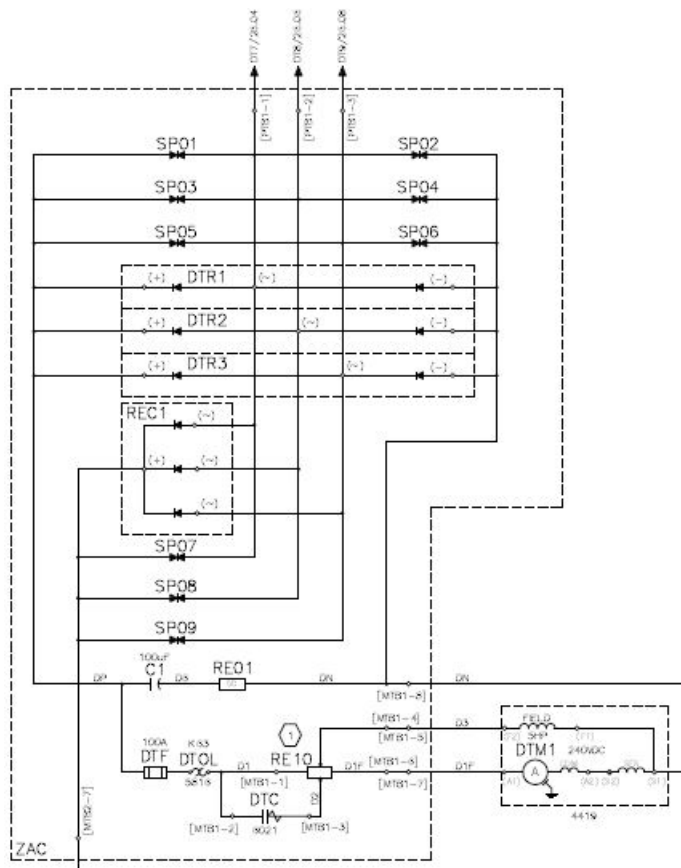
Fonte: BUCYRUS, 2011.

Figura 27 – Controle do joystick do operador



Fonte: BUCYRUS, 2011.

Figura 28 – Esquemático ligação sistema de abertura de caçamba 7295



Fonte: BUCYRUS, 2011.

No instante em que o equipamento entra em funcionamento, o motor DTM já é alimentado diretamente, fazendo que o cabo de aço do dromo acoplado no eixo de saída seja tensionado, evitando chicoteamento do mesmo quando a caçamba for aberta. Após a coleta do material escavado a caçamba mantém-se fechada, pois o descarregamento deste material é realizado na portinhola inferior. (BUCYRUS, 2012). No ato de descarregamento deste material, o operador do equipamento faz um comando deslocando o joystick para a direita (Figura 27) (BUCYRUS, 2011a). Este controle ativa o contator DTC, isolando algumas resistências da bancada RE10 e permitindo que a corrente elétrica flua com mais intensidade no motor DTM, conseqüentemente elevando sua velocidade. Assim, o dromo acoplado ao eixo de saída do DTM irá acentuar o cabo de aço (*trip rope*), impulsionando a alavanca de trava da portinhola (*latch bar lever*), abrindo a caçamba (BUCYRUS, 2012).

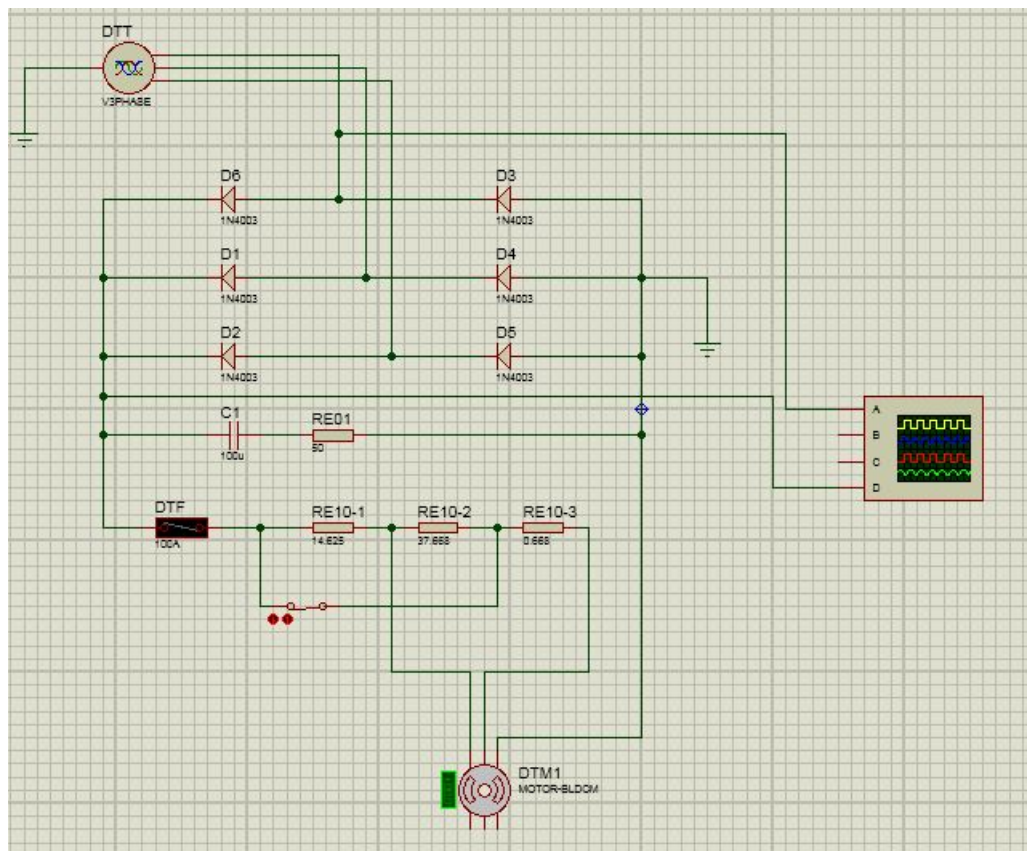
3 METODOLOGIA

Neste capítulo, será apresentado como foi elaborado o trabalho de otimização do sistema de abertura de caçamba em escavadeiras elétricas. A princípio será exibido a estrutura da retificação não controlada a diodo original da escavadeira 7295, permitindo a visualização do comportamento do circuito, utilizando o software *Proteus*. Seguidamente será relatado o projeto de retificação semicontrolado, explanando os dispositivos utilizados, como também contemplando o circuito através do software.

3.1 Circuito retificador não controlado a diodo utilizado na escavadeira a cabo 7295

De acordo com as informações obtidas através do esquemático fornecido pelo fabricante do equipamento, foi esboçado o circuito retificador não controlado, com as devidas especificações dos componentes, exibido na Figura 29.

Figura 29 – Circuito retificador não controlado da escavadeira 7295, desenvolvido no software *Proteus*



Fonte: Próprio autor

Foi utilizado uma fonte trifásica com 60 Hz de frequência, 6 diodos 1N4003, um filtro

RC. A bancada de resistores RE10 foi adicionada ao circuito já com os valores equivalentes das resistências que as compõem. O *switch* está dando lugar ao contator DTC que é acionado através do comando do *joystick* do operador. O motor CC está demonstrado pelo DTM1. O componente extra instalado na extremidade direita do circuito é um osciloscópio para realizar a leitura da tensão na fonte trifásica comparada ao terminal positivo pós retificação. A análise do gráfico gerada através do osciloscópio bem como do comportamento do motor serão discutidos no capítulo 4.

3.2 Projeto do circuito retificador semicontrolado aplicável à escavadeira 7295

O objetivo principal deste projeto é a eliminação do contator DTC do circuito original para um sistema onde o operador possa abrir a portinhola da caçamba de forma suave e manual, sem a necessidade de realizar regulagem periódica da bancada de resistores RE10 e das constantes substituições deste contator devido ao sistema original ser bastante agressivo nas partidas do motor. Com isso foi desenvolvido um circuito retificador semicontrolado utilizando pontes por tiristores (SCR's). Para cada fase do circuito trifásico, foi utilizado um dispositivo de disparo do gatilho do tiristor (TCA 785). No anexo encontra-se o projeto desenvolvido no *Proteus*.

Similar a fonte de tensão no circuito do equipamento, foi instalada uma fonte trifásica oriunda do DTT, de valor RMS 110V em 60 Hz de frequência. Para auxiliar a diminuição de corrente nos TCA's 785 utilizados, incrementa-se transformadores abaixadores em cada fase. Desejando uma tensão no secundário deste transformador em 10V, utiliza-se o seguinte cálculo para encontrar o valor da indutância do secundário:

Dados:

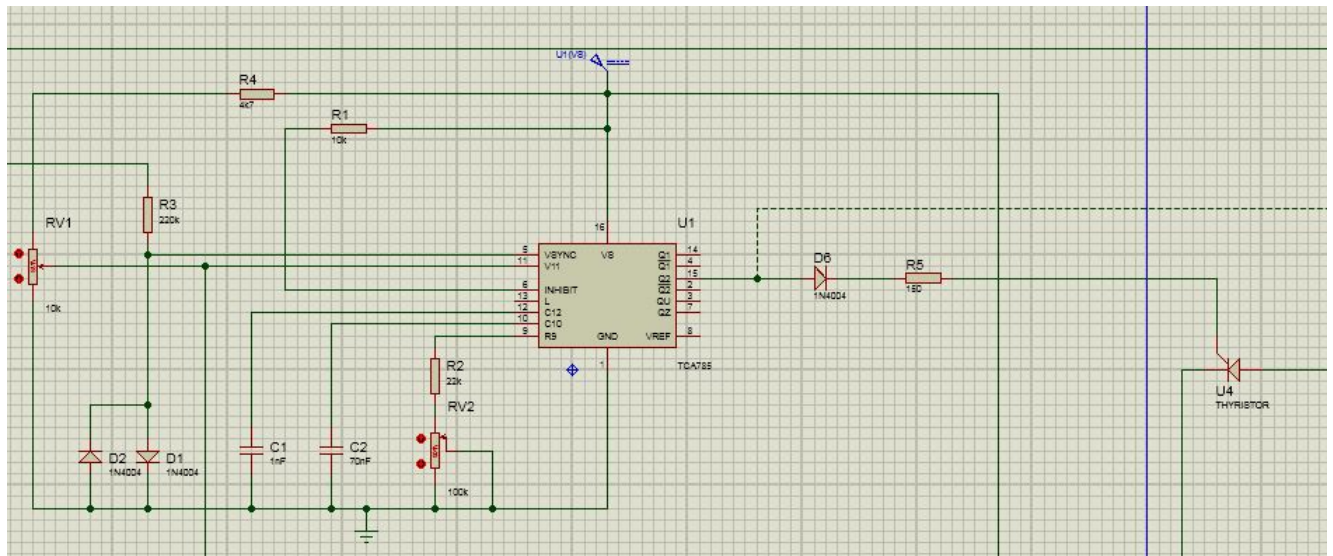
- V1 (tensão primário transformador) = 110V;
- V2 (tensão secundário transformador) = 10V;
- L1 (indutância do transformador) = 1H.

$$\frac{N1}{N2} = \frac{V1}{V2} = \frac{\sqrt{L1}}{\sqrt{L2}} = \sqrt{\frac{L1}{L2}} \quad (3.1)$$

$$\frac{110}{10} = \sqrt{\frac{1}{L2}} \quad (3.2)$$

$$L2 = 8,26mH \quad (3.3)$$

Figura 30 – Circuito de disparo dos gatilhos



Fonte: Próprio autor.

Através deste valor encontrado da indutância L2, podemos inserir o transformador para uma tensão de saída de 10 Vca.

Para cada fase a ser retificada utiliza-se o circuito integrado TCA 785, por onde este servirá de disparo para o *gate* dos SCR's. A Figura 30 exhibe toda a ligação do TCA 785, bem como dos componentes que complementam o circuito de disparo.

Analisando a primeira parte do circuito, temos o sincronizador de rede, conectado ao pino 5 do TCA 785. Nele há uma alta resistência na entrada em paralelo a dois diodos anti-paralelos. Sem este sincronismo com a rede ocorrerá um disparo aleatório dos *gates*, sendo que cada pulso no disparo é aplicado em um intervalo de tempo distinto, sem relacionamento com a rede. Estes diodos irão fornecer tensão entre -0,7 V e 0,7 V para evitar danos no TCA 785. Toda a vez que a tensão neste pino passar por zero será gerado um pulso de sincronismo. O cálculo da corrente nos diodos é dado pela seguinte fórmula:

$$I_d = \frac{(V_{fontepico} - V_d)}{R_3} \quad (3.4)$$

$$I_d = \frac{(10\sqrt{2} - 0,7)}{220000} \quad (3.5)$$

$$I_d = 61,36\mu A \quad (3.6)$$

Onde:

- $V_{fontepico}$: Tensão do secundário do transformador de controle;

- V_d : tensão dos diodos de sincronismo do TCA 785;
- R_3 : Resistência de sincronismo do TCA 785.

Analisando o resultado (3.6), vemos que a corrente nos diodos de sincronismo é muito baixa, evitando danos nos componentes. A baixa corrente nos diodos de sincronismo ajuda a minimizar perdas de energia e a prolongar a vida útil dos componentes, contribuindo para a eficiência geral do sistema.

A segunda parte do circuito de disparo determina a geração do ângulo de disparo. O pino 11 do TCA 785 é a porta de entrada deste sinal, onde está conectado o potenciômetro de $10k\Omega$.

Convergindo a implementação do projeto para a escavadeira, esta alteração de resistência será feito pelo próprio operador da máquina, no momento de descarregamento de material da caçamba. A tensão de alimentação do TCA 785, localizado no pino 16 (Vs) é 12 Vcc. Quando o potenciômetro está regulado no valor mínimo ele estará conectado diretamente ao terra, não entrando corrente no pino 11. Mas quando está regulado no valor máximo, o pino 11 estará recebendo um valor de corrente máximo, sendo determinada por:

$$I_{max} = \frac{V_s}{R_4} \quad (3.7)$$

$$I_{max} = \frac{12}{4700} \quad (3.8)$$

$$I_{max} = 2,55mA \quad (3.9)$$

Tem-se conectado ao pino 9 do TCA 785 dois resistores que são responsáveis por gerar uma corrente de rampa no capacitor conectado ao pino 10, denominado na equação como I_c , onde:

- V_{ccint} : tensão interna TCA 785;
- k: constante TCA 785;
- R_2 : resistência de rampa fase R;
- R_{trim} : resistência trimpot.

De acordo com o datasheet do TCA 785, a corrente de rampa deve ser de valor entre $10\mu A$ a $1000\mu A$. Inicialmente, utilizou-se os valores para R_2 de $2,2k\Omega$ e R_{trim} de $100k\Omega$.

$$I_c = \frac{V_{ccint} \cdot k}{R_2 + R_{trim}} \quad (3.10)$$

$$I_c = \frac{3,1,1,1}{2200 + 100000} \quad (3.11)$$

$$I_c = 0,333\mu A \quad (3.12)$$

Nota-se que o valor da corrente de rampa não está dentro da faixa especificada no datasheet. Então alterou-se o valor de R2 para 22kΩ e Rtrim manteve-se 100kΩ.

$$I_c = \frac{V_{ccint} \cdot k}{R2 + Rtrim} \quad (3.13)$$

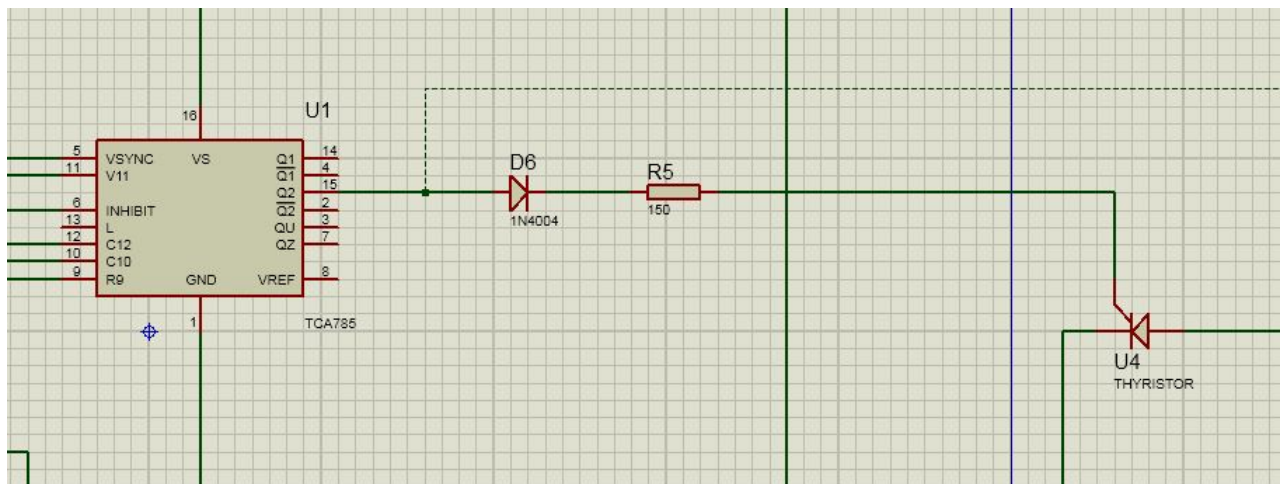
$$I_c = \frac{3,1.1,1}{22000 + 100000} \quad (3.14)$$

$$I_c = 27,95\mu A \quad (3.15)$$

Como a corrente calculada desta vez ficou dentro do valor estipulado, dentre 10μA a 1000μA, temos uma situação onde o TCA 785 irá produzir uma corrente de rampa aceitável para o correto funcionamento.

Após os cálculos de parametrização do TCA 785 para realizar os disparos do SCR, foram conectados às portas de saída 15 do CI cada *gate* dos tiristores, como demonstra a Figura 31.

Figura 31 – Saída para disparo do *gate* de cada SCR por fase



Fonte: Próprio autor

Foi calculado o valor do ângulo de disparo α para que a tensão média de saída VDC seja de 110V:

$$V_{linha} = V_{fonte} \sqrt{2} \quad (3.16)$$

$$V_{linha} = 155V \quad (3.17)$$

$$V_{medio} = \frac{3}{2\pi} V_{linha} (1 + \cos \alpha) \quad (3.18)$$

$$1 + \cos \alpha = \frac{V_{\text{medio}} \cdot 2\pi}{3V_{\text{linha}}} \quad (3.19)$$

$$1 + \cos \alpha = \frac{44\pi}{93} \quad (3.20)$$

$$\cos \alpha = 0,48 \quad (3.21)$$

$$\alpha = 61^\circ \quad (3.22)$$

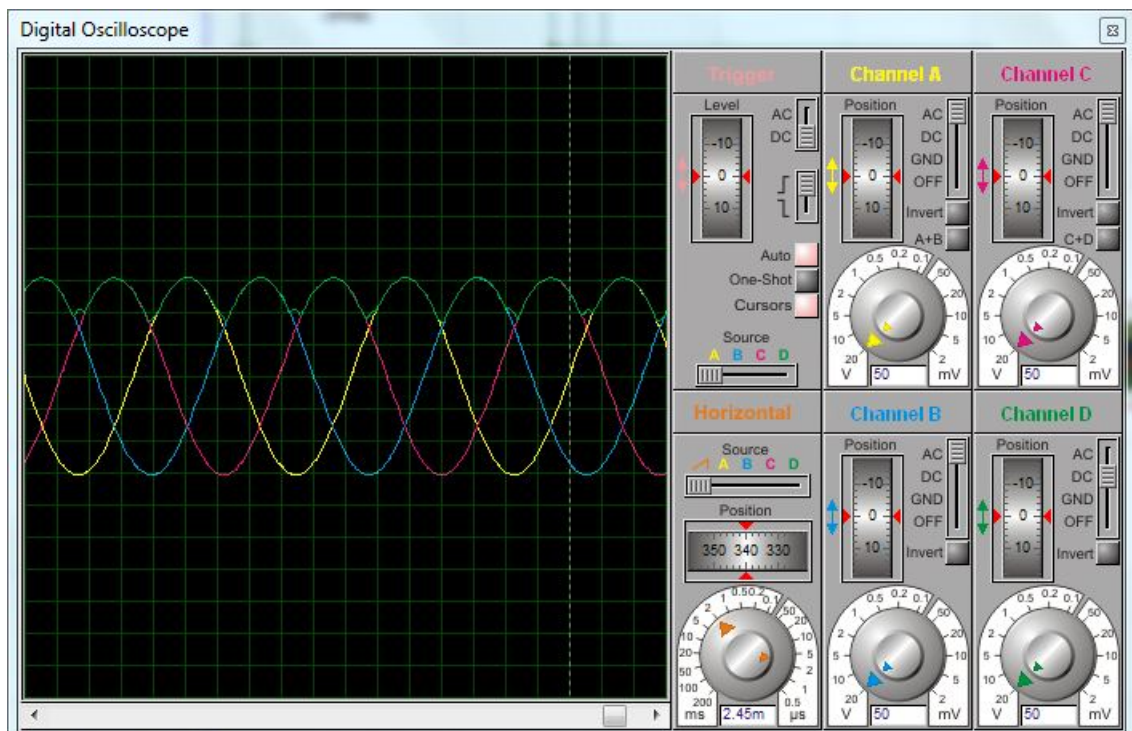
4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos através do osciloscópio disponível no software *Proteus*, demonstrando a comparação entre uso do projeto original do equipamento (retificador trifásico não controlado) com o projeto desenvolvido (retificador trifásico semiconrolado)

4.1 Retificador trifásico não controlado - circuito original do equipamento

Para análise do circuito original aplicado à escavadeira 7295, teremos duas situações distintas. A primeira é quando a caçamba está retida. Nesta situação o motor gira em rotação baixa para garantir o esticamento do cabo da abertura.

Figura 32 – Sinais de tensão retificador não controlado



Fonte: Próprio autor

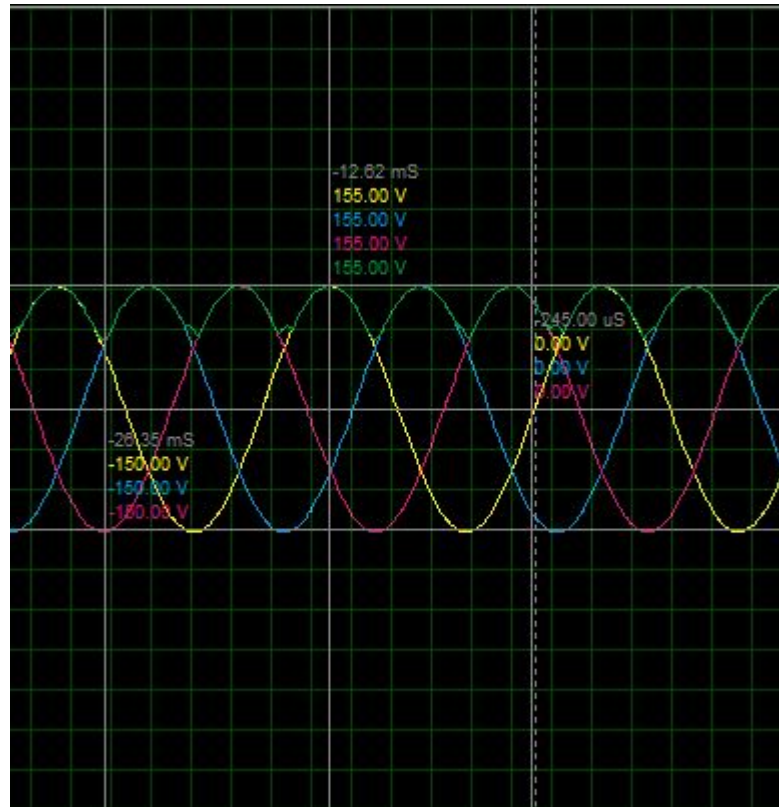
A Figura 32 demonstra as tensões alternadas em cada fase e a tensão pós retificação, sendo:

- Canal A (amarelo) - Tensão fase R;
- Canal B (azul) - Tensão fase S;
- Canal C (rosa) - Tensão T;

- Canal D (verde) - Tensão contínua positiva.

A Figura 33 retrata os valores da tensão de pico de cada sinal, estes valores são essenciais para que o valor de tensão simulado seja o mesmo valor de tensão utilizado no equipamento real, sendo dados em tensão de pico:

Figura 33 – Valores correspondentes de tensão de pico de cada sinal

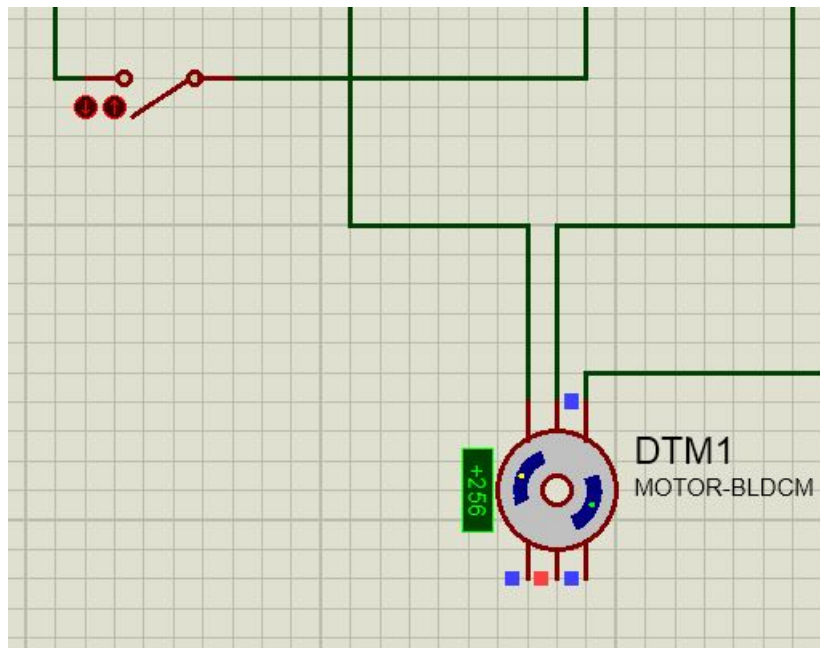


Fonte: Próprio autor

Outra análise que pode ser vista através deste simulador, é a velocidade do eixo de saída do motor. A segunda situação do circuito, é no momento em que acontece a abertura da caçamba através do acionamento do contator antes da bancada de resistores. O sinal de tensão será o mesmo, alterando somente a corrente, conseqüentemente haverá maior rotação do motor devido a eliminação de alguns resistores no circuito. No circuito original do equipamento, a velocidade nominal do motor se dá através da bancada de resistores instaladas na escavadeira. No momento que se deseja uma maior velocidade, o contator deriva a passagem de corrente permitindo que passe através de somente alguns resistores da bancada. As Figuras 34 e 35 retratam ambas situações e o resultado da mudança de velocidade do motor CC. O valor retratado numericamente no motor simulado é a rotação do eixo de saída do motor, dado em RPM. O sinal positivo significa que ele está operando em sentido horário.

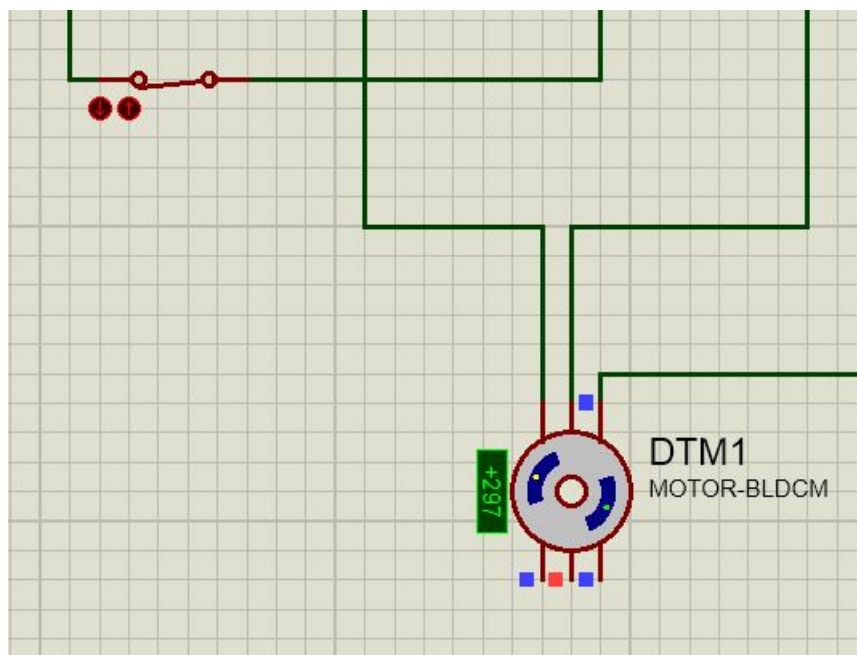
Através deste resultado conclui-se que o circuito simulado no *software* condiz com o que ocorre fisicamente no equipamento, sendo que a rotação nominal do motor aumenta no momento em que o operador faz o comando de abertura da caçamba.

Figura 34 – Velocidade do motor durante retenção da caçamba



Fonte: Próprio autor

Figura 35 – Velocidade do motor durante abertura da caçamba



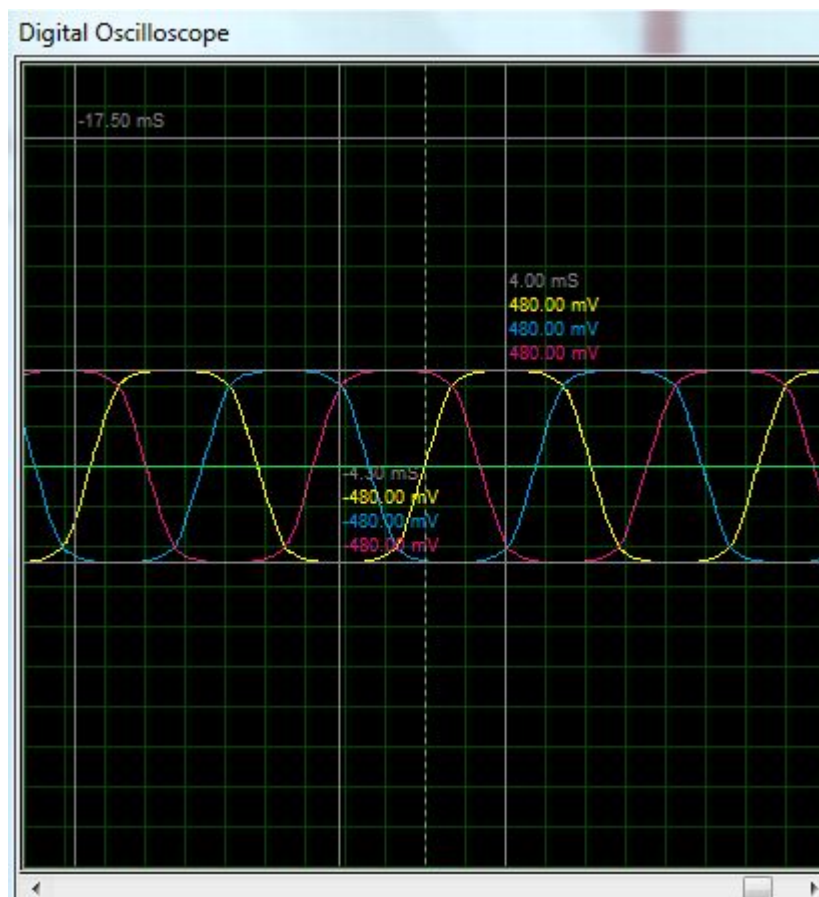
Fonte: Próprio autor

4.2 Retificador trifásico semicontrolado - circuito projetado

Para os resultados a serem discutidos do circuito retificador semicontrolado, serão analisados os valores encontrados para a construção do circuito de disparo dos tiristores, além dos gráficos da retificação em si.

Inicialmente, iremos analisar o sinal de sincronismo do TCA 785 instalado em cada ponto das fases. Através da verificação destes sinais, vemos que cada pulso é aplicado num intervalo de tempo distinto. Para que haja o sincronismo no TCA, o dispositivo detecta a passagem de rede por zero, ou seja, há um detector no circuito interno do CI que gera um pulso de sincronismo toda a vez que a tensão da rede passa por zero. A Figura 36 retrata este fenômeno. Esta restrição da tensão máxima de sincronismo ocorre devido a instalação de dois diodos anti-paralelo, evitando a queima do TCA 785

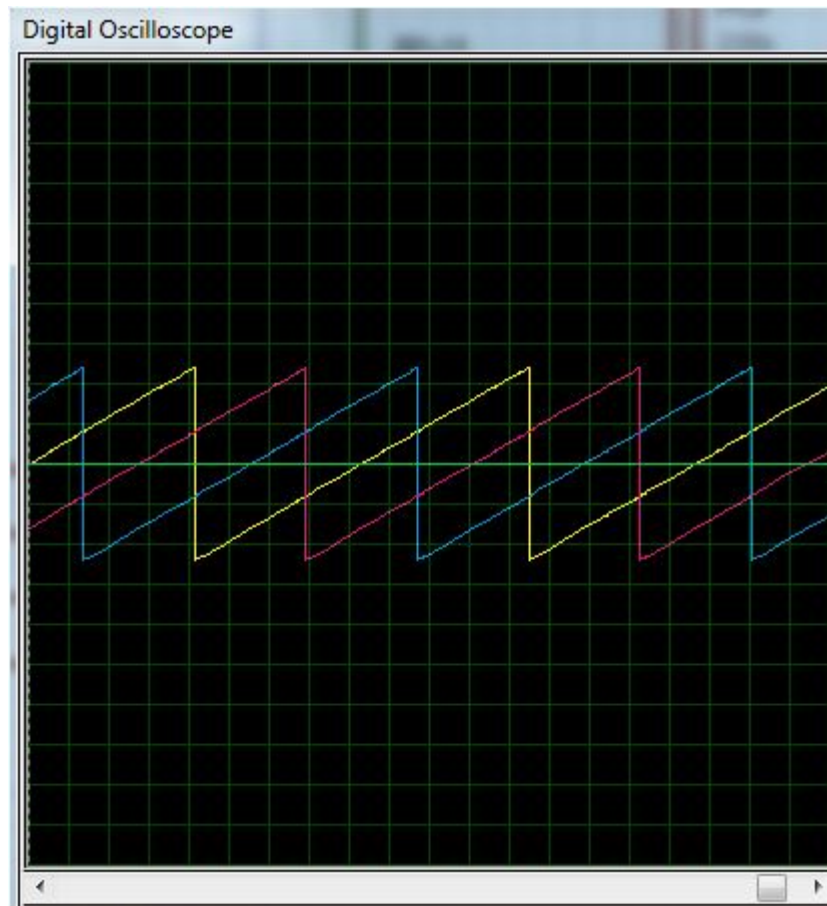
Figura 36 – Tensão de sincronismo do TCA 785



Fonte: Próprio autor

A geração da rampa de carga no capacitor conectado ao pino 10 é responsável pela geração de pulsos do TCA 785, a Figura 37 exhibe o sinal de carregamento e descarregamento dos capacitores para cada fase do circuito.

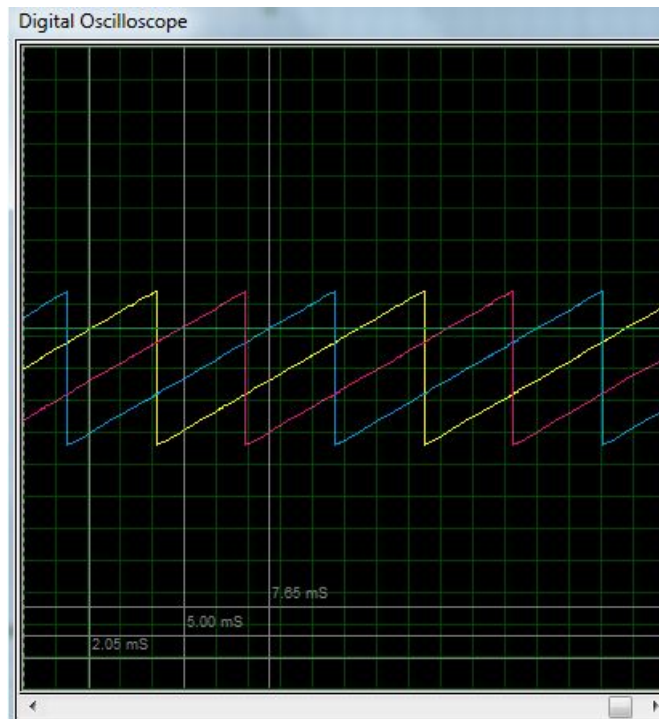
Figura 37 – Geração de rampa dente de serra dos capacitores por fase



Fonte: Próprio autor

No TCA 785 há um comparador que relaciona este sinal gerado pelos capacitores com o sinal do resistor que gerenciará o ângulo α . A tensão do capacitor é crescente e a tensão de controle é constante no tempo. Quando há o cruzamento desses sinais, surge um gatilho no circuito, gerando um pulso para o tiristor, ou seja, quando essas tensões se igualarem a mudança de estado na saída do comparador, este enviará um sinal de pulso de disparo na saída do TCA 785.

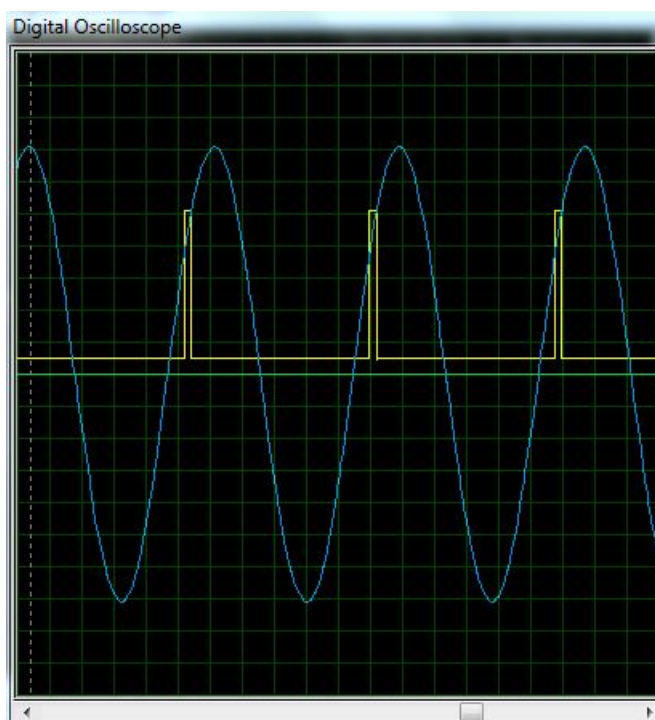
A Figura 38 expõe o sinal do potenciômetro que irá controlar o disparo do ângulo α em contato com os sinais de cada capacitor por fase. Este potenciômetro será o dispositivo em que o operador do equipamento utilizará para abrir a portinhola da caçamba, substituindo o capacitor. O mesmo está representado pelo sinal linear de cor verde. No instante $t = 2,05$ ms, irá ocorrer o gatilho da fase S (amarelo), pois há o encontro destes dois sinais; após será a fase T (rosa), no instante $t = 5$ ms e subsequente o sinal da fase R (azul), em $t = 7,65$ ms. Este capacitor continua a carregar até que o sinal de sincronismo seja passado pelo zero, descarregando o mesmo rapidamente e preparando para o início da próxima rampa.

Figura 38 – Cruzamento entre sinais capacitivos por fase e sinal do potenciômetro de *gate*

Fonte: Próprio autor

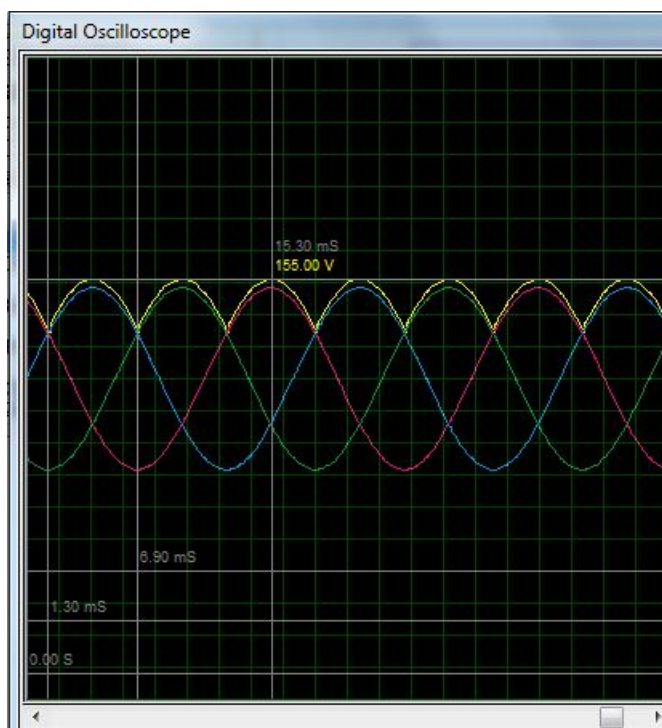
Partindo para correlação entre os ângulos de disparo e o sinal disparado do TCA 785, estudamos os sinais gerados em cada circunstância. A Figura 39, notamos a comparação entre o sinal de disparo com o sinal trifásico da fonte, sendo que quando o sinal é disparado no *gate*, há a seleção do sinal de pico da fonte trifásico, ou seja, neste ponto é que o sinal trifásico passará pelo SCR, transformando-o em sinal semi contínuo. Do ponto de vista da carga, neste ângulo de disparo, o sinal de saída, representado de amarelo (Figura 40), corresponde ao sinal contínuo semelhante ao projeto original, com tensão rms de 110 Vcc.

Figura 39 – Correlação entre o sinal de disparo e sinal trifásico da fonte



Fonte: Próprio autor

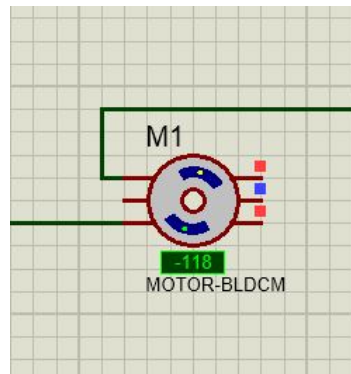
Figura 40 – Sinal de saída na carga comparado ao sinal trifásico da fonte



Fonte: Próprio autor

Durante este ciclo de disparo, tem-se que o motor CC estará em sua velocidade nominal, permitindo que a caçamba fique fechada durante seu funcionamento. A direção de rotação do motor modificou para anti-horário, como visto na Figura 41, para isto, será necessário modificar a instalação do cabo de aço no conjunto do direcionador dos movimentos da caçamba.

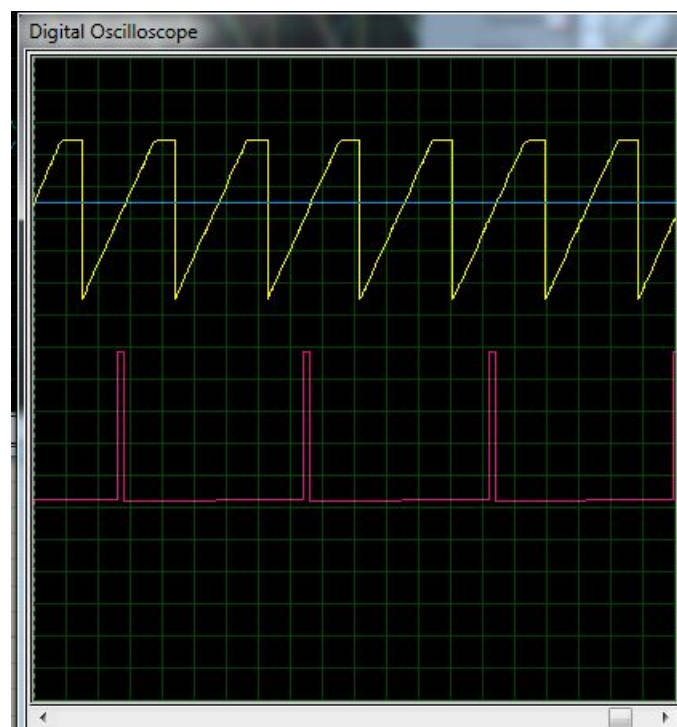
Figura 41 – Velocidade do motor nominal durante retenção da caçamba do circuito semicontrolado



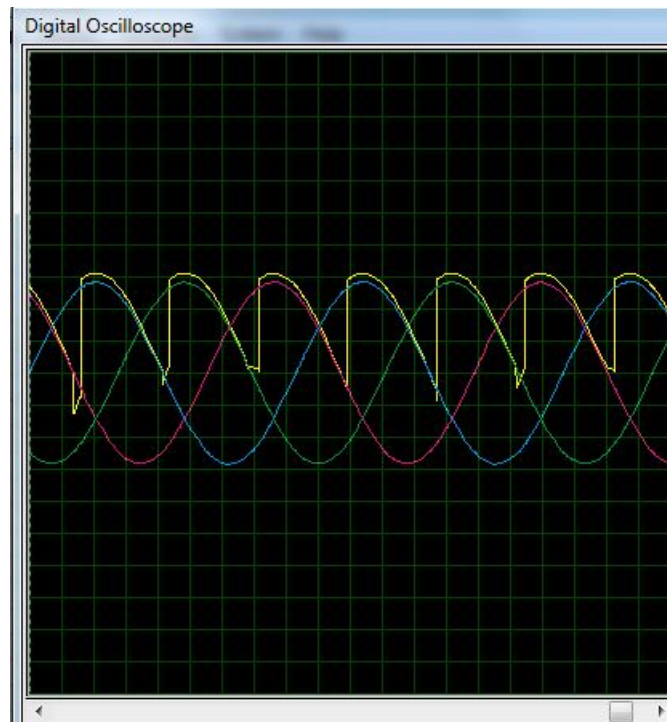
Fonte: Próprio autor

43) Analisando agora com ângulo de disparo de 60° , temos como resultado (Figuras 42 e

Figura 42 – Sinal de disparo para $\alpha=60^\circ$

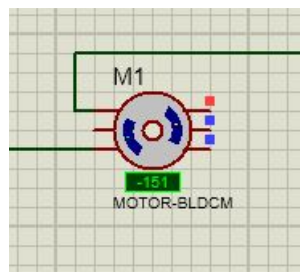


Fonte: Próprio autor

Figura 43 – Sinal de saída da carga para $\alpha=60^\circ$ 

Fonte: Próprio autor

Nota-se que a velocidade do motor para $\alpha = 60^\circ$ (Figura 44) aumentou comparado a velocidade nominal do motor quando em $\alpha = 0^\circ$ (Figura 41), ou seja, quando o operador for aumentando o potenciômetro para abertura da caçamba, aumentará simultaneamente a rotação do eixo de saída do motor, proporcionando a abertura da caçamba conforme requerido, comprovando assim a eficácia do novo projeto desenvolvido.

Figura 44 – Velocidade do motor para $\alpha=60^\circ$ 

Fonte: Próprio autor

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado um projeto de retificação CA-CC destinado às escavadeiras a cabo Caterpillar 7295, com o objetivo principal de substituir componentes robustos por um sistema de retificação que utiliza dispositivos de baixo custo e controle suave. Essa abordagem visa não apenas proporcionar integridade física aos usuários do equipamento, mas também oferecer ganhos significativos em termos de eficiência operacional.

Uma das principais vantagens do projeto é a capacidade de ajustar a velocidade do motor de abertura da caçamba de forma flexível, de acordo com as necessidades do operador. Isso é alcançado simplesmente variando a resistência em um potenciômetro instalado na cabine, eliminando a necessidade de parar o equipamento para ajustar manualmente a bancada de resistores e modificar a velocidade. Essa funcionalidade não apenas garante a produtividade contínua do equipamento, mas também reduz significativamente o tempo de máquina parada, aumentando a eficiência global das operações.

Ao adotar essa abordagem de controle suave e ajustável, o projeto não apenas moderniza o sistema de retificação das escavadeiras a cabo, mas também atende às demandas dos operadores por maior flexibilidade e facilidade de uso. Além disso, ao utilizar componentes de baixo custo, o projeto oferece uma solução econômica que não compromete a qualidade ou a segurança do equipamento.

Ao optar por adotar um sistema de retificação semicontrolada utilizando SCR's e TCA 785 em substituição a um sistema de retificação não controlada, várias vantagens e benefícios são alcançados. Com a utilização de destes componentes nos oferece um controle mais preciso sobre o processo de retificação. Isso significa que a saída de corrente contínua pode ser ajustada e controlada de forma mais eficaz, resultando em uma operação mais estável e confiável do equipamento, neste caso, a escavadeira a cabo. Ao contrário de um sistema de retificação não controlado, onde a saída de corrente é totalmente dependente das características dos componentes utilizados, o sistema com SCR's e TCA 785 permite ajustes e otimizações conforme necessário para atender às exigências específicas de operação.

Portanto, concluímos que o projeto apresentado não só representa um avanço significativo na tecnologia de retificação aplicada a escavadeiras a cabo, mas também demonstra um compromisso com a inovação, a eficiência e a segurança no ambiente de trabalho.

REFERÊNCIAS

- AHMED, A. **Eletrônica de Potência**. [S.l.]: Prentice Hall, 2000. Citado 3 vezes nas páginas 24, 25 e 26.
- ALMEIDA, J. L. A. de. **Dispositivos Semicondutores: Tiristores. Controle de Potência em C.C. e C.A.** [S.l.]: Editora Érica, 1996. Citado na página 28.
- BARBI, I. **Eletrônica de Potência**. [S.l.]: Do Autor, 2005. Citado na página 23.
- BRITO, M. R. S.; COSTA, N. M. A.; FREITAS, L. C. G. Plataforma didática de retificadores trifásicos para ensino de eletrônica de potência. **Universidade Federal de Uberlândia - UFU**, p. 1–6, 2010. Citado na página 28.
- BUCYRUS. 295hr mining shovel: Operator's manual. 2011. Citado na página 38.
- BUCYRUS. Electrical schematic for vale 295hr lots 72 73 machine numbers 141401 141402. 2011. Citado na página 35.
- BUCYRUS. Electric rope shovels: Service procedures. 2012. Citado 4 vezes nas páginas 35, 36, 37 e 38.
- CATERPILLAR. Electric rope shovels: Product line. 2011. Citado 3 vezes nas páginas 13, 14 e 15.
- CATERPILLAR. Electric rope shovels: Dipper. 2022. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 17.
- EEEP. Escola estadual de educação profissional-eeep. 2012. Citado 4 vezes nas páginas 27, 31, 33 e 35.
- JUNIOR, R. C. **Tiristor SCR: retificador controlado de silício**. [S.l.]: Preliminar, 2005. Citado 4 vezes nas páginas 31, 32, 33 e 35.
- LIBERT, N. Retificadores industriais. 2007. Citado na página 24.
- POMILIO, J. A. **Eletrônica de Potência**. [S.l.]: FEEC Universidade Federal de Campinas, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.
- RASHID, M. H. **Eletrônica de Potência: dispositivos, circuitos e aplicações**. [S.l.]: Pearson, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.
- RUIZ, J. N. **Diseño e implementación de un rectificador trifásico totalmente controlado para el control de un motor DC**. 192 p. Monografía (Dissertação) — Universitat Politècnica de València, València, 2016. Citado 4 vezes nas páginas 20, 28, 29 e 30.

**ANEXO A – ESQUEMÁTICO DO PROJETO NO SOFTWARE
*PROTEUS***

