



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE CARAÚBAS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

THIAGO POMPILIO DE SOUSA

**DIMENSIONAMENTO E SIMULAÇÃO DE UM RETIFICADOR TRIFÁSICO
CONTROLADO PARA ACIONAMENTO DE UM MOTOR DE CORRENTE
CONTÍNUA**

CARAÚBAS

2019

THIAGO POMPILIO DE SOUSA

**DIMENSIONAMENTO E SIMULAÇÃO DE UM RETIFICADOR TRIFÁSICO
CONTROLADO PARA ACIONAMENTO DE UM MOTOR DE CORRENTE
CONTÍNUA**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, Campus Caraúbas como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia elétrica.

Orientador: Prof. Ms. Antônio Alisson Alencar Freitas.

CARAÚBAS

2019

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

S725d Sousa, Thiago Pompílio de .
DIMENSIONAMENTO E SIMULAÇÃO DE UM RETIFICADOR
TRIFÁSICO CONTROLADO PARA ACIONAMENTO DE UM MOTOR
DE CORRENTE CONTÍNUA / Thiago Pompílio de Sousa.
- 2019.
83 f. : il.

Orientador: Antônio Alisson.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Elétrica, 2019.

1. Retificador. 2. Produção. 3. Perfuração. 4.
Trifásicos. 5. Eficiência energética. I. Alisson,
Antônio, orient. II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

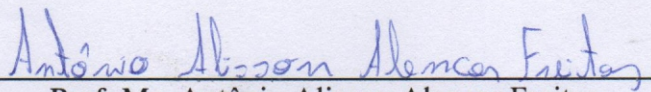
THIAGO POMPILIO DE SOUSA

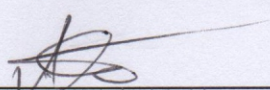
**DIMENSIONAMENTO E SIMULAÇÃO DE UM RETIFICADOR TRIFÁSICO
CONTROLADO PARA ACIONAMENTO DE UM MOTOR DE CORRENTE
CONTÍNUA**

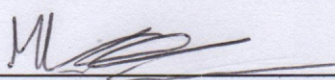
Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, Campus Caraúbas como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia elétrica.

Defendida em: 20 / 03 / 2019.

BANCA EXAMINADORA


Prof. Ms. Antônio Alisson Alencar Freitas
Orientador


Prof. Ms. José Ailton Leão Barboza Junior
Membro Examinador


Prof. Dr. Marcus Vinicius Silverio Costa
Membro Examinador

*Aos meus pais Jorge Martins de Sousa e
Maria Pompilio de Sousa, e a minha esposa
Kesya Waleska Sousa Pinheiro.*

AGRADECIMENTOS

A princípio, agradeço ao meu redentor, Deus, por me conceder este momento tão grandioso e ilustre em minha existência. Agradecer a sua imensurável contribuição na minha vida e por ter dado a mim discernimento nas minhas escolhas e caminhos, edificado minha sabedoria e me ensinado a verdadeira força para superar todos os obstáculos postos durante esta trajetória, de forma que em nenhum momento fizesse-me renunciar aos meus anseios.

Para toda minha família, em especial meus pais, Jorge Martins que sempre esteve ao meu lado, sempre mostrando um exemplo de superação para viver as jornadas cansativas da sua profissão e Maria Pompilio, que sempre me forneceu todo apoio e força para superar as dificuldades e nunca ter desistido do propósito que ela tinha para com seus filhos. A minha irmã Mariana Pompilio por toda cooperação prestada durante todo o curso de graduação.

A minha esposa Kesya Waleska, que sempre acreditou em minha capacidade de enfrentar os desafios e alcançar a vitória, além de todo o seu apoio, companheirismo, ânimo e compreensão.

A todo corpo docente da UFERSA e um agradecimento especial ao meu professor e orientador Antônio Alisson Alencar Freitas, pela paciência, motivação e por toda a dedicação para que esse trabalho fosse concluído. Agradeço muito a UFERSA pela grande contribuição dada a sociedade, possibilitando a formação superior para vários cidadãos que anteriormente não tinham muitas expectativas para crescimento profissional.

E por fim, agradecer aos meus amigos Antônio George, Genézio Araújo, Hamilton Freire, Ícaro André, Jean Declyer, José Netto, José Rubens, Lucas Duarte e Michael Rostand que me ajudaram em todos os momentos vividos durante o curso.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.”

José de Alencar.

RESUMO

Os retificadores são dispositivos utilizados em equipamentos eletrônicos do nosso dia a dia. Além disso, esses retificadores em maiores escalas são amplamente utilizados nas indústrias. Dentre estas, a indústria petrolífera tem papel fundamental para a economia do Brasil e na economia mundial. A empresa Petrorio é uma produtora independente de petróleo com foco no investimento e na recuperação de ativos em produção. Em janeiro de 2014 a Petrorio assumiu a gestão do campo de Polvo. A plataforma Polvo-A está situada a uma distância de 100 quilômetros da cidade de Cabo Frio na bacia de Campos e possui as atividades de produção e perfuração de poços. Na sonda de perfuração da plataforma Polvo-A, pertencente a empresa Petrorio são utilizados retificadores trifásicos controlados de seis pulsos para o acionamento dos motores da bomba de lama. Dessa forma, o presente trabalho consiste em analisar este retificador de forma quantitativa e qualitativa, além de propor solução para a melhoria da eficiência energética desses equipamentos. Primeiramente foram analisados os retificadores monofásicos e trifásicos controlados, com intuito de analisar e selecionar o melhor retificador para ser utilizado na plataforma Polvo-A. Assim durante a realização do trabalho, em posse dos dados obtidos através de cálculos e simulações executadas no programa PSIM, constatou-se que o retificador trifásico controlado de seis pulsos está sobredimensionado, o que motivou a elaboração de propostas com melhorias a serem implementadas para este retificador. Finalmente, foram estudadas as possíveis soluções encontradas para a melhoria de eficiência dos retificadores.

Palavras-chave: Retificador, produção, perfuração, trifásicos, eficiência energética.

ABSTRACT

Rectifiers are devices used in electronic equipment of our day to day. In addition, these rectifiers on larger scales are widely used in industries. Among these, the oil industry plays a fundamental role for the Brazilian economy and the world economy. Petrorio is an independent oil producer with a focus on investment and recovery of assets in production. In January 2014 Petrorio took over the management of the Polvo field. The Polvo-A platform is located at a distance of 100 kilometers from the city of Cabo Frio in the Campos basin and has the activities of production and drilling of wells. The three-phase three-phase rectifiers used for the drive of the mud pump motors are used in the drilling rig of the Polvo-A platform owned by Petrorio. In this way, the present work consists of analyzing this rectifier in a quantitative and qualitative way, besides proposing solution for the improvement of the energy efficiency of these equipments. Firstly, the single-phase and three-phase controlled rectifiers were analyzed in order to analyze and select the best rectifier to be used in the Polvo-A platform. Thus, during the execution of the work, in possession of the data obtained through calculations and simulations executed in the PSIM program, it was verified that the six-phase controlled three-phase rectifier is oversized, which motivated the elaboration of proposals with improvements to be implemented for this rectifier. Finally, the possible solutions found to improve the efficiency of the rectifiers were studied.

Keywords: Rectifier, production, drilling, three-phase, energy efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Motor de corrente contínua	17
Figura 2	– Retificador monofásico controlado (ponto médio)	21
Figura 3	– Circuito do retificador monofásico com ponto médio	21
Figura 4	– Tensão de entrada do retificador monofásico com ponto médio	22
Figura 5	– Tensão de saída do retificador monofásico com ponto médio ($\alpha = 30^\circ$) ...	22
Figura 6	– Corrente de saída do retificador monofásico com ponto médio ($\alpha = 30^\circ$) .	22
Figura 7	– Tensão de disparo do SCR ($\alpha = 30^\circ$)	23
Figura 8	– Tensão de saída do retificador monofásico com ponto médio ($\alpha = 60^\circ$) ...	23
Figura 9	– Corrente de saída do retificador monofásico com ponto médio ($\alpha = 60^\circ$) .	23
Figura 10	– Tensão de disparo do SCR ($\alpha = 60^\circ$)	24
Figura 11	– Retificador monofásico controlado (ponte completa)	24
Figura 12	– Circuito do retificador monofásico com ponte completa	25
Figura 13	– Tensão de entrada do retificador monofásico com ponte completa	26
Figura 14	– Tensão de saída do retificador monofásico com ponte completa ($\alpha = 30^\circ$)	26
Figura 15	– Corrente de saída do retificador monofásico com ponte completa ($\alpha = 30^\circ$)	26
Figura 16	– Tensão de disparo do SCR ($\alpha = 30^\circ$)	27
Figura 17	– Tensão de saída do retificador monofásico com ponte completa ($\alpha = 60^\circ$)	27
Figura 18	– Corrente de saída do retificador monofásico com ponte completa ($\alpha = 60^\circ$)	27
Figura 19	– Tensão de disparo do SCR ($\alpha = 60^\circ$)	28
Figura 20	– Retificador trifásico controlado (ponto médio)	29
Figura 21	– Circuito do retificador trifásico com ponto médio	30
Figura 22	– Tensão de entrada do retificador trifásico com ponto médio	31
Figura 23	– Tensão de saída do retificador trifásico com ponto médio ($\alpha = 30^\circ$)	31
Figura 24	– Corrente de saída do retificador trifásico com ponto médio ($\alpha = 30^\circ$)	31
Figura 25	– Tensão de disparo dos SCRs ($\alpha = 30^\circ$)	32
Figura 26	– Tensão de saída do retificador trifásico com ponto médio ($\alpha = 60^\circ$)	32
Figura 27	– Corrente de saída do retificador trifásico com ponto médio ($\alpha = 60^\circ$)	32
Figura 28	– Tensão de disparo dos SCRs ($\alpha = 60^\circ$)	33
Figura 29	– Retificador trifásico controlado (ponte completa)	33

Figura 30	– Etapas de operação do retificador trifásico controlado (ponte completa) ...	34
Figura 31	– Circuito do retificador trifásico com ponte completa	36
Figura 32	– Tensão de entrada do retificador trifásico com ponte completa	36
Figura 33	– Tensão de saída do retificador trifásico com ponte completa ($\alpha = 30^\circ$)	36
Figura 34	– Corrente de saída do retificador trifásico com ponte completa ($\alpha = 30^\circ$) ..	37
Figura 35	– Tensão de disparo dos SCRs ($\alpha = 30^\circ$)	37
Figura 36	– Tensão de saída do retificador trifásico com ponte completa ($\alpha = 60^\circ$)	37
Figura 37	– Corrente de saída do retificador trifásico com ponte completa ($\alpha = 60^\circ$) ..	38
Figura 38	– Tensão de disparo dos SCRs ($\alpha = 60^\circ$)	38
Figura 39	– Retificador trifásico controlado (doze pulsos) associado em série	39
Figura 40	– Retificador trifásico controlado (doze pulsos) associado em paralelo	40
Figura 41	– Circuito do retificador trifásico de doze pulsos	41
Figura 42	– Tensão de entrada do retificador trifásico de doze pulsos	42
Figura 43	– Tensão de saída do retificador trifásico de doze pulsos ($\alpha = 30^\circ$)	42
Figura 44	– Corrente de saída do retificador trifásico de doze pulsos ($\alpha = 30^\circ$)	42
Figura 45	– Tensão de disparo dos SCRs – Conversor Y-Y ($\alpha = 30^\circ$)	43
Figura 46	– Tensão de disparo dos SCRs – Conversor Y- Δ ($\alpha = 30^\circ$)	43
Figura 47	– Tensão de saída do retificador trifásico de doze pulsos ($\alpha = 60^\circ$)	43
Figura 48	– Corrente de saída do retificador trifásico de doze pulsos ($\alpha = 60^\circ$)	44
Figura 49	– Tensão de disparo dos SCRs – Conversor Y-Y ($\alpha = 60^\circ$)	44
Figura 50	– Tensão de disparo dos SCRs – Conversor Y- Δ ($\alpha = 60^\circ$)	44
Figura 51	– <i>Overview</i> do sistema	47
Figura 52	– Representação da chave de seleção dos equipamentos da sonda de perfuração	48
Figura 53	– Valores das resistências do motor GE-752 US	50
Figura 54	– Valores obtidos durante o teste de impedâncias do motor GE-752 US	50
Figura 55	– Valores nominais do motor GE-752 US	51
Figura 56	– Circuito do retificador trifásico com ponte completa para o acionamento dos motores CC	60
Figura 57	– Tensão de entrada do retificador	61
Figura 58	– Circuito de gatilho dos SCRs	62
Figura 59	– Tensão de disparo dos SCRs ($\alpha = 57.71^\circ$)	62
Figura 60	– Tensão de saída do retificador trifásico com ponte completa ($\alpha = 57.71^\circ$)	62

Figura 61	– Corrente de saída do retificador trifásico com ponte completa ($\alpha = 57.71^\circ$)	63
Figura 62	– Tensão dos SCRs – Grupo positivo ($\alpha = 57.71^\circ$)	63
Figura 63	– Tensão dos SCRs – Grupo negativo ($\alpha = 57.71^\circ$)	64
Figura 64	– Corrente dos SCRs – Semiciclo positivo da Fase “A” ($\alpha = 57.71^\circ$)	64
Figura 65	– Corrente dos SCRs – Semiciclo negativo da Fase “A” ($\alpha = 57.71^\circ$)	65
Figura 66	– Corrente dos SCRs – Semiciclo positivo da Fase “B” ($\alpha = 57.71^\circ$)	65
Figura 67	– Corrente dos SCRs – Semiciclo negativo da Fase “B” ($\alpha = 57.71^\circ$)	66
Figura 68	– Corrente dos SCRs – Semiciclo positivo da Fase “C” ($\alpha = 57.71^\circ$)	66
Figura 69	– Corrente dos SCRs – Semiciclo negativo da Fase “C” ($\alpha = 57.71^\circ$)	67
Figura 70	– Sobreposição das correntes dos SCRs (1/5/6) com a corrente de saída	67
Figura 71	– Sobreposição das correntes dos SCRs (2/4/6) com a corrente de saída	68
Figura 72	– Sobreposição das correntes dos SCRs (3/4/5) com a corrente de saída	68
Figura 73	– Gráfico de corrente média do SCR em função da temperatura máxima permitida	70
Figura 74	– Tensão de saída do retificador trifásico com capacitor de filtro ($\alpha = 57.71^\circ$)	72
Figura 75	– Corrente de saída do retificador trifásico com capacitor de filtro ($\alpha = 57.71^\circ$)	73
Figura 76	– Tensão de saída do retificador trifásico com capacitor de filtro ($\alpha = 73^\circ$)	73
Figura 77	– Corrente de saída do retificador trifásico com capacitor de filtro ($\alpha = 73^\circ$)	74
Figura 78	– Harmônicas de tensão e corrente do retificador trifásico (sem o capacitor de filtro)	74
Figura 79	– Harmônicas de tensão e corrente do retificador trifásico (com o capacitor de filtro)	75
Figura 80	– Circuito do retificador trifásico de doze pulsos	77
Figura 81	– Tensão de saída do retificador trifásico de doze pulsos ($\alpha = 57.71^\circ$)	78
Figura 82	– Corrente de saída do retificador trifásico de doze pulsos ($\alpha = 57.71^\circ$)	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Valores das leituras obtidas durante a simulação do retificador monofásico com ponto médio	24
Tabela 2	– Valores das leituras obtidas durante a simulação do retificador monofásico com ponte completa	28
Tabela 3	– Valores das leituras obtidas durante a simulação do retificador trifásico com ponto médio	33
Tabela 4	– Valores das leituras obtidas durante a simulação do retificador trifásico com ponte completa	38
Tabela 5	– Valores das leituras obtidas durante o dimensionamento do retificador trifásico de doze pulsos	45
Tabela 6	– Valores calculados durante o dimensionamento do retificador trifásico ($\alpha = 0^\circ$)	56
Tabela 7	– Valores calculados durante o dimensionamento do retificador trifásico ($\alpha = 57.71^\circ$)	58
Tabela 8	– Valores das leituras obtidas durante a simulação do retificador trifásico ($\alpha = 57.71^\circ$).....	69
Tabela 9	– Valores das leituras obtidas durante a simulação do retificador trifásico (com capacitor de filtro)	76
Tabela 10	– Valores das leituras obtidas durante a simulação do retificador trifásico de doze pulsos	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
V	Volts
A	Ampères
kVA	Kilo volt-ampère
Hz	Hertz
R	Resistência
F	Frequência
L	Indutância
Hz	Hertz
SCR	<i>Silicon Controlled Rectifier</i>
GE	<i>General Electric</i>
pk	Valor de pico
med	Valor médio
ef	Valor eficaz
CLP	Controlador Lógico Programável
IHM	Interface Homem-Máquina
US\$	Dólar americano
FEM	Força eletromotriz
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i>
°C	Graus Celsius

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos	18
1.1.1	Objetivo geral	18
1.1.2	Objetivos específicos	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	Retificadores controlados	20
2.2	Retificadores monofásicos controlados	21
2.2.1	Retificador monofásico controlado (Ponto médio)	21
2.2.2	Retificador monofásico controlado (Ponte completa)	24
2.3	Retificadores trifásicos controlados	29
2.3.1	Retificador trifásico controlado (Ponto médio)	29
2.3.2	Retificador trifásico controlado (Ponte completa)	33
2.3.3	Retificador trifásico controlado (Doze Pulsos)	39
3	METODOLOGIA	46
4	DIMENSIONAMENTO DO RETIFICADOR	47
4.1	Overview do sistema	47
4.2	Dimensionamento do retificador	49
5	SIMULAÇÃO DO RETIFICADOR	60
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	70
6.1	Sobredimensionamento dos SCRs	70
6.2	Inserção de um capacitor de filtro	71
6.3	Utilização de retificadores com 12 pulsos	76
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
	REFERÊNCIAS	82

1 INTRODUÇÃO

Segundo Pomilio (2002), as aplicações das máquinas de corrente contínua são bastante variadas, incluindo a tração de veículos elétricos e o acionamento de máquinas operatrizes. Atualmente, na sede da indústria petrolífera as atividades que envolvem a perfuração de poços de petróleo são bastante complexas e requerem um grande investimento por parte da companhia.

Por exemplo, durante a última campanha de perfuração realizada na plataforma Polvo-A, pertencente a empresa Petrorio o investimento para colocar um dos poços em produção foi de aproximadamente US\$ 15 milhões em um período de dois meses. Portanto, os equipamentos a serem instalados em uma plataforma de petróleo devem possuir alta eficiência, além de alta confiabilidade como requisitos mínimos, pois, caso algum desses equipamentos apresentem um mau funcionamento durante a sua utilização, a companhia estará propensa a arcar com altos prejuízos.

As atividades de perfuração e completação de poços são realizadas por meio de sondas de perfuração, que consiste em um conjunto de equipamentos bastante complexos, com grande variedade de tipos. Cada equipamento em uma sonda de perfuração tem sua finalidade específica, porém, os mesmos estão expostos a uma alta demanda de atividades pesadas que variam de acordo com a operação a ser realizada. Dentre os equipamentos instalados em uma sonda de perfuração, tem-se (*Top-Drive*, bombas de lama, mesa rotativa, *Drawworks*).

Na indústria petrolífera são utilizados diversos tipos de motores, nos quais estes são responsáveis pelo acionamento de bombas e demais equipamentos de aplicação industrial. Os equipamentos instalados em uma sonda de perfuração possuem um fator em comum, os mesmos são acionados através de motores de corrente contínua. Os motores CC podem operar com velocidade ajustável entre amplos limites e se prestam a controles de grande flexibilidade e precisão, além de possuir alto torque de partida em baixas rotações.

Por isso seu uso é restrito a casos especiais em que estas exigências compensam o custo mais alto da instalação. Vale salientar que as características dos motores de corrente contínua são afetadas diretamente com o tipo de excitação dos mesmos. Os tipos de excitação são: Série, paralelo, independente e/ou composta.

Dentre os motores instalados na sonda de perfuração da plataforma Polvo-A, há dois motores de corrente contínua, destinados a acionar mecanicamente a bomba de circulação de lama, tendo este equipamento papel primordial nas operações de completação e perfuração de

poços. Na figura 1 tem-se o motor de corrente contínua utilizado na sonda de perfuração da plataforma Polvo-A.

Figura 1 – Motor de corrente contínua



Fonte: Datasheet GE-752 High Torque DC drilling motor.

Os motores de corrente contínua instalados na sonda de perfuração da plataforma Polvo-A são acionados através de retificadores trifásicos totalmente controlados por SCRs (*Silicon Controlled Rectifier*), por serem equipamentos robustos, possuírem uma elevada corrente elétrica, além de garantir uma maior precisão no controle de velocidade dos motores.

Segundo Rashid (1999) os retificadores são dispositivos capazes de converter corrente alternada em corrente contínua. Esta conversão será empregada quando a carga a ser alimentada exigir uma tensão contínua. De acordo com Pomilio (2002) os retificadores podem ser classificados conforme: a sua capacidade de ajustar o valor da tensão de saída; de acordo com o número de fases da tensão alternada; e em função do tipo de conexão dos elementos retificadores.

A instalação dos motores CC na sonda de perfuração da plataforma Polvo-A, em conjunto com um sistema de retificadores de alta eficiência e alta confiabilidade garantem o correto e adequado funcionamento dos equipamentos que por consequência traz uma otimização de tempo e redução de custos devido a menor incidência de falhas sobre os mesmos.

Dessa forma, a análise qualitativa do retificador trifásico controlado empregado no acionamento dos motores de corrente contínua e a busca por contínuas melhorias, torna-se um

desafio para atingir melhores resultados de eficiência energética. O presente trabalho encontra-se dividido da seguinte maneira:

No 2º capítulo deste trabalho serão analisados os tipos de retificadores controlados por SCRs (monofásicos e trifásicos), a fim de conhecer suas vantagens/desvantagens, além de selecionar o melhor retificador a ser empregado na sonda de perfuração da plataforma Polvo-A.

No 4º capítulo será dimensionado o retificador proposto, com intuito de verificar se o mesmo está bem dimensionado para as condições atuais de operação.

No 5º capítulo será realizada a simulação do retificador através de métodos computacionais para verificar as formas de onda, os valores de tensão e corrente do retificador além de fazer uma comparação com os valores reais obtidos durante a operação dos equipamentos.

No 6º capítulo serão expostas as possíveis melhorias que poderão ser realizadas no retificador, analisando as vantagens/desvantagens das mesmas por métodos computacionais, além de listar as dificuldades operacionais que serão enfrentadas com a implementação destas melhorias.

No 7º capítulo serão abordados sucintamente todos os temas expostos nesse trabalho, além de levantar os pontos essenciais para a realização de futuros trabalhos no retificador trifásico instalado na plataforma Polvo-A.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo analisar o retificador trifásico controlado para o acionamento de motor de corrente contínua buscando melhorias que permitam o aumento de sua eficiência. Além de difundir e expandir os conhecimentos da disciplina de eletrônica de potência sobre tais equipamentos.

1.1.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram traçados:

- Expandir os conhecimentos na disciplina de eletrônica de potência;

- Dominar os métodos de simulação e cálculo dos retificadores monofásicos e trifásicos controlados;
- Verificar a possibilidade de otimização do retificador utilizado na plataforma Polvo-A (Petrório);
- Obter experiência prática com os dispositivos presentes no mercado (prática em laboratório).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Retificadores Controlados

Para obter tensões de saídas controladas em retificadores, se faz necessário o emprego de tiristores para o controle de fase, ao invés de diodos utilizados em retificadores não-controlados. A tensão de saída dos retificadores tiristorizados é controlada variando o ângulo de disparo dos tiristores, Rashid (1999). O gatilho de um tiristor é controlado através da aplicação de um pulso de curta duração em seu terminal e desligado devido à comutação natural da rede.

Os retificadores controlados podem ser classificados em dois tipos, dependendo do número de fases na alimentação de entrada: Retificadores monofásicos e retificadores trifásicos. Cada tipo pode ser subdividido em: Semicontrolado e totalmente controlado.

Os retificadores controlados são classificados em dois tipos: Completamente controlado e semicontrolado, Ahmed (2000). O retificador completamente controlado é um conversor de dois quadrantes, onde a corrente CC é unidirecional, porém, a tensão CC pode ter qualquer uma das duas polaridades. Em uma delas, o fluxo de potência vai da fonte CA para a carga CC, em um processo chamado retificação. Com a inversão da tensão CC pela carga, o fluxo de potência vai da fonte CC para a alimentação CA, em um método denominado inversão.

Caso metade dos SCRs venham a ser substituídos por diodos, o circuito passará a ser classificado como semicontrolado. Nesse circuito, o valor médio da tensão CC também é variado através do controle de fase do SCR. Este tipo de retificador também é denominado de conversor de um quadrante, pois, a polaridade da tensão de saída CC e a direção da corrente não podem ser alteradas, ou seja, o fluxo de potência ocorre da fonte CA para a carga CC.

De acordo com Rashid (1999) os retificadores controlados são simples e mais baratos e sua eficiência é, em geral, acima de 95%. Os circuitos retificadores controlados constituem a principal aplicação dos tiristores em conversores estáticos. Possuem vasta aplicação industrial, no acionamento de motores de corrente contínua, em estações retificadoras para alimentação de redes de transmissão CC, no acionamento de locomotivas, Rashid (1999).

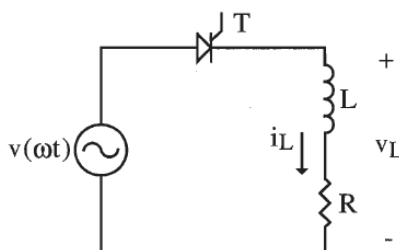
No capítulo que se segue serão abordados os retificadores controlados monofásicos e trifásicos.

2.2 Retificadores monofásicos controlados

2.2.1 Retificador monofásico controlado (Ponto médio)

Na figura 2 tem-se um retificador monofásico controlado em ponto médio.

Figura 2 – Retificador monofásico controlado (ponto médio)



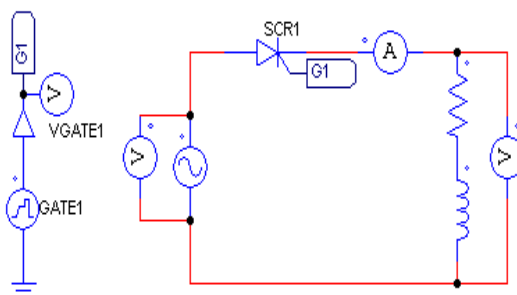
Fonte: Barbi, 2006.

Segundo Ahmed (2000) durante o semiciclo positivo da tensão de alimentação, o SCR estará diretamente polarizado e caso o SCR venha a passar para o estado de ligado em $\omega t = \alpha$, a carga é conectada a rede de alimentação de entrada.

Durante o semiciclo negativo da tensão de entrada, o SCR estará inversamente polarizado. Entretanto, a energia armazenada no campo magnético do indutor retornará e manterá uma corrente direta através da carga, mesmo com a tensão de entrada estando negativa.

De acordo com Rashid (1999) os retificadores monofásicos controlados são extensivamente utilizados em aplicações industriais até 15 kW. Dependendo do ângulo de disparo dos SCRs (α) a tensão média de saída pode ser tanto positiva quanto negativa, o que possibilita a operação em dois quadrantes. Na figura 3 está representado o circuito que foi utilizado no software PSIM, para a obtenção das leituras desejadas.

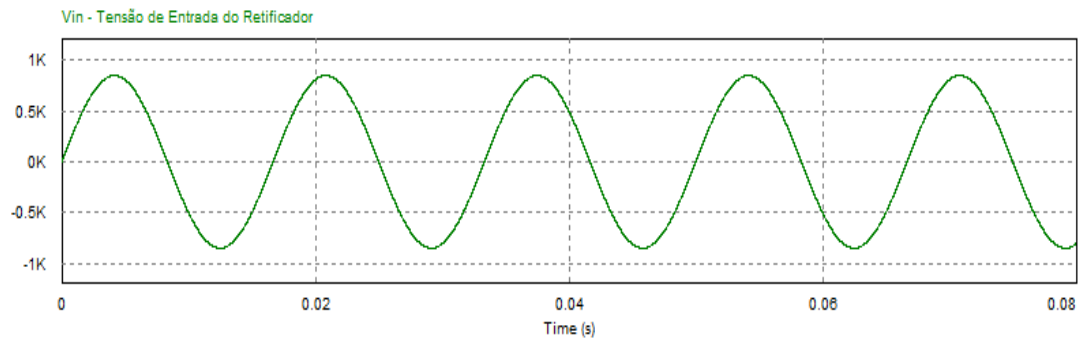
Figura 3 – Circuito do retificador monofásico com ponto médio



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 4 foi obtido o gráfico para leitura da tensão em CA da alimentação do retificador monofásico controlado (ponto médio).

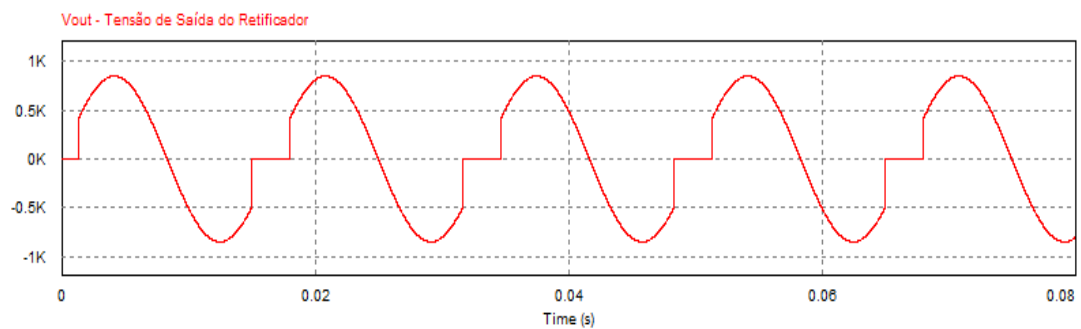
Figura 4 – Tensão de entrada do retificador monofásico com ponto médio



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 5 foi obtido o gráfico para leitura da tensão de saída em CC do retificador monofásico controlado (ponto médio), para $(\alpha = 30^\circ)$.

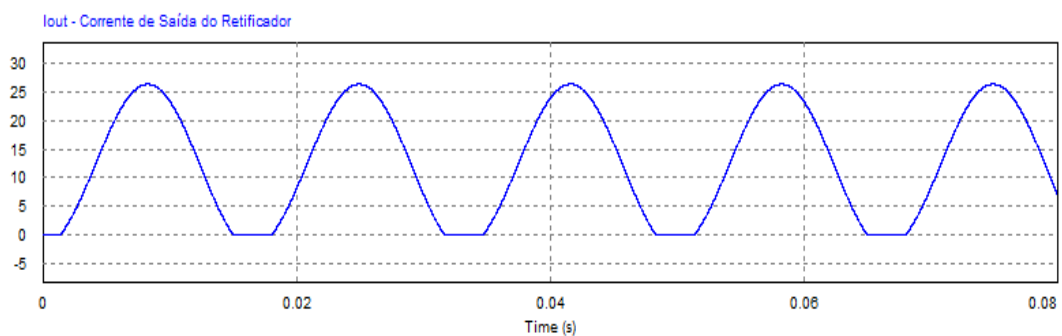
Figura 5 – Tensão de saída do retificador monofásico com ponto médio ($\alpha = 30^\circ$)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 6 foi obtido o gráfico para leitura da corrente de saída em CC do retificador monofásico controlado (ponto médio), para $(\alpha = 30^\circ)$.

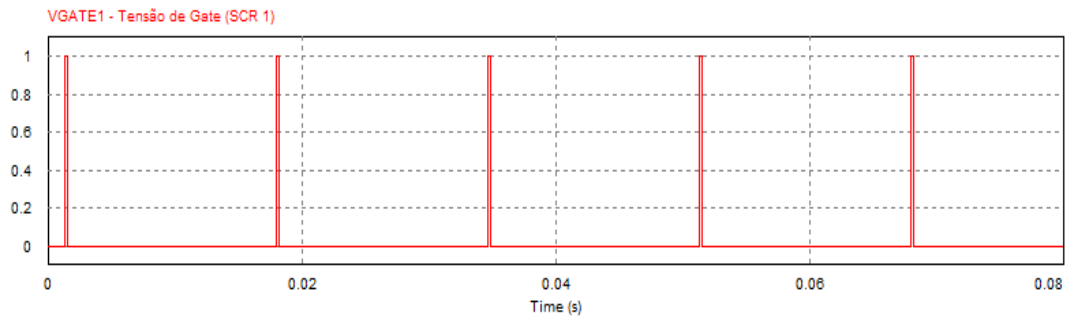
Figura 6 – Corrente de saída do retificador monofásico com ponto médio ($\alpha = 30^\circ$)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 7 foi obtido o gráfico para leitura de tensão de disparo do SCR, para ($\alpha = 30^\circ$).

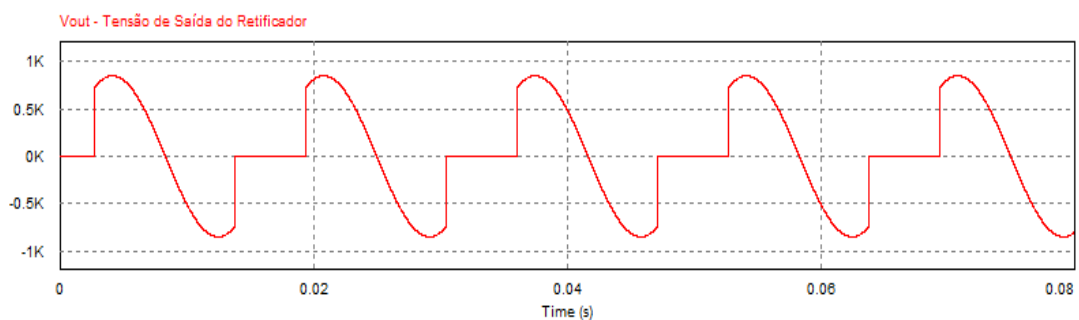
Figura 7 – Tensão de disparo do SCR ($\alpha = 30^\circ$)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 8 foi obtido o gráfico para leitura da tensão de saída em CC do retificador monofásico controlado (ponto médio), para ($\alpha = 60^\circ$).

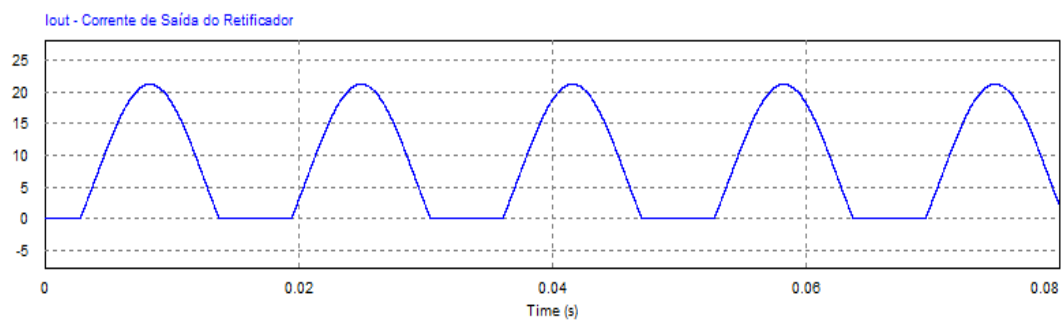
Figura 8 – Tensão de saída do retificador monofásico com ponto médio ($\alpha = 60^\circ$)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 9 foi obtido o gráfico para leitura da corrente de saída em CC do retificador monofásico controlado (ponto médio), para ($\alpha = 60^\circ$).

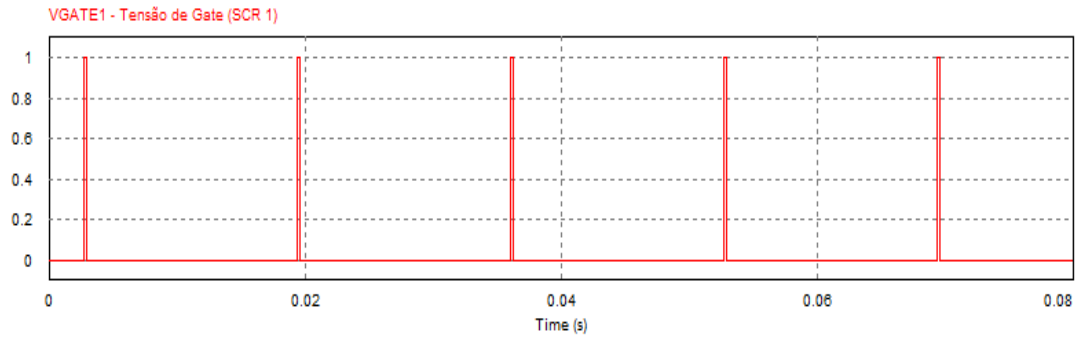
Figura 9 – Corrente de saída do retificador monofásico com ponte médio ($\alpha = 60^\circ$)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 10 foi obtido o gráfico para leitura de tensão de disparo do SCR, para ($\alpha = 60^\circ$).

Figura 10 – Tensão de disparo dos SCRs ($\alpha = 60^\circ$)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Os valores médios obtidos durante a simulação do retificador monofásico controlado (ponto médio) estão presentes na Tabela 1.

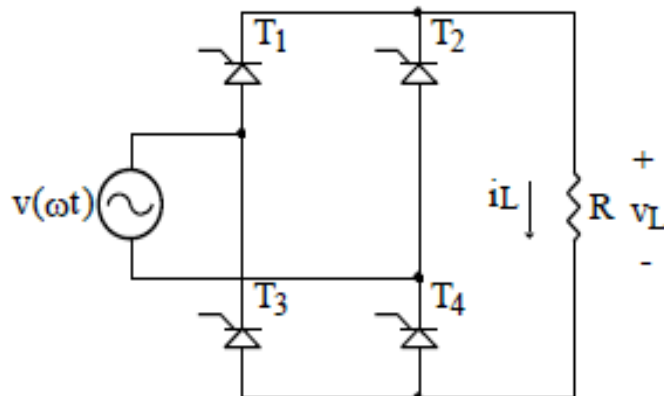
Tabela 1 – Valores das leituras obtidas durante a simulação do retificador monofásico com ponto médio.

α	Tensão de Entrada (V_{in})	Tensão de Saída (V_{out})	Corrente de Saída (I_{out})
(30°)	602.92V	21.39V	12.77A
(60°)	602.92V	9.32V	8.56A

2.2.2 Retificador monofásico controlado (Ponte completa)

Na figura 11 tem-se um retificador monofásico controlado em ponte completa.

Figura 11 – Retificador monofásico controlado (ponte completa)



Fonte: Barbi, 2006.

Durante o semiciclo positivo da tensão de alimentação ($0 < \theta < \pi$) os tiristores (T1 e T4) estão diretamente polarizados e quando esses dois SCRs são disparados simultaneamente em $\omega t = \alpha$, a carga é conectada a rede de alimentação de entrada através de T1 e T4. Devido à carga indutiva, os SCRs (T1 e T4), continuarão a conduzir além de $\omega t = \pi$, mesmo com a tensão de entrada estando negativa.

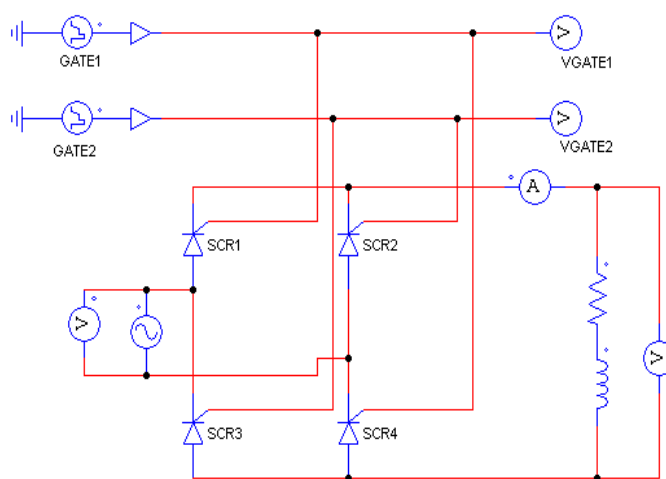
Durante o semiciclo negativo da tensão de entrada, os tiristores (T2 e T3) estão diretamente polarizados e o disparo em T2 e T3 aplicará a tensão da rede de alimentação sobre T1 e T4 como tensão reversa de bloqueio. Com a comutação dos tiristores (T1 e T4) a corrente da carga será transferida para os tiristores (T2 e T3).

Para entender os modos de operação, basta visualizar a senoide da tensão nos seguintes instantes.

- ($0^\circ < \omega t < \pi$): A tensão de entrada V e a corrente de entrada I_i são positivas, dessa forma, a potência flui da rede de alimentação para a carga. Diz-se que o conversor opera no modo retificador.
- ($\pi < \omega t < \pi + \alpha$): A tensão de entrada V é negativa e a corrente de entrada I_i é positiva, dessa forma, haverá o fluxo inverso de potência da carga para a rede de alimentação. Diz-se que o conversor opera no modo inversão.

Com intuito de representar as etapas de operação de um retificador monofásico controlado de ponte completa, foram realizadas simulações no software PSIM, variando o ângulo de disparo dos SCRs ($\alpha = 30^\circ/60^\circ$) e registrando as leituras de tensão, de entrada, tensão de saída, tensão de *gate* dos SCRs e a corrente de saída. Na figura 12 está representado o circuito que foi utilizado no software PSIM, para a obtenção das leituras desejadas.

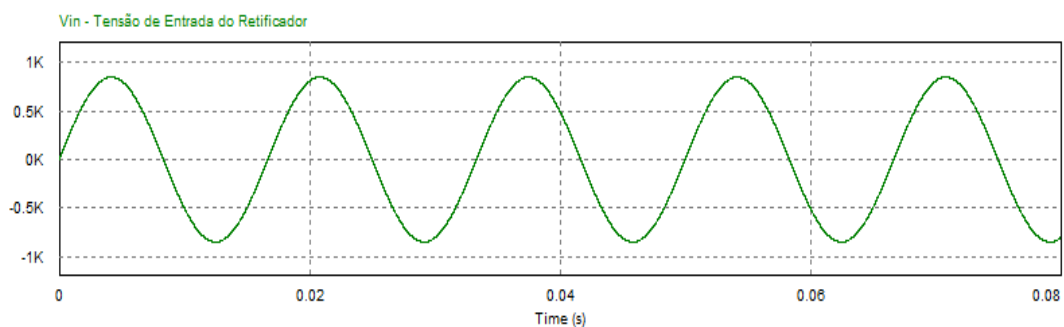
Figura 12 – Circuito do retificador monofásico com ponte completa



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 13 foi obtido o gráfico para leitura da tensão em CA da alimentação do retificador monofásico controlado (ponte completa).

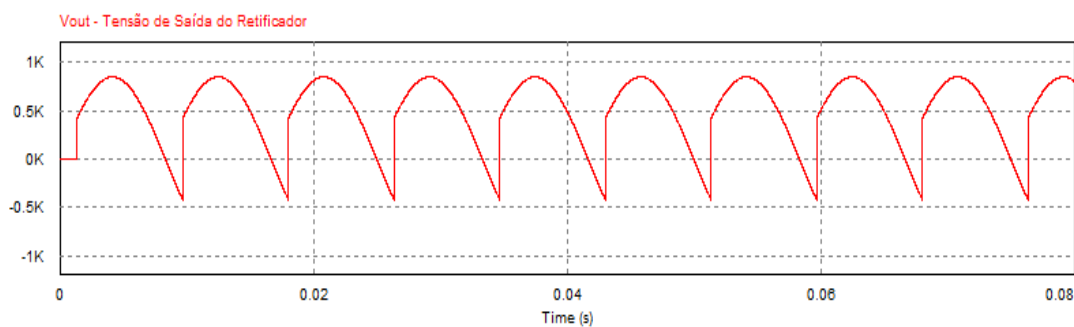
Figura 13 – Tensão de entrada do retificador monofásico com ponte completa



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 14 foi obtido o gráfico para leitura da tensão de saída em CC do retificador monofásico controlado (ponte completa), para ($\alpha = 30^\circ$).

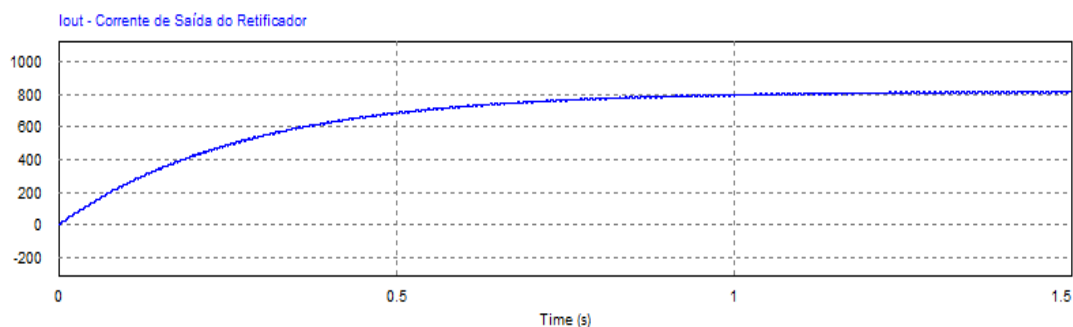
Figura 14 – Tensão de saída do retificador monofásico com ponte completa ($\alpha = 30^\circ$)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 15 foi obtido o gráfico para leitura da corrente de saída em CC do retificador monofásico controlado (ponte completa), para ($\alpha = 30^\circ$).

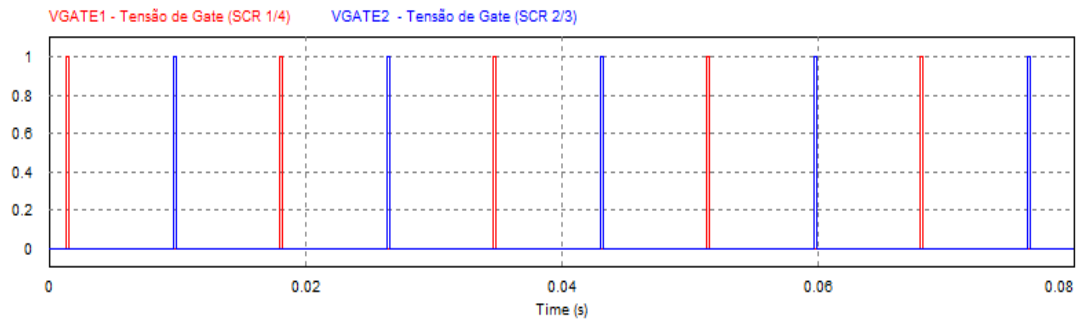
Figura 15 – Corrente de saída do retificador monofásico com ponte completa ($\alpha = 30^\circ$)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 16 foi obtido o gráfico para leitura de tensão de disparo dos SCRs, para ($\alpha = 30^\circ$).

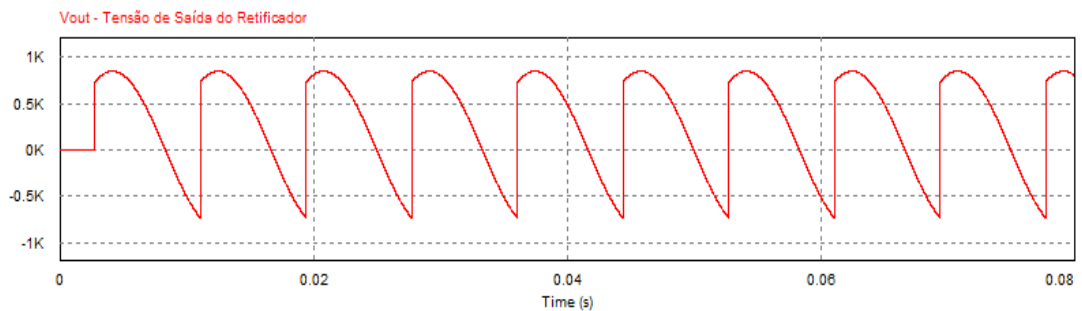
Figura 16 – Tensão de disparo dos SCRs ($\alpha = 30^\circ$)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 17 foi obtido o gráfico para leitura da tensão de saída em CC do retificador monofásico controlado (ponte completa), para ($\alpha = 60^\circ$).

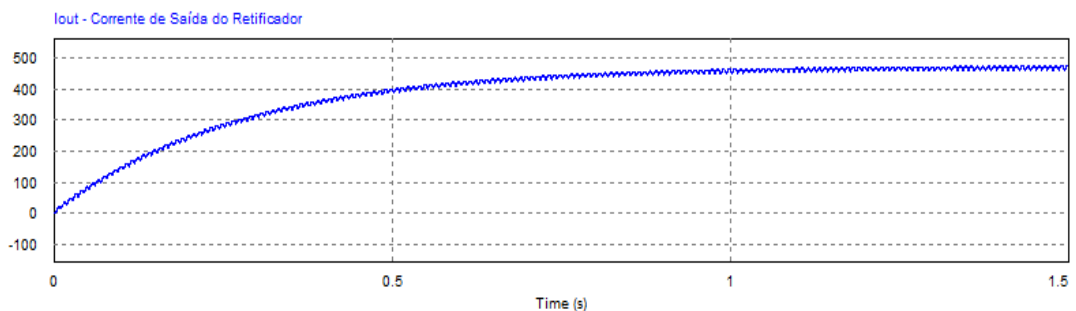
Figura 17 – Tensão de saída do retificador monofásico com ponte completa ($\alpha = 60^\circ$)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 18 foi obtido o gráfico para leitura da corrente de saída em CC do retificador monofásico controlado (ponte completa), para ($\alpha = 60^\circ$).

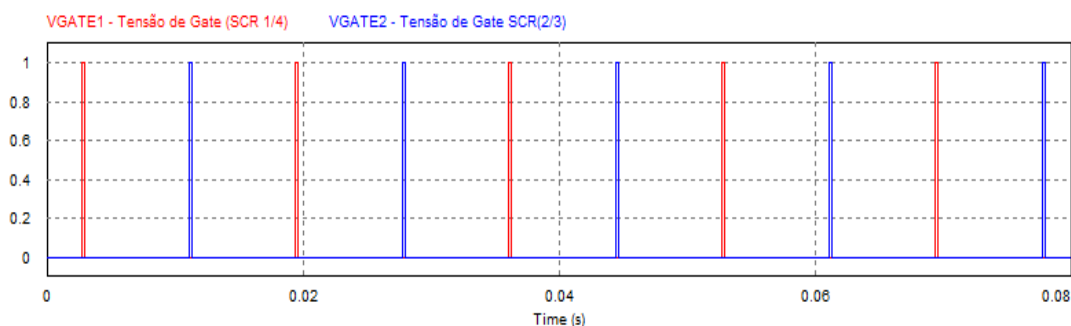
Figura 18 – Corrente de saída do retificador monofásico com ponte completa ($\alpha = 60^\circ$)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 19 foi obtido o gráfico para leitura de tensão de disparo dos SCRs, para ($\alpha = 60^\circ$).

Figura 19 – Tensão de disparo dos SCRs ($\alpha = 60^\circ$)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Os valores médios obtidos durante a simulação do retificador monofásico controlado (ponte completa) estão presentes na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores das leituras obtidas durante a simulação do retificador monofásico com ponte completa.

α	Tensão de Entrada (V_{in})	Tensão de Saída (V_{out})	Corrente de Saída (I_{out})
(30°)	602.92V	467.46V	729.17A
(60°)	602.92V	274.81V	386.59A

Segundo Ahmed (2000) quando a indutância for pequena ou o ângulo de disparo α for mantido alto, a corrente de saída CC atingirá o valor zero a cada semiciclo em $(\pi + \beta)$, caracterizando a condução descontínua (Figura 19), onde nesse intervalo nenhum dos tiristores ficará com status de ligado.

Por outro lado se a indutância da carga for grande, ou se o ângulo de disparo (α) se tornar pequeno, a corrente da carga não poderá atingir o valor zero, caracterizando a condução contínua (Figura 16), ou seja, um dos pares de tiristores estará sempre conduzindo.

Tendo como referência os valores dispostos nas tabelas 1 e 2, pode-se afirmar que o retificador monofásico controlado (ponto médio e ponte completa) não é viável para o acionamento dos motores de corrente contínua existentes na sonda de perfuração da plataforma Polvo-A, pois, o sistema de energia é trifásico e o retificador monofásico não seria capaz de fornecer potência suficiente para a rotação dos motores.

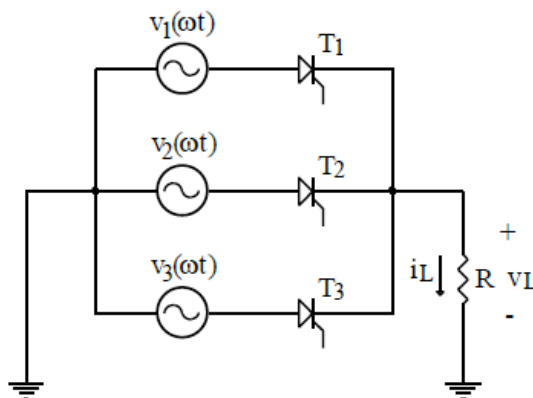
2.3 Retificadores trifásicos controlados

De acordo com Rashid (1999) os conversores trifásicos fornecem uma tensão média de saída maior e, além disso, a frequência das ondulações da tensão de saída é maior quando comparado aos conversores monofásicos, o que facilita a filtragem na saída do conversor. Por estas razões, os conversores trifásicos são extensivamente utilizados em acionamentos com velocidade variável em altas potências.

2.3.1 Retificador trifásico controlado (Ponto médio)

No circuito da figura 20 tem-se um retificador trifásico controlado com ponto médio. Segundo Ahmed (2000) este tipo de retificador também é denominado de circuito de três pulsos, pois a pulsação da tensão CC é três vezes a frequência de entrada. Isso faz com que o retificador trifásico controlado com ponto médio tenha uma eficiência maior que os retificadores monofásicos.

Figura 20 – Retificador trifásico controlado (ponto médio)



Fonte: Barbi, 2006.

Em um retificador trifásico tem-se três formas de onda para tensão de entrada (V_A , V_B e V_C), onde a tensão mais positiva irá aparecer sobre a carga quando o seu respectivo SCR for disparado. O funcionamento do retificador é bastante simples, de acordo com Ahmed (2000) o ângulo de disparo (α) é medido a partir dos pontos de interseção, ou cruzamento das tensões de fase correspondente e não do cruzamento com o zero das ondas de tensão. A primeira interseção entre as ondas de tensão é considerada quando $\omega t = 30^\circ$.

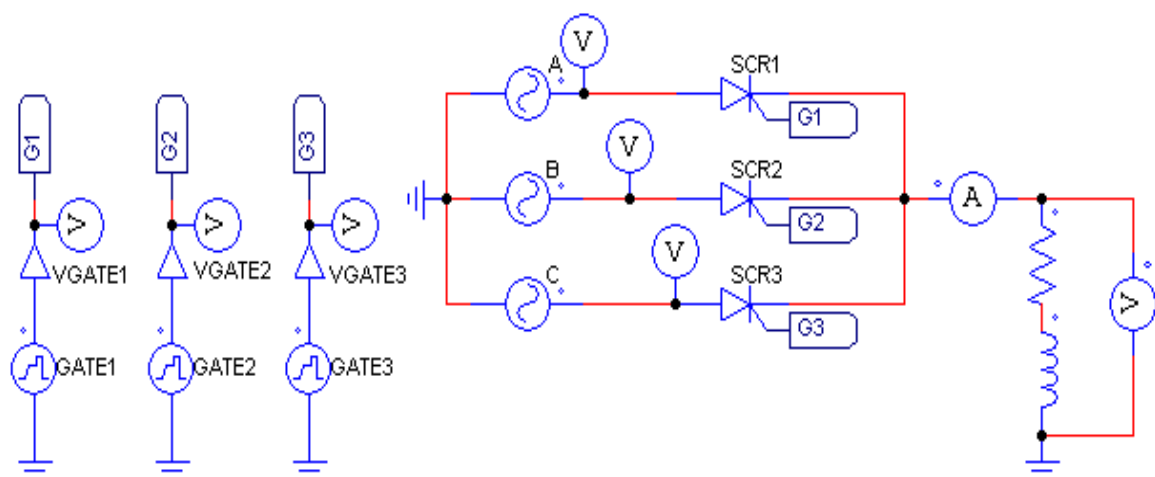
Para entender os modos de operação, basta visualizar a senoide da tensão nos seguintes instantes.

- ($30^\circ < \omega t < 150^\circ$): Durante esse intervalo a tensão de entrada V_A é a tensão mais positiva. Dessa forma, o SCR da fase “A” estará diretamente polarizado e conduzirá tensão para a carga quando o *gate* for acionado. Neste intervalo os SCRs das demais fases se encontrarão inversamente polarizados.
- ($150^\circ < \omega t < 270^\circ$): Quando $\omega t = 150^\circ$ a tensão de entrada V_B começa a se tornar mais positiva do que V_A . Dessa forma, o SCR da fase “B” estará diretamente polarizado e conduzirá tensão para a carga quando o *gate* for acionado. Quando o SCR da fase “B” mudar o seu estado para ligado, fará automaticamente com que o SCR da fase “A” seja reversamente polarizado, pois, a tensão de linha V_{AB} se tornará negativa. Neste intervalo os SCRs das demais fases se encontrarão inversamente polarizados.
- ($270^\circ < \omega t < 390^\circ$): Quando $\omega t = 270^\circ$ a tensão de entrada V_C começa a se tornar mais positiva do que V_B . Dessa forma, o SCR da fase “C” estará diretamente polarizado e conduzirá tensão para a carga quando o *gate* for acionado. Quando o SCR da fase “C” mudar o seu estado para ligado, fará automaticamente com que o SCR da fase “B” seja reversamente polarizado, pois, a tensão de linha V_{BC} se tornará negativa. Neste intervalo os SCRs das demais fases se encontrarão inversamente polarizados.

Com intuito de representar as etapas de operação de um retificador trifásico controlado de ponto médio, foram realizadas simulações no software PSIM, variando o ângulo de disparo dos SCRs ($\alpha = 30^\circ/60^\circ$) e registrando as leituras de tensão, de entrada, tensão de saída, tensão de *gate* dos SCRs e a corrente de saída.

Na figura 21 está representado o circuito que foi utilizado no software PSIM, para a obtenção das leituras desejadas.

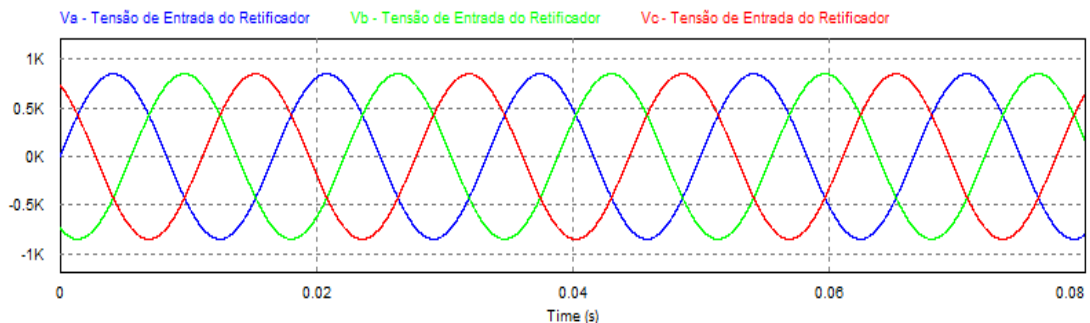
Figura 21 – Circuito do retificador trifásico controlado com ponto médio



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 22 foi obtido o gráfico para leitura da tensão em CA da alimentação do retificador trifásico controlado (ponto médio).

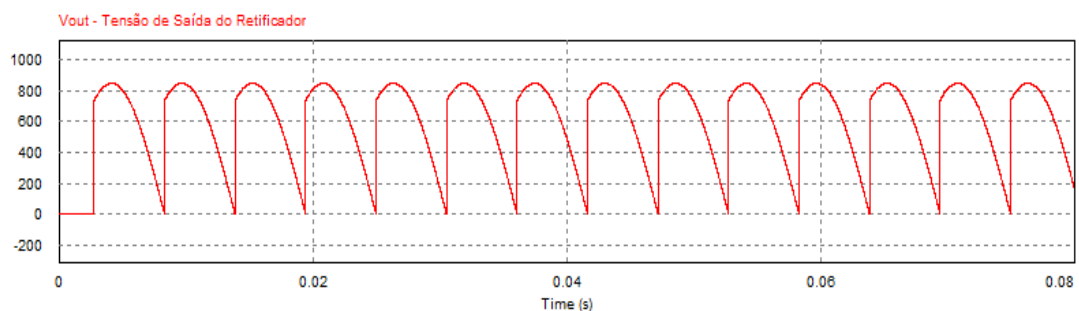
Figura 22 – Tensão de entrada do retificador trifásico com ponto médio



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 23 foi obtido o gráfico para leitura da tensão de saída em CC do retificador trifásico controlado (ponto médio), para $(\alpha = 30^\circ + 30^\circ = 60^\circ)$.

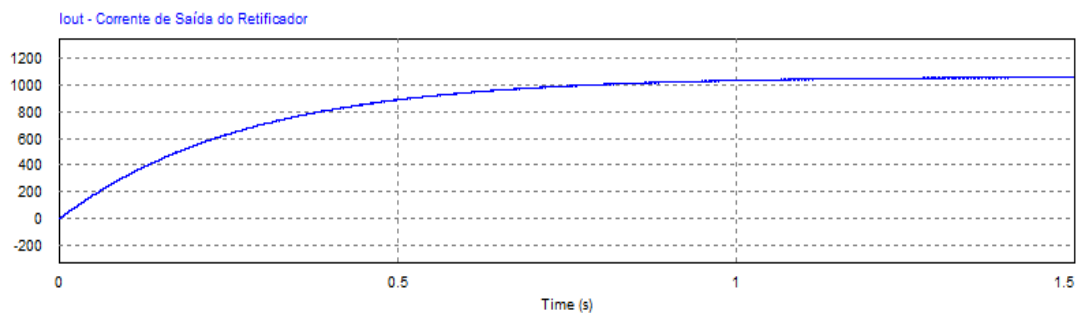
Figura 23 – Tensão de saída do retificador trifásico com ponto médio ($\alpha = 30^\circ$)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 24 foi obtido o gráfico para leitura da corrente de saída em CC do retificador trifásico controlado (ponto médio), para $(\alpha = 30^\circ + 30^\circ = 60^\circ)$.

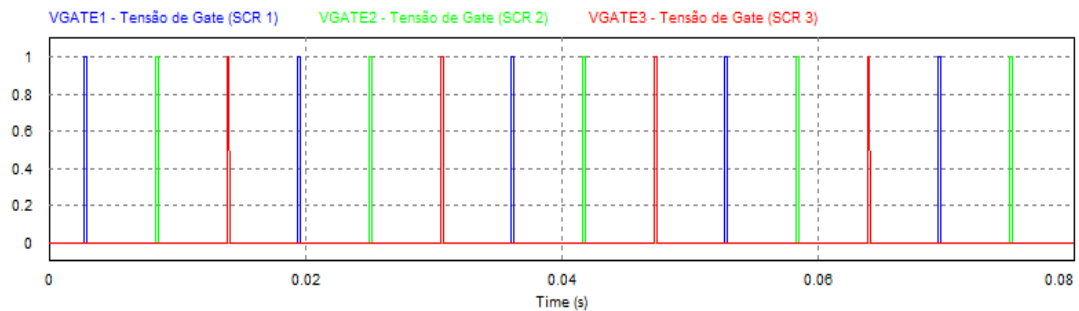
Figura 24 – Corrente de saída do retificador trifásico com ponto médio ($\alpha = 30^\circ$)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 25 foi obtido o gráfico para leitura de tensão de disparo dos SCRs, para ($\alpha = 30^\circ + 30^\circ = 60^\circ$).

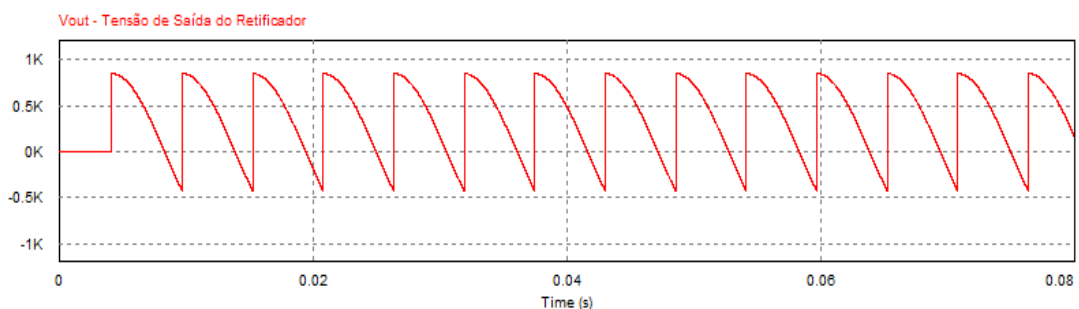
Figura 25 – Tensão de disparo dos SCRs ($\alpha = 30^\circ$)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 26 foi obtido o gráfico para leitura da tensão de saída em CC do retificador trifásico controlado (ponto médio), para ($\alpha = 30^\circ + 60^\circ = 90^\circ$).

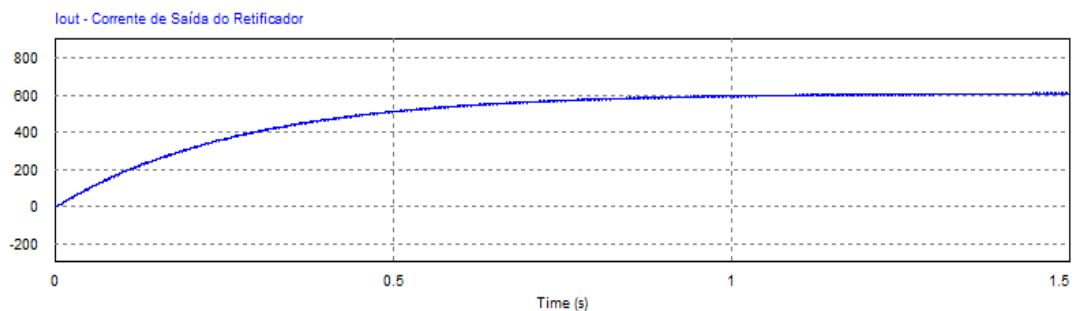
Figura 26 – Tensão de saída do retificador trifásico com ponto médio ($\alpha = 60^\circ$)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 27 foi obtido o gráfico para leitura da corrente de saída em CC do retificador trifásico controlado (ponto médio), para ($\alpha = 30^\circ + 60^\circ = 90^\circ$).

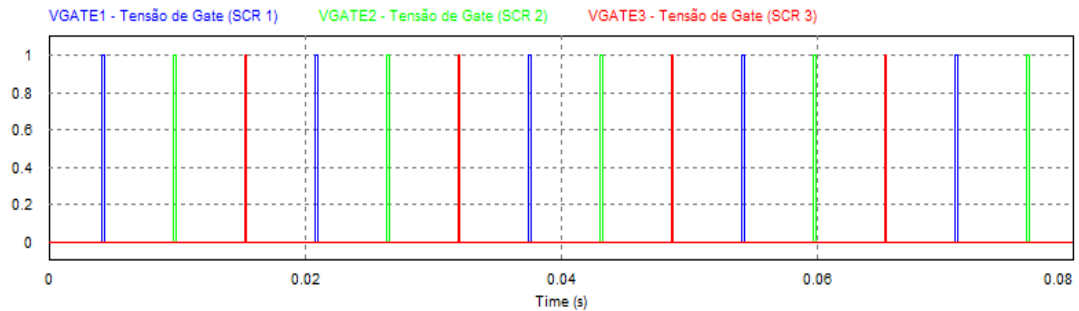
Figura 27 – Corrente de saída do retificador trifásico com ponto médio ($\alpha = 60^\circ$)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 28 foi obtido o gráfico para leitura de tensão de disparo dos SCRs, para ($\alpha = 30^\circ + 60^\circ = 90^\circ$).

Figura 28 – Tensão de disparo dos SCRs ($\alpha = 60^\circ$)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Os valores médios obtidos durante a simulação do retificador trifásico controlado (ponto médio) estão presentes na Tabela 3.

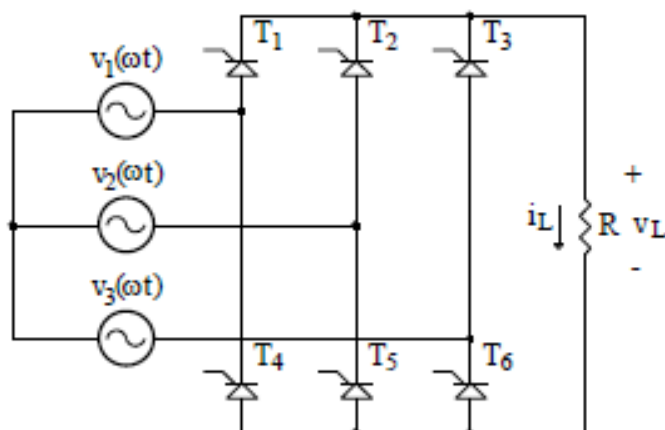
Tabela 3 – Valores das leituras obtidas durante a simulação do retificador trifásico com ponto médio.

α	Tensão de Entrada (V_{in})	Tensão de Saída (V_{out})	Corrente de Saída (I_{out})
(30°)	602.92V	588.99V	867.41A
(60°)	602.92V	342.10V	499.05A

2.3.2 Retificador trifásico controlado (Ponte completa)

Na figura 29 tem-se um retificador trifásico controlado em ponte completa.

Figura 29 – Retificador trifásico controlado (ponte completa)



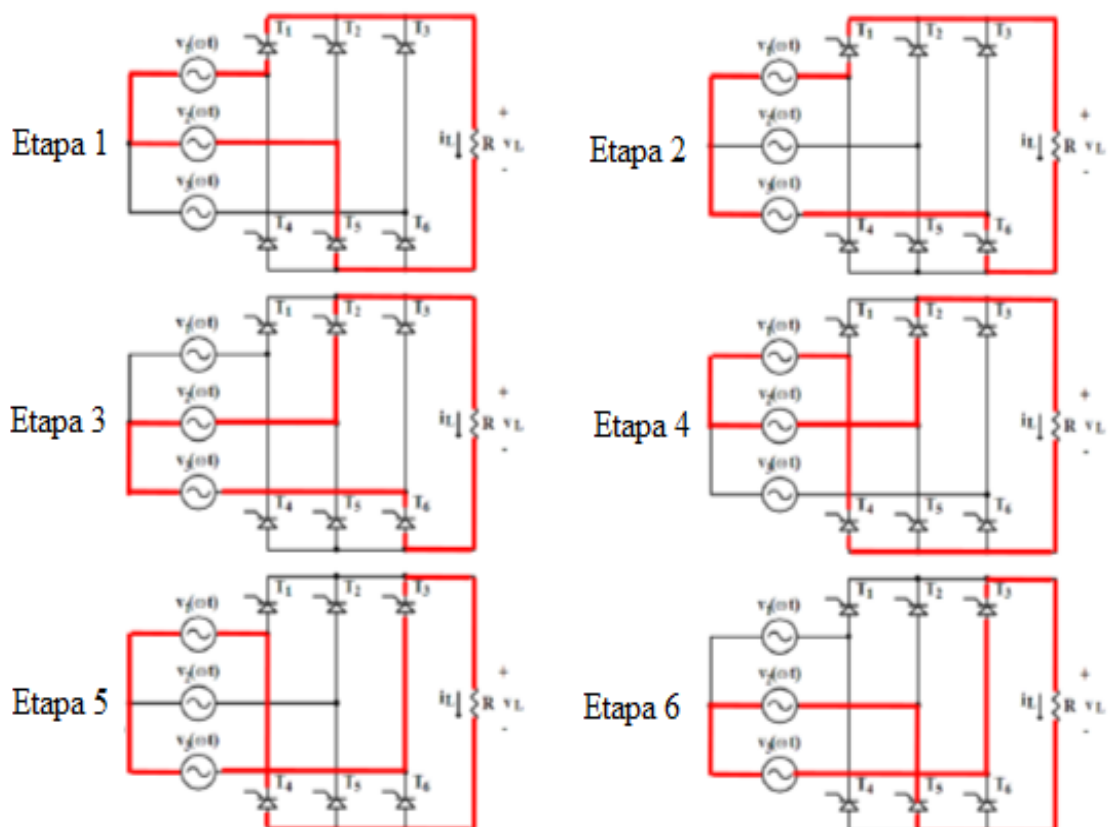
Fonte: Barbi, 2006.

Segundo Ahmed (2000) este tipo de retificador também é denominado de circuito de seis pulsos, pois, ele é projetado com dois retificadores de três pulsos em série. Os SCRs (1/2/3) recebem o nome de grupo positivo, uma vez que são disparados durante o semiciclo positivo de tensão de fase às quais estão ligados. De modo semelhante, os SCRs (4/5/6) são disparados durante o semiciclo negativo da tensão de fase e formam o grupo negativo.

Para o adequado funcionamento deste retificador é necessário que dois SCRs sejam acionados ao mesmo tempo. Portanto, dois pulsos, separados por 60° , são aplicados a cada SCR no ciclo.

Para entender os modos de operação, basta visualizar a senoide da tensão nos instantes descritos a seguir. Na Figura 30, estão representadas as etapas de operação para o retificador trifásico controlado (ponte completa).

Figura 30 – Etapas de operação do retificador trifásico controlado (ponte completa)

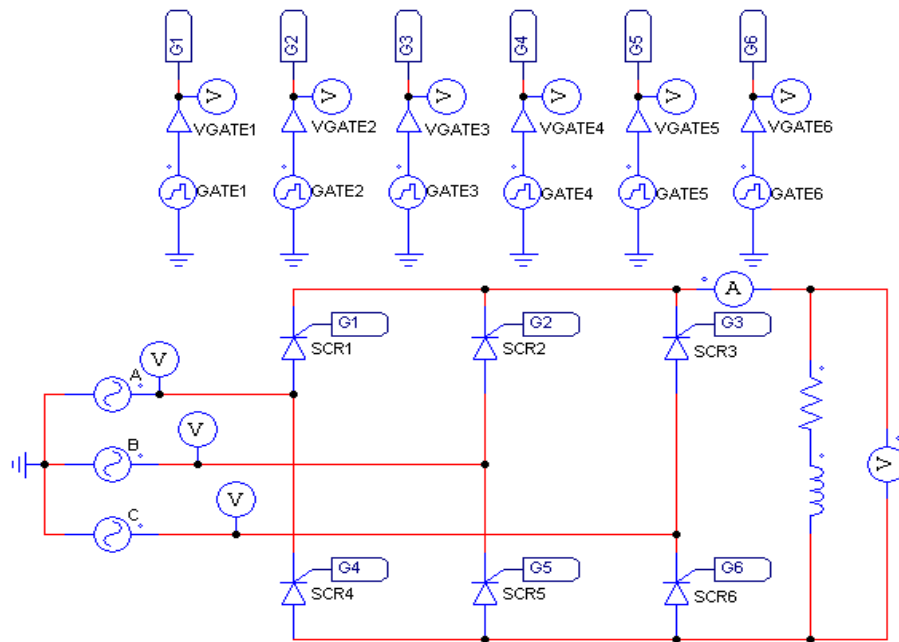


Fonte: Adaptado do Barbi, 2006.

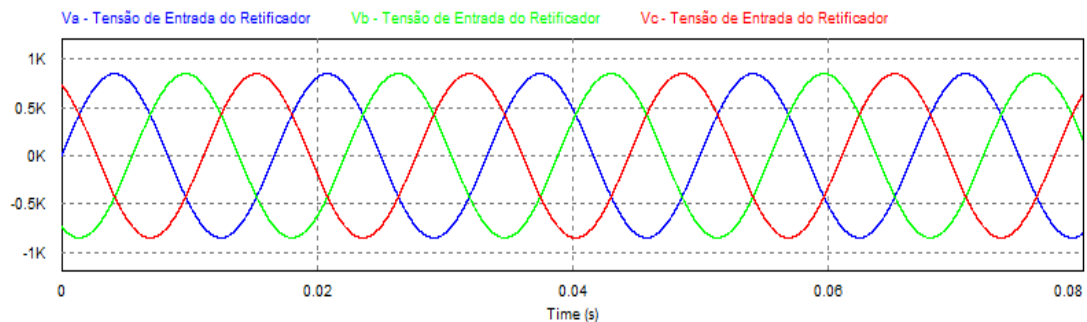
- $(\frac{\pi}{6} + \alpha < \omega t < \frac{\pi}{2} + \alpha)$: Em $\omega t = \frac{\pi}{6} + \alpha$ o SCR 5 já estará conduzindo e o SCR 1 é disparado. Durante o intervalo $(\frac{\pi}{6} + \alpha \leq \omega t \leq \frac{\pi}{2} + \alpha)$ os SCR's (1/5) conduzem e a tensão de linha V_{AB} será disponibilizada a carga.
- $(\frac{\pi}{2} + \alpha < \omega t < \frac{5\pi}{6} + \alpha)$: Em $\omega t = \frac{\pi}{2} + \alpha$ o SCR 6 é disparado, enquanto o SCR 5 é reversamente polarizado de imediato. O SCR 5 é desligado devido à comutação natural. Durante o intervalo $(\frac{\pi}{2} + \alpha \leq \omega t \leq \frac{5\pi}{6} + \alpha)$ os SCR's (1/6) conduzem e a tensão de linha V_{AC} será disponibilizada a carga.
- $(\frac{5\pi}{6} + \alpha < \omega t < \frac{7\pi}{6} + \alpha)$: Em $\omega t = \frac{5\pi}{6} + \alpha$ o SCR 2 é disparado, enquanto o SCR 1 é reversamente polarizado de imediato. O SCR 1 é desligado devido à comutação natural. Durante o intervalo $(\frac{5\pi}{6} + \alpha < \omega t < \frac{7\pi}{6} + \alpha)$ os SCR's (2/6) conduzem e a tensão de linha V_{BC} será disponibilizada a carga.
- $(\frac{7\pi}{6} + \alpha < \omega t < \frac{3\pi}{2} + \alpha)$: Em $\omega t = \frac{7\pi}{6} + \alpha$ o SCR 4 é disparado, enquanto o SCR 6 é reversamente polarizado de imediato. O SCR 6 é desligado devido à comutação natural. Durante o intervalo $(\frac{7\pi}{6} + \alpha < \omega t < \frac{3\pi}{2} + \alpha)$ os SCR's (2/4) conduzem e a tensão de linha V_{AB} será disponibilizada a carga.
- $(\frac{3\pi}{2} + \alpha < \omega t < \frac{11\pi}{6} + \alpha)$: Em $\omega t = \frac{3\pi}{2} + \alpha$ o SCR 3 é disparado, enquanto o SCR 2 é reversamente polarizado de imediato. O SCR 2 é desligado devido à comutação natural. Durante o intervalo $(\frac{3\pi}{2} + \alpha < \omega t < \frac{11\pi}{6} + \alpha)$ os SCR's (3/4) conduzem e a tensão de linha V_{AC} será disponibilizada a carga.
- $(\frac{11\pi}{6} + \alpha < \omega t < \frac{13\pi}{6} + \alpha)$: Em $\omega t = \frac{11\pi}{6} + \alpha$ o SCR 5 é disparado, enquanto o SCR 4 é reversamente polarizado de imediato. O SCR 4 é desligado devido à comutação natural. Durante o intervalo $(\frac{11\pi}{6} + \alpha < \omega t < \frac{13\pi}{6} + \alpha)$ os SCR's (3/5) conduzem e a tensão de linha V_{AC} será disponibilizada a carga.

Com intuito de representar as etapas de operação de um retificador trifásico controlado de ponte completa, foram realizadas simulações no software PSIM, variando o ângulo de disparo dos SCR's ($\alpha + 30^\circ / \alpha + 60^\circ$) e registrando as leituras de tensão, de entrada, tensão de saída, tensão de *gate* dos SCR's e a corrente de saída. Na figura 31 está representado o circuito que foi utilizado no software PSIM, para a obtenção das leituras desejadas.

Na figura 32 foi obtido o gráfico para leitura da tensão em CA da alimentação do retificador trifásico controlado (ponte completa).

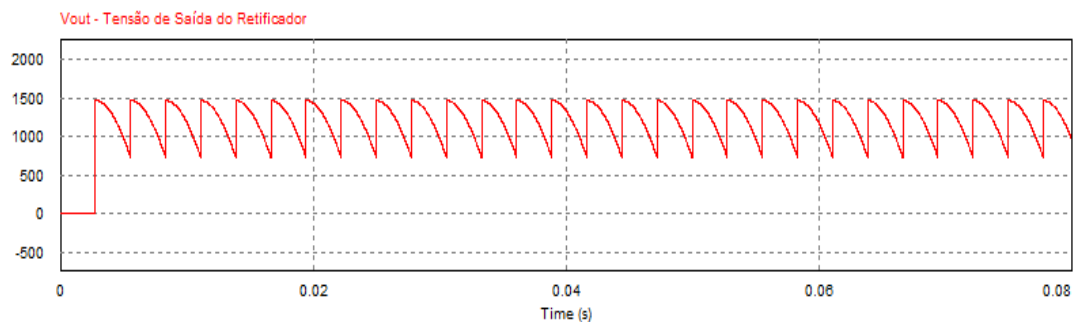
Figura 31 – Circuito do retificador trifásico com ponte completa

Fonte: Autoria própria, 2019.

Figura 32 – Tensão de entrada do retificador trifásico com ponte completa

Fonte: Autoria própria, 2019.

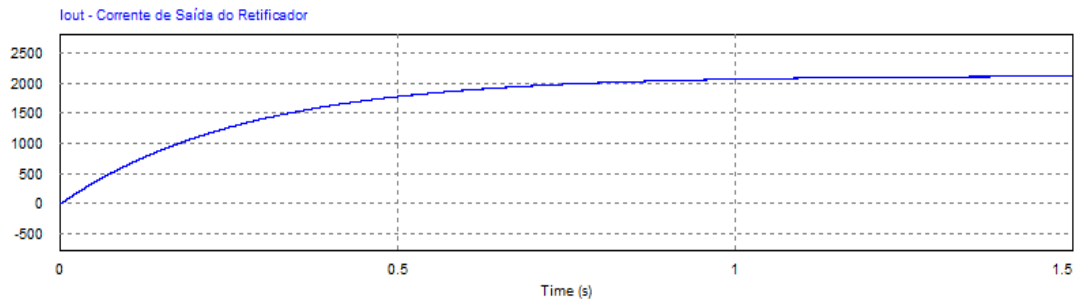
Na figura 33 foi obtido o gráfico para leitura da tensão de saída em CC do retificador trifásico controlado (ponte completa), para $(\alpha = 30^\circ + 30^\circ = 60^\circ)$.

Figura 33 – Tensão de saída do retificador trifásico com ponte completa ($\alpha = 30^\circ$)

Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 34 foi obtido o gráfico para leitura da corrente de saída em CC do retificador trifásico controlado (ponte completa), para $(\alpha = 30^\circ + 30^\circ = 60^\circ)$.

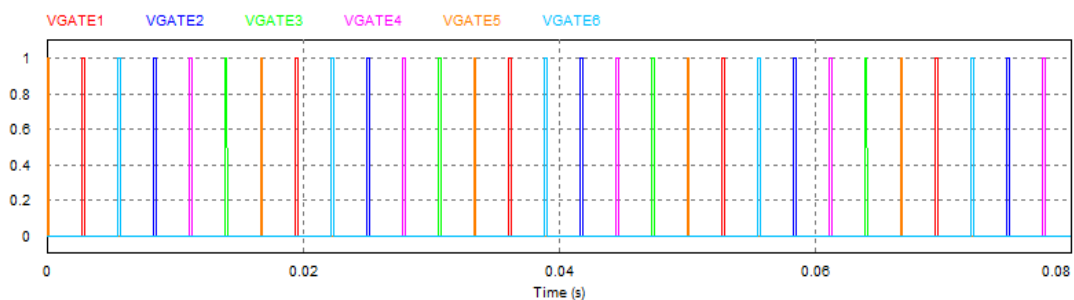
Figura 34 – Corrente de saída do retificador trifásico com ponte completa ($\alpha = 30^\circ$)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 35 foi obtido o gráfico para leitura de tensão de disparo dos SCRs, para $(\alpha = 30^\circ)$.

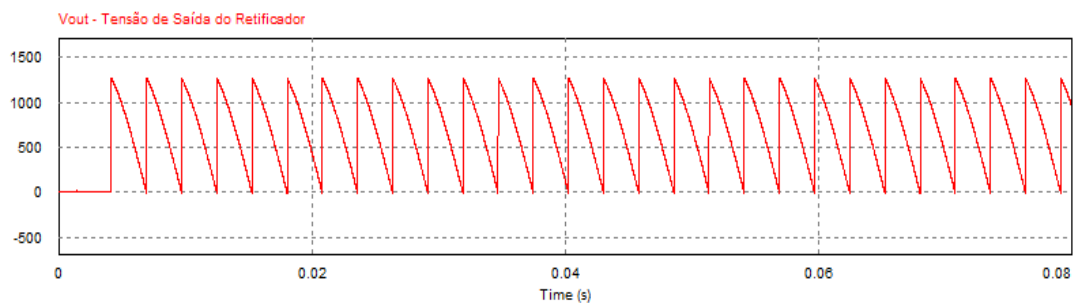
Figura 35 – Tensão de disparo dos SCRs ($\alpha = 30^\circ$)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 36 foi obtido o gráfico para leitura da tensão de saída em CC do retificador trifásico controlado (ponte completa), para $(\alpha = 60^\circ + 30^\circ = 90^\circ)$.

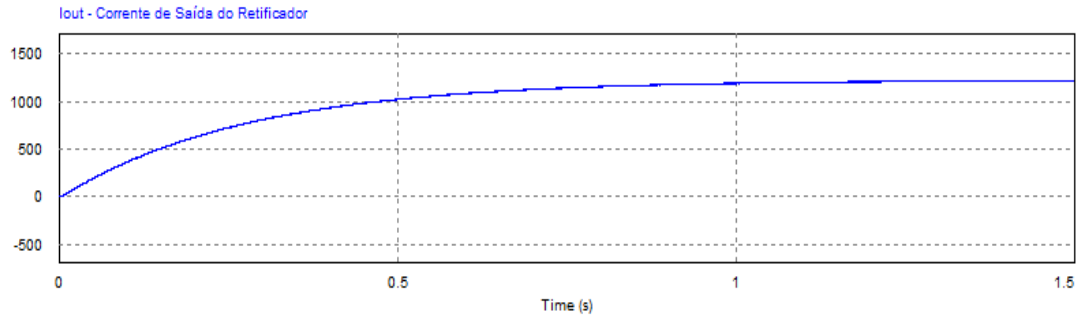
Figura 36 – Tensão de saída do retificador trifásico com ponte completa ($\alpha = 60^\circ$)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 37 foi obtido o gráfico para leitura da corrente de saída em CC do retificador trifásico controlado (ponte completa), para ($\alpha = 60^\circ + 30^\circ = 90^\circ$).

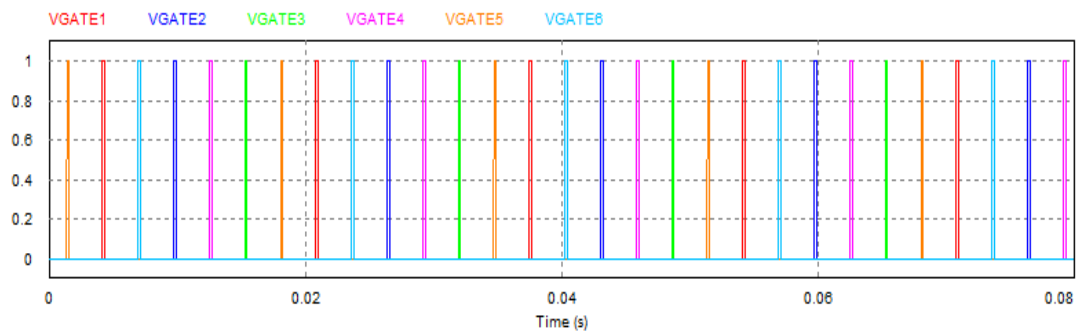
Figura 37 – Corrente de saída do retificador trifásico com ponte completa ($\alpha = 60^\circ$)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 38 foi obtido o gráfico para leitura de tensão de disparo dos SCRs, para ($\alpha = 60^\circ$).

Figura 38 – Tensão de disparo dos SCRs ($\alpha = 60^\circ$)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Os valores médios obtidos durante a simulação do retificador trifásico controlado (ponte completa) estão presentes na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores das leituras obtidas durante a simulação do retificador trifásico com ponte completa.

α	Tensão de Entrada (V_{in})	Tensão de Saída (V_{out})	Corrente de Saída (I_{out})
(30°)	602.92V	1173.42V	1734.32A
(60°)	602.92V	665.43V	996.95A

Tendo como referência os valores dispostos nas tabelas 3 e 4, pode-se afirmar que o retificador trifásico controlado (ponte completa) é viável para o acionamento dos motores de

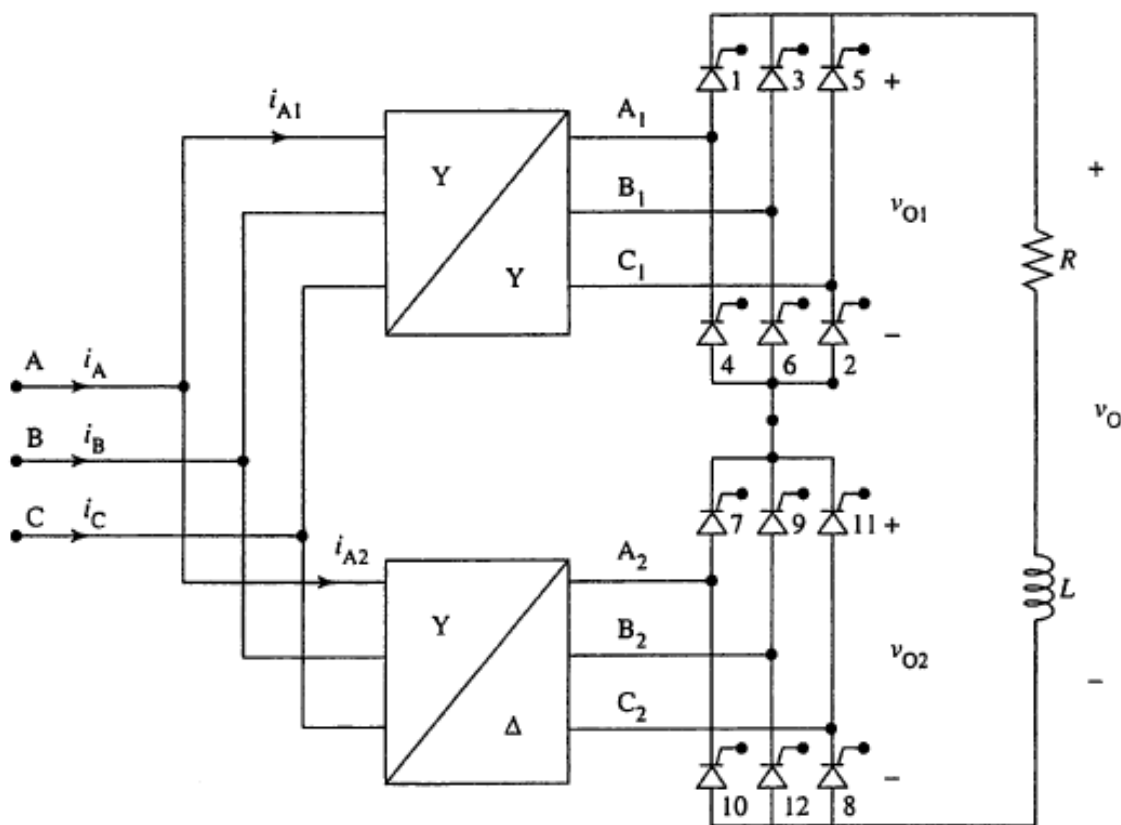
corrente contínua existentes na sonda de perfuração da plataforma Polvo-A, pois, o sistema de energia também é trifásico e o retificador trifásico possui capacidade de fornecer potência suficiente para a rotação dos motores.

2.3.3 Retificador trifásico controlado (Doze Pulsos)

Segundo Ahmed (2000) este tipo de retificador também é denominado de circuito de doze pulsos, pois, ele é projetado com a conexão de dois retificadores de seis pulsos em série ou em paralelo, dependendo da empregabilidade do retificador. A utilização de transformadores gera um deslocamento de fase de 30° entre as duas tensões dos enrolamentos secundários em Y e em Δ .

No circuito da figura 39, tem-se a ponte de doze pulsos conectada em série, dessa forma, a tensão de saída resultante é a soma das tensões de saída de cada. Uma vez que cada um deles produz uma saída de seis pulsos, a tensão resultante é uma saída de doze pulsos. Nessa topologia, a mesma corrente da saída flui através de ambos os conversores.

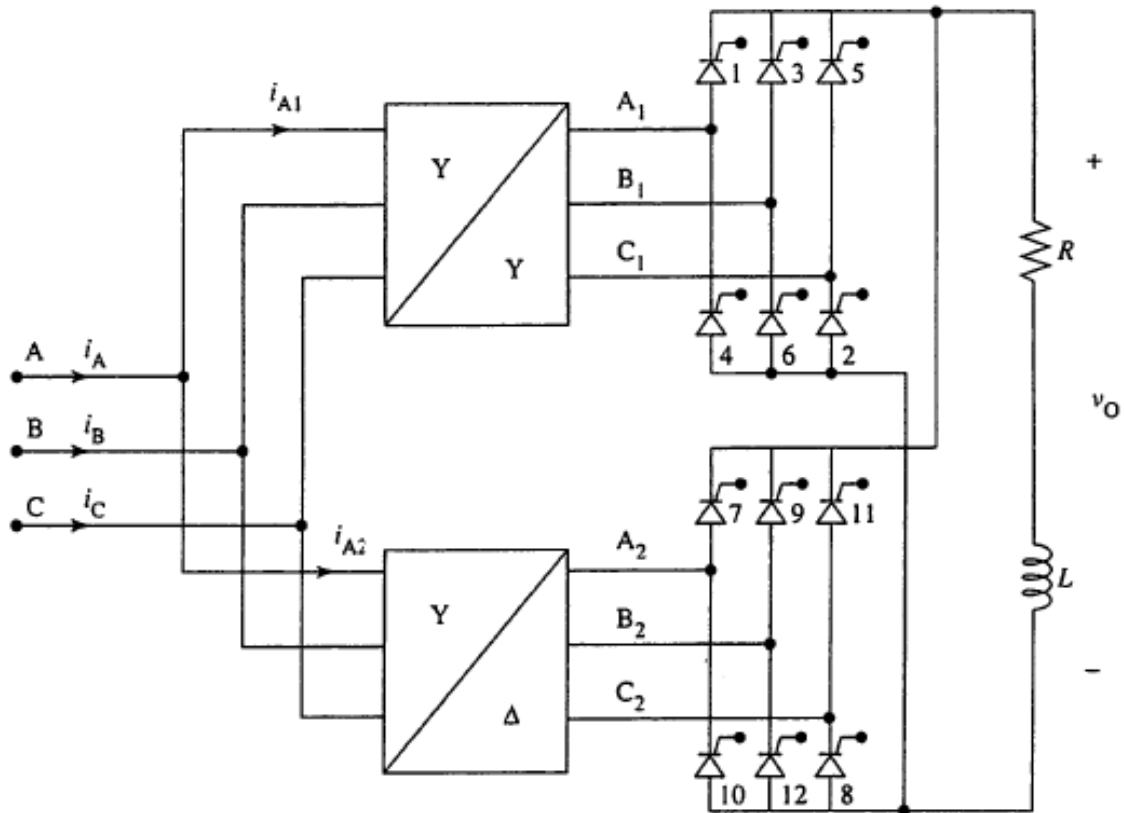
Figura 39 – Retificador trifásico controlado (doze pulsos) associado em série



Fonte: Ahmed, 2000.

No circuito da figura 40, tem-se a ponte de doze pulsos conectada em paralelo. Nesta configuração é importante que as tensões médias em ambos os conversores sejam iguais. A tensão média aplicada a carga será a média das duas tensões dos conversores, a corrente será dividida na razão inversa das reatâncias (Pomílio, 2002).

Figura 40 – Retificador trifásico controlado (doze pulsos) associado em paralelo



Fonte: Ahmed, 2000.

Apesar do valor médio em ambos os conversores em um retificador de 12 pulsos serem iguais, o defasamento de 30° entre essas tensões, faz com que seus valores instantâneos se tornem diferentes. Sendo assim, os dois conversores não podem ser conectados diretamente em paralelo, pois pode provocar uma circulação de corrente alternada entre as pontes.

Para resolver este problema utiliza-se do emprego de um transformador de interfase, cujo objetivo é limitar a circulação de corrente alternada, provocada pela diferença entre as tensões instantâneas (Sousa, 2017). Na equação (1) (Sousa, 2017) tem-se o cálculo para determinar-se a indutância própria de um dos enrolamentos do transformador de interfase.

$$L_{int} = \frac{0.113 * V_0}{48\pi * f * I_{pk}} = \frac{0.113 * 1191}{48\pi * 60 * 1410} \quad (1)$$

$$L_{int} = 10.54 \mu H \quad (2)$$

Onde:

L_{int} : Indutância própria do transformador de interfase;

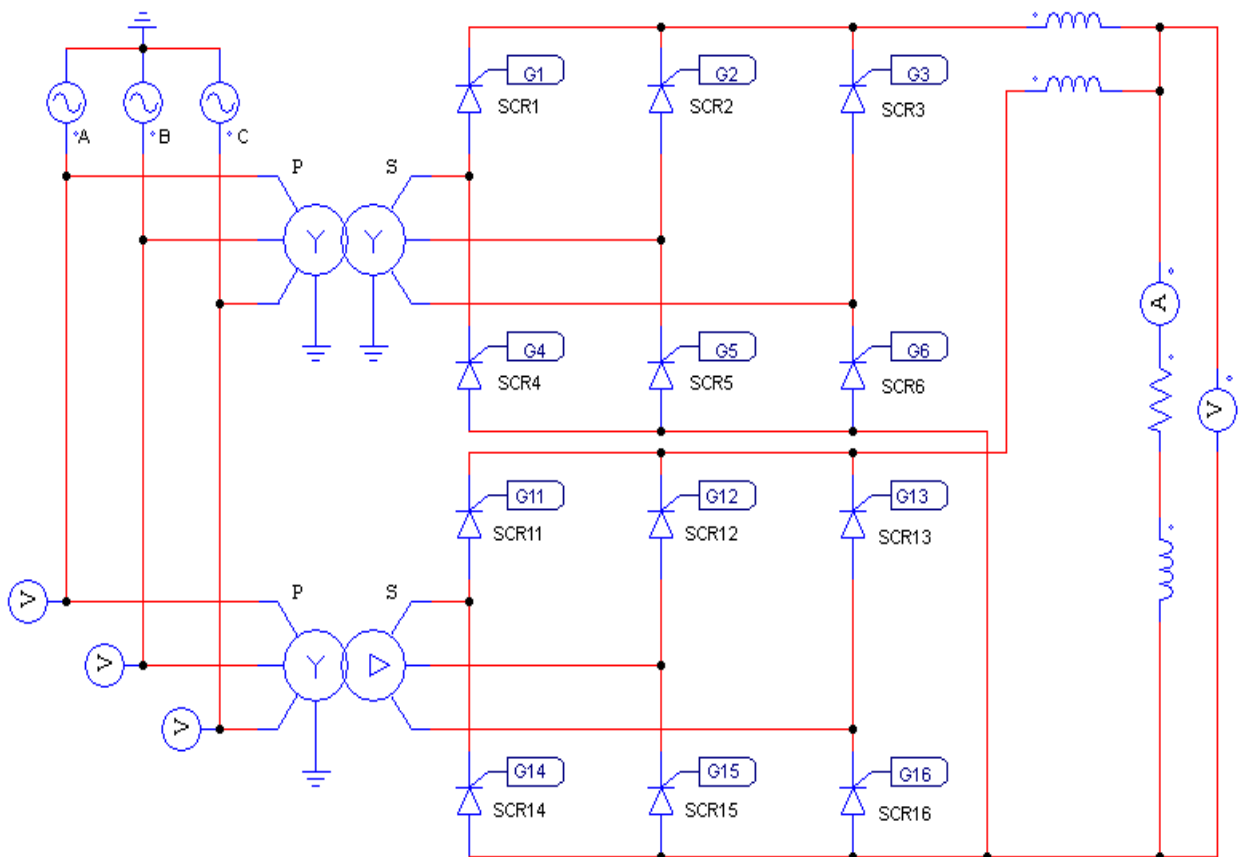
V_0 : Tensão média na carga (Obtido via simulação no programa PSIM);

f : Frequência da rede elétrica;

I_{pk} : Corrente de pico de circulação entre os conversores (Obtido via simulação no programa PSIM);

Com intuito de representar as etapas de operação de um retificador trifásico controlado de 12 pulsos, foram realizadas simulações no software PSIM, variando o ângulo de disparo dos SCRs ($\alpha + 30^\circ / \alpha + 60^\circ$) e registrando as leituras de tensão, de entrada, tensão de saída, tensão de *gate* dos SCRs e a corrente de saída. Na figura 41 está representado o circuito que foi utilizado no software PSIM, para a obtenção das leituras desejadas.

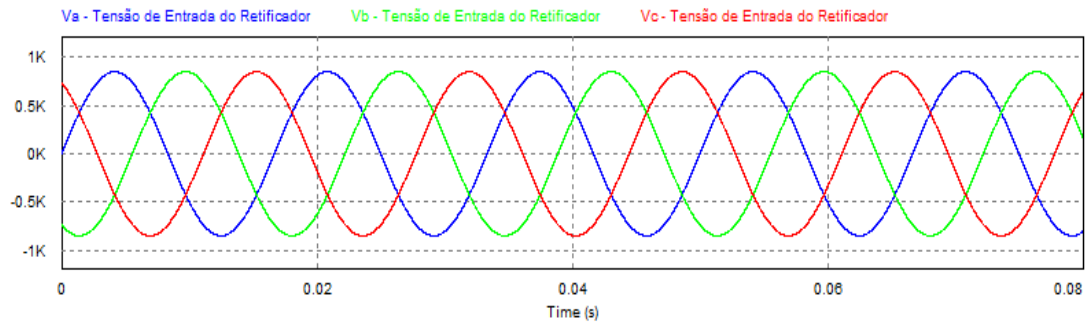
Figura 41 – Circuito do retificador trifásico de doze pulsos



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 42 foi obtido o gráfico para leitura da tensão em CA da alimentação do retificador trifásico controlado (ponte completa).

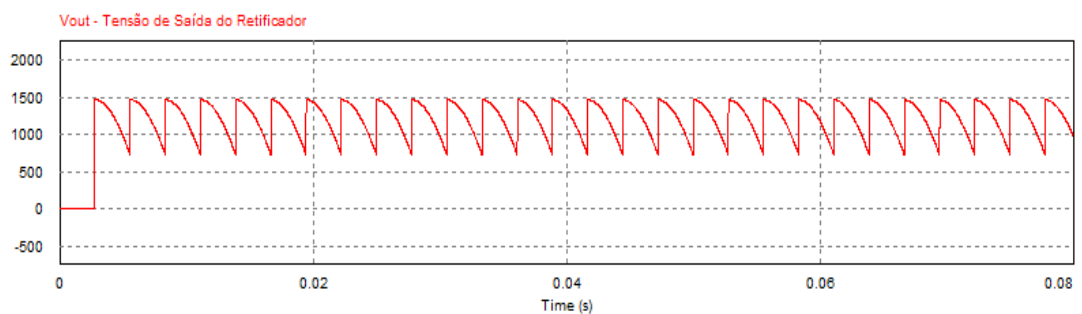
Figura 42 – Tensão de entrada do retificador trifásico de doze pulsos



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 43 foi obtido o gráfico para leitura da tensão de saída em CC do retificador trifásico controlado (doze pulsos), para ($\alpha = 30^\circ + 30^\circ = 60^\circ$).

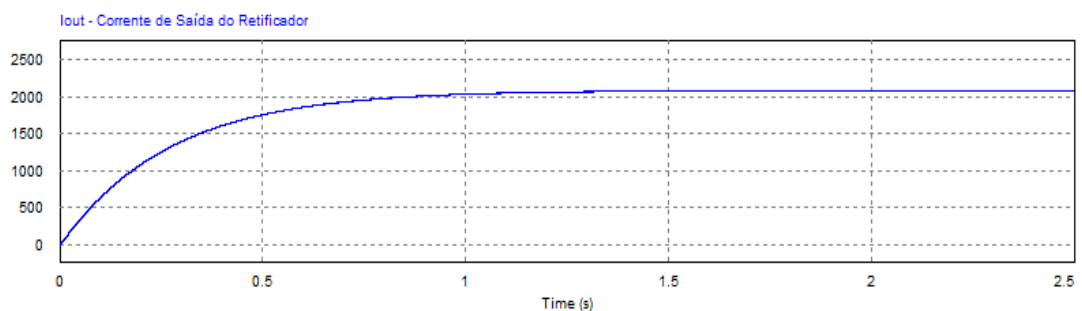
Figura 43 – Tensão de saída do retificador trifásico controlado de doze pulsos ($\alpha = 30^\circ$)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 44 foi obtido o gráfico para leitura da corrente de saída em CC do retificador trifásico controlado (doze pulsos), para ($\alpha = 30^\circ + 30^\circ = 60^\circ$).

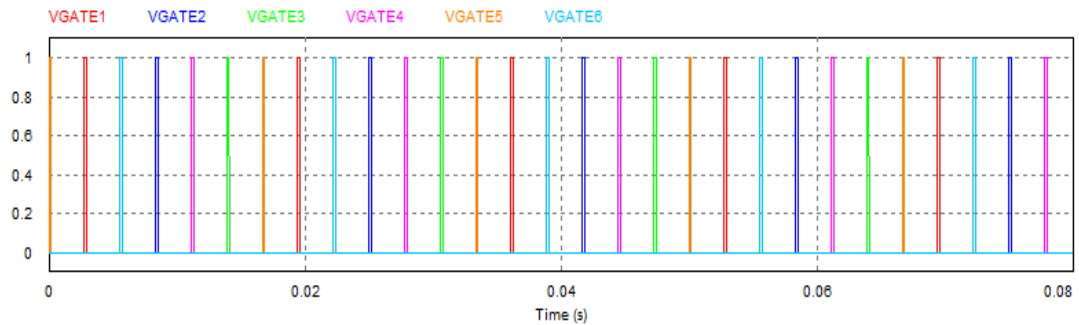
Figura 44 – Corrente de saída do retificador trifásico controlado de doze pulsos ($\alpha = 30^\circ$)



Fonte: Autoria própria, 2019.

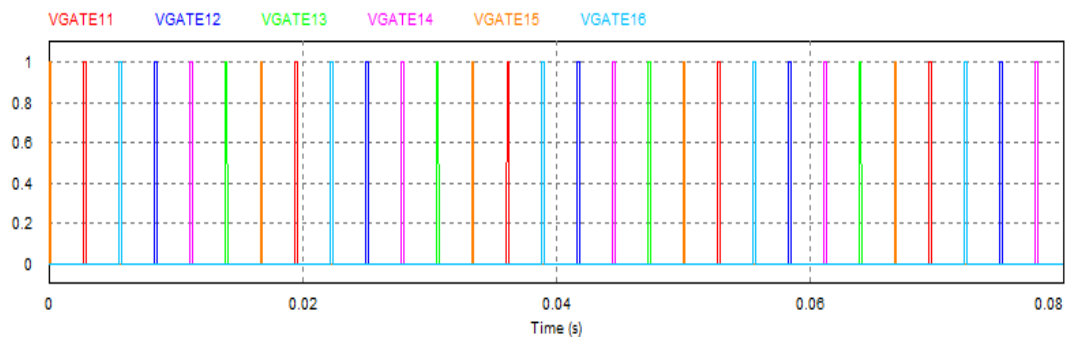
Nas figuras 45 e 46 foram obtidos os gráficos para leitura de tensão de disparo dos SCRs, para ($\alpha = 30^\circ$).

Figura 45 – Tensão de disparo dos SCRs – Conversor Y-Y ($\alpha = 30^\circ$)



Fonte: Autoria própria, 2019.

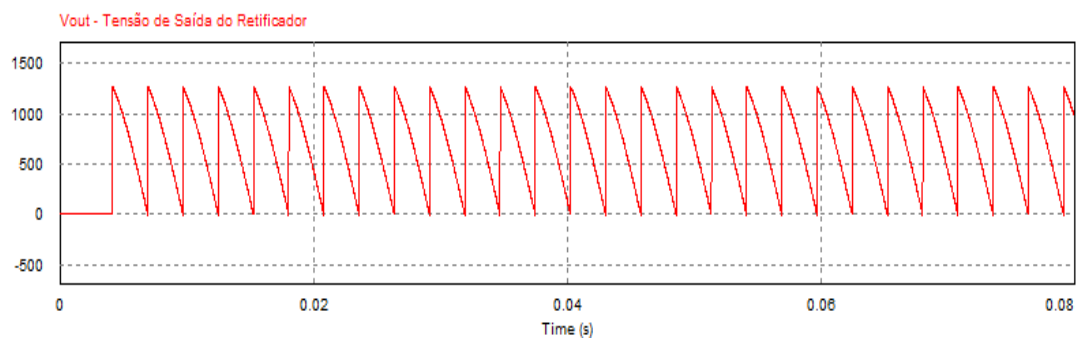
Figura 46 – Tensão de disparo dos SCRs – Conversor Y- Δ ($\alpha = 30^\circ$)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 47 foi obtido o gráfico para leitura da tensão de saída em CC do retificador trifásico controlado (doze pulsos), para ($\alpha = 60^\circ + 30^\circ = 90^\circ$).

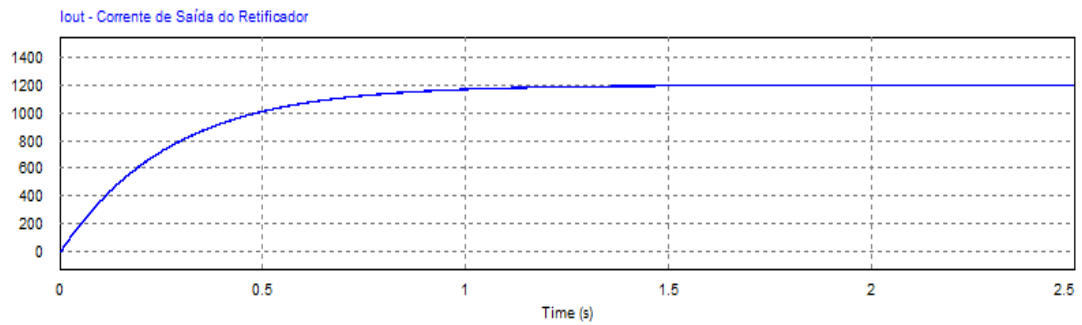
Figura 47 – Tensão de saída do retificador trifásico controlado de doze pulsos ($\alpha = 60^\circ$)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 48 foi obtido o gráfico para leitura da corrente de saída em CC do retificador trifásico controlado (doze pulsos), para ($\alpha = 60^\circ + 30^\circ = 90^\circ$).

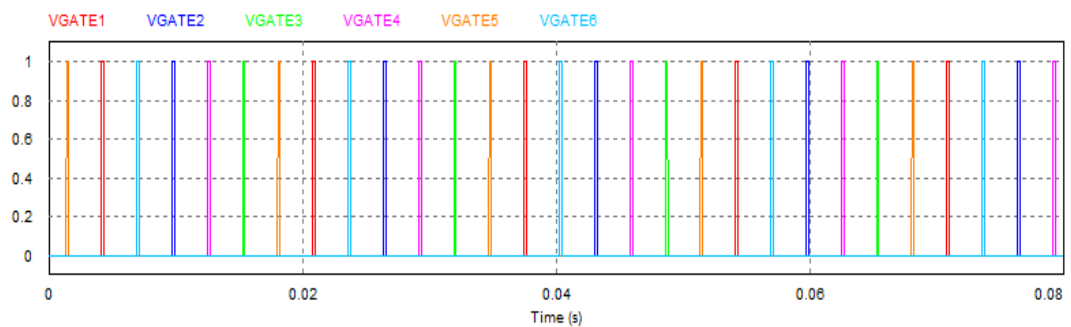
Figura 48 – Corrente de saída do retificador trifásico controlado de doze pulsos ($\alpha = 60^\circ$)



Fonte: Autoria própria, 2019.

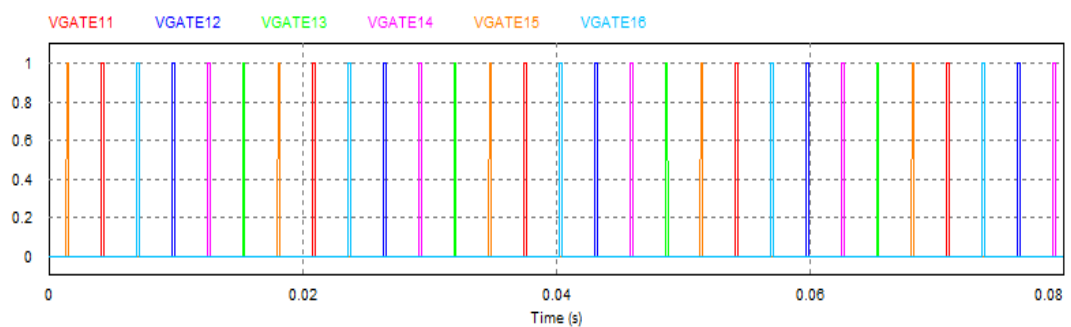
Nas figuras 49 e 50 foram obtidos os gráficos para leitura de tensão de disparo dos SCRs, para ($\alpha = 60^\circ$).

Figura 49 – Tensão de disparo dos SCRs – Conversor Y-Y ($\alpha = 60^\circ$)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Figura 50 – Tensão de disparo dos SCRs – Conversor Y- Δ ($\alpha = 60^\circ$)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Os valores médios obtidos durante a simulação do retificador trifásico controlado (doze pulsos) estão presentes na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores das leituras obtidas durante a simulação do retificador trifásico de doze pulsos.

α	Tensão de Entrada (V_{in})	Tensão de Saída (V_{out})	Corrente de Saída (I_{out})
(30°)	602.92V	1191.17V	1859.17A
(60°)	602.92V	685.46V	1070.17A

Tendo como referência os valores dispostos na tabela 5, pode-se afirmar que o retificador trifásico controlado (doze pulsos) também é viável para o acionamento dos motores de corrente contínua existentes na sonda de perfuração da plataforma Polvo-A, pois, o sistema de energia também é trifásico e o retificador de doze pulsos possui capacidade de fornecer potência suficiente para a rotação dos motores.

No próximo capítulo serão apresentadas as metodologias utilizadas durante o dimensionamento e a simulação do retificador trifásico empregado no acionamento dos motores CC da empresa Petrorio, que possibilitaram a obtenção dos resultados finais para esse trabalho.

3 METODOLOGIA

O estudo realizado no presente trabalho foi direcionado para o retificador trifásico controlado empregado no acionamento dos motores de corrente contínua, instalados na sonda de perfuração da plataforma Polvo-A, pertencente a empresa Petrorio. A primeira etapa do desenvolvimento do trabalho foi a análise dos retificadores monofásicos e trifásicos controlados.

Posteriormente, as conversas informais com técnicos especialistas a fim de conhecer os padrões de operação dos equipamentos utilizados durante as atividades rotineiras da sonda de perfuração, assim como a experiência adquirida durante o acompanhamento das operações, verificações de manuais, *datasheets* e o levantamento de informações através de diagramas elétricos possibilitaram o aprendizado para o desenvolvimento do trabalho.

Após deter o conhecimento sobre os padrões de operação dos equipamentos e tendo conhecimento da estrutura do retificador, dos SCRs e da carga instalada foram feitos os cálculos e análises através de simulações de todas as variáveis pertinentes ao retificador com objetivo de conhecer se o mesmo está bem dimensionado. Com a utilização do programa PSIM, foram realizadas simulações do retificador trifásico acionando os motores da bomba de lama.

Uma vez que, constatou-se o sobredimensionamento dos SCRs, foram analisadas possíveis soluções encontradas para a melhoria de eficiência energética dos retificadores. Devido ao sobredimensionamento dos SCRs, foi analisada a possibilidade de substituição dos mesmos por dispositivos com tecnologias mais novas que acarretaria em um controle mais preciso e o consequente aumento de rendimento do sistema.

Em seguida, foi analisada a inserção de um capacitor de filtro que diminuiria a ondulação dos sinais de corrente e tensão e também provocaria o aumento de rendimento do sistema. Foi calculado o valor de capacitância para ser instalada na saída do retificador, assim como foram realizadas simulações do retificador trifásico com capacitor de filtro acionando os motores da bomba de lama.

Por fim, foi analisado o retificador trifásico controlado de doze pulsos que diminuiria a ondulação do sinal de corrente e também provocaria o aumento de rendimento do sistema. Para validar esta melhoria foi calculado o valor do transformador de interfase para ser instalada na saída de cada retificador de seis pulsos, assim como foram realizadas simulações do retificador trifásico com capacitor de filtro acionando os motores da bomba de lama.

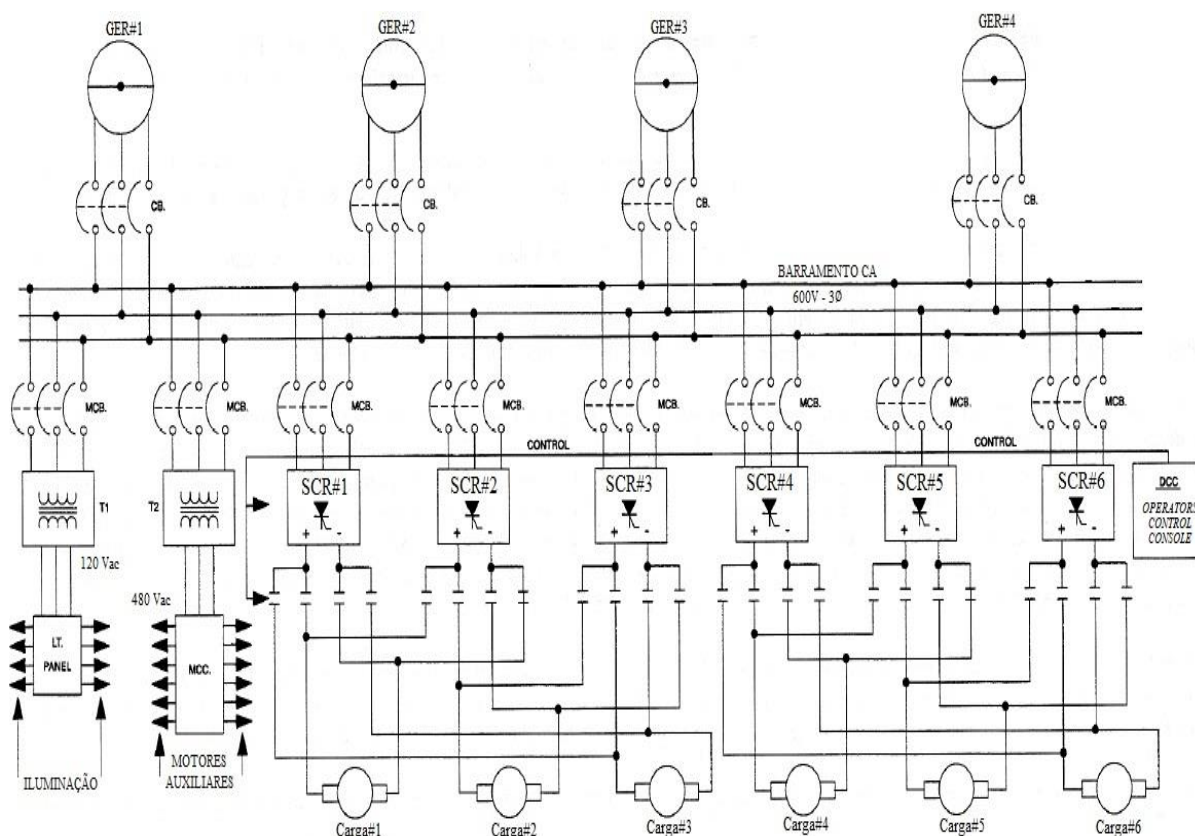
4 DIMENSIONAMENTO DO RETIFICADOR UTILIZADO NO ACIONAMENTO DO MOTOR CC GE-752 US

4.1 Overview do sistema

Dentre os motores instalados na sonda de perfuração da plataforma Polvo-A, existem alguns motores de corrente contínua, os quais são responsáveis por diferentes funções nas operações de completação e perfuração de poços. Tais motores contém a mesma especificação e são fabricados pela GE (*General Electric*). Para atender esta demanda de corrente contínua na plataforma, foi projetado um sistema elétrico dedicado para o acionamento dos motores de corrente contínua.

Na figura 51, tem-se o *overview* do sistema elétrico da sonda de perfuração da plataforma Polvo-A.

Figura 51 – Overview do sistema



Fonte: Autoria própria, 2019.

O sistema é composto por quatro geradores a diesel de 2150 KVA, disponibilizando em sua saída uma tensão alternada de 600 V. As saídas de tensão dos geradores são

interligadas a um barramento em triângulo, dessa forma, de acordo com as operações a serem realizadas na sonda, permite-se o paralelismo entre os geradores, elevando a quantidade de carga disponível para os equipamentos. No barramento dos geradores estão interligados seis painéis de retificadores, os quais são responsáveis pela conversão (CA-CC) e por seguinte a alimentação e controle de velocidade dos motores de corrente contínua.

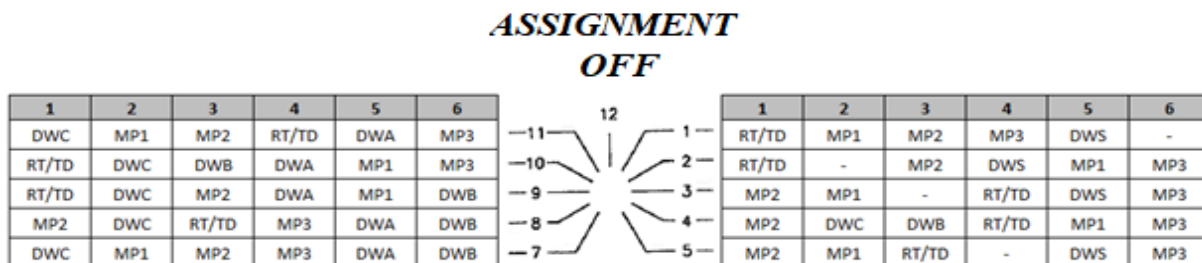
Cada painel de retificador é composto por 12 tiristores os quais constituem um retificador trifásico totalmente controlado (seis pulsos), onde se tem quatro tiristores por fase associados em paralelo, para que possam dividir a corrente entre eles, permitindo assim o acionamento de motores com correntes mais elevadas. Cada tiristor possui corrente limite de 600A, ou seja, como os tiristores estão associados em paralelo, a corrente suportada por fase é 1200A.

Uma vez que a sonda de perfuração possui 11 motores de corrente contínua e apenas seis painéis de retificadores, dependendo da tarefa, se faz necessária a seleção dos motores que serão controlados pelo operador da sonda, ou seja, pode-se conectar o painel de retificador a diferentes equipamentos.

Os contatores de potência instalados nos barramentos de tensão contínua do SCR têm a função de efetuar o “assignment” dos equipamentos, ou seja, o retificador será interligado a determinado equipamento dependendo da seleção realizada pelo operador da sonda. Também existe a possibilidade de inversão de rotação de alguns dos motores através de inversão da polaridade do campo ou da armadura do mesmo através do sistema de contatores.

Na figura 52, tem-se a representação da chave de seleção dos equipamentos da sonda de perfuração da plataforma Polvo-A.

Figura 52 – Representação da chave de seleção dos equipamentos da sonda de perfuração



Fonte: Autoria própria, 2019.

Para exemplificar uma das formas de operação, considera-se que a chave de seleção está na posição 11. Dessa forma, os retificadores irão acionar as seguintes cargas:

- Retificador 1: *Draworks C*;

- Retificador 2: Bomba de lama 1;
- Retificador 3: Bomba de lama 2;
- Retificador 4: Mesa rotativa / *Top-Drive*;
- Retificador 5: *Draworks A*;
- Retificador 6: Bomba de lama 3;

Caso o operador necessite acionar apenas um destes equipamentos, os demais painéis de retificadores deverão ficar bloqueados.

Com intuito de aprimorar o controle dos SCRs, tem-se um sistema de automação dedicado aos painéis de retificadores com CLPs (Controlador Lógico Programável) e IHMs (Interface Homem-Máquina), responsável pela interface entre campo e os painéis de retificadores, determinar o controle de velocidade dos motores, além de fazer a seleção dos motores que serão interligados ao SCR.

4.2 Dimensionamento do retificador

Os retificadores trifásicos controlado em ponte completa possuem uma eficiência melhor quando comparado ao retificador trifásico (ponto médio), pois, retifica mais pulsos na saída (seis pulsos por período), dessa forma, aumentando o valor médio da tensão e da corrente na saída do retificador. No acionamento mecânico da bomba de circulação de lama são utilizados dois motores de corrente contínua, do modelo GE-752 US. Estes motores são alimentados através do mesmo retificador.

A interligação dos motores ao barramento CC do retificador pode ser realizada através de duas maneiras dependendo da necessidade da operação a ser realizada, série ou paralelo. Para a interligação em série, a tensão de saída do retificador é dividida para os dois motores e a corrente se mantém igual em ambos. Na interligação em paralelo, a tensão de saída do retificador é fornecida individualmente para os motores.

Ambos os motores possuem excitação em paralelo, ou seja, as bobinas de campo estão em paralelo com as bobinas da armadura. Com intuito de dimensionar o retificador para o acionamento destes motores, é necessário conhecer os parâmetros de resistência e indutância de um dos motores, assim como a tensão de entrada do retificador e a frequência da rede elétrica. Inicialmente, para efeito do dimensionamento do retificador foi designado considerado o acionamento de apenas um dos motores da bomba de lama.

Os parâmetros iniciais da resistência de campo e resistência da armadura foram retirados do manual do motor GE 752 US (Figura 53).

Figura 53 – Valores das resistências do motor GE-752 US

"Resistance at 25° C (Ohms):	Min.	Max.
Armature		
Model 752UP	0.00912	0.00949
Model 752AUP	0.00912	0.00949
Model 752US	0.00749	0.00800
Model 752AUT	0.00749	0.00800
Exciting Field (With Cables)		
Model 752UP	1.25	1.33
Model 752UP (After 3/88)	1.13	1.22
Model 752AUP	0.00512	0.00558
Model 752US	1.13	1.22
Model 752AUT	0.00486	0.00535
Commutating Field (With Cables)		
Model 752UP	0.00508	0.00540
Model 752UP (After 3/88)	0.00439	0.00534
Model 752AUP	0.00439	0.00477
Model 752US	0.00432	0.00480
Model 752AUT	0.00432	0.00480

Fonte: Vertical Drilling Motor Type GE752 Manual motor.

Para o valor de indutância de campo, foi necessário calcular o mesmo utilizando o teste de impedância disponível no manual do motor (Figura 54).

Figura 54 – Valores obtidos durante o teste de impedâncias do motor GE-752 US

Impedance Test	Voltage Drop	
(Coiled Frame Without Armature):	Min.	Max.
Exciting Field (With Cables)		
Model 752UP (0.5 Amps @ 60 Hz)	59.0	66.6
Model 752AUP (24 Amps @ 60 Hz)	13.1	15.6
Model 752US (0.5 Amps @ 60 Hz)*	59.0	66.6
Model 752AUT (24 Amps @ 60 Hz)	13.1	15.6
Commutating Field (With Cables)		
Model 752UP (24 Amps @ 60 Hz)	7.3	8.5
Model 752AUP (24 Amps @ 60 Hz)	7.2	8.5
Model 752US (24 Amps @ 60 Hz)**	7.3	8.1
Model 752AUT (24 Amps @ 60 Hz)	7.7	8.5"

Fonte: Vertical Drilling Motor Type GE752 Manual motor.

- Campo de excitação:

$$Z_e = \frac{V_{drop_ex}}{I_{teste_ex}} = \frac{59}{0.5} \rightarrow Z_e = 118\Omega \quad (3)$$

$$L_e = \frac{Z_e}{2\pi f} = \frac{118}{2\pi 60} \rightarrow L_e = 313 \text{ mH} \quad (4)$$

Onde:

Z_e : Impedância do campo de excitação;

V_{drop_ex} : Queda de tensão no teste de impedância do campo de excitação;

I_{teste_ex} : Corrente no teste de impedância do campo de excitação;

L_e : Indutância do campo de excitação;

- Campo de comutação:

$$Z_c = \frac{V_{drop_com}}{I_{teste_com}} = \frac{7.3}{24} \rightarrow Z_c = 0.3041\Omega \quad (5)$$

$$L_c = \frac{Z_c}{2\pi f} = \frac{0.3041}{2\pi 60} \rightarrow L_c = 0.80 \text{ mH} \quad (6)$$

Onde:

Z_c : Impedância do campo de comutação;

V_{drop_com} : Queda de tensão no teste de impedância do campo de comutação;

I_{teste_com} : Corrente no teste de impedância do campo de comutação;

L_c : Indutância do campo de comutação;

Portanto, a indutância do campo (L_f) será igual a:

$$L_f = L_e + L_c = 313.80 \text{ mH} \quad (7)$$

Para o valor de indutância de armadura, foi necessário calcular o mesmo utilizando os valores nominais disponibilizados no manual do motor (Figura 55). Para calcular a FEM gerada nos terminais da armadura utilizou-se a equação (8) (Fitzgerald, 2014).

Figura 55 – Valores nominais do motor GE-752 US

Motor Ratings**		Continuous Max. HP
Shunt (US)		
Volts		750
Armature Amps		1185
Field Amps*		60
RPM		1040
Torque		5705
Horsepower		1130

Fonte: Vertical Drilling Motor Type GE752 Manual motor.

$$P_{mec} = E_a * I_a \quad (8)$$

$$T_{ind} * \omega_m = E_a * I_a \quad (9)$$

Onde:

P_{mec} : Potência mecânica;

T_{ind} : Torque induzido (N.m);

ω_m : Velocidade angular (rad/s);

E_a : FEM induzida na armadura;

I_a : Corrente de armadura;

Com as unidades de torque em (lb/ft) e a velocidade em (RPM) foi necessário convertê-las para o SI.

$$T_{ind} = 5705 * 1.356 = 7735 \text{ N.m} \quad (10)$$

$$\omega_m = \frac{RPM * 2\pi}{60} = \frac{1040 * 2\pi}{60} = 108.9 \frac{rad}{s} \quad (11)$$

Portanto, a FEM gerada nos terminais da armadura será:

$$7735 * 108.9 = E_a * 1185 \quad (12)$$

$$E_a = 710.89 \text{ V} \quad (13)$$

Em seguida utilizou-se a relação entre a tensão dos terminais do motor e a FEM gerada na armadura equação (12) (Fitzgerald, 2014), para obtenção da impedância da armadura.

$$Z_a = \frac{V_t - E_a}{I_a} = \frac{750 - 710.89}{1185} \quad (14)$$

$$Z_a = |0.033| \Omega \quad (15)$$

Por último, foi definido o valor de indutância da armadura, utilizando a equação (16).

$$Z_a^2 = R_a^2 + L_a^2 \quad (16)$$

$$L_a = \sqrt{Z_a^2 - R_a^2} = \sqrt{(0.033)^2 - (7.49m)^2} \quad (17)$$

$$L_a = 32.13 \text{ mH} \quad (18)$$

Para o dimensionamento do retificador estudado neste trabalho foram consideradas que todos os SCRs são ideais, não há queda de tensão nos condutores e o ângulo de disparo utilizado foi para a máxima carga ($\alpha = 0^\circ$). Abaixo seguem os principais valores nominais do sistema.

$$V_{in_{ef}} = 600 \text{ V};$$

$$f = 60 \text{ Hz};$$

$$R_f = 1.13432 \Omega; \quad L_f = 313.807 \text{ mH};$$

$$R_a = 7.49 \text{ m}\Omega; \quad L_a = 32.13 \text{ mH};$$

Onde:

$V_{in_{ef}}$: Tensão eficaz de entrada do retificador;

f : Frequência da rede elétrica;

R_f : Resistência equivalente de campo do motor de corrente contínua;

L_f : Indutância equivalente de campo do motor de corrente contínua;

R_a : Resistência equivalente de armadura do motor de corrente contínua;

L_a : Indutância equivalente de armadura do motor de corrente contínua;

Na equação (19) (Barbi, 2006) tem-se o cálculo para a tensão de pico. Com o valor da tensão eficaz $V_{in_{pk}}$ conhecido, é possível através das equações (20, 21 e 22) (Rashid, 2000) determinar as curvas das tensões de entrada do retificador.

$$V_{in_{pk}} = V_{in_{ef}}\sqrt{2} = 848.53 \text{ V} \quad (19)$$

$$V_A = V_{in_{ef}}\sqrt{2} (30^\circ) = 848.53 (30^\circ) \quad (20)$$

$$V_B = V_{in_{ef}}\sqrt{2} (-120^\circ) = 848.53 (-120^\circ) \quad (21)$$

$$V_C = V_{in_{ef}}\sqrt{2} (120^\circ) = 848.53 (120^\circ) \quad (22)$$

Com as tensões de entrada já definidas, pode-se agora determinar as tensões da carga e do SCR. Utilizando a equação (23) (Assef, 2012) é possível determinar a tensão reversa máxima do SCR. Com a equação (24) (Assef, 2012) determina-se a tensão de pico na presente na carga.

- Tensão de Pico:

$$V_{scr_rrm} = -V_{in_ef} \sqrt{2} \sqrt{3} = -1469.69 \text{ V} \quad (23)$$

$$V_{carga_pk} = V_{in_ef} \sqrt{2} \sqrt{3} = 1469.69 \text{ V} \quad (24)$$

Conhecendo a tensão de pico na carga e os intervalos de condução do SCR determina-se o valor da tensão eficaz sobre a carga, através da equação (28) (Rashid, 1999).

- Tensão Eficaz

$$F_1(x) = V_{in_ef} * \text{sen}(x) * \sqrt{2} * \sqrt{3} \quad (25)$$

$$V_{scr_ef} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} * \left(\int_{180 \text{ deg}}^{300 \text{ deg}} F_1(x)^2 dx + \int_{240 \text{ deg}}^{360 \text{ deg}} F_1(x)^2 dx \right)} \quad (26)$$

$$V_{scr_ef} = 932.13 \text{ V} \quad (27)$$

$$V_{carga_ef} = \sqrt{\frac{6}{2\pi} * \left(\int_{\frac{\pi}{3} + \alpha_{rad}}^{\frac{2\pi}{3} + \alpha_{rad}} (F_1(x))^2 dx \right)} \quad (28)$$

$$V_{carga_ef} = 1404.69 \text{ V} \quad (29)$$

Conhecendo a tensão de pico na carga e os intervalos de condução do SCR determina-se o valor da tensão média sobre a carga, através da equação (32) (Rashid, 1999).

- Tensão Média

$$V_{scr_med} = \frac{1}{2\pi} * \left(\int_{180\ deg}^{300\ deg} F_1(x)dx + \int_{240\ deg}^{360\ deg} F_1(x)dx \right) \quad (30)$$

$$V_{scr_med} = -701.73\ V \quad (31)$$

$$V_{carga_med} = \frac{6}{2\pi} * \left(\int_{\frac{\pi}{3} + \alpha_{rad}}^{\frac{2\pi}{3} + \alpha_{rad}} F_1(x)dx \right) \quad (32)$$

$$V_{carga_med} = 1403.45\ V \quad (33)$$

Uma vez que todas as tensões da carga e do SCR foram calculadas, pode-se determinar os valores de corrente os mesmos. Conhecendo o valor da tensão de pico da carga, aplica-se a equação (34) (Barbi, 2006) para determinar a corrente de pico do SCR. Posteriormente, aplica-se a equação (35) (Petry, 2013) para determinar a corrente de pico na carga.

- Corrente de Pico:

$$I_{scr_pk} = \frac{V_{in_ef} \sqrt{2} \sqrt{3}}{2 * R} = 643.58\ A \quad (34)$$

$$I_{carga_pk} = 2 * I_{scr_pk} = 1287.16\ A \quad (35)$$

Conhecendo os valores de tensão média da carga, aplicam-se as equações (36 e 37) (Hart, 2012) para calcular as correntes médias sobre a carga e o SCR, respectivamente.

- Corrente Média:

$$I_{carga_med} = \frac{V_{carga_med}}{R} = 1229.15\ A \quad (36)$$

$$I_{scr_med} = \frac{I_{carga_med}}{2\sqrt{3}} = 204.86 \text{ A} \quad (37)$$

Conhecendo os valores de corrente média da carga, aplicam-se as equações (38 e 39) (Hart, 2012) para calcular as correntes eficazes sobre a carga e o SCR, respectivamente.

- Corrente Eficaz:

$$I_{carga_ef} = I_{carga_med} = 1229.15 \text{ A} \quad (38)$$

$$I_{scr_ef} = \frac{I_{carga_med}}{2\sqrt{3}} = 354.82 \text{ A} \quad (39)$$

Na tabela 6 estão dispostos todos os valores calculados durante o dimensionamento do retificador trifásico controlado para ($\alpha = 0^\circ$).

Tabela 6 – Valores calculados durante o dimensionamento do retificador trifásico ($\alpha = 0^\circ$).

	Valores Calculados		
	Pico	Média	Eficaz
I_SCR1	643.58 A	204.86 A	354.82 A
V_SCR1	-1469.67 V	-701.73 V	932.13 V
I_CARGA	1287.16 A	1229.15A	1229.15A
V_CARGA	1469.69 V	1403.45 V	1404.69 V

Conforme disposto na tabela 6, a tensão máxima da carga (V_{carga_med}) será de 1403.45 V_{med} . Porém, devido a limitação de 750 V_{med} máximo de alimentação do motor se faz necessário calcular o valor do ângulo de disparo máximo em que os SCRs devem trabalhar. A equação (40) (Barbi, 2006) demonstra como calcular o valor do ângulo de disparo para uma tensão máxima de 750 V_{med} .

$$V_{med} = 2.34 * V_{inef} * \cos(\alpha) \quad (40)$$

$$\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{750}{2.34 * 600}\right) \rightarrow \alpha = 57.71^\circ \quad (41)$$

Com o valor o ângulo de disparo (α) estabelecido, foram calculados os novos valores médio e eficaz de corrente e tensão para a carga e os SCR's.

Conhecendo a tensão de pico na carga determinada na equação (24) e os intervalos de condução do SCR determina-se o valor da tensão eficaz sobre a carga, através da equação (45) (Rashid, 1999).

- Tensão Eficaz

$$F_1(x) = V_{in_ef} * \text{sen}(x) * \sqrt{2} * \sqrt{3} \quad (42)$$

$$V_{scr_ef} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} * \left(\int_{237.71 \text{ deg}}^{357.71 \text{ deg}} F_1(x)^2 dx + \int_{297.71 \text{ deg}}^{417.71 \text{ deg}} F_1(x)^2 dx \right)} \quad (43)$$

$$V_{scr_ef} = 810 \text{ V} \quad (44)$$

$$V_{carga_ef} = \sqrt{\frac{6}{2\pi} * \left(\int_{\frac{\pi}{3} + \alpha_{rad}}^{\frac{2\pi}{3} + \alpha_{rad}} (F_1(x))^2 dx \right)} \quad (45)$$

$$V_{carga_ef} = 834.63 \text{ V} \quad (46)$$

Conhecendo a tensão de pico na carga e os intervalos de condução do SCR determina-se o valor da tensão média sobre a carga, através da equação (49) (Rashid, 1999).

- Tensão Média

$$V_{scr_med} = \frac{1}{2\pi} * \left(\int_{237.71 \text{ deg}}^{357.71 \text{ deg}} F_1(x) dx + \int_{297.71 \text{ deg}}^{417.71 \text{ deg}} F_1(x) dx \right) \quad (47)$$

$$V_{scr_med} = -374.87 \text{ V} \quad (48)$$

$$V_{carga_med} = \frac{6}{2\pi} * \left(\int_{\frac{\pi}{3} + \alpha_{rad}}^{\frac{2\pi}{3} + \alpha_{rad}} F_1(x) dx \right) \quad (49)$$

$$V_{carga_med} = 749.73 \text{ V} \quad (50)$$

Conhecendo os valores de tensão média da carga, aplicam-se as equações (51 e 52) (Hart, 2012) para calcular as correntes médias sobre a carga e o SCR, respectivamente.

- Corrente Média:

$$I_{carga_med} = \frac{V_{carga_med}}{R} = 656.62 \text{ A} \quad (51)$$

$$I_{scr_med} = \frac{I_{carga_med}}{2 \cdot 3} = 109.44 \text{ A} \quad (52)$$

Conhecendo os valores de corrente média da carga, aplicam-se as equações (53 e 54) (Hart, 2012) para calcular as correntes eficaz sobre a carga e o SCR, respectivamente.

- Corrente Eficaz:

$$I_{carga_ef} = I_{carga_med} = 656.62 \text{ A} \quad (53)$$

$$I_{scr_ef} = \frac{I_{carga_med}}{2\sqrt{3}} = 189.55 \text{ A} \quad (54)$$

Na tabela 7 estão dispostos todos os valores calculados durante o dimensionamento do retificador trifásico controlado para ($\alpha = 57.71^\circ$).

Tabela 7 – Valores calculados durante o dimensionamento do retificador trifásico ($\alpha = 57.71^\circ$).

	Valores Calculados	
	Média	Eficaz
I_SCR1	109.44 A	189.55 A
V_SCR1	-374.87 V	810 V
I_CARGA	656.62 A	656.62 A
V_CARGA	749.73 V	834.63 V

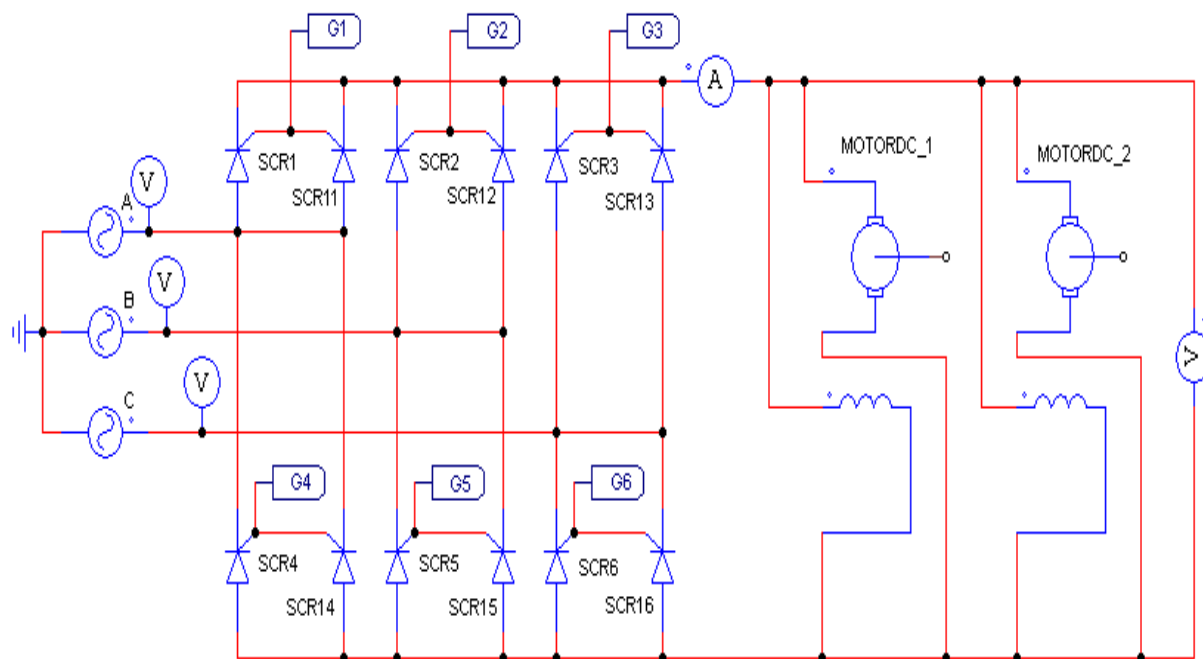
Conforme os valores expostos na tabela 7, pode-se afirmar que o SCR instalado nos retificadores da plataforma Polvo-A está sobredimensionado, uma vez que a corrente média máxima dos mesmos é de 600 A. No próximo capítulo será realizada a análise qualitativa deste retificador, com intuito de validar os equacionamentos realizados.

5 SIMULAÇÃO DO RETIFICADOR UTILIZADO NO ACIONAMENTO DOS MOTORES CC DAS BOMBAS DE LAMA

Com objetivo de demonstrar o comportamento dos sinais de tensão e corrente do retificador trifásico controlado, foram realizadas simulações computacionais no programa PSIM. O PSIM é um programa de simulação desenvolvido com o objetivo de simular circuitos eletrônicos de potência. Possui uma interface homem-máquina amigável e a inserção de voltímetros e amperímetros no circuito, fornece os gráficos sincronizados no tempo com todas as tensões e correntes solicitadas.

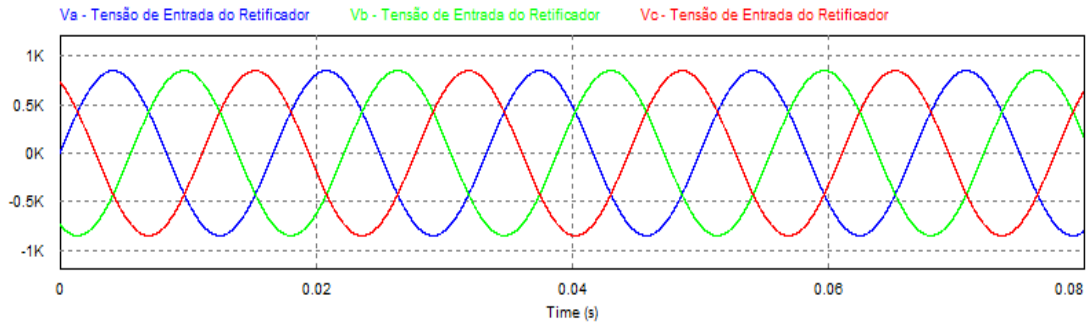
Nesse capítulo realizada a simulação do retificador através de métodos computacionais, além de fazer uma análise qualitativa com os valores calculados no capítulo anterior. Na figura 56 está representado o circuito que foi utilizado no software PSIM, para a obtenção das leituras desejadas.

Figura 56 – Circuito do retificador trifásico com ponte completa para o acionamento dos motores CC



Fonte: Autoria própria, 2019.

A tensão de entrada determinada no dimensionamento do retificador foi 600V eficazes, ou seja, 848.53V de pico com uma frequência de 60 Hz. Na figura 57, foram obtidas as formas de onda para a tensão de entrada do retificador.

Figura 57 – Tensão de entrada do retificador

Fonte: Autoria própria, 2019.

Com o valor o ângulo de disparo (α) estabelecido, foram calculados os tempos de disparo para os SCRs.

$$\omega = 2\pi f = 376.991 \frac{rad}{s} \quad (55)$$

$$\alpha_{rad} = \frac{\alpha * \pi * rad}{180 * deg} = 1.007 \text{ rad} \quad (56)$$

$$T_1 = \left(\alpha_{rad} + \frac{\pi}{6} \right) * \frac{1}{\omega} = 4.061 \text{ ms} \quad (57)$$

$$T_2 = \left(\alpha_{rad} + \frac{\pi}{6} + \frac{2\pi}{3} \right) * \frac{1}{\omega} = 9.616 \text{ ms} \quad (58)$$

$$T_3 = \left(\alpha_{rad} + \frac{\pi}{6} + \frac{4\pi}{3} \right) * \frac{1}{\omega} = 15.172 \text{ ms} \quad (59)$$

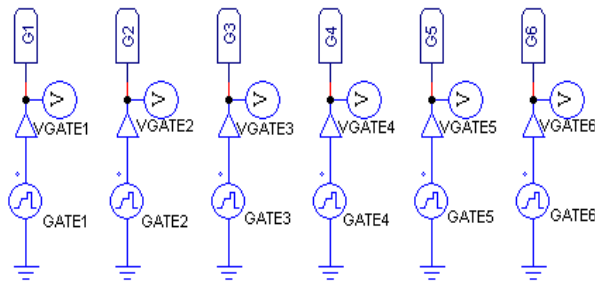
$$T_4 = \left(\alpha_{rad} + \frac{\pi}{6} + \pi \right) * \frac{1}{\omega} = 12.394 \text{ ms} \quad (60)$$

$$T_5 = \left(\alpha_{rad} + \frac{\pi}{6} + \frac{5\pi}{3} \right) * \frac{1}{\omega} = 17.95 \text{ ms} \quad (61)$$

$$T_6 = \left(\alpha_{rad} + \frac{\pi}{6} + \frac{7\pi}{3} \right) * \frac{1}{\omega} = 23.505 \text{ ms} \quad (62)$$

Com a obtenção dos tempos de disparo para os SCRs, foram realizadas simulações computacionais no programa PSIM para conhecer o comportamento dos sinais de tensão e corrente do retificador trifásico controlado. Na figura 58 tem-se o circuito utilizado para a geração dos gatilhos dos SCRs.

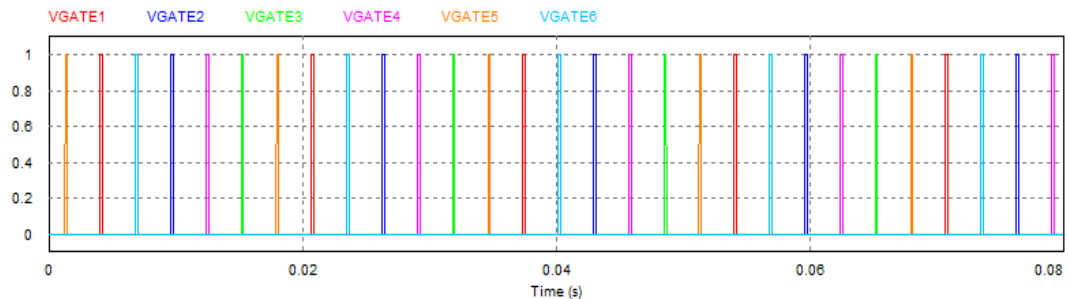
Figura 58 – Circuito de gatilho dos SCRs



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 59 tem-se o gráfico para leitura de tensão de disparo dos SCRs, para ($\alpha = 57.71^\circ$).

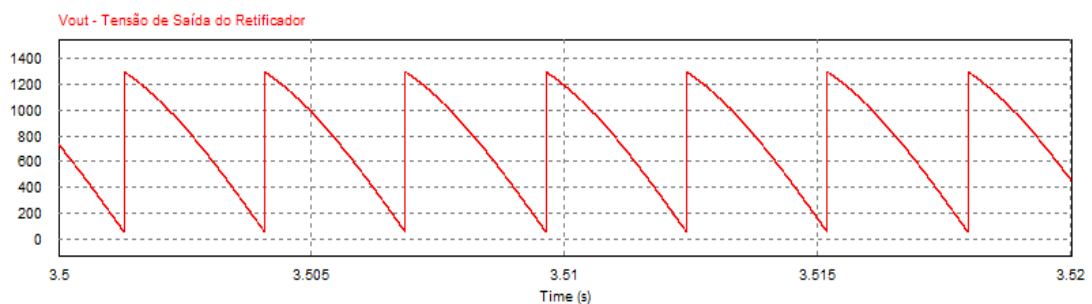
Figura 59 – Tensão de disparo dos SCRs ($\alpha = 57.71^\circ$)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 60 foi obtido o gráfico para leitura da tensão de saída em CC do retificador trifásico controlado (ponte completa), para ($\alpha = 57.71^\circ$).

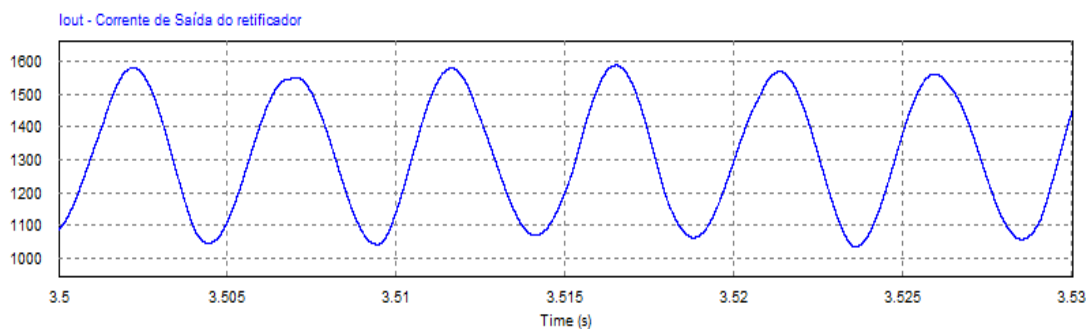
Figura 60 – Tensão de saída do retificador trifásico com ponte completa ($\alpha = 57.71^\circ$)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 61 foi obtido o gráfico para leitura da corrente de saída em CC do retificador trifásico controlado (ponte completa), para ($\alpha = 57.71^\circ$).

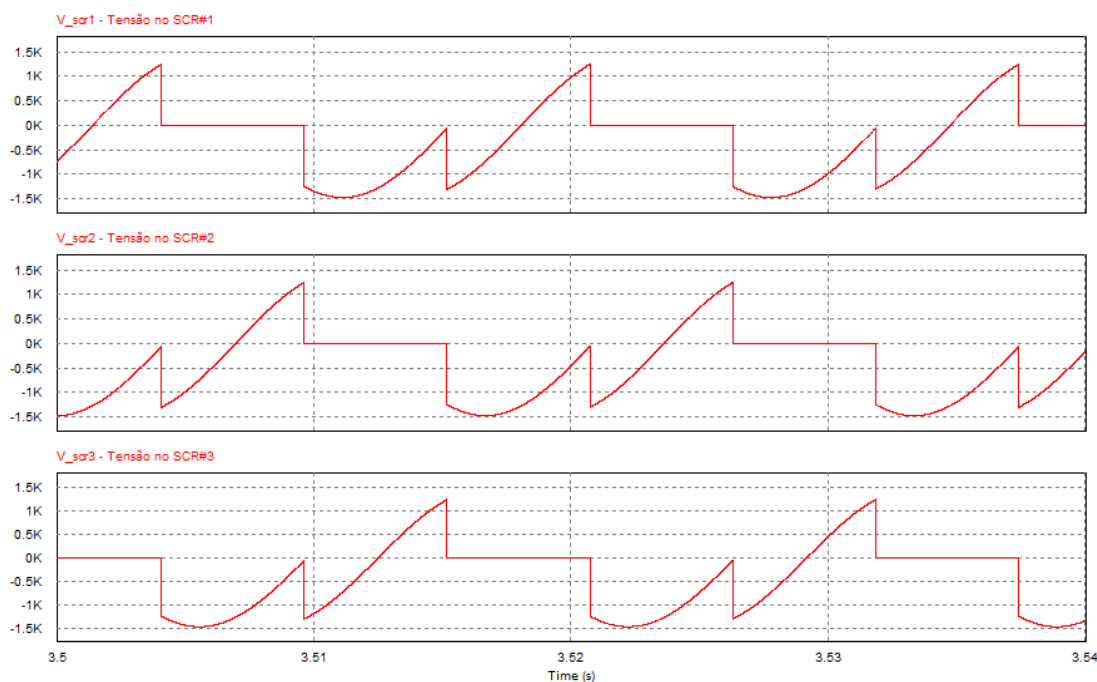
Figura 61 – Corrente de saída do retificador trifásico com ponte completa ($\alpha = 57.71^\circ$)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 62 foi obtido o gráfico para a tensão sobre os SCRs do grupo positivo. Com a análise deste gráfico é possível determinar se o SCR estará conduzindo ou estará bloqueado.

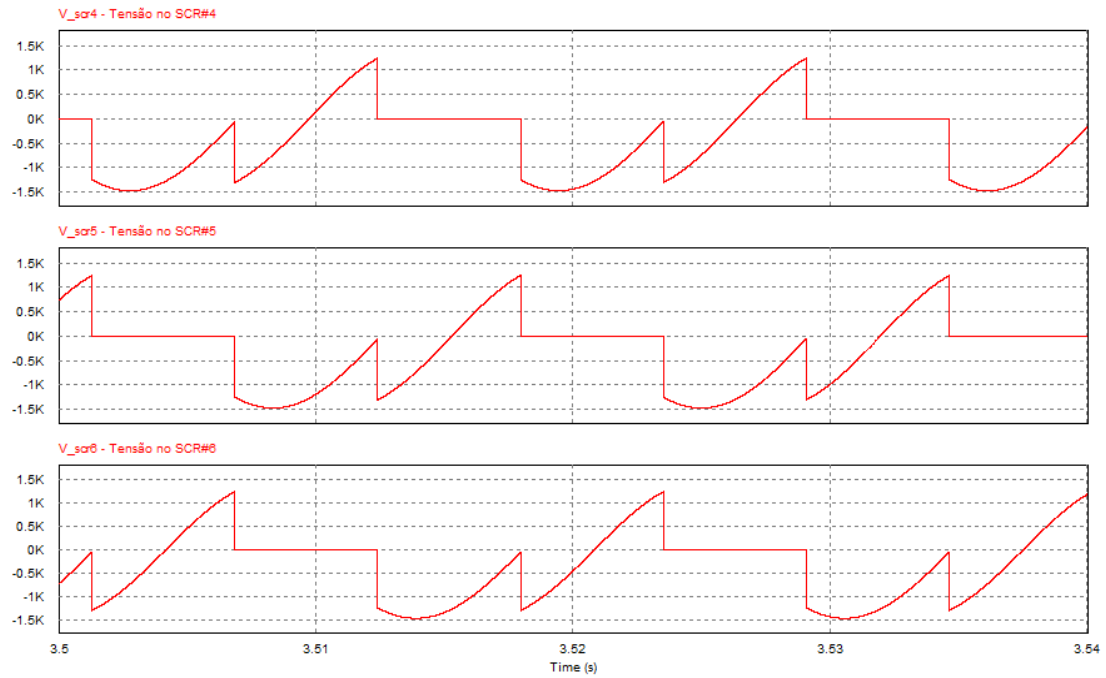
Figura 62 – Tensão dos SCRs – Grupo positivo ($\alpha = 57.71^\circ$)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 63 foi obtido o gráfico para a tensão sobre os SCRs do grupo negativo. Com a análise deste gráfico é possível determinar se o SCR estará conduzindo ou estará bloqueado.

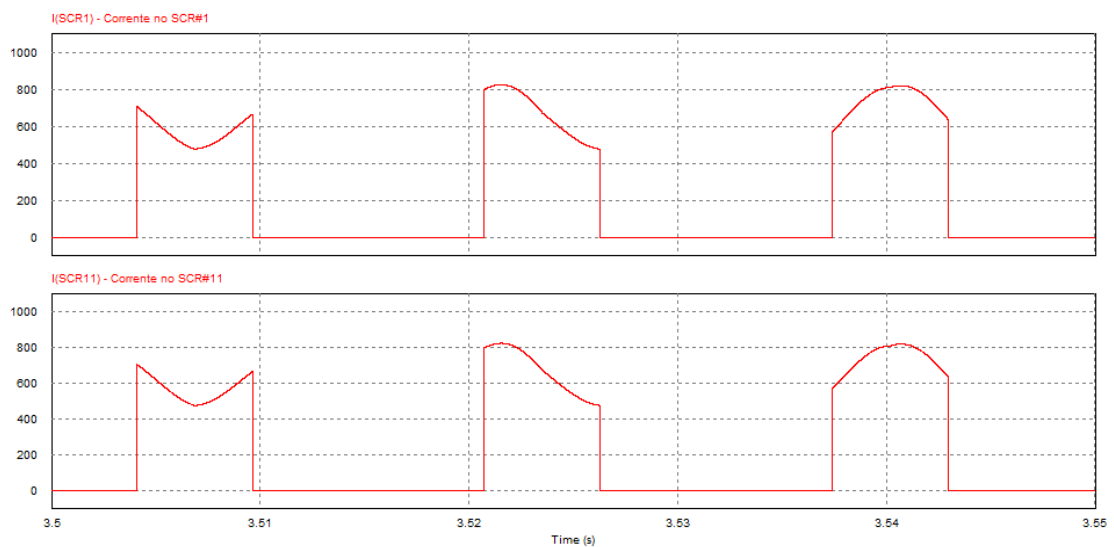
Figura 63 – Tensão dos SCRs – Grupo negativo ($\alpha = 57.71^\circ$)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Devido ao retificador possuir dois SCRs conduzindo em cada semiciclo da onda senoidal de tensão, a corrente sobre os SCRs também será analisada por fase. Na figura 64 tem-se o gráfico da corrente nos SCRs da fase “A”, para o semiciclo positivo da tensão de entrada.

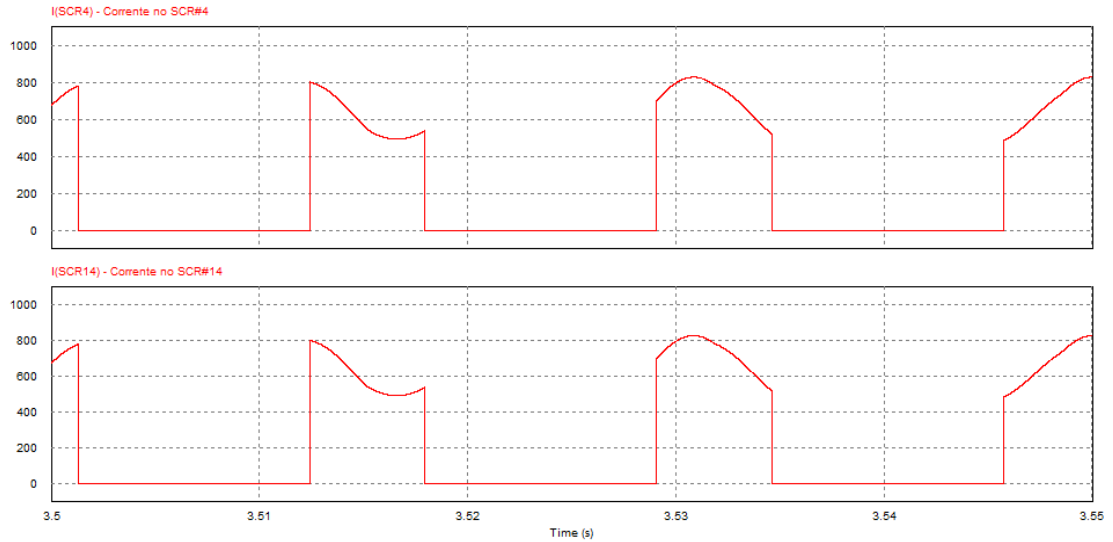
Figura 64 – Corrente dos SCRs – Semiciclo positivo da Fase “A” ($\alpha = 57.71^\circ$)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 65 tem-se o gráfico da corrente nos SCRs da fase “A”, para o semiciclo negativo da tensão de entrada.

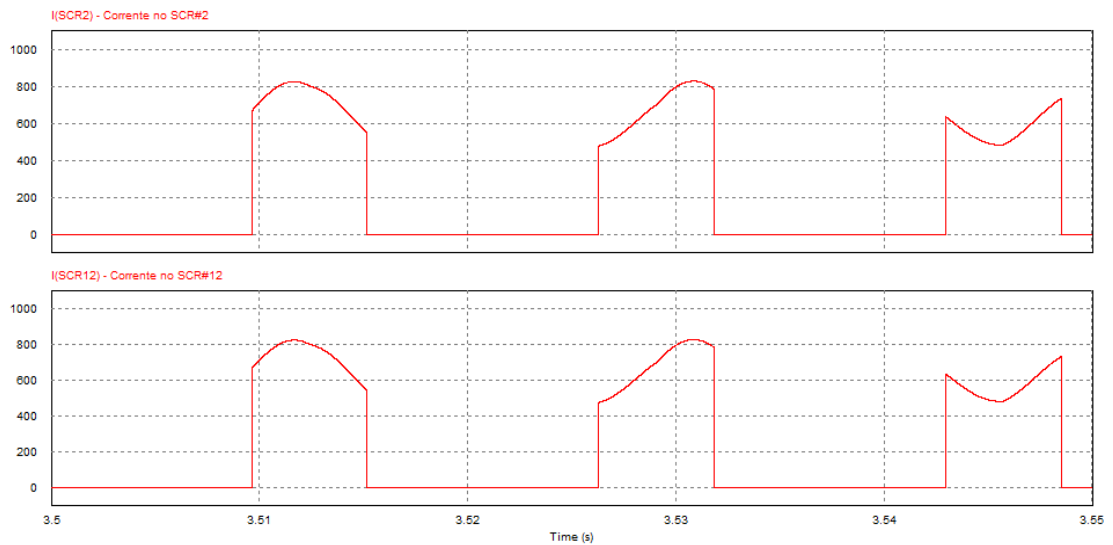
Figura 65 – Corrente dos SCRs – Semiciclo negativo da Fase “A” ($\alpha = 57.71^\circ$)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 66 tem-se o gráfico da corrente nos SCRs da fase “B”, para o semiciclo positivo da tensão de entrada.

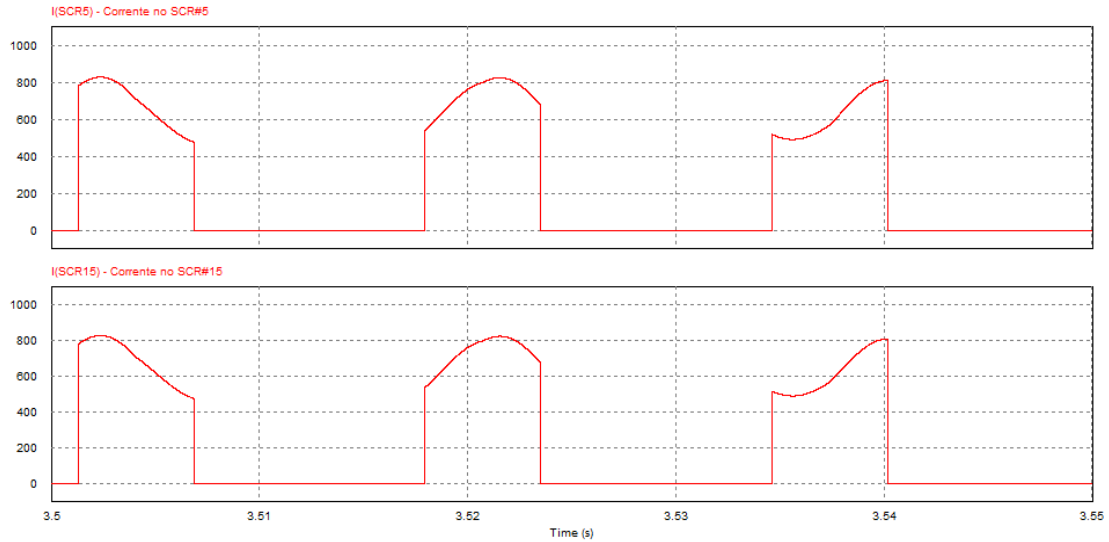
Figura 66 – Corrente dos SCRs – Semiciclo positivo da Fase “B” ($\alpha = 57.71^\circ$)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 67 tem-se o gráfico da corrente nos SCRs da fase “B”, para o semiciclo negativo da tensão de entrada.

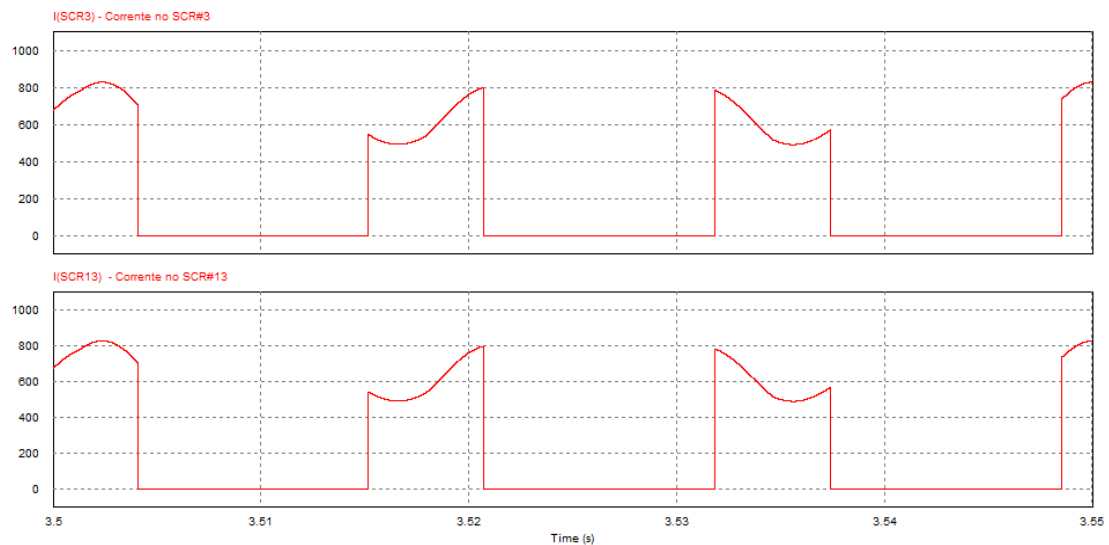
Figura 67 – Corrente dos SCRs – Semiciclo negativo da Fase “B” ($\alpha = 57.71^\circ$)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 68 tem-se o gráfico da corrente nos SCRs da fase “C”, para o semiciclo positivo da tensão de entrada.

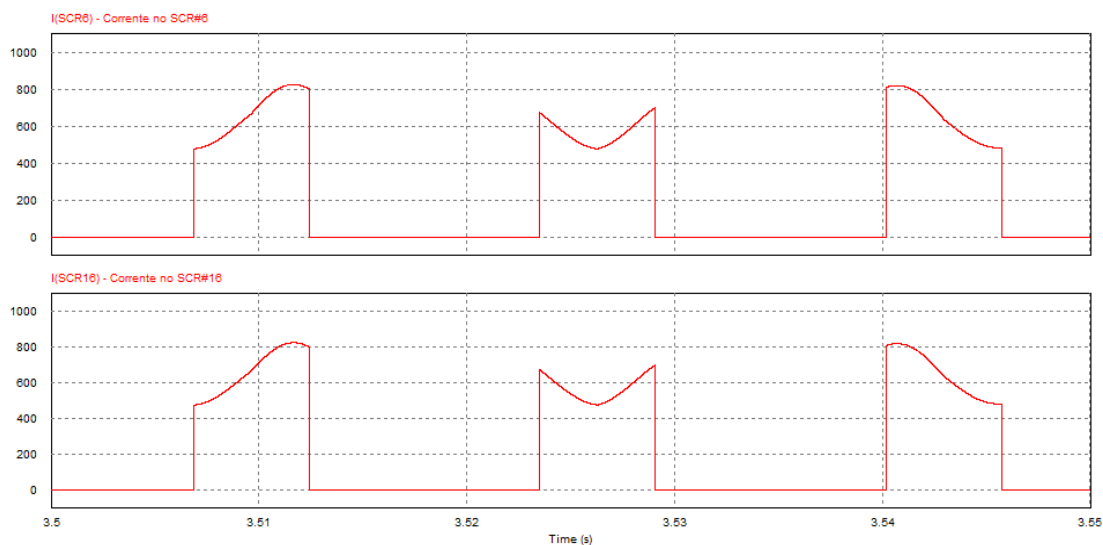
Figura 68 – Corrente dos SCRs – Semiciclo positivo da Fase “C” ($\alpha = 57.71^\circ$)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 69 tem-se o gráfico da corrente nos SCRs da fase “C”, para o semiciclo negativo da tensão de entrada.

Figura 69 – Corrente dos SCR's – Semiciclo negativo da Fase "C" ($\alpha = 57.71^\circ$)

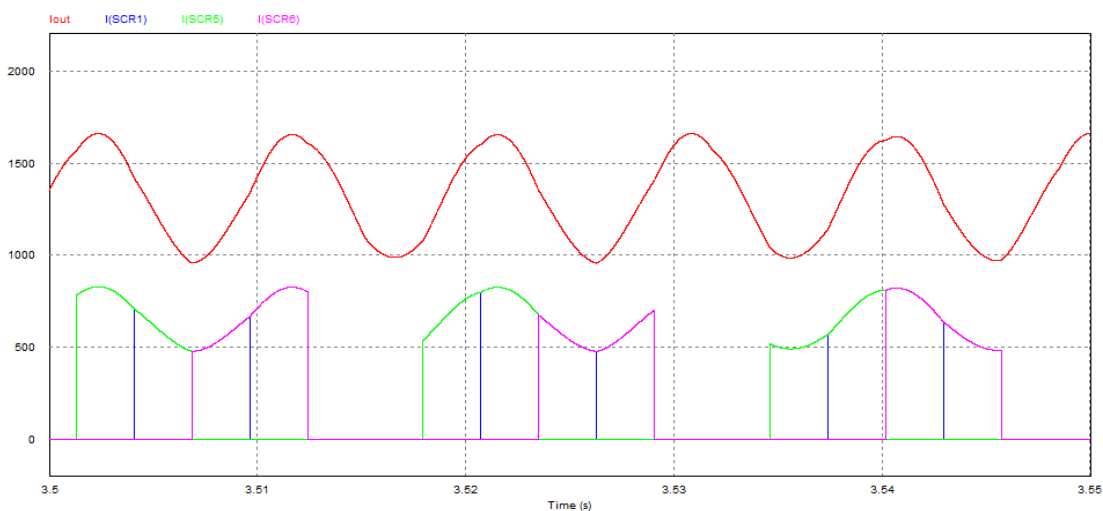


Fonte: Autoria própria, 2019.

A associação em paralelo dos SCR's é utilizada quando a corrente da carga, ou a margem de sobrecorrente necessária, não pode ser suportada por um único SCR, Pomílio (2001).

Tendo como referências os gráficos obtidos durante a simulação do retificador trifásico controlado e analisando a sobreposição das formas de onda da corrente nos SCR's, é possível observar que a corrente na carga (I_{out}) é formada pela contribuição das correntes dos SCR's que estão em condução de cada fase. Na figura 70, tem-se a sobreposição das formas de onda de corrente nos SCR's (1/5/6) comparada com a corrente na carga (I_{out}). Neste intervalo de condução a fase "A" é a mais positiva.

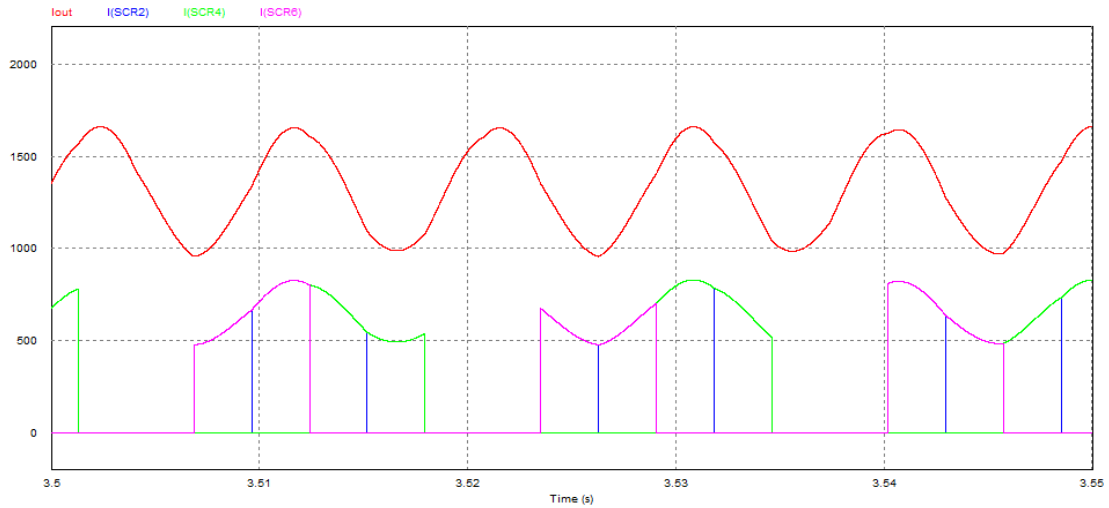
Figura 70 – Sobreposição das correntes dos SCR's (1/5/6) com a corrente de saída



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 71, tem-se a sobreposição das formas de onda de corrente nos SCR's (2/4/6) comparada com a corrente na carga (I_{out}). Neste intervalo de condução a fase “B” é a mais positiva.

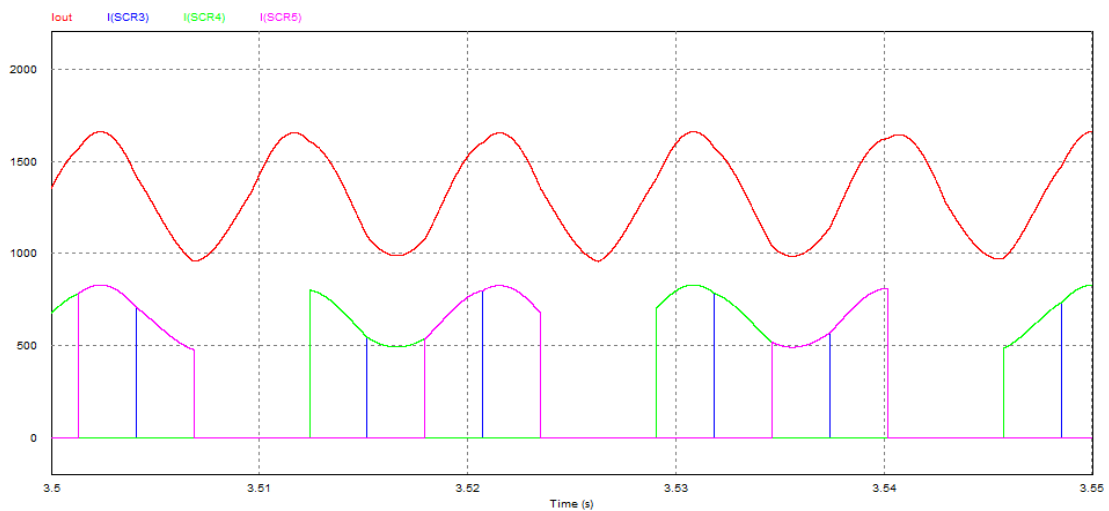
Figura 71 – Sobreposição das correntes dos SCR's (2/4/6) com a corrente de saída



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 72, tem-se a sobreposição das formas de onda de corrente nos SCR's (3/4/5) comparada com a corrente na carga (I_{out}). Neste intervalo de condução a fase “C” é a mais positiva.

Figura 72 – Sobreposição das correntes dos SCR's (3/4/5) com a corrente de saída



Fonte: Autoria própria, 2019.

Todos os valores (pico, média e eficaz) obtidos durante a simulação do retificador trifásico controlado, para ($\alpha = 57.71^\circ$) estão presentes na Tabela 8.

Tabela 8 – Valores das leituras obtidas durante simulação do retificador trifásico ($\alpha = 57.71^\circ$).

	Valores Simulados		
	Pico	Média	Eficaz
I_SCR1	827.85 A	218.89 A	385.02 A
V_SCR1	-1469.67 V	-372.62 V	809.39 V
I_CARGA	1661.66 A	1315.89 A	1336.28 A
V_CARGA	1298.58 V	745.24 V	830.98 V

Conforme os valores expostos na tabela 7, pode-se afirmar que o retificador está sobredimensionado para o acionamento dos dois motores de corrente contínua, com a tensão máxima de 745.25 V e a corrente média no SCR de 218.89 A.

No próximo capítulo serão abordadas as possíveis melhorias que poderão ser realizadas no retificador, além de analisar as vantagens/desvantagens para cada melhoria idealizada.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

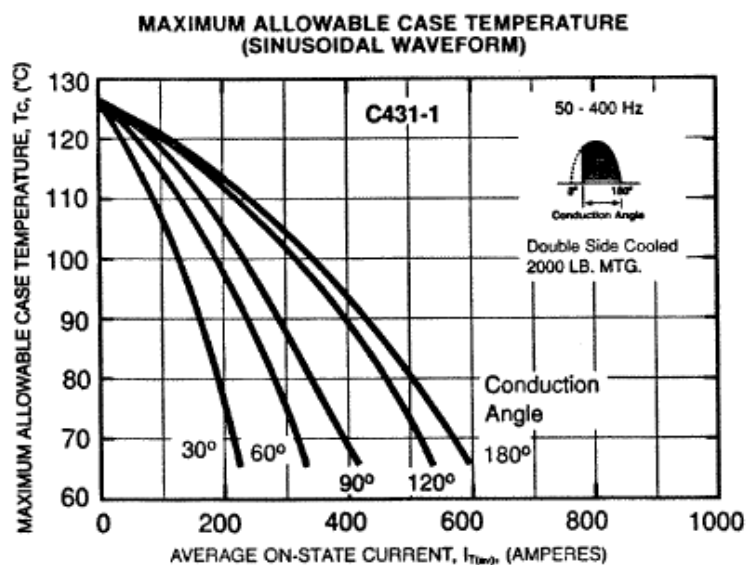
Conforme o dimensionamento feito neste trabalho para o retificador trifásico controlado, constatou-se que o mesmo está sobredimensionado para o acionamento dos motores de contínua da sonda de perfuração da plataforma Polvo-A, porém, existem algumas melhorias que podem ser realizadas para que o sistema venha a trabalhar de uma forma mais adequada. Nesse capítulo serão apresentadas possíveis melhorias no retificador com o objetivo de aumentar a eficiência do sistema (retificador e motor).

6.1 Sobredimensionamento dos SCRs e troca por tecnologias mais novas

Devido à limitação de $750 V_{med}$ na alimentação dos motores de corrente contínua da bomba de lama, calculou-se que o ângulo de disparo máximo dos SCRs deverá ser de 57.71° , nesta situação a corrente média máxima de cada SCR é de 218.89 A.

Vale salientar que com o aumento da temperatura em que os SCRs estão expostos, o valor de corrente média do SCR tende a diminuir, dessa forma, também se faz necessário analisar a temperatura máxima do local de instalação dos SCRs para determinar o sobredimensionamento dos mesmos. Para essa análise foi utilizado o SCR (C431-1) da Powerex, o qual também possui a corrente média de 600 A. Na figura 73 tem-se o gráfico de corrente média do SCR em função da temperatura máxima permitida.

Figura 73 – Gráfico de corrente média do SCR em função da temperatura máxima permitida



Fonte: Datasheet Powerex C431.

Ao analisar o gráfico de corrente média do SCR em função da temperatura máxima permitida, pode-se afirmar que o SCR instalado nos retificadores da plataforma Polvo-A está sobredimensionado, uma vez que a corrente média máxima dos mesmos é de 600 A e a temperatura máxima de operação dos SCRs não ultrapassa 75° C.

Uma vez que os SCRs estão sobredimensionados e a corrente média máxima ser relativamente baixa para aplicações industriais, pode-se analisar futuramente a possibilidade de substituir os SCRs (tiristor) por dispositivos com uma tecnologia mais nova, na qual pode-se incluir os IGBTs e Mosfets. As principais vantagens dos IGBTs são:

- Capacidade elevada de chaveamento;
- Pequenas perdas de condução;
- Utilizado para a comutação de cargas com correntes elevadas;

Porém, devido a sua capacidade elevada de chaveamento quando comparado com os tiristores, os IGBTs exigem uma maior complexidade dos seus circuitos de disparos e para isso todo o painel do retificador deverá ser substituído.

Este tipo de implementação seria de longo prazo de tempo, pois, demanda da empresa um bom planejamento, a aquisição de novos painéis de retificadores com IGBTs, a instalação e comissionamento, além de indisponibilizar toda a sonda de perfuração para as atividades de perfuração e completação de poços.

6.2 Inserção de um capacitor de filtro

A inserção de um capacitor de filtro tende a eliminar a componente CA do circuito, ou seja, a ondulação dos sinais de tensão e corrente de saída irá ser reduzida e consequentemente o rendimento do sistema irá aumentar, pois a qualidade destes sinais será elevada.

Para dimensionar o capacitor de filtro é necessário conhecer alguns parâmetros, tal como, a tensão de pico, a sua corrente média e a frequência de oscilação na carga. De acordo com Maganha (2016), tem-se a equação (63):

$$C = \left(\frac{I_{carga_med}}{n * f * Ripple} \right) \quad (63)$$

Onde:

C: Valor da capacitância.

I_{carga_med} : Corrente média da carga.

n : Fator multiplicativo da frequência (número de pulsos).

f : Frequência da rede elétrica.

Ripple: Diminuição da ondulação em torno do seu valor de pico.

Para efeito de simulação, adotou-se uma oscilação de 5% (ondulação=0.05) com a tensão de pico da carga ($V_{carga_pk} = 1469.69 \text{ V}$).

$$V_{min} = \left(\frac{V_{carga_pk}}{1 + \text{ondulação}} \right) = \frac{1469.69}{1.05} \quad (64)$$

$$V_{min} = 1399.7 \text{ V} \quad (65)$$

Com os valores da tensão de pico na carga e a tensão mínima na carga é possível determinar o valor de Ripple conforme a equação (66):

$$Ripple = (V_{carga_pk} - V_{min}) \quad (66)$$

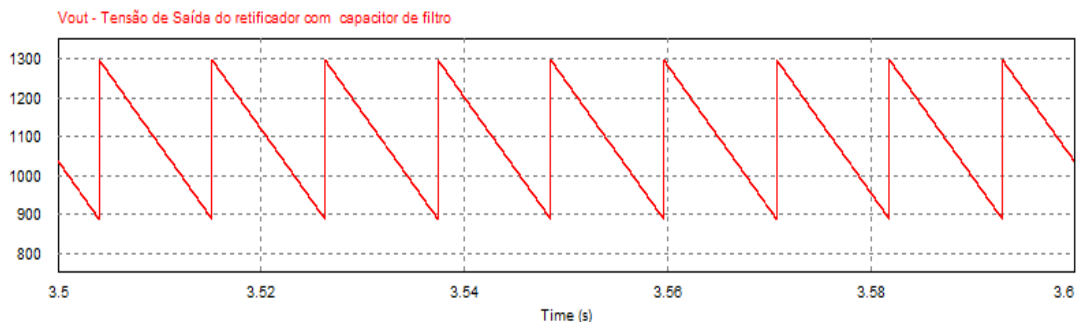
$$Ripple = (1469.69 - 1399.7) = 69.98 \text{ V} \quad (67)$$

Portanto, para determinar a capacitância utiliza-se a equação (63):

$$C = \left(\frac{1315.89}{6 * 60 * 69.98} \right) = 52.23 \text{ mF} \quad (68)$$

Na figura 74 foi obtido o gráfico para leitura da tensão de saída em CC do retificador trifásico controlado com a instalação do capacitor de filtro.

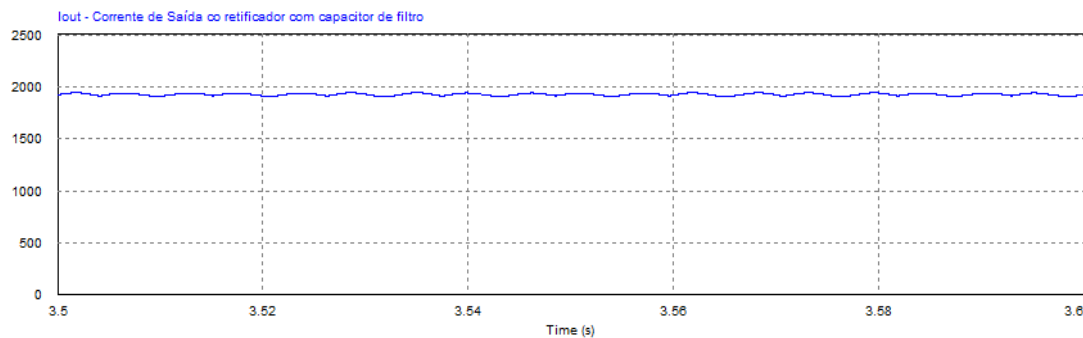
Figura 74 – Tensão de saída do retificador trifásico com capacitor de filtro ($\alpha = 57.71^\circ$)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 75 foi obtido o gráfico para leitura da corrente de saída em CC do retificador trifásico controlado com a instalação do capacitor de filtro.

Figura 75 – Corrente de saída do retificador trifásico com capacitor de filtro ($\alpha = 57.71^\circ$)

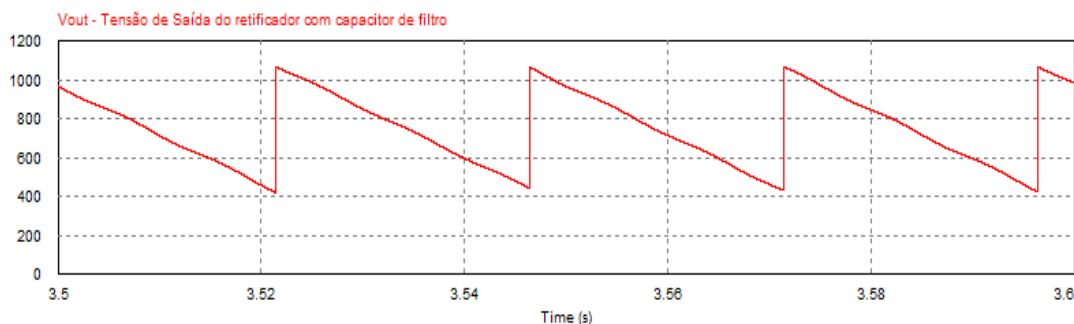


Fonte: Autoria própria, 2019.

Esta implementação pode ser realizada em um curto espaço de tempo com a aquisição e instalação dos capacitores. Porém, devido a ser uma capacitância relativamente alta, demandaria de um espaço reservado para o banco de capacitores e de um maior investimento por parte da empresa Petrório. Além disso, devido ao aumento da tensão média e da corrente média sobre a carga com a instalação do capacitor, seria necessário realizar um novo estudo sobre os ângulos de disparo dos SCRs.

Com intuito de comprovar a necessidade de alterar os ângulos de disparo dos SCRs, foi calculado um novo valor para o ângulo de disparo ($\alpha = 73^\circ$) para que a tensão média de saída do retificador tendesse a $750 V_{med}$. Na figura 76 foi obtido o gráfico para leitura da tensão de saída em CC do retificador trifásico com a instalação do capacitor de filtro com ($\alpha = 73^\circ$).

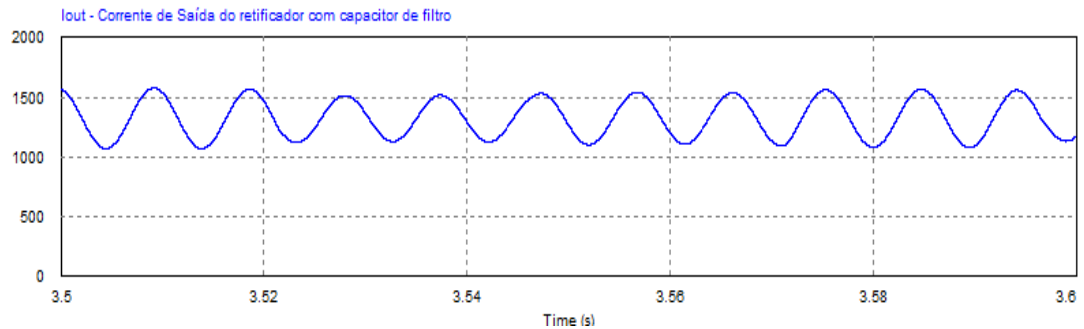
Figura 76 – Tensão de saída do retificador trifásico com capacitor de filtro ($\alpha = 73^\circ$)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 77 foi obtido o gráfico para leitura da corrente de saída em CC do retificador trifásico com a instalação do capacitor de filtro.

Figura 77 – Corrente de saída do retificador trifásico com capacitor de filtro ($\alpha = 73^\circ$)

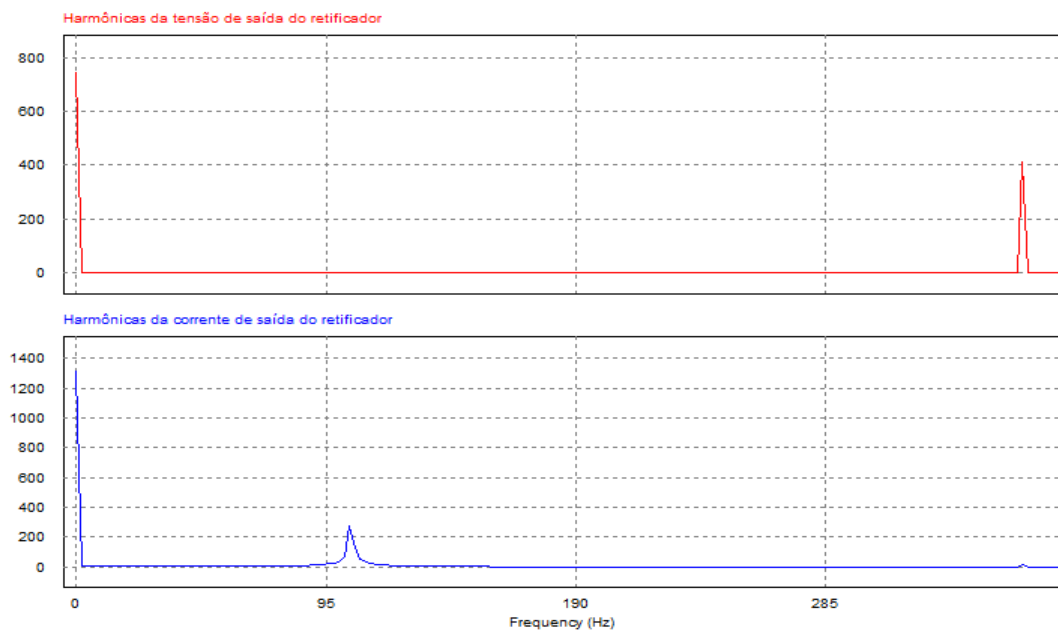


Fonte: Autoria própria, 2019.

De acordo com Souza (2017) para manter a tensão de saída com ondulação reduzida, a inserção de um capacitor de filtro resulta na absorção de uma corrente com alta taxa de distorção harmônica e baixo fator de potência, ou seja, a ondulação dos sinais de tensão e corrente de saída irá ser reduzida e consequentemente o rendimento do sistema irá aumentar, pois a qualidade destes sinais será elevada.

Na figura 78 foram obtidos os gráficos com a distorção de harmônicas para as formas de onda de tensão e corrente do retificador trifásico controlado sem o capacitor de filtro.

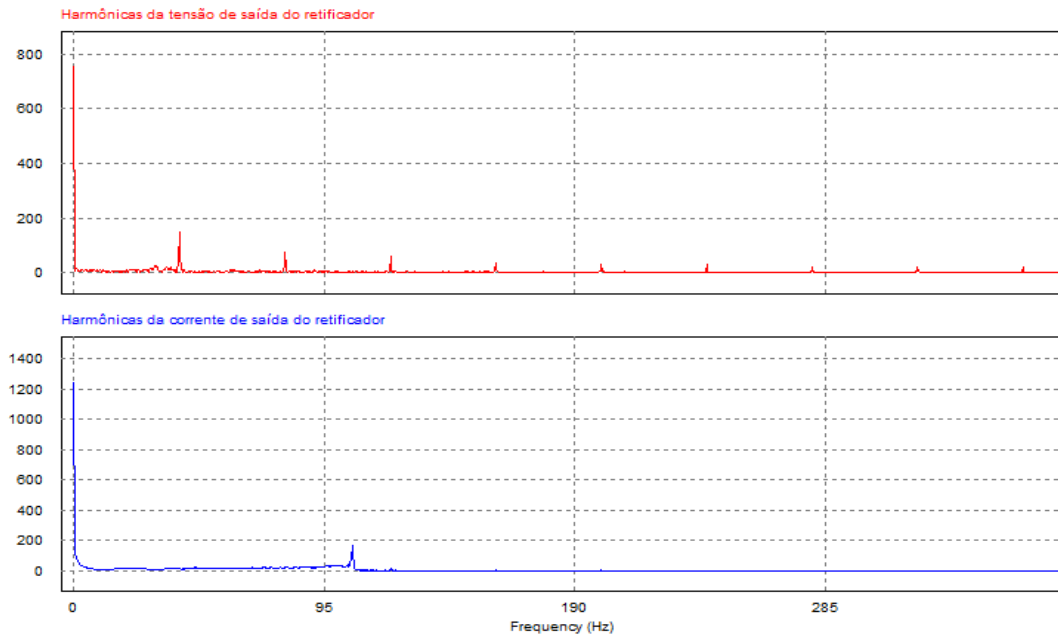
Figura 78 – Harmônicas para a tensão e corrente do retificador trifásico (sem o capacitor de filtro)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 79 foram obtidos os gráficos com a distorção de harmônicas para as formas de onda de tensão e corrente do retificador trifásico controlado com o capacitor de filtro.

Figura 79 – Harmônicas para a tensão e corrente do retificador trifásico (com o capacitor de filtro)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Segundo (Pomilio, 2002), o THD (*Total Harmonic Distortion*) é a medida do valor efetivo das componentes harmônicas na forma de onda distorcida, ou seja, a relação entre o conteúdo harmônico e a componente fundamental. Dessa forma, a análise quantitativa do THD para os retificadores propostos neste trabalho torna-se mais um embasamento teórico para justificar a implementação das melhorias propostas no retificador com o objetivo de aumentar a eficiência do sistema.

Na equação (69) (Pomilio, 2002) tem-se o cálculo para determinar-se o THD de um sistema elétrico, quando o valor eficaz de corrente é conhecido.

$$THD = \sqrt{\left(\frac{I_{rms}}{I_1}\right)^2 - 1} \quad (69)$$

Onde:

THD: Total Harmonic Distortion;

I_{rms} : Corrente eficaz na carga (Obtido via simulação no programa PSIM);

I_1 : Corrente eficaz da fundamental (Obtido via simulação no programa PSIM);

Utilizando a equação (69), será calculado o THD para o retificador trifásico de seis pulsos sem o capacitor de filtro.

$$THD = \sqrt{\left(\frac{1336.28}{1315}\right)^2 - 1} \quad (70)$$

$$THD = 0.1794 = 17.94\% \quad (71)$$

Utilizando a equação (69), será calculado o THD para o retificador trifásico com o capacitor de filtro.

$$THD = \sqrt{\left(\frac{1323.43}{1330}\right)^2 - 1} \quad (72)$$

$$THD = 0.099 = 9.9\% \quad (73)$$

Portanto, pode-se afirmar que a instalação de um capacitor de filtro tende a diminuir o percentual de harmônicas no retificador, ou seja, o rendimento do sistema será elevado.

Os valores médios obtidos durante a simulação do retificador trifásico controlado com o capacitor de filtro estão presentes na Tabela 9.

Tabela 9 – Valores das leituras obtidas durante a simulação do retificador trifásico (com capacitor de filtro).

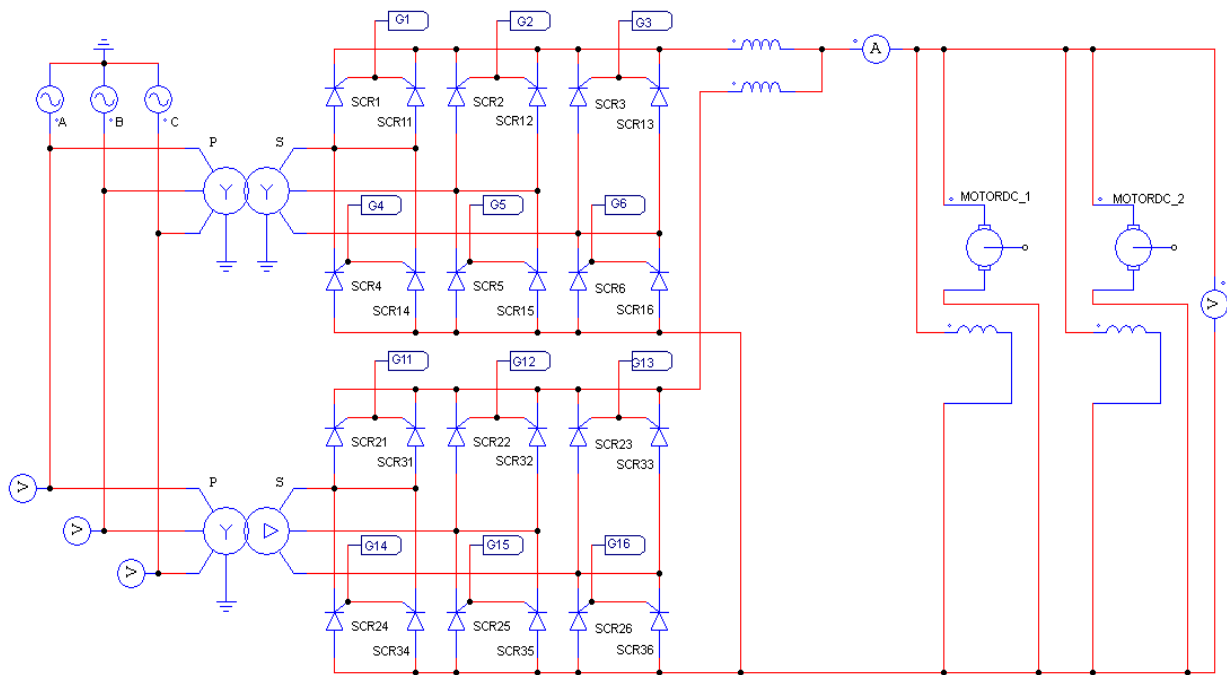
α	Tensão de Entrada (V_{in})	Tensão de Saída (V_{out})	Corrente de Saída (I_{out})
(57.71°)	602.92V	1086.54 V	1786.31 A
(73°)	602.92V	751.08 V	1323.49 A

6.3 Utilização de retificadores com 12 Pulsos

A conexão de dois destes retificadores em cascata permitiria a geração de uma saída CC com 12 pulsos e consequentemente também diminuiria a ondulação dos sinais de corrente de saída, aumentando o rendimento do sistema.

Com intuito de comprovar a diminuição da ondulação dos sinais de corrente de saída do retificador e o consequente aumento de rendimento do sistema foram realizadas simulações no software PSIM para avaliar o comportamento destas formas de onda. Na figura 80 está representado o circuito que foi utilizado no software PSIM, para a obtenção das leituras desejadas.

Figura 80 – Circuito do retificador trifásico de doze pulsos



Fonte: Autoria própria, 2019.

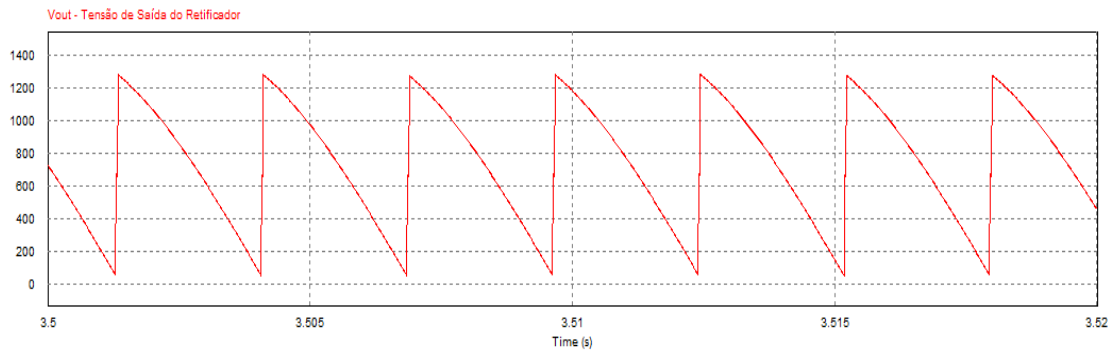
Utilizando a equação (1) (Sousa, 2017) tem-se o cálculo para determinar-se a indutância própria de um dos enrolamentos do transformador de interfase.

$$L_{int} = \frac{0.113 * V_0}{48\pi * f * I_{pk}} = \frac{0.113 * 731.97}{48\pi * 60 * 1399.15} \quad (74)$$

$$L_{int} = 6.53 \mu H \quad (75)$$

Na figura 81 foi obtido o gráfico para leitura da tensão de saída em CC do retificador trifásico controlado (doze pulsos), para ($\alpha = 57.71^\circ$).

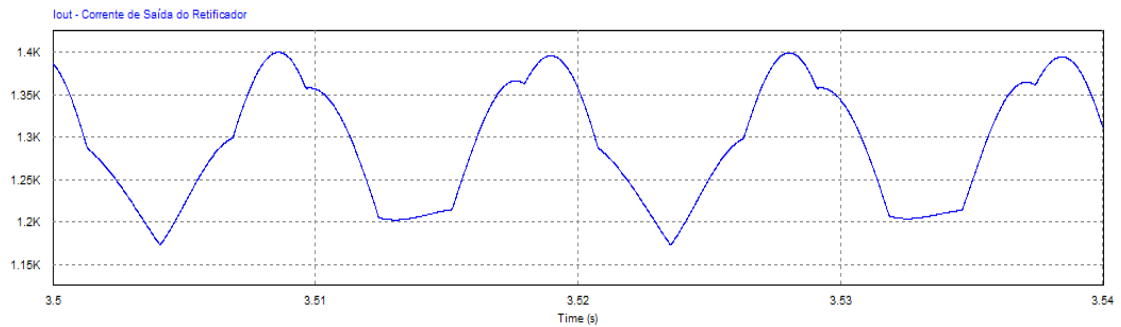
Figura 81 – Tensão de saída do retificador trifásico de doze pulsos ($\alpha = 57.71^\circ$).



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na figura 82 foi obtido o gráfico para leitura da corrente de saída em CC do retificador trifásico controlado (doze pulsos), para ($\alpha = 57.71^\circ$).

Figura 82 – Corrente de saída do retificador trifásico de doze pulsos ($\alpha = 57.71^\circ$)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Foi realizada a análise quantitativa do THD para o retificador de doze pulsos. Utilizando a equação (69), será calculado o THD para o retificador trifásico de doze pulsos.

$$THD = \sqrt{\left(\frac{1294.44}{1293.12}\right)^2 - 1} \quad (76)$$

$$THD = 0.045 = 4.5\% \quad (77)$$

Portanto, pode-se afirmar que a utilização de retificadores com doze pulsos terá o menor percentual de harmônicas no retificador quando comparado com o retificador de seis pulsos e do retificador trifásico com o capacitor de filtro, ou seja, o rendimento do sistema será o melhor quando comparado com as demais melhorias propostas neste trabalho.

Os valores médios obtidos durante a simulação do retificador trifásico controlado de doze pulsos estão presentes na Tabela 10.

Tabela 10 – Valores das leituras obtidas durante a simulação do retificador trifásico de doze pulsos.

α	Tensão de Entrada (V_{in})	Tensão de Saída (V_{out})	Corrente de Saída (I_{out})
(57.71°)	602.92V	741.61 V	1225.30 A

A implementação desta melhoria demandaria um longo prazo, pois, teria que ser alterada a instalação de todos os painéis de retificadores e teria como desvantagens a redução dos retificadores disponíveis, ou seja, diminuiria a capacidade de acionamento para apenas três equipamentos da sonda de perfuração, além do custo atrelado a aquisição e instalação de transformadores trifásicos.

No próximo capítulo serão abordados todos os temas expostos nesse trabalho, além de levantar os pontos essenciais que possibilitarão a realização de futuros trabalhos no retificador.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo estão expostas as conclusões sobre os resultados obtidos ao término do trabalho, assim como, os comentários essenciais que possibilitarão a implementação das melhorias propostas que podem ser realizadas em futuros trabalhos.

Ao concluir o presente trabalho pôde-se diagnosticar que os retificadores trifásicos controlados de onda completa são os mais recomendados a serem utilizados no acionamento dos motores da bomba de lama, pois, o sistema de energia também é trifásico e apenas este tipo de retificador entre os analisados possui a capacidade de fornecer potência total para o acionamento dos referidos motores.

Quanto ao dimensionamento do retificador trifásicos instalado na sonda de perfuração da plataforma Polvo-A, pode-se afirmar que o SCR instalado nos retificadores está sobredimensionado, uma vez que a corrente média máxima dos mesmos é de 600 A. Através de simulações realizadas no programa PSIM, foram validados todos os equacionamentos utilizados durante o dimensionamento e a comparação entre os valores calculados, os valores simulados e os valores estabelecidos em projeto, constatou-se que o retificador está sobredimensionado para o acionamento dos motores da bomba de lama.

A substituição dos SCRs por dispositivos com tecnologias mais novas que acarretaria em um controle mais preciso e o consequente aumento de rendimento do sistema, porém, para realizar essa implementação teria de ser realizado o processo chamado de *retrofit*, ou seja, modernizar por completo o painel de retificador. Cabe a empresa avaliar economicamente a viabilidade desta melhoria.

Quanto a inserção de um capacitor de filtro que diminuiria a ondulação dos sinais de corrente e tensão e também provocaria o aumento de rendimento do sistema, seria uma implementação menos impactante economicamente para empresa, além de ser relativamente um trabalho mais simples quando comparado com o *retrofit* do retificador.

Também foi analisada a possibilidade de substituir os retificadores trifásicos controlado de seis pulsos por retificador trifásicos controlado de doze pulsos, que diminuiria a ondulação do sinal de corrente e também provocaria o aumento de rendimento do sistema, porém, para implementar esta melhoria a operação dos equipamentos da sonda de perfuração seria fortemente impactada, pois, diminuiria a capacidade de acionamento para apenas três equipamentos da sonda de perfuração, dessa forma, tornando-se inviável a operação de toda a sonda de perfuração.

Por fim, para trabalhos futuros devido ao sobredimensionamento dos SCRs, recomenda-se um estudo mais detalhado com implementações práticas sobre todas as possíveis soluções de melhorias da eficiência energética dos retificadores, com análises e comparações com os retificadores trifásicos controlado de seis pulsos atualmente instalados na plataforma, para então ser realizada a tomada de decisão quanto a melhor proposta em custo-benefício.

REFERÊNCIAS

RASHID, M. H. **Eletrônica de Potência**, Circuitos, Dispositivos e aplicações. Editora Pearson Education do Brasil LTDA. 1999.

BARBI, I. **Eletrônica de Potência 6. Ed.** Florianópolis: Edição do Autor. 2006.

AHMED, A. **Eletrônica de Potência**. São Paulo: Editora Prentice Hall. 2000.

HART, D. W. **Eletrônica de Potência, Análise e Projeto de Circuitos**. Editora Mcgraw Hill. 2012.

UMANS ,S. D. **Máquinas Elétricas** de Fitzgerald e Kingsley, McGraw-Hill, 7ª Ed. 2014.

POMILIO, J. A. Apostila de Eletrônica de Potência – Pós-Graduação. São Paulo, SP – Unicamp, 2002.

PETRY, C. A. Notas de Aula de Eletrônica de Potência – Graduação. Florianópolis, SC – UFSC. 2013. Disponível em: http://www.professorpetry.com.br/Ensino/Eletronica_Potencia/Eletronica_Potencia.html

ASSEF, A. A. Notas de Aula de Eletrônica de Potência – Graduação. Curitiba, PR – UTFPR. 2012. Disponível em: http://paginapessoal.utfpr.edu.br/amauriassef/disciplinas/eletronica-de-potencia/apresentacoes/Eletr_Pot1_15.pdf/view

Vertical Drilling Motor Type GE752. Disponível em: <https://www.manualagent.com/ge-appliances/ge752/users-manual>

Ramilo Pereira de Moura Sousa. Retificador de 12 pulsos de alto fator de potência com filtro ativo paralelo conectado ao lado CC. Trabalho de Conclusão de curso – Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), 2017. Disponível em: http://www.cear.ufpb.br/arquivos/cgee/TCC/TCC - Ramilo Pereira - _vers%C3%A3o_final.pdf

Alencar Franco de Souza. Estudo de técnicas de correção de fator de potência em retificadores controlados. Dissertação de Mestrado – Mestre em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), 2017. Disponível em: [https://ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ppgel/142-2017-10-27-DissertacaoAlencarSouza\(1\).pdf](https://ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ppgel/142-2017-10-27-DissertacaoAlencarSouza(1).pdf)

GE 752 *Datasheet*. Disponível em: http://www.unionsupplies.com/files/files/GE752_Data.pdf

Datasheet Powerex C431. Disponível em: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/20606/POWEREX/C431.html>

MAGANHA, Gabriel V. Silva. Eletrônica Analógica Aula 62: Calculando e Simulando o Ripple no Multisim, Proteus e EveryCircuit. 2016. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=-02eF77ANx0&t=592s>