



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

CENTRO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO E AUTOMAÇÃO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**SISTEMA DE CONTROLE ELETRONICO APLICADO A CIRCUITO DE POTENCIA
DEDICADO A DESSALINIZADOR POR OSMOSE REVERSA**

Ricardo Monteiro Costa

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Ferreira Pinheiro

Junho de 2016

RICARDO MONTEIRO COSTA

**SISTEMA DE CONTROLE ELETRONICO APLICADO A CIRCUITO DE POTENCIA
DEDICADO A DESSALINIZADOR POR OSMOSE REVERSA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Departamento de Engenharia de Computação
e Automação da Universidade Federal do Rio
Grande do Norte como requisito parcial para
a obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecatrônica.

Aprovado em _____ de _____ de 2016.

Prof. Dr. Ricardo Ferreira Pinheiro

Orientador – UFRN

Prof. Dr. Manoel Firmino de Medeiros Júnior

Docente – UFRN

Prof. Dr. Caio Dorneles Cunha

Docente - UFRN

Prof. Ricardo Ferreira Pinheiro Filho

Docente – IFRN

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer aos meus pais, Ricardo e Cláudia, e as minhas avós Alzinete e Maria José por sempre se fazerem presentes em minha vida e pela educação e moral de quem recebi. Tais exemplos servem de modelo para a formação do meu caráter e me norteiam nas ações que tomo diariamente.

A minha namorada Úrsula por sempre estar ao meu lado, por me ajudar e incentivar nas escolhas que tomo, pelo apoio incondicional nos momentos delicados, pela sua consideração nos momentos em que estive ausente.

Às minhas irmãs, Vanessa, Beatriz e Renata sou grato pelo amor fraternal e pela forte participação durante minha formação.

Gostaria de dedicar especial carinho a minha tia Márcia, que me incentivou desde cedo pela sede incessante na busca de conhecimento, e que me ajudou na elaboração deste trabalho.

Aos amigos de curso Mateus Antonio, Maurício Rêgo, Elizeu, Sywlkson, Daniel Henrique, Dayse, João, Ormazabal, Fernando Maux pela união e amizade que levarei para onde for. Pelas madrugadas vencidas estudando, ajudando uns aos outros.

Ao meu orientador Ricardo Ferreira Pinheiro, pela paciência, pela pronta disponibilidade para sanar minhas dúvidas e me orientar durante a elaboração deste projeto.

Aos professores que tive a oportunidade de conhecer durante o curso, Ronai, Darlan, Simone, Adilson, Diogo, Pablo Javier, Felipe Martel, dos quais fui aluno e presenciei aulas de qualidade ímpar, que tiveram grande participação na construção da minha formação.

Aos funcionários e bolsistas que trabalharam para que a estrutura do curso se mantivesse sólida.

Se

Se és capaz de manter tua calma, quando,
todo mundo ao redor já a perdeu e te culpa.
De crer em ti quando estão todos duvidando,
e para esses no entanto achar uma desculpa.

Se és capaz de esperar sem te desesperares,
ou, enganado, não mentir ao mentiroso,
Ou, sendo odiado, sempre ao ódio te esquivares,
e não parecer bom demais, nem pretensioso.

Se és capaz de pensar - sem que a isso só te atires,
de sonhar - sem fazer dos sonhos teus senhores.
Se, encontrando a Desgraça e o Triunfo, conseguires,
tratar da mesma forma a esses dois impostores.

Se és capaz de sofrer a dor de ver mudadas,
em armadilhas as verdades que disseste
E as coisas, por que deste a vida estraçalhadas,
e refazê-las com o bem pouco que te reste.

Se és capaz de arriscar numa única parada,

tudo quanto ganhaste em toda a tua vida.
E perder e, ao perder, sem nunca dizer nada,
resignado, tornar ao ponto de partida.

De forçar coração, nervos, músculos, tudo,
a dar seja o que for que neles ainda existe.
E a persistir assim quando, exausto, contudo,
resta a vontade em ti, que ainda te ordena: Persiste!

Se és capaz de, entre a plebe, não te corromperes,
e, entre Reis, não perder a naturalidade.
E de amigos, quer bons, quer maus, te defenderes,
se a todos podes ser de alguma utilidade.

Se és capaz de dar, segundo por segundo,
ao minuto fatal todo valor e brilho.

Tua é a Terra com tudo o que existe no mundo,
e - o que ainda é muito mais - és um Homem, meu filho!

Rudyard Kipling

RESUMO

Este trabalho traz uma contribuição para o projeto do Sistema de Dessalinização à Osmose Reversa, que é uma alternativa para populações do semi-árido do nordeste que possuem acesso limitado a água potável de qualidade. Para contornar o problema da insuficiência de abastecimento de energia elétrica em algumas regiões serão utilizadas como fontes de energia, painéis solares e aerogeradores, que convertem energia oriunda do sol e dos ventos, respectivamente, em energia elétrica útil. Este trabalho é focado no sistema de controle da bomba dessalinizadora, pois para que a mesma funcione conforme desejado são necessárias condições específicas como tensão elétrica e corrente elétrica sejam garantidas em seus terminais sob determinados parâmetros. Para isso serão integrados: O sistema de geração de energia por fontes renováveis, com o conversor CC-CC isolado em ponte completa (Full Bridge), controle pi série em série em cascata, o motor bomba e, por fim, a carga. Pretende-se com isso contribuir para diminuir dependência de comunidades isoladas e fomentar P&D na área de energias alternativas.

Palavras-chave: Sistema de controle; Conversor; Energias renováveis; Energia fotovoltaica; Chaveamento; Dessalinização.

ABSTRACT

This work makes a contribution to the project Desalination System for Reverse Osmosis, which is an alternative to the northeastern semi-arid populations have limited access to safe drinking water. To turn around the problem of electricity supply shortage in some regions will be used as energy sources, solar panels and wind turbines that convert energy from the sun and wind, respectively, into usable electricity. This work is focused on the control of closed-loop system of desalination pump, because for it to function as desired is necessary specific conditions such as voltage, electric current is guaranteed at its terminals. For this will be integrated: Power generation system with renewable sources with the isolated DC-DC converter in full bridge (full bridge), PI cascade control, the engine and, finally, the desalination load. The aim of this work is to decrease the dependence on isolated communities and promote R & D in the area of clean energy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Diagrama esquemático de um sistema de potência.....	18
Figura 1.2 - Estrutura de controlador em série.....	20
Figura 1.3 - Diagrama de blocos da estrutura de controle por realimentação.....	21
Figura 1.1 - Elementos básicos de painel fotovoltaico.....	25
Figura 5.2 - Moléculas com dopagem P e N.....	26
Figura 5.3 - Princípio de funcionamento de um painel solar.....	27
Figura 5.4 - Formação dos ventos devido ao deslocamento das massas de ar.....	30
Figura 5.5 - Velocidade média anual do vento a 50m de altura.....	31
Figura 5.6 - Diagrama esquemático de uma turbina eólica moderna.....	32
Figura 5.7 – Protótipo do Regulador Eletromagnético de Frequência.....	33
Figura 5.8 - Mapa do potencial energético solar do Brasil.....	35
Figura 5.9 – Diagrama esquemático da estrutura do Projeto com todas as etapas.....	36
Figura 5.10 – Diagrama esquemático de circuito do conversor boost.....	37
Figura 5.11 - Diagrama esquemático de circuito equivalente do boost com chave fechada.....	38
Figura 5.12 - Diagrama esquemático de circuito equivalente do boost com chave aberta.....	39
Figura 5.13 – Gráficos da análise do boost ao longo de ciclos de chaveamento.....	40
Figura 5.14 - Gráfico do rendimento real e ideal do conversor boost.....	41
Figura 5.15 - Gráfico do ganho ideal e real do conversor boost.....	41
Figura 5.16 - Diagrama esquemático de tensão e corrente na chave no instante de chaveamento.....	42
Figura 5.8 - Diagrama esquemático de conversor Boost Dimensionado.....	47
Figura 5.9 - Diagrama de blocos de uma planta com controle em malha fechada..	49
Figura 5.10 - Diagrama esquemático para geração de sinal PWM.....	50

Figura 5.171 – Ilustração do processo de comparação do sinal de controle com dente de serra.....	50
Figura 5.12 – Gráfico do ciclo de trabalho imposta ao transistor de potência no conversor boost.....	51
Figura 5.13 - Diagrama esquemático descrevendo a malha de controle PI série em cascata do conversor boost.....	52
Figura 5.14 - Diagrama esquemático de conversor boost com ciclo de trabalho controlada.....	54
Figura 5.15 - Gráfico do comportamento da tensão de saída do conversor <i>boost</i> sem perturbação.....	54
Figura 5.16 - Gráfico do comportamento da tensão de saída do conversor <i>boost</i> com perturbação positiva.....	55
Figura 5.187 - Gráfico do comportamento da tensão de saída do conversor <i>boost</i> com perturbação negativa.....	56
Figura 5.18 - Diagrama esquemático do circuito conversor em ponte completa.....	58
Figura 5.19 – Gráfico do comportamento da tensão no enrolamento primário ao longo do ciclo de chaveamento.....	59
Figura 5.20 – Diagrama esquemático do conversor em ponte completa utilizado parte Um.....	61
Figura 5.21 – Diagrama esquemático do conversor ponte completa utilizado parte Dois.....	61
Figura 5.22 - Diagrama esquemático descrevendo a malha de controle utilizada no conversor em ponte completa.....	63
Figura 5.23 – Gráfico apresentando o ciclo de trabalho nos grupos de transistores.....	63
Figura 5.24 – Gráfico da tensão de saída do conversor ponte completa à tensão de entrada nominal.....	66
Figura 5.25 - Gráfico da tensão de saída do conversor ponte completa à perturbação na entrada positiva em degrau.....	67
Figura 5.26 - Gráfico da tensão de saída do conversor ponte completa a perturbação na entrada negativa em degrau.....	67
Figura 5.19 - Diagrama esquemático de um inversor de tensão trifásico.	70
Figura 5.20 – Gráfico representando o esquema de chaveamento dos transistores de um inversor trifásico.....	71

Figura 5.21 – Diagrama esquemático adotado para a configuração do inversor trifásico utilizado no projeto.....72

Figura 5.22 - Diagrama esquemático do motor bomba acoplado a carga.....	73
Figura 5.5 – Diagrama esquemático representando a malha de controle utilizada no projeto.....	75
Figura 5.6 – Diagrama esquemático da estratégia de geração de sinal de controle para três fases.....	77
Figura 5.7 – Gráfico representando a lógica de variação do ciclo de trabalho do inversor.....	77
Figura 5.8 – Diagrama esquemático mostrando a ordenação de chaveamento de transistores no inversor trifásico.....	78
Figura 5.9 – Diagrama esquemático do sistema Inversor de tensão acoplado à carga.....	79
Figura 5.10 – Gráfico da Velocidade do sistema partindo em vazio e atingindo regime permanente.....	81
Figura 5.11 – Gráfico do torque do motor bomba com partida em vazio.....	81
Figura 5.12 – Gráfico da velocidade do motor bomba quando aplicado um torque mecânico em degrau.....	82
Figura 5.13 – Gráfico do torque do motor bomba quando aplicado torque mecânico em degrau.....	82
Figura 5.23- Diagrama esquemático de interface entre elevação de tensão e inversão de tensão.....	85
Figura 5.24 – Gráfico de tensão de saída do conversor em ponte completa quando feita a conexão ao inversor trifásico.....	86
Figura 5.25 – Gráfico representando a ação de controle dos transistores no conversor em ponte completa, depois de feita a união ao inversor trifásico.....	87
Figura 5.26 – Gráfico das correntes nas fases A, B e C do inversor trifásico.....	88
Figura 5.27 – Gráfico da velocidade do motor bomba de indução no sistema completo.....	88
Figura 5.28 – Gráfico do torque no motor bomba após a conexão ao conversor elevador.....	89
Figura 4.7 – Gráfico da velocidade do motor bomba após a inclusão de carga mecânica.....	89
Figura 5.8 – Gráfico do torque do motor bomba após a inclusão de carga mecânica.....	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Características de operação do <i>boost</i>	44
Tabela 2.2: Componentes do <i>boost</i> projetado.....	48
Tabela 2.3: Parâmetros do controlador do <i>boost</i>	53
Tabela 2.4: Parâmetros de saída do <i>boost</i>	57
Tabela 2.5: Razões de trabalho do conversor <i>boost</i>	64
Tabela 2.6: Parâmetros do controlador para o conversor em ponte completa.....	65
Tabela 2.7: Parâmetro de saída do conversor em ponte completa.....	68
Tabela 2.8: Razões de trabalho do conversor em ponte completa.....	69
Tabela 2.9: Parâmetros obtidos no barramento de saída do conversor em ponte completa.....	73
Tabela 3.1: Características da carga utilizada.....	75
Tabela 3.2: Parâmetros do controlador PI.....	76
Tabela 3.3: Características elétricas do motor bomba de indução.....	78
Tabela 3.4: Sequência de chaveamento de transistores no inversor trifásico.....	79
Tabela 4.1: Novos parâmetros de controle do conversor em ponte completa.....	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

AC – Corrente Alternada

DC – Corrente Contínua

kV – Kilo Volts

kA – Kilo Amperes

Ess – Erro de Estado Estacionário

P – Ação Proporcional

PI – Ação Proporcional e Integral

PD – Ação Proporcional e Derivativa

PID – Ação Proporcional Integrativa e Derivativa

P e N – Positivo e Negativo

P&D – Pesquisa e Desenvolvimento

REF – Regulador Eletromagnético de Frequência

DCA – Departamento de Engenharia de Computação e Automação

IGBT - *Insulated Gate Bipolar Transistor*

PWM - *Pulse Width Modulation*

RMS - *Root Mean Square*

RPM – Rotações Por Minuto

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1. ELETRÔNICA DE POTÊNCIA.....	18
1.2 SISTEMAS DE CONTROLE.....	19
1.3 O EFEITO FOTOVOLTAICO.....	24
1.4 ENERGIA EÓLICA.....	29
1.5 REGULADOR ELETROMAGNÉTICO DE FREQUÊNCIA - REF.....	33
1.6 MOTIVAÇÕES.....	34
1.7 PROJETO DE INTEGRAÇÃO.....	35
2. CONVERSORES ELEVADORES CC-CC.....	37
2.1 O CONVERSOR BOOST.....	37
2.1.1 PROJETO DO CONVESOR <i>BOOST</i>	44
2.1.2 PROJETO DA MALHA DE CONTROLE DO CONVERSOR <i>BOOST</i>	49
2.2 O CONVERSOR EM PONTE COMPLETA.....	57
2.2.1 PROJETO DO CONVERSOR PONTE COMPLETA.....	60
2.2.2 PROJETO DA MALHA DE CONTROLE PARA O CONVERSOR PONTE COMPLETA.....	62
2.2.3 UNIÃO DA MALHA DE CONTROLE AO CONVERSOR PONTE COMPLETA.....	64
3. INVERSOR DE TENSÃO, MOTOR BOMBA E CARGA.....	70
3.1 O INVERSOR DE TENSÃO TRIFÁSICO.....	70
3.2 PROJETO DE CONTROLE DO INVERSOR TRIFÁSICO APLICADO AO MOTOR BOMBA.....	72
3.3 SIMULAÇÃO DO INVERSOR ACOPLADO AO MOTOR BOMBA E A CARGA.....	79
4. UNIÃO DOS SISTEMAS DE ELEVAÇÃO DE TENSÃO, INVERSÃO DE TENSÃO E MOTOR BOMBA.....	84
4.1 OPERAÇÃO COMPLETA COM E SEM CARGA.....	84
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	91
5.1 CONCLUSÕES.....	91
5.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	93
REFERÊNCIAS.....	95
Apêndice A.....	97

1. INTRODUÇÃO

A busca por diferentes fontes de energia para uso aproveitável remonta a tempos antigos. Cerca de 4.000 anos atrás, persas, chineses, egípcios utilizavam pequenos moinhos que funcionavam a partir de quedas d'água ou de exposição às correntes de ar. A energia colhida era utilizada para moer grãos, irrigar plantações, tracionar embarcações dentre outras atividades importantes no contexto social daquela época.

Com o aumento populacional a partir do Século XIX, na revolução industrial viu-se uma crescente demanda de energia para garantir que as necessidades da população fossem atingidas. Para isso percebeu-se a necessidade de desenvolver métodos mais eficientes e de maior escala produtiva, para que toda população pudesse ser abastecida com água, alimentos e bens de consumo.

Foi a partir de meados do século XIX que se percebeu que a energia na forma elétrica tinha facilidade superior em relação a outras formas de energia, como a energia potencial na água e a energia mecânica em relação a transmissão, armazenamento e custo operacional. E que esta energia poderia ser convertida para energia de qualquer outra natureza, como por exemplo para iluminação, alimentação de motor bomba elétrico e automatização de processos mesmo que de forma rudimentar. Essas demandas impulsionaram o desenvolvimento de pesquisas na área de sistemas.

Atualmente o uso de fontes de energia renováveis como energia solar, eólica, biomassa, geotérmica dentre outras, vem ganhando espaço em razão do apelo ambiental e do fato da energia oriunda de combustíveis fósseis ser finita. Na maioria das aplicações, a forma da energia final que se quer obter não é de natureza elétrica. Para isso são utilizados mecanismos de conversão, que atuam como uma interface entre dois diferentes tipos de energia.

A energia oriunda do sol que atinge a terra é convertida em uma ampla variedade de formas, como energia mecânica das águas, dos ventos e das marés, energia química dos combustíveis fósseis, dentre outras formas de manifestação. A

transmissão dessa forma de energia se dá por ondas eletromagnéticas em um amplo espectro de irradiação. Existem duas formas diferentes de se coletar este tipo de energia disponível. Uma delas é pela via do aquecimento direto devido à transmissão de calor por irradiação, e a outra forma se dá por efeito fotovoltaico, que se mostra mais atraente, pois a conversão de energia solar em energia elétrica permite uma ampla variedade de aplicações.

Outro fator que merece destaque é que a quantidade de energia solar que a terra capta é dependente de diversos fatores sazonais, como a distância entre a terra e o sol. Como a terra possui uma órbita elíptica existem períodos do ano em que a mesma está mais próxima do sol (periélio), dessa forma a receber maior radiação, e momentos em que está mais afastada dele (afélio), nos quais receberá menos radiação. Outro fator é a angulação em seu próprio eixo que irá proporcionar uma incidência diferente nos hemisférios ao longo do ano. Regiões próximas à linha do equador como o Brasil, sofrem menos com esse efeito, logo, possuem maior incidência de irradiação solar.

Denomina-se energia eólica a energia cinética contida nas massas de ar em movimento (vento). Seu aproveitamento ocorre por meio da conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação, com o emprego de turbinas eólicas, também denominados aerogeradores, para a geração de eletricidade, ou cataventos (e moinhos), para trabalhos mecânicos como bombeamento d'água [1].

Como é possível constatar, a energia se mostra presente em diferentes formas. Com um sistema apropriado de conversão, é possível transitar entre suas diferentes manifestações. Uma vantagem que esta prática traz é o aumento da disponibilidade energética para uso humano. Contribuindo, desta forma, para o desenvolvimento tecnológico e social sem deixar de lado a preocupação com o meio ambiente.

O incentivo à diversificação da matriz energética nacional se justifica pelos benefícios que tal ação pode proporcionar ao sistema elétrico que abastece todo o país, entre eles, a diminuição da dependência das linhas de transmissão a longas distâncias, o baixo impacto ambiental, a minimização das perdas, que poderá ser

uma fonte energética importante para o caso em que outro tipo de fonte energética esteja em crise em determinado momento delicado.

No nordeste brasileiro, em comunidades afastadas dos centros urbanos a presença da rede elétrica é precária e muitas vezes, inexistente, pois devido a grande área em que a população está espalhada, o custo de implantação de uma rede de distribuição elétrica é demasiadamente alto, sendo mais viável economicamente e ambientalmente a instalação de tecnologias de energias alternativas. Este problema da distribuição desigual da energia elétrica, somado a longos períodos de seca acarretam em uma série de dificuldades para a população que ali reside. Uma delas é a falta de água de boa qualidade para utilização humana, pois a presença de sólidos em suspensão e outras substâncias contaminantes tornam a água presente nos lençóis freáticos imprópria para o consumo humano. Uma solução para este problema é a instalação de pequenas unidades de tratamento de água salobra, distribuídas estrategicamente nessas regiões cujo problema de abastecimento de água é crítico.

O início do aprimoramento de sistemas de eletrônica de potência deu-se em 1948 com o desenvolvimento de transistores de silício por Schockley. A partir daí, e nas décadas seguintes, pôde-se gerenciar com maior segurança e rendimento grandes quantidades de energia, transmitir a longas distâncias, mudar sua natureza de CC para AC conforme a necessidade imposta, tudo isso com sistemas de controle para garantir que o sistema permaneça estável, e possibilitar diferentes estratégias de manipulação da energia elétrica [17].

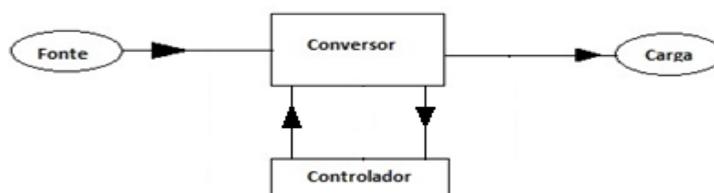
Dada a devida importância no tratamento da energia elétrica para utilização humana, este trabalho tem como objetivo implantar estratégias de controle aplicadas a circuitos de potência alimentados a partir de fontes renováveis para alimentar uma bomba hidráulica. A bomba será responsável por realizar o processo de osmose reversa, que consiste em pressionar água salobra através de uma membrana adequada, separando a água das impurezas contidas na mesma. Desta forma, pode ser garantido água de melhor qualidade para as comunidades que não dispõem de acesso à rede elétrica e água de qualidade.

1.1. ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

Os sistemas eletrônicos de potência são constituídos por dispositivos físicos fabricados com material semicondutor, em que se exploram propriedades elétricas e magnéticas. Estes dispositivos são essenciais à sustentabilidade energética, que pode ser definida como o atendimento de nossas atuais necessidades sem comprometer a capacidade de futuras gerações terem suas necessidades atendidas. O uso de energia renovável para a geração de eletricidade, bem como o aumento do rendimento da transmissão e do consumo de eletricidade, são os pilares da sustentabilidade. Algumas das aplicações da eletrônica de potência neste contexto são mencionadas a seguir: Exploração de energia renovável, como energia eólica e energia solar, usando dispositivos fotovoltaicos; Armazenamento de energia em baterias e em sistemas de armazenamento de energia cinética em volantes de inércia (*flywheels*) para compensar a variabilidade na eletricidade gerada de fontes renováveis; Aumento do rendimento na transmissão de energia; Aumento do rendimento no consumo da eletricidade em sistemas motorizados e em iluminação [2].

Os sistemas de potência funcionam como agente intermediário entre fonte de energia e carga, ou seja, atua como um canal, capaz de transmitir a forma com a qual a energia será transferida para a carga, utilizando-se para isso circuitos eletrônicos e controladores. A partir dos parâmetros necessários é possível dimensionar as grandezas envolvidas no sistema, para que seja alcançada a máxima rendimento no processo de transformação da energia, seja ela em forma de tensão ou de corrente elétrica.

Figura 1.1 - Diagrama esquemático de um sistema de potência.



Fonte: Autor, 2016.

A interface de eletrônica de potência desenhada esquematicamente na figura 1.1 consiste em dispositivos de estado sólido, que funcionam como interceptores, com alta frequência de comutação entre os estados ligado e desligado.

Houve um contínuo aprimoramento da capacidade de tensão e corrente de dispositivos de estado sólido, como diodos e transistores, e suas velocidades de comutação aumentaram drasticamente, a ponto de alguns dispositivos serem capazes de comutar em dezenas de nanossegundos. Atualmente, existem dispositivos capazes de suportar tensões de kV e correntes de kA. Ademais, os custos de tais dispositivos caem continuamente [2].

1.2 SISTEMAS DE CONTROLE

A introdução de um controlador em um determinado sistema visa a modificação de sua dinâmica, manipulando a relação entrada/saída através da atuação sobre um ou mais dos seus parâmetros, com o objetivo de satisfazer certas especificações com relação a sua resposta. Os parâmetros do sistema que sofrem uma ação direta do controlador são denominados de variáveis manipuladas, enquanto que os parâmetros no qual se deseja obter as mudanças que satisfaçam às dadas especificações denominam-se variáveis controladas [3].

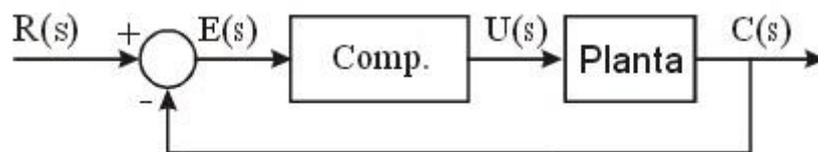
O controlador e atuador são dispositivos físicos, podendo ser: eletrônico, elétrico, mecânico, pneumático, hidráulico ou combinações destes. No projeto real de um sistema de controle, o projetista deverá decidir pela utilização de um ou mais controladores. Esta escolha depende de vários fatores. O tipo de controlador mais comumente usado, mesmo em plantas das mais diversas naturezas, é o controlador eletrônico. De fato, os sinais não elétricos são, normalmente, transformados em sinais elétricos, através de transdutores, e, devido a simplicidade de transmissão, é possível atingir aumento de performance, aumento da confiabilidade e principalmente, facilidade de compensação. Geralmente controladores eletrônicos são circuitos simples, formados basicamente por amplificadores operacionais, sendo assim de fácil implementação prática a baixo custo [3].

Uma vez determinada a necessidade de se projetar um controlador, existem algumas configurações possíveis, com respeito ao posicionamento do mesmo no sistema a ser controlado. Algumas das configurações mais usadas em sistemas de controle, são:

- Controladores Série

Em geral, o projeto de controladores série é mais simples que o de controladores por realimentação. Entretanto, normalmente exige amplificadores adicionais para aumentar o ganho do sistema. Consiste em colocar o controlador no ramo direto de alimentação, ou seja, em série com a planta, a figura 1.2 ilustra esquematicamente a estrutura de um controlador em série[2].

Figura 1.2 - Estrutura de controlador em série.

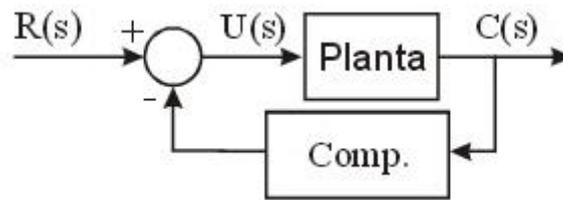


Fonte: MENEGHETTI, F. **Sistemas de Controle**. Natal, 2007. Apostila.

- Controladores por Realimentação

Em geral, o número de componentes necessários na compensação por realimentação será menor que o número de componentes na compensação série. Esta configuração recebe este nome, pois, neste caso, o compensador é inserido num ramo de realimentação. A figura 1.3 mostra esquematicamente como é estruturado o controle por realimentação[3].

Figura 1.3 – Diagrama de blocos da estrutura de controle por realimentação



Fonte: MENEGHETTI, F. **Sistemas de Controle**. Natal, 2007. Apostila.

Ações de Controle – (Controladores Série)

- Controle Proporcional (P)

A razão entre a saída e a entrada do compensador é chamada de ganho proporcional 'K', quanto maior for o ganho do compensador, menor será o erro de estado estacionário 'ess'. Contudo, o tempo de acomodação aumenta, tendendo, em certos casos, a desestabilizar o sistema. O inverso acontece quando se reduz (atenua) o ganho. Um compensador deste tipo, como não acrescenta polos nem zeros ao sistema principal, representa apenas um ajuste no seu ganho original[3].

$$u(t) = Ke(t) \quad ; \quad U(s) = KE(s) \quad (1)$$

com
$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (1.2)$$

em que:

$e(t)$ = Sinal de erro.

$r(t)$ = Sinal de referência.

$y(t)$ = Sinal captado pelo elemento sensor.

$U(t)$ = Ação Proporcional.

Características

- É um amplificador com ganho ajustável (K).
- O aumento de K diminui o erro de regime.
- Em geral, o aumento de K torna o sistema mais oscilatório, podendo instabilizá-lo.
- Melhora o regime e piora o transitório, sendo bastante limitado.

- Controlador Proporcional + Integral (PI)

A ação integral corresponde a ter-se uma taxa de variação do sinal de saída com relação à entrada. Desta forma, com uma ação integral, atua-se beneficemente na resposta em regime permanente, tendendo a eliminar o erro de estado estacionário, contudo, prejudica-se o regime transitório, pois se acrescenta polos ao sistema tendendo a desestabilizá-lo, e com isso aumentar o tempo de acomodação.

A atuação de um controlador PI corresponde à soma de uma ação proporcional com uma ação integral. Desta forma pode-se melhorar a resposta transitória com a contribuição da ação proporcional, enquanto a ação integral corrige o erro de estado estacionário[3].

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \right) \quad ; \quad U(s) = \frac{(K_p s + K_i)}{s} E(s) \quad (2)$$

onde: $K_i = \frac{K_p}{\tau_i}$, sendo τ_i o tempo integrativo ou *reset time*.

Características

- Tende a zerar o erro de regime, pois aumenta a ordem do sistema.
- Adiciona um polo em $p = 0$ e um zero em $z = -K_i / K_p$.
- É utilizado quando a resposta transitória é aceitável e a resposta em regime insatisfatória.

- Como aumenta a ordem do sistema, acrescenta possibilidades de instabilidade diferentes daquelas apresentadas pelo sistema original.

- Controlador Proporcional + Derivativo (PD)

Embora um controlador puramente derivativo não seja implementável na prática, a ação derivativa, associada à ação proporcional, corresponde ao acréscimo de um zero ao sistema, atuando benéficamente no regime transitório, tendendo a aumentar a estabilidade relativa do sistema e reduzindo o tempo de acomodação, contudo, contrapondo-se a estas vantagens, aumenta o tempo de subida e, por não atuar no regime permanente, não corrige o erro de estado estacionário.[3]

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \tau_d \frac{d}{dt} e(t) \right) \quad ; \quad U(s) = (K_p + K_d s) E(s)$$

onde: $K_d = K_p \tau_d$, sendo τ_d a constante derivativa.

(3)

Características

- Leva em conta a taxa de variação do erro.
- Adiciona um zero em $z = -K_p / K_d$.
- É utilizado quando a resposta em regime é aceitável e resposta transitória insatisfatória.
- Introduce um efeito de antecipação no sistema, fazendo com que o mesmo reaja não somente à magnitude do sinal de erro, como também à sua tendência para o instante futuro, iniciando, assim, uma ação corretiva mais cedo.
- A ação derivativa tem a desvantagem de amplificar os sinais de ruído, o que pode causar um efeito de saturação nos atuadores do sistema.

- Controlador Proporcional + Integrativo + Derivativo (PID)

O PID une as ações proporcional, integral e derivativa em um só controlador, atuando tanto no regime transitório quanto no regime permanente[2].

$$U(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) E(s) \quad \Rightarrow \quad \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} \quad (4)$$

Características

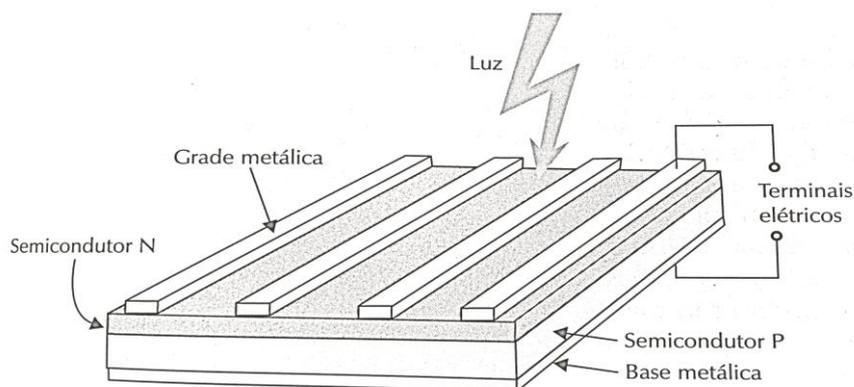
- É utilizado quando se tem resposta transitória e de regime insatisfatórias.
- Adiciona um polo em $p = 0$ e 2 zeros, que dependem dos parâmetros do controlador.

1.30 EFEITO FOTOVOLTAICO

O efeito fotovoltaico é o fenômeno físico que permite a conversão direta da luz em eletricidade. Esse fenômeno ocorre quando a luz, ou radiação eletromagnética do sol, incide sobre uma célula composta de materiais semicondutores com propriedades específicas.

A figura 1.4 ilustra a estrutura de uma célula fotovoltaica composta por duas camadas de material semicondutor P e N, uma grade de coletores metálicos superiores e uma base metálica inferior [4].

Figura 1.4 - Elementos básicos de painel fotovoltaico.



Fonte: ALDABÓ, R. **Energia Solar**. 1ª Edição. São Paulo: Artliber, 2002[5].

A grade e a base metálica inferior são os terminais elétricos que fazem a coleta da corrente elétrica produzida pela ação da luz. A base inferior é uma película de alumínio ou de prata. A parte superior da célula, que recebe a luz, precisa ser translúcida, portanto os contatos elétricos são construídos na forma de uma fina grade metálica impressa na célula [4].

Uma célula comercial ainda possui uma camada de material antirreflexivo, normalmente feita de nitreto de silício ou de dióxido de titânio, necessária para evitar a reflexão e aumentar a absorção de luz pela célula. As camadas semicondutoras da célula podem ser fabricadas com vários materiais diferentes, sendo o mais comum o silício. Cerca de 95% de todas as células fotovoltaicas fabricadas no mundo são de silício, pois é um material abundante e barato [4].

Um semicondutor é um material que não pode ser classificado como condutor elétrico nem como isolante. As propriedades de um semicondutor podem ser modificadas pela adição de materiais dopantes ou impurezas.

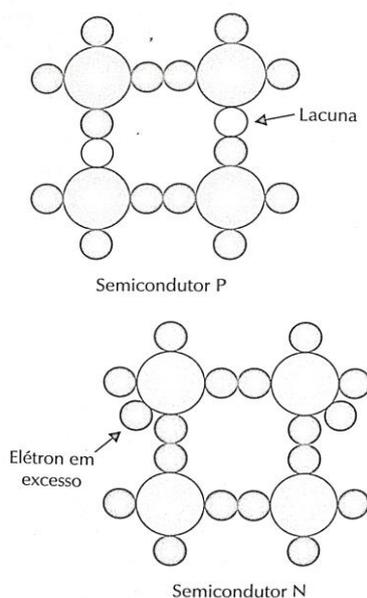
Uma célula fotovoltaica é composta tipicamente pela junção de duas camadas de material semicondutor, uma do tipo P e outra do tipo N. Existem células de múltiplas junções, que possuem um maior número de camadas, entretanto seu funcionamento é idêntico ao das células de duas camadas. As células de múltiplas

camadas produzem mais energia, porém são mais caras e não são tão utilizadas quanto as de apenas duas camadas [4].

O material N possui um excedente de elétrons e o material P apresenta falta de elétrons. Devido à diferença de concentração de elétrons nas duas camadas de materiais, os elétrons da camada N fluem para a camada P e criam um campo elétrico dentro da zona de depleção, também chamada de barreira potencial, no interior da estrutura da célula [4].

A figura 1.5 ilustra as estruturas moleculares P e N. O material P possui menos elétrons do que teria um material semicondutor puro, o que se percebe pela presença de lacunas, portanto é um material positivo. O material N possui elétrons em excesso, como se observa na figura pela presença de um elétron adicional em torno de alguns átomos da estrutura. Devido ao excesso de elétrons, o material é negativo, pois o elétron é uma partícula de carga negativa [4].

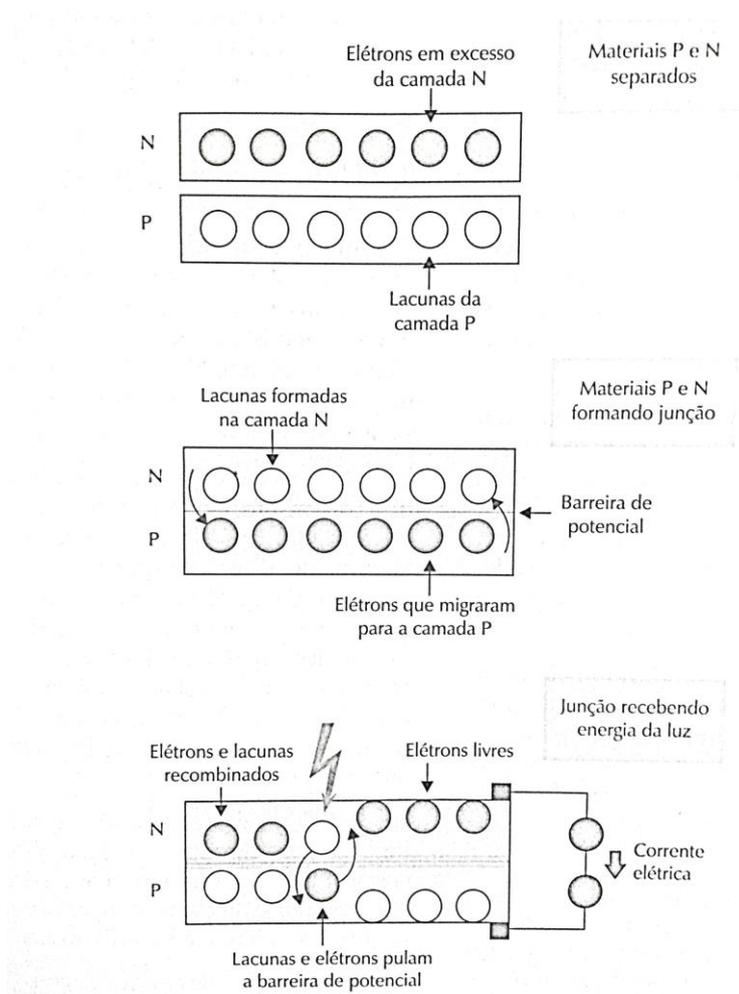
Figura 1.5 - Moléculas com dopagem P e N.



Fonte: ALDABÓ, R. **Energia Solar**. 1ª Edição. São Paulo: Artliber, 2002[5].

Quando duas camadas de materiais P e N são colocadas em contato, formando o que se chama de junção semicondutora, os elétrons da camada N migram para a camada P e ocupam os espaços vazios das lacunas. A figura 1.6 mostra o que acontece quando as duas camadas P e N são unidas. A mudança de elétrons e lacunas de uma camada para outra origina um campo elétrico e cria uma barreira de potencial entre as duas camadas. Os elétrons e lacunas permanecem presos atrás dessa barreira quando a célula fotovoltaica não está iluminada [4].

Figura 1.6 - Princípio de funcionamento de um painel solar.



Fonte: ALDABÓ, R. **Energia Solar**. 1ª Edição. São Paulo: Artliber, 2002 [5].

A camada superior de material N de uma célula fotovoltaica é tão fina que a luz pode penetrar nesse material e descarregar sua energia sobre os elétrons, fazendo com que eles tenham energia o suficiente para vencer a barreira de potencial e movimentar-se da camada N para a camada P. Os elétrons em movimento são coletados pelos eletrodos metálicos. Se houver um circuito fechado os elétrons vão circular em direção aos eletrodos da camada N, formando uma corrente elétrica [4].

Uma parte dos elétrons acaba sendo aprisionada pelas lacunas que existem na camada N, porém uma grande parte deles fica livre para formar corrente elétrica quando um condutor elétrico forma um circuito fechado entre as duas camadas. Se não houver um caminho elétrico entre as duas camadas os elétrons livres não podem formar uma corrente elétrica. Entretanto, mesmo na ausência de corrente elétrica, percebe-se uma tensão elétrica de aproximadamente 0,6 V entre os dois lados da célula, causada pelo campo elétrico da barreira de potencial [4].

A corrente elétrica produzida pela célula fotovoltaica sozinha, quando exposta à luz, pode ser usada numa infinidade de aplicações, alimentando aparelhos elétricos, carregando baterias ou fornecendo eletricidade para ruas, bairros e cidades nos sistemas conectados à rede elétrica. Uma célula fotovoltaica sozinha produz pouca energia e apresenta uma tensão elétrica muito baixa, mas várias células podem ser ligadas em série ou paralelo para fornecer uma grande quantidade de energia elétrica e uma tensão mais elevada [4].

Testes práticos e de laboratório demonstraram que a vida útil dos módulos fotovoltaicos é superior a 20 anos. Os outros componentes do sistema apresentam vida útil variável: baterias entre cinco e 15 anos, e os componentes eletrônicos em torno de 10 anos [5].

Atualmente as células fotovoltaicas produzidas em larga escala e disponíveis comercialmente são constituídas de silício monocristalino, policristalino ou amorfo. Existem diversos outros tipos de tecnologias e materiais e recentemente têm surgido pesquisas sobre as chamadas células fotovoltaicas orgânicas, que utilizam polímeros e outros tipos de materiais combinados no lugar dos semicondutores,

mas essa tecnologia ainda não alcançou rendimento de conversão muito elevada nem confiabilidade necessária para a produção comercial [4].

1.4 ENERGIA EÓLICA

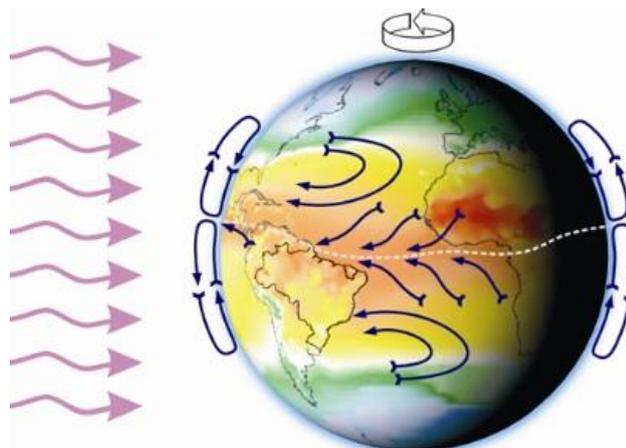
A energia cinética dos ventos é oriunda do aquecimento diferenciado das massas de ar ao redor do globo terrestre. O ar se desloca de regiões com maior pressão para regiões com menor pressão.

Uma estimativa da energia total disponível dos ventos ao redor do planeta pode ser feita a partir da hipótese de que, aproximadamente, 2% da energia solar absorvida pela Terra é convertida em energia cinética dos ventos. Este percentual, embora pareça pequeno, representa centena de vezes a potência instalada nas centrais elétricas do mundo [6].

Existem locais no globo terrestre nos quais os ventos jamais cessam de “soprar”, pois os mecanismos que os produzem (aquecimento no equador e esfriamento nos polos) estão sempre presentes na natureza. São chamados de ventos planetários ou constantes são mostrados na figura 1.7 e podem ser classificados em:

- Alísios: Ventos que sopram dos trópicos para o Equador, em baixas altitudes.
- Contra-Alísios: Ventos que sopram do Equador para os polos, em altas altitudes.
- Ventos do Oeste: Ventos que sopram dos trópicos para os polos.
- Polares: Ventos frios que sopram dos polos para regiões temperadas [6].

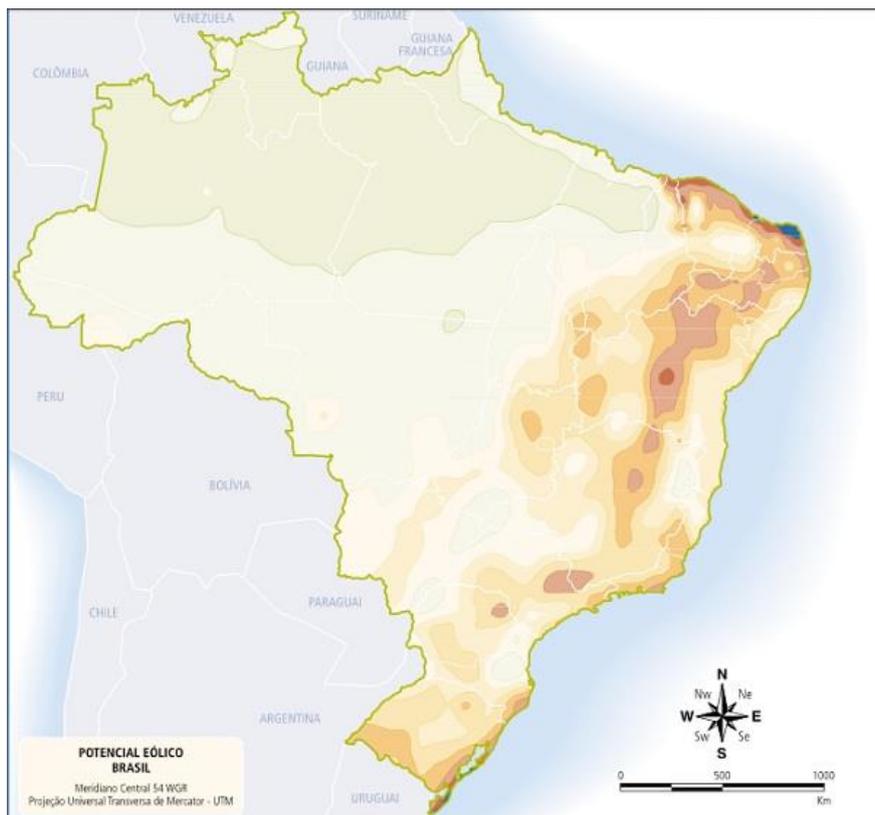
Figura 1.7 - Formação dos ventos devido ao deslocamento das massas de ar.



Fonte: Portal Energia. Disponível em <<http://www.portal-energia.com/downloads/energia-eolica-principios-tecnologias.pdf>>. Acesso em 26 de maio de 2016 [6].

A previsão da intensidade dos ventos é baseada em características da região em estudo. Fatores como relevo, proximidade aos oceanos, construções, vegetação e estação do ano influenciam na quantidade de ar soprado. A figura 1.8 mostra o potencial eólico do Brasil.

Figura 1.8 - Velocidade média anual do vento a 50m de altura.



Velocidade média do vento (m/s) 50 m acima do nível da superfície						
		Mata	Campo Aberto	Zona Costeira	Morro	Montanha
Classes de energia	4	> 6,0	> 7,0	> 8,0	> 9,0	> 11,0
	3	4,5 - 6,0	6,0 - 7,0	6,0 - 7,0	7,5 - 9,0	8,5 - 11,0
	2	3,0 - 4,5	4,5 - 6,0	4,5 - 6,0	6,0 - 7,5	7,0 - 8,5
	1	< 3,0	< 4,5	< 4,5	< 6,0	< 7,0

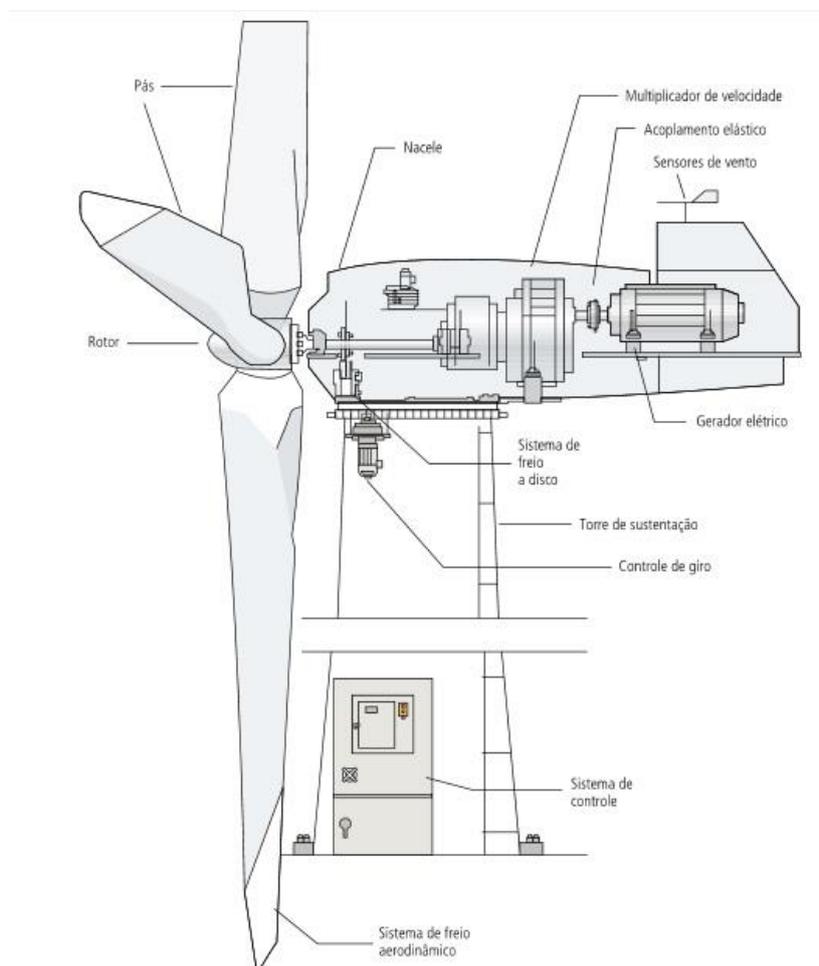
Fonte: Atlas Energia Eólica. Disponível em
http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica%283%29.pdf.
 Acesso em 27 de maio de 2016 [7].

A utilização da energia eólica faz-se a partir de conversão da energia de natureza cinética, para elétrica. Para isso são utilizados mecanismos que captam a energia dos ventos através de pás e fazem girar o eixo de um gerador elétrico.

No início da utilização da energia eólica, surgiram turbinas de vários tipos. Eixo horizontal, eixo vertical, com apenas uma pá, com duas e três pás, gerador de

indução, gerador síncrono etc. Com o passar do tempo, consolidou-se o projeto de turbinas eólicas com as seguintes características: eixo de rotação horizontal, três pás, gerador de indução e estrutura não flexível, como ilustrado na Figura 1.9 [7].

Figura 1.9 - Diagrama esquemático de uma turbina eólica moderna.



Fonte: Atlas Energia Eólica. Disponível em
<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica%283%29.pdf>.
Acesso em 27 de maio de 2016 [7].

1.5 REGULADOR ELETROMAGNÉTICO DE FREQUÊNCIA - REF

O REF (Regulador Eletromagnético de Frequência) é um equipamento que recebe velocidade variável e entrega velocidade constante. Genericamente o REF pode operar como regulador eletromagnético de velocidade (REV), garantindo na presente aplicação, velocidade constante à bomba do dessalinizador, de modo a possibilitar água filtrada de boa qualidade. O REF pode se tornar ainda mais útil para o controle de velocidade em casos em que mais de uma fonte primária de energia seja disponível para movimentar a bomba do dessalinizador. Por exemplo, o REF poderia associar uma combinação de energia solar com energia eólica, garantindo ao dessalinizador uma operação exclusivamente a partir de fontes renováveis. O REF, ou VER será introduzido neste projeto, em um passo futuro, em que será estudada a alimentação solar fotovoltaica e eólica ao dessalinizador. Neste trabalho, será utilizada apenas a fonte de energia solar fotovoltaica, de modo que a bomba do dessalinizador será acionada por um motor bomba de indução trifásico convencional.

O protótipo do REF foi desenvolvido por pesquisadores da UFRN e encontra-se no laboratório do DCA/UFRN e é mostrado na figura 1.10. Sua utilização possui uma ampla gama de possibilidades de integração.

Figura 1.10 – Protótipo do Regulador Eletromagnético de Frequência.



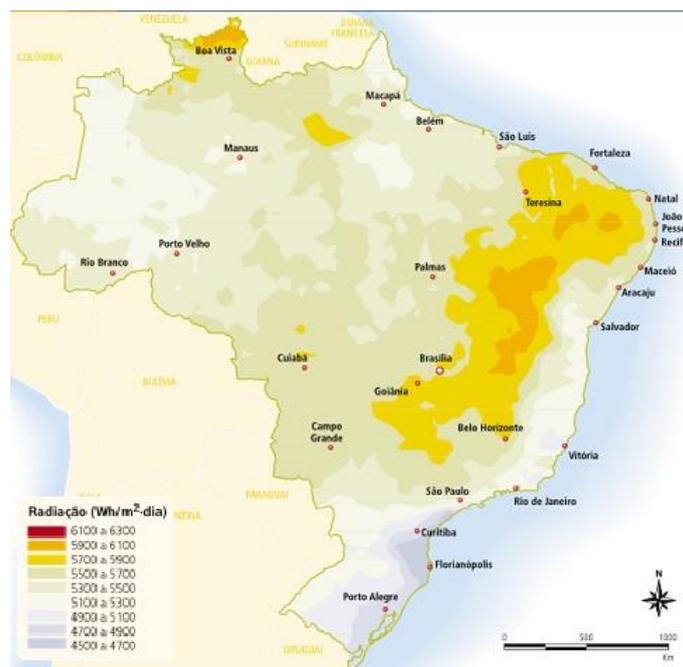
Fonte: SILVA, 2015, p.59 [8].

1.6 MOTIVAÇÕES

A falta de água na região nordeste é uma constante preocupação para a população e para o governo. Os períodos de estiagem fazem com que a água fique ainda mais escassa. Fenômenos como El Nino indicam o problema, pois as massas de ar que contém umidade são impedidas de chegar à região nordeste. A falta do abastecimento de água nessa região ocasiona uma série de problemas como a diminuição de áreas férteis para agricultura e pecuária prejudicando a economia local, desertificação de ecossistemas naturais, além de problemas sociais como a fome e a sede.

Nestas regiões existe água na porção subterrânea, porém com a presença de material particulado e impurezas que a tornam imprópria para o consumo humano, animal e para o uso doméstico. Uma solução adotada para este problema é o uso do processo de osmose reversa a partir de uma bomba hidráulica. Para alimentação deste motor bomba serão utilizados painéis solares, pois o fornecimento de energia elétrica nem sempre está presente em toda a região nordeste, e o potencial energético oriundo da energia solar é alto em relação a outras regiões, como é possível averiguar na figura 1.11.

Figura 1.11 - Mapa do potencial energético solar do Brasil.



Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar%283%29.pdf.

Acesso em 22 de março de 2016 [9].

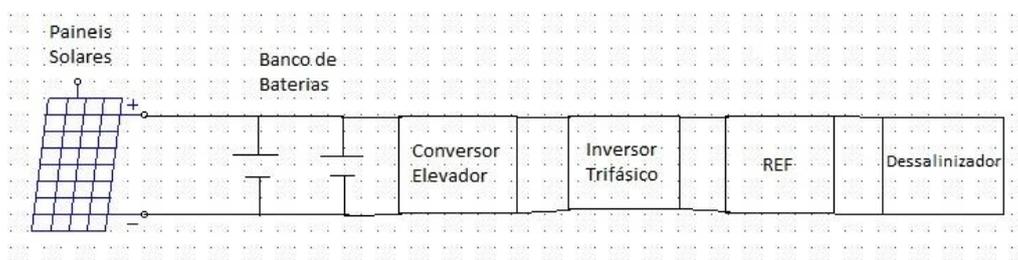
Como o sistema será abastecido por energia solar, é necessário que haja uma constante atenção nos parâmetros de funcionamento, pois o fornecimento de energia solar oscila durante o dia, e o sistema elétrico não pode sofrer com tais variações, deve apresentar comportamento constante. Daí a necessidade de implementação de sistemas de controle para que a constância no fornecimento de energia elétrica esteja garantida.

1.7 PROJETO DE INTEGRAÇÃO

O sistema de dessalinização de águas subterrâneas será constituído da seguinte forma: a energia gerada por painéis solares será responsável por alimentar eletricamente o circuito de potência e de controle para o motor bomba hidráulico que fará a osmose reversa. O dimensionamento do sistema fotovoltaico e o dimensionamento do banco de baterias foram feitos por (Souza, 2015). Para o

provimento correto dos parâmetros necessários na saída serão utilizados três estágios: o primeiro estágio será responsável por elevar a tensão oriunda do banco de baterias, para a tensão nominal necessária pela bomba, para isso será utilizado um conversor *boost* inicialmente e em seguida comparado com o conversor em ponte completa, os mesmos controlados por controladores PI, adicionados em diagrama de blocos pela ferramenta computacional utilizada no trabalho; O segundo estágio será responsável por fazer com que a tensão elevada em nível CC se torne AC trifásica, para isso será utilizado um inversor trifásico, com a presença de controle pi série; O terceiro estágio é a alimentação da bomba para realizar o processo de osmose reversa. Todo este processo descrito é ilustrado na figura 1.12. Para a simulação de operação dos referidos sistemas será utilizada a ferramenta computacional PSIM v.9 [10].

Figura 1.12 – Diagrama esquemático da estrutura do Projeto com todas as etapas.



Fonte: Autor, 2016.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: no capítulo 2 serão projetados dois diferentes tipos de conversores elevadores com suas respectivas malhas de controle. Em seguida, será feita a simulação computacional e analisado qual dos conversores é mais indicado para esta aplicação. Após esta etapa será projetado o inversor de tensão trifásico no capítulo 3, e adicionado a este uma malha de controle escalar para controlar a velocidade do motor bomba de indução trifásico. Em seguida será feita a simulação do inversor de tensão acoplado a um motor bomba de indução. Somente depois de projetadas todas as partes do projeto separadamente no capítulo 4 serão feita a união do sistema completo e feita a simulação do seu comportamento em condições reais de operação.

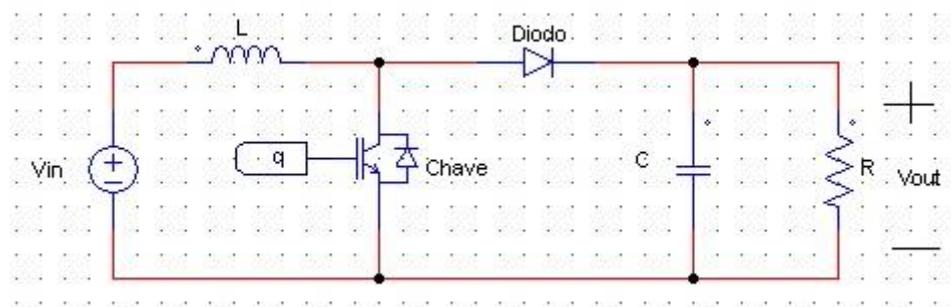
2. CONVERSORES ELEVADORES CC-CC

Neste capítulo serão projetados duas diferentes topologias de conversores CC-CC elevadores de tensão, o conversor *boost* e o conversor em ponte completa. Após a simulação computacional com suas malhas de controle será feita a análise sobre qual dos conversores é o mais indicado para esta aplicação

2.1 O CONVERSOR BOOST

O conversor *boost* mostrado na figura 2.1 é formado pela composição de fonte de tensão, diodo, dispositivo de chaveamento (IGBT), indutor, capacitor e resistência. É utilizado nos casos em que há a necessidade de se elevar a tensão de entrada (V_{in}), para uma tensão superior (V_{out}).

Figura 2.1 – Diagrama esquemático de circuito do conversor boost.



Fonte: Autor, 2016.

Em comparação com conversores abaixadores, conversores elevadores apresentam duas grandes diferenças:

- O fluxo de potência é de uma tensão mais baixa para uma tensão mais elevada de carga, em direção oposta à do fluxo através do polo chaveado, que consiste dos elementos transistor de potência e diodo. Assim, o sentido

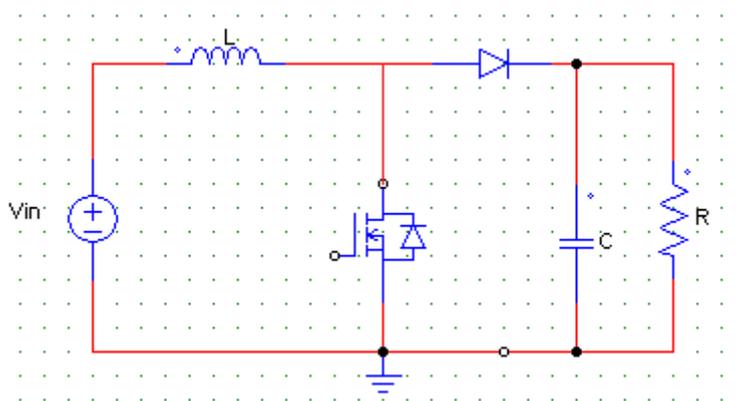
da corrente pelo indutor em série do polo de potência é oposto àquele no conversor abaixador; esta corrente permanece positiva no modo de condução contínua.

- No polo chaveado de potência, o PWM é realizado com um transistor e um diodo. Na saída, é conectado um capacitor de filtragem, que forma a tensão e minimiza a ondulação na tensão de saída [2].

O chaveamento realizado no transistor de potência, muda periodicamente o comportamento do conversor, fazendo com que o mesmo tenha dois comportamentos diferentes, com a chave aberta (OFF) e com a chave fechada (ON), como será visto a seguir.

Quando a chave está em seu período ON, ou seja, conduzindo corrente, a tensão V_{in} é aplicada diretamente em seus terminais fazendo com que sua corrente cresça linearmente, com o perfil de uma rampa, desta forma, a energia está sendo armazenada no indutor sempre que a chave estiver em seu período ON. Em seu período de condução a chave funciona como um curto-circuito. O circuito esquematizado na figura 2.2 ilustra este comportamento.

Figura 2.2 - Diagrama esquemático de circuito equivalente do boost com chave fechada.

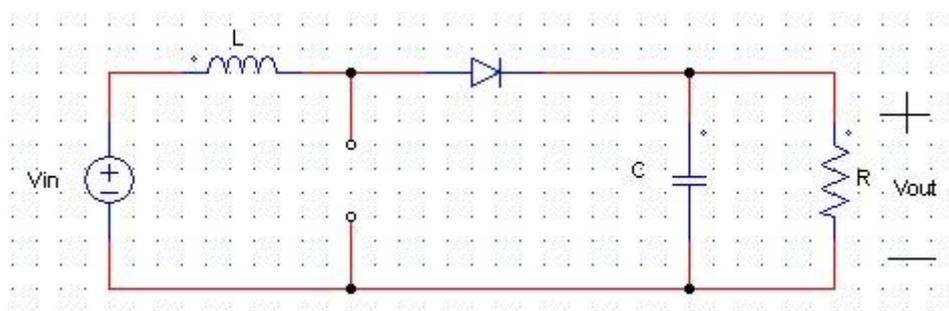


Fonte: Autor, 2016.

Quando a chave muda seu comportamento para abertura, ou seja, período OFF, a corrente que estava passando pelo indutor é forçada a seguir pelo diodo,

pois a mesma não pode variar abruptamente. Com isso parte da energia que estava armazenada no indutor é transferida para o capacitor de saída e para a carga. O circuito equivalente é mostrado na figura 2.3.

Figura 2.3 - Diagrama esquemático de circuito equivalente do boost com chave aberta.



Fonte: Autor, 2016.

O período em que a chave permanece em estado ON em relação ao período total (T_s) é chamado de ciclo de trabalho (D). O ciclo de trabalho de uma chave é um importante atributo no projeto de conversores potência, já que ela regula o comportamento dinâmico do sistema.

$$D = \frac{T_{on}}{T_s} \quad (5)$$

Em que:

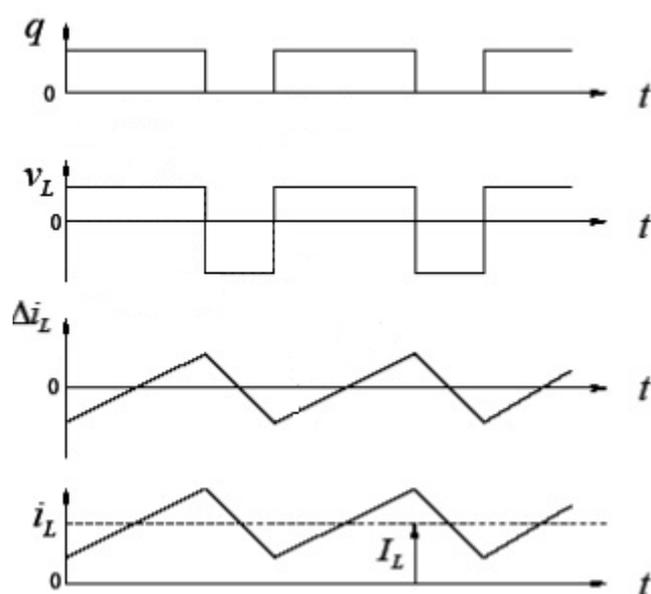
D – Ciclo de trabalho

T_{on} – Período de Condução

T_s – Período Total

Com o ciclo de trabalho constante no chaveamento no transistor, o sistema chegará a condições normais de fornecimento de energia pelos painéis fotovoltaicos em equilíbrio, ou regime permanente. Nesta condição a corrente média no capacitor de filtragem é nula, fazendo com que a corrente média no indutor no período em que a chave estiver aberta seja igual a corrente média na carga. Na figura 2.4 são mostrados gráficos dos perfis de tensão e correntes nos elementos que compõem o *boost* durante os intervalos de chaveamento. Para o caso estudado será considerada uma perda de tensão no diodo no valor de 0,7 V para aproximá-lo de seu comportamento real.

Figura 2.4 – Gráficos da análise do boost ao longo de ciclos de chaveamento.



Fonte: Autor, 2016.

Em que:

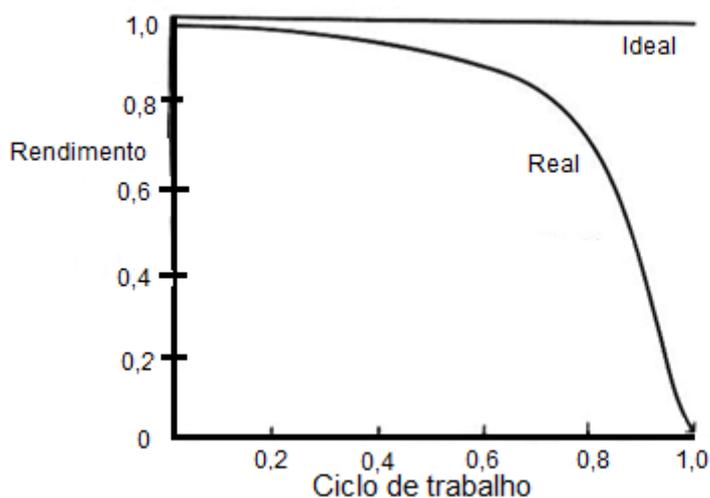
Q = Estado de condução do transistor (ON/OFF)

V_L = Tensão no indutor

ΔI_L = Variação da corrente no indutor

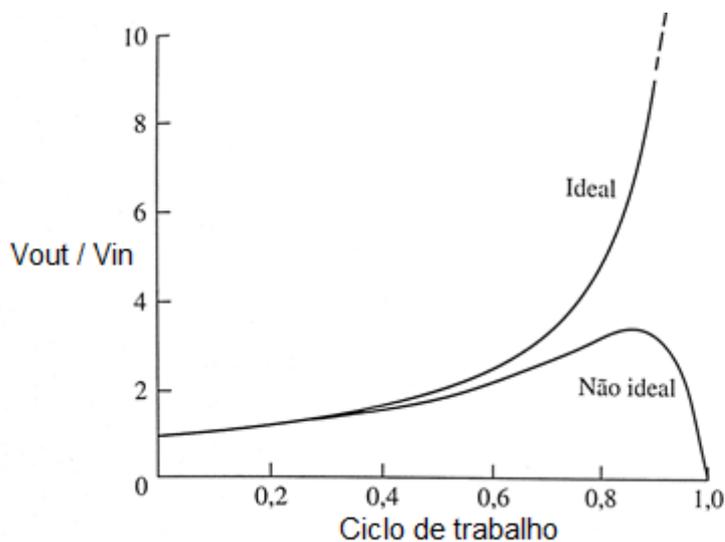
I_L = Corrente do indutor

Figura 2.5 - Gráfico do rendimento real e ideal do conversor boost.



Fonte: Autor, 2016.

Figura 2.6 - Gráfico do ganho ideal e real do conversor boost.

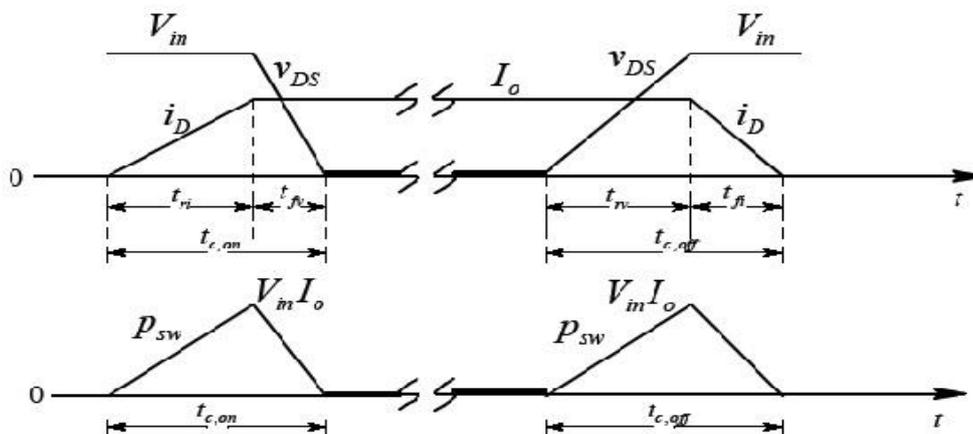


Fonte: Autor, 2016.

Nos gráficos mostrados nas figuras 2.5 e 2.6 é possível concluir que o comportamento ideal do conversor difere do seu real comportamento. Com um ciclo de trabalho próximo à unidade, o período em que a chave permanece aberta é muito curto, diminuindo a rendimento do transistor de potência que, somados à influência das perdas internas em cada componente contribuem para a limitação do rendimento máxima que o conversor pode atingir.

Durante cada transição de ligado para desligado e vice-versa, o transistor tem simultaneamente altas tensão e corrente, como observado nas formas de onda chaveadas na figura 2.7.

Figura 2.7 - Diagrama esquemático de tensão e corrente na chave no instante de chaveamento.



Fonte: MOHAN, N. **Eletrônica de Potência Curso Introductório**. 1ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2014 [2].

Em que:

P_{sw} = Perda por Chaveamento

V_{in} = Tensão de Entrada

V_{ds} = Tensão descendente

I_o = Corrente Nominal

I_d = Corrente descendente

$t_{c, on}$ = Tempo de Transição na Abertura

$t_{c, off}$ = Tempo de Transição de Fechamento

f_s = Frequência de Chaveamento

O tempos de transição $t_{c,on}$ e $t_{c,off}$ são calculados da seguinte forma:

$$t_{c,on} = t_{ri} + t_{fv} \quad (7)$$

$$t_{c,off} = t_{rv} + t_{fi} \quad (8)$$

Em que:

t_{ri} = Tempo de subida da corrente

t_{fv} = Tempo de descida da tensão

t_{rv} = Tempo de subida da tensão

t_{fi} = Tempo de descida da corrente

A perda de potência instantânea no transistor é o produto de V_{ds} e I_d , como visto na figura. O valor médio da perda por chaveamento vista na figura 2.7 é:

$$P_{sw} = V_{in} * 0,5 * I_0 * (t_{c,on} + t_{c,off}) * f_s \quad (6)$$

Outra forma de perda de energia no transistor inclui a perda por condução que está atrelada à resistência interna do IGBT, esta perda é influenciada pela corrente que está sendo conduzida e a temperatura da junção. A equação que modela a perda por condução é:

$$P_{cond} = R_{on} * D * I^2 \quad (9)$$

Em que:

P_{cond} = Perda devido à condução

R_{on} = Resistência do transistor

D = Ciclo de trabalho

I = Corrente

2.1.1 PROJETO DO CONVESOR *BOOST*

Admitindo que o sistema de geração de energia solar disponibilize 1200 W de potência no barramento de entrada do conversor *boost* e baseado nas características de operação, é possível dimensionar seus componentes. Como o conversor estará sendo alimentado por baterias, será admitido que a tensão de entrada pode variar. Para isso será implementado um sistema de controle pi série série em cascata, que regulará seu ciclo de trabalho, para que a tensão na saída do mesmo não sofra com as variações oriundas da entrada. A tabela 2.1 mostra as características de operação do conversor *boost*.

Tabela 2.1 – Características de operação do *boost*

Pin	1200 W
Vin	24 V
ΔV_{in}	4 V
R	36 Ω
fs	10 KHz
lin	50 A

Fonte: Autor, 2016.

Em que:

Pin – Potência de Entrada

Vin – Tensão de Entrada

ΔV_{in} – Variação na Tensão de Entrada

Rout – Carga

fs – Frequência de chaveamento

lin – Corrente de Entrada

O dimensionamento do conversor *boost* será feito para esta condição de operação específica, pois o ciclo de trabalho não pode exceder à unidade e não pode ser negativa. Para simular o conversor mais fiel ao real, serão consideradas cargas no diodo, no indutor e no capacitor, representadas por resistores. Para condições normais de funcionamento, a tensão V_{in} que alimenta o *boost* será 24 V, porém devido às oscilações no sistema de geração de energia, será modelada uma variação de 4 V para mais e para menos, ou seja, a tensão máxima admitida será 28 V e a tensão mínima será de 20 V. Com isso espera-se que o conversor com realimentação com o controlador PI cumpra sua função de manter a tensão constante de 200 V no barramento de saída.

Primeiramente realiza-se a equação para encontrar o ciclo de trabalho em condições normais.

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1-D} \rightarrow \frac{200}{24} = \frac{1}{1-D} \rightarrow 200 * D = 176 \rightarrow D = 0,88 \quad (10)$$

Para encontrar a estimativa da corrente de saída do conversor faz-se:

$$I_{out} = \frac{V_{out}}{R} \quad (11)$$

$$I_{out} = \frac{200}{36} = 5,55 \text{ A} \quad (11.1)$$

Considerando a equação de potência é possível estimar a corrente média que percorre o indutor.

$$P_{in} = V_{in} * I_{in} \rightarrow 1200 = 24 * I_{in} \quad (12)$$

$$I_{in} = 50 \text{ A} \quad (12.1)$$

Esta é a corrente de entrada, que será necessariamente a corrente média no indutor. Encontrada a corrente de entrada é possível dimensionar a indutância. Será

considerada admissível uma variação de 15% na corrente nominal do indutor. O modo de condução contínua deve ser garantido, ou seja, a corrente que passa pelo indutor nunca deve ser nula, pois dessa forma o fluxo de potência do conversor seria descontínuo. A partir da equação do indutor é possível dimensioná-lo.

$$V = L * \frac{di}{dt} \quad (13)$$

$$V = L * \frac{\Delta i}{\Delta t} = L * \frac{\Delta i}{D * T_s} \quad (13.1)$$

$$L = \frac{V * D}{\Delta i * f_s} = \frac{24 * 0,88}{0,15 * 50 * 10000} \quad [2] \quad (13.2)$$

$$281,6 \mu H \rightarrow 300 \mu H \quad (13.3)$$

Para efeito de simplificação, será considerado uma indutância de 300 μH na implementação. Para ser mais fiel ao circuito real, será adicionada uma resistência de 0,01 Ω em série com a indutância. A corrente no indutor irá oscilar em torno do valor médio de 50 A, atingindo um valor mínimo e máximo, respectivamente.

$$I_{l, \min} = 50 - \frac{\Delta i}{2} = 46,25 \text{ A} \quad (14)$$

$$I_{l, \max} = 50 + \frac{\Delta i}{2} = 53,75 \text{ A} \quad (14.1)$$

A seguir será feito o cálculo da capacitância, que será responsável pelo provimento de tensão CC, para o inversor. Será admitida uma variação máxima de 1% na tensão nominal do barramento. Com isso é possível encontrar o valor da capacitância.

$$\Delta V_{out} = 0,01 * V_{out} = 0,01 * 200 = 2 \text{ V} \quad (15)$$

$$\frac{\Delta V_{out}}{V_{out}} = \frac{D}{R * C * f_s} \rightarrow \frac{2}{200} = \frac{0,88}{36 * C * 10000} \quad (15.1)$$

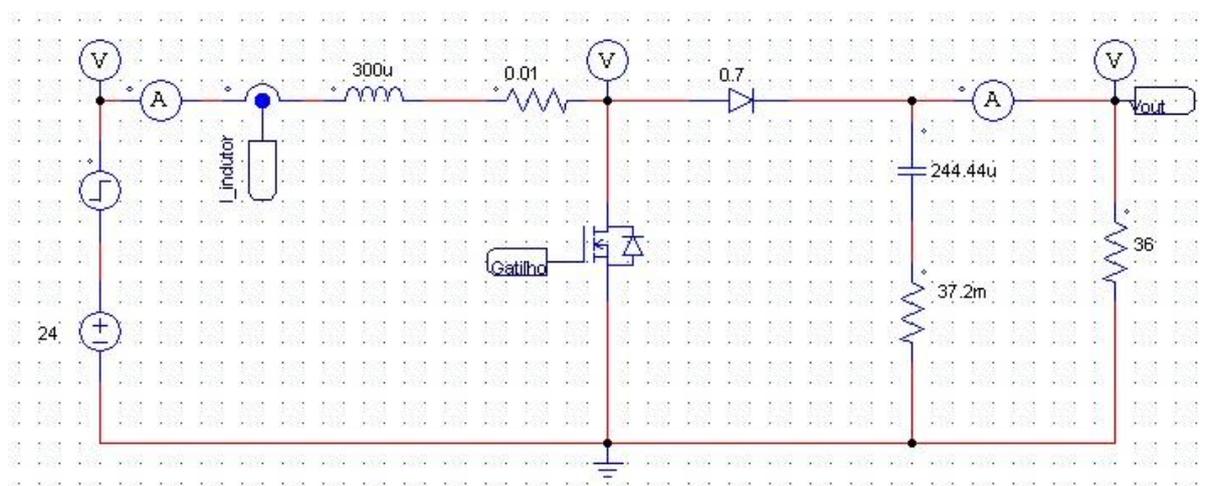
$$C = \frac{0,88 * 200}{2 * 36 * 10000} = 244,44 \mu\text{F} \quad (15.2)$$

Uma resistência será inserida em série com o capacitor, para simular aproximações de perda de energia. O dimensionamento se dá na forma:

$$\Delta V_{res} = I_{l, \text{máx}} * R_c \rightarrow R_c = \frac{0,01 * 200}{53,75} = 37,2 \text{ m}\Omega \quad (16)$$

Com todos os componentes devidamente dimensionados, é possível simular o conversor, conforme exposto na figura 2.9 e vistos detalhadamente na tabela 2.2.

Figura 2.8 - Diagrama esquemático de conversor Boost Dimensionado.



Fonte: Autor, 2016.

Tabela 2.2 – Componentes do *boost* projetado

V_{in}	24 V
R	36 Ω
L	300 μ H
R_l	0,01 Ω
C	244,44 μ F
R_c	37,2 m Ω
F_s	10 kHz
V_{out}	200 V
ΔV_{out}	2 V
$I_{indutor}$	50 A
$\Delta I_{indutor}$	7,5 A

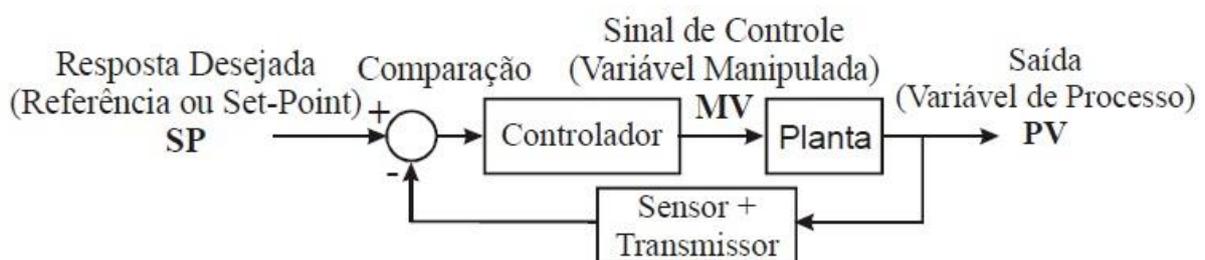
Fonte: Autor, 2016.

A seguir será detalhada a estratégia de controle utilizada para controlar o chaveamento do transistor de potência. A malha de controle é de vital importância para o sistema porque ela será responsável por regular o ciclo de trabalho com a qual a chave irá operar. Fatores como a tensão de entrada e perdas de energia no circuito são importantes variáveis que devem ser consideradas no projeto da malha de controle, pois irão repercutir diretamente na tensão entregue ao barramento de saída do conversor. Em seguida será feita a união do conversor com sua malha de controle e será analisado seu comportamento.

2.1.2 PROJETO DA MALHA DE CONTROLE DO CONVERSOR BOOST

Para que o controle em malha fechada possa ser efetuado é preciso que haja um sinal realizando a realimentação, ou seja, a saída do sistema em questão deve influenciar na sua entrada, de forma a promover estabilidade, baseada nos parâmetros de controle escolhidos. A figura 2.10 apresenta o diagrama de blocos de uma planta genérica com controle em malha fechada, para auxiliar na compreensão. As variáveis de processo (que neste caso são a tensão de saída e a corrente de saída) são transmitidas a um comparador, o mesmo obtém a diferença entre o valor ideal (que deve ser atingido) e o valor real (que está sendo medido) de cada variável. Baseado nesta diferença, uma ação de controle atua na variável manipulada (que neste caso é o ciclo de trabalho), a fim de encaminhar o comportamento da planta para o pretendido. Esse processo cíclico é realizado continuamente com base num período T de amostragem da variável de processo. O esquema de controle utilizado é ilustrado na figura 2.10.

Figura 2.9 - Diagrama de blocos de uma planta com controle em malha fechada.

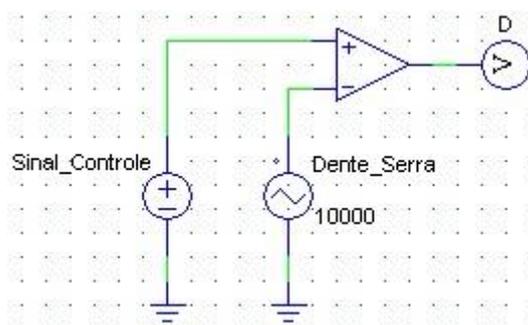


Fonte: MENEGHETTI, F. **Sistemas de Controle**. Natal, 2007. Apostila [3].

O sinal de controle gerado pelo controlador irá atuar variando o ciclo de trabalho D , a fim de alterar o estado atual do sistema. A técnica utilizada para controlar o chaveamento do transistor é chamada de PWM, ou Modulação por Largura de Pulso. Para isso será gerado um sinal dente de serra com a mesma frequência f_s de chaveamento requisitada e será feita a comparação do dente de

serra com o sinal de controle. Este procedimento é visto na figura 2.11 em que é possível observar o diagrama esquemático da implementação do controle PWM utilizado.

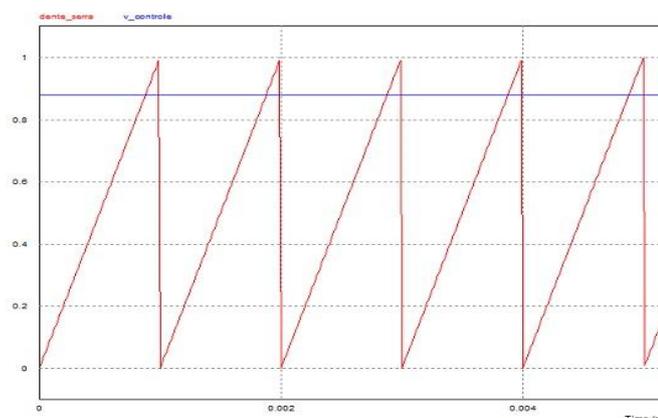
Figura 2.10 - Diagrama esquemático para geração de sinal PWM.



Fonte: Autor, 2016.

Baseado neste princípio, a diferença positiva entre o sinal de controle e o dente de serra, será o período em que a chave estará em seu estado ativo ON, ou seja, conduzindo corrente. O outro caso é quando o sinal do dente de serra for superior ao sinal de controle, levando a chave a seu estado inativo OFF. A figura 2.12 foi gerada com o sinal de controle de 0.88 que corresponde ao ciclo de trabalho nominal em que o conversor *boost* foi dimensionado, como descrito no capítulo anterior.

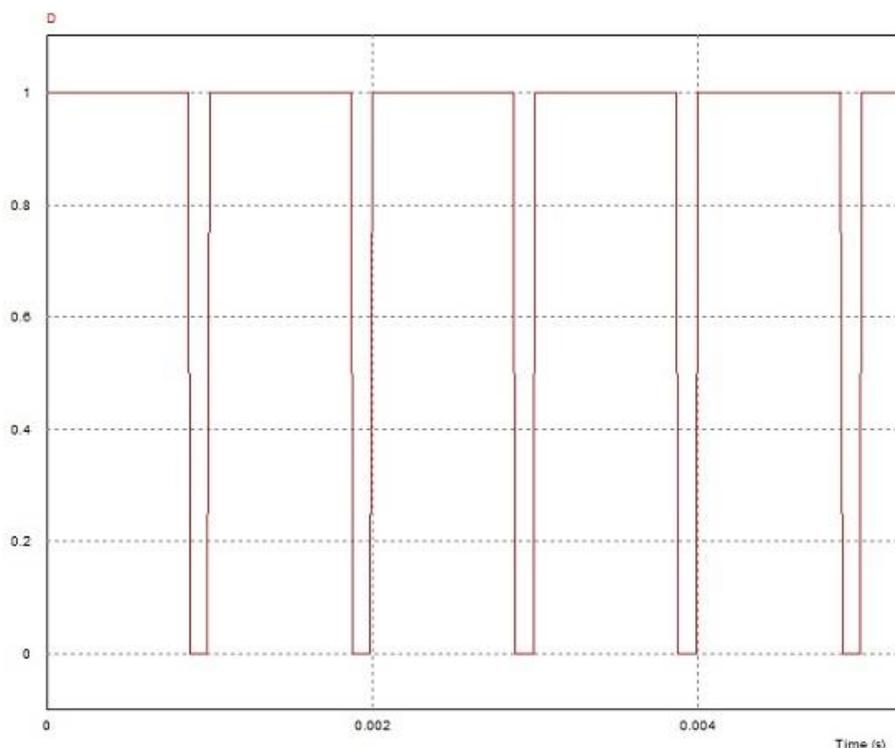
Figura 2.81 – Ilustração do processo de comparação do sinal de controle com dente de serra.



Fonte: Autor, 2016.

O sinal de controle é superior ao sinal do dente de serra em 88% do período, dessa forma após os dois sinais entrarem no comparador, será obtido um sinal digital no qual seu ciclo de trabalho é 0.88, conforme mostra a figura 2.13.

Figura 2.12 – Gráfico do ciclo de trabalho imposta ao transistor de potência no conversor boost.



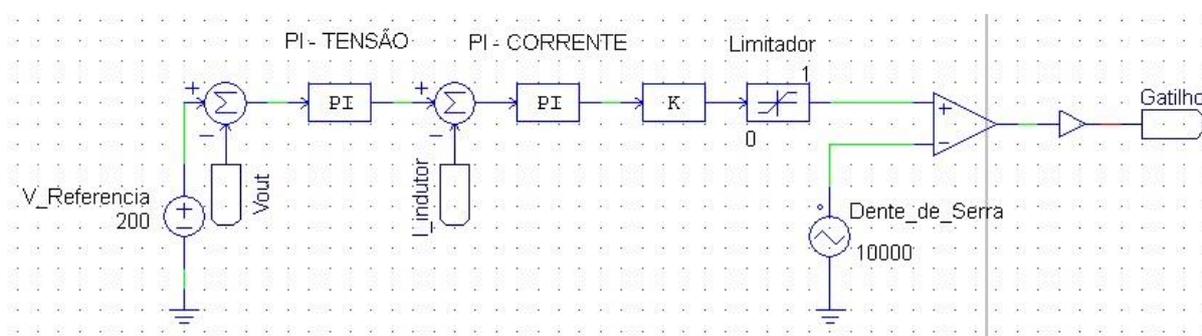
Fonte: Autor, 2016.

Esse é o comportamento esperado para o caso em que a tensão de entrada esteja na sua normalidade. Para os casos extremos de anormalidades de fornecimento de tensão, o ciclo de trabalho sofrerá uma leve variação para mais ou para menos.

A malha de controle devidamente estruturada é mostrada através do diagrama esquemático na figura 2.14 e os parâmetros de controle encontrados estão expostos na tabela 2.3. O controle efetuado no conversor é do tipo PI em cascata, pois, dessa forma, é possível acompanhar o saldo de erro acumulado, e

com base neste saldo líquido, a ação de controle é feita buscando erro nulo em regime permanente. As variáveis de processo monitoradas são a tensão no barramento CC de saída e a corrente que atravessa o indutor. A tensão de referência de 200 V e a tensão real medida são introduzidas no bloco somador, que calculará a diferença entre os valores, e após isso, enviará o sinal de erro para o controlador PI. A ação de controle é calculada baseada nos parâmetros K_{pi} e T_i do controlador de tensão. Em seguida, o sinal da ação de controle é comparado com a segunda variável de processo, a corrente do indutor, então, será gerada uma segunda ação de controle e multiplicada por um ganho K . A ação de controle é projetada para estar entre zero e um, pois será feita a comparação com o bloco comparador, e para que essa ação seja limitada, é inserido um limitador, com limite inferior 0 e limite superior 1. Com isso o sinal de controle é analisado se é maior ou menor que o dente de serra. No período em que for maior, será emitido o valor 1, e quando for menor será emitido o valor 0, com isso o sinal de controle está implementado na forma digital, podendo atuar no acionamento e desligamento do transistor de potência do *boost*.

Figura 2.13 - Diagrama esquemático descrevendo a malha de controle PI série em cascata do conversor boost.



Fonte: Autor, 2016.

Os parâmetros dos controladores PI e ganho K foram obtidos através do método de tentativa e erro, buscando atingir o melhor comportamento possível. As constantes são mostradas na tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Parâmetros do controlador do *boost*

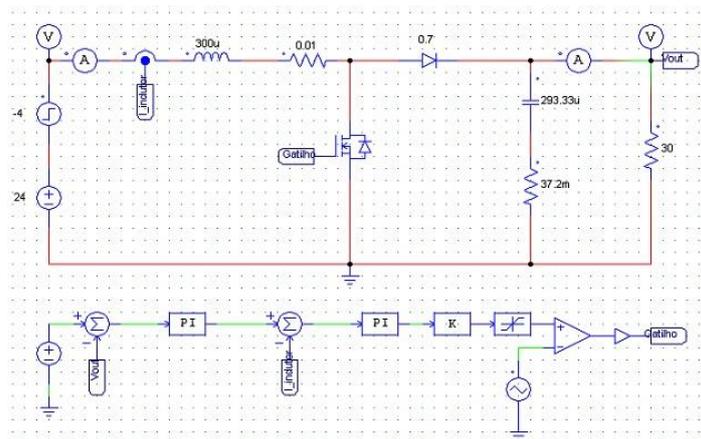
PI TENSÃO	
Kpi	0.0704
Ti	0.0088
PI CORRENTE	
Kpi	0.018
Ti	0.008182
Ganho K	
1	

Fonte: Autor, 2016.

2.1.3 SIMULAÇÃO DA MALHA DE CONTROLE NO CONVERSOR BOOST

Depois de projetados separadamente o conversor *boost* e a malha de controle, será feita, então, a união das partes, para que a lógica de controle possa controlar a potência que será transferida. As variáveis de processo manipuladas serão grandezas de entrada do sistema de controle, podendo ser feita desta forma a realimentação do sistema. O conversor *boost* com sua respectiva malha de controle é mostrado na figura 2.15.

Figura 2.14 - Diagrama esquemático de conversor boost com ciclo de trabalho controlada.

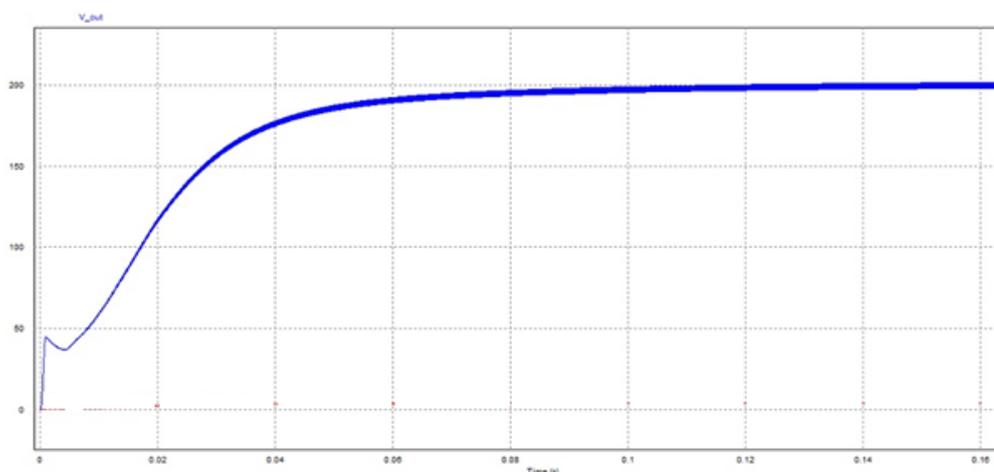


Fonte: Autor, 2016.

- **SIMULAÇÃO SEM PERTURBAÇÃO**

Com todo o circuito montado é possível simular sua operação no software PSIM e observar seu comportamento. A primeira simulação foi feita com a tensão nominal de 24 V e sem a presença de perturbação na tensão de entrada. A figura 2.16 apresenta o gráfico do comportamento da tensão de saída do conversor ao longo do tempo.

Figura 2.15 - Gráfico do comportamento da tensão de saída do conversor boost sem perturbação.

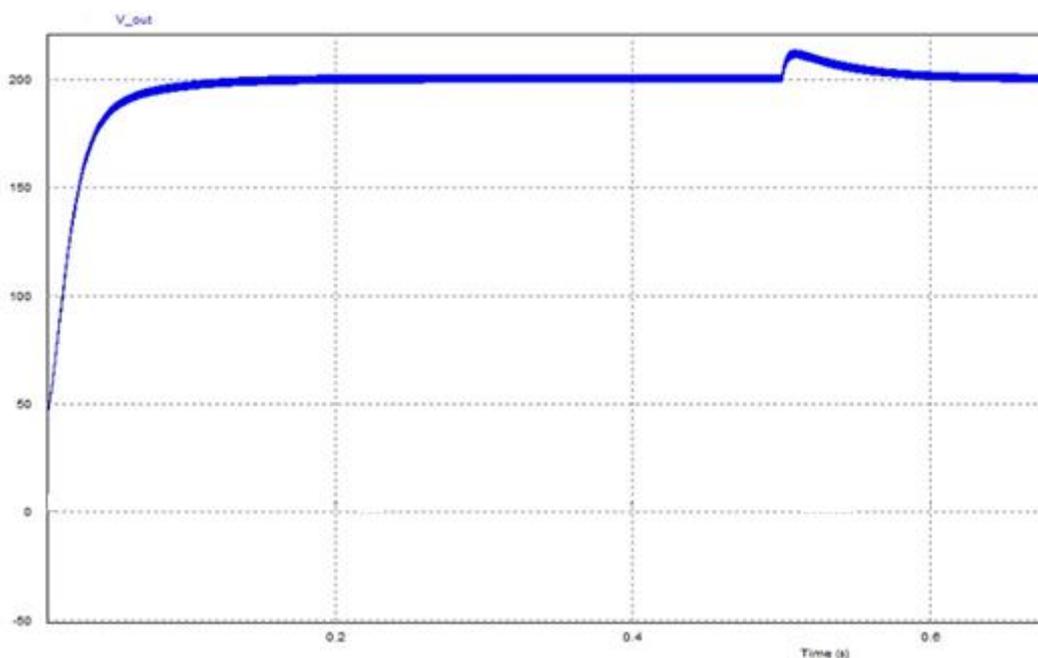


Fonte: Autor, 2016.

- SIMULAÇÃO COM PERTURBAÇÃO POSITIVA EM DEGRAU

Adicionando-se no instante $t = 0,5$ s, uma variação de tensão de +4 V à tensão de entrada, foi obtido o gráfico conforme ilustrado na figura 2.17

Figura 2.16 - Gráfico do comportamento da tensão de saída do conversor *boost* com perturbação positiva.

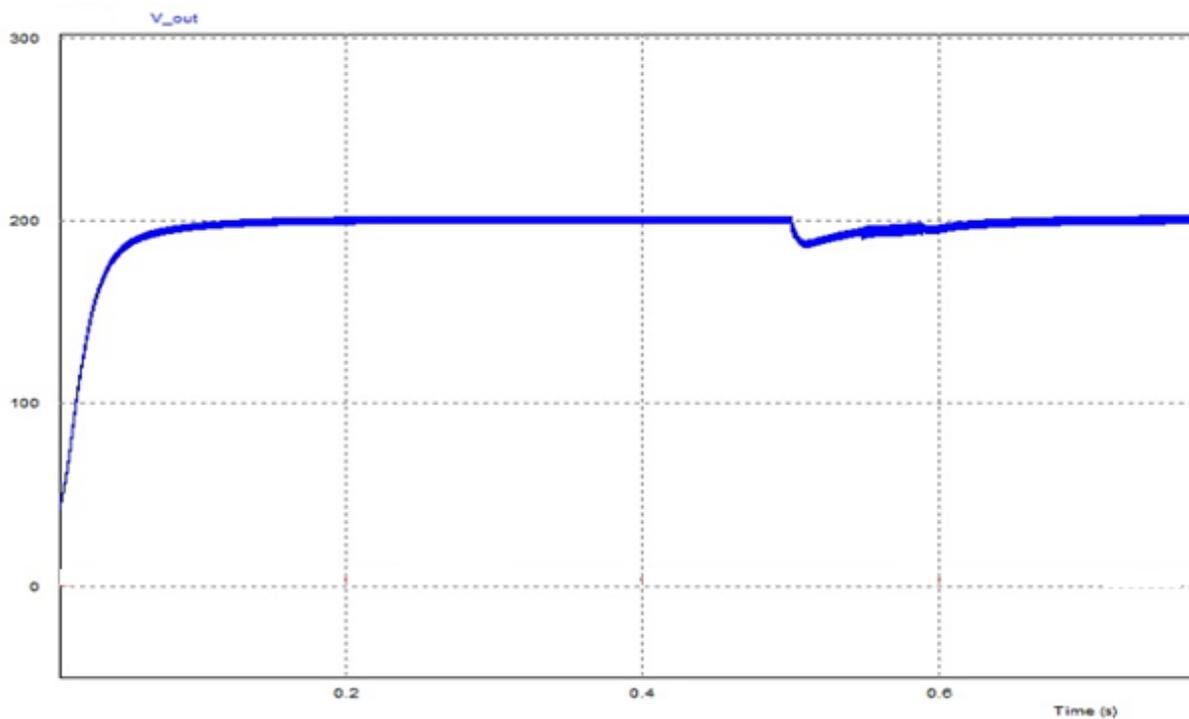


Fonte: Autor, 2016.

- SIMULAÇÃO COM PERTURBAÇÃO NEGATIVA EM DEGRAU

Com a tensão de entrada adicionada uma perturbação de -4 V em degrau em $t = 0,5$ s para simular condições anormais de funcionamento. O gráfico da figura 2.18 mostra o resultado obtido.

Figura 2.97 - Gráfico do comportamento da tensão de saída do conversor *boost* com perturbação negativa.



Fonte: Autor, 2016.

As tabelas 2.4 e 2.5 apresentam as características de operação do conversor *boost*.

Tabela 2.4 – Parâmetros de saída do *Boost*

Resultados	
V_{out}	200 V
ΔV_{out}	3 V
I_{out}	5,55 A
ΔI_{out}	0,15 A
P_{out}	1110 W

Fonte: Autor, 2016.

Tabela 2.5 – Razões de trabalho do conversor *boost*

V _{in}	D
20 V	0,95
24 V	0,90
28 V	0,89

Fonte: Autor, 2016.

Com os valores de corrente e tensão de saída encontrados para o *boost*, é possível encontrar sua rendimento na transmissão de energia, pela relação:

$$\text{Rendimento} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{V_{\text{out}} \cdot I_{\text{out}}}{V_{\text{in}} \cdot I_{\text{indutor}}} = \frac{200 \cdot 5,55}{24 \cdot 48} = \frac{1110}{1152} = 0,96 \quad (17)$$

O conversor *boost* apresenta uma rendimento de 96%, porém seu ciclo de trabalho é demasiadamente alta, deixando o *boost* com pouca liberdade para esta aplicação, e trabalhando num regime de trabalho arriscado para a segurança do sistema. Por causa disso será analisada outra arquitetura de conversor CC-CC, chamada ponte completa ou *full bridge*, para que, se for viável seja feita sua substituição.

2.2 O CONVERSOR EM PONTE COMPLETA

O motivo que justifica a proposta de utilização do conversor em ponte completa é o de obter outra opção válida com um ciclo de trabalho que não seja crítica, pois como foi visto no conversor elevador *boost* a elevação de tensão da entrada para a saída é muito alta e isso resulta num ciclo de trabalho demasiadamente alta a operação adequada do conversor. A proposta de utilização

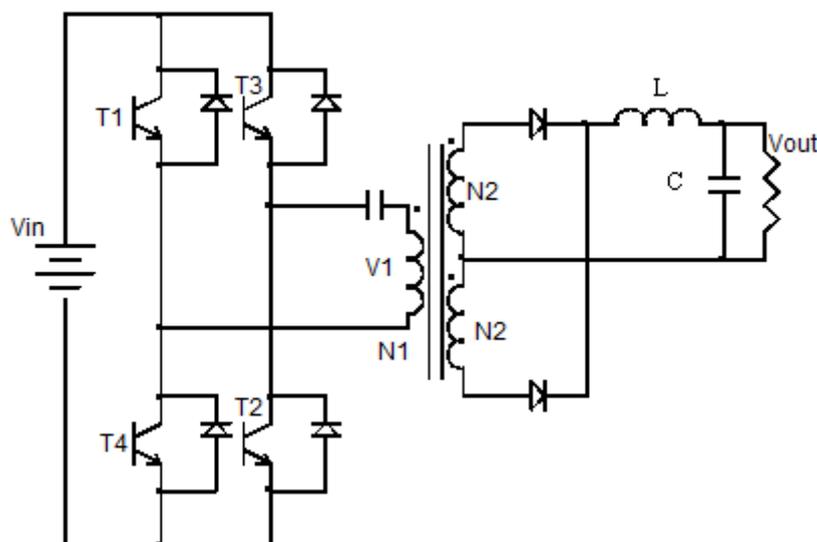
do conversor em ponte completa é feita para se obter um comparativo de rendimento com o conversor *boost*.

Conversores em ponte completa são formados num arranjo de quatro transistores; por conseguinte, são economicamente viáveis somente em aplicações com potências de algumas centenas de watts ou mais. Como conversores diretos, conversores em ponte completa também são derivados de conversores abaixadores. Diferentemente de conversores flyback e conversores diretos que operam apenas em um quadrante da malha B-H, conversores em ponte completa usam o núcleo magnético em dois quadrantes [2].

Um conversor em ponte completa consiste em dois polos de potência chaveados, como mostrado na figura abaixo, com um transformador em derivação central (*center-tapped*) no enrolamento secundário, conforme exposto na figura 2.19 [2].

Na análise deste conversor será considerado que o mesmo opera em regime estacionário em modo de condução contínua, em que a corrente no indutor de saída circula continuamente.

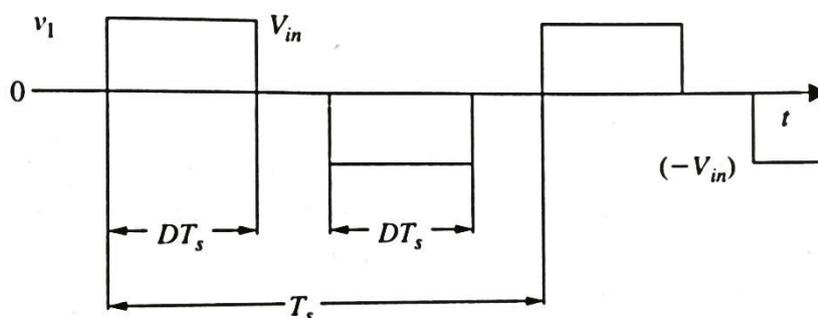
Figura 2.18 - Diagrama esquemático do circuito conversor em ponte completa.



Fonte: Autor, 2016.

No conversor em ponte completa a tensão de entrada aplicada ao enrolamento primário se alterna sem uma componente CC. A forma de onda desta tensão é mostrada na figura 2.20, em que $v_1 = V_{in}$ quando os transistores T1 e T2 estão ligados durante o intervalo de tempo DT_s , e $v_1 = -V_{in}$ quando os transistores T3 e T4 estão ligados durante um intervalo de tempo de mesma duração. Esta forma de onda se aplica por períodos idênticos positiva e negativa ao primário do transformador. O ciclo de trabalho D da interruptor ($<0,5$) é controlado para permitir a regulação da tensão de saída por meio de intervalos de tensão zero entre as tensões positiva e negativa aplicadas. Este comportamento é ilustrado na figura 2.20 [2].

Figura 2.19 – Gráfico do comportamento da tensão no enrolamento primário ao longo do ciclo de chaveamento.



Fonte: MOHAN, N. **Eletrônica de Potência Curso Introductório**. 1ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2014[2].

Os dois grupos de transistores T1 com T2 e T3 com T4, devem operar em intervalos distintos, caso contrário a fonte V_{in} será curto circuitada e isso acarretará em problemas para os dispositivos, pois a corrente no barramento de entrada crescerá ilimitadamente.

2.2.1 PROJETO DO CONVERSOR PONTE COMPLETA

O dimensionamento do conversor em ponte completa se dará sob as mesmas condições para as quais o conversor *boost* foi projetado. As condições de entrada são oriundas do banco de baterias, o conversor deverá operar como elevador de tensão, através do seu transformador. O ciclo de trabalho deverá ser menor que 0,5, pois cada grupo de transistores irá dividir o período total da transferência de energia para o lado secundário. Dessa forma, o ciclo de trabalho para cada transistor será pequena, já que os dois grupos de transistores dividirão o tempo de condução no mesmo período de chaveamento do conversor.

Para a confecção do conversor em ponte completa foi utilizado o modelo proposto por (Faria, 2012), que foi utilizado no projeto de ponte completa para aplicação em células de combustível.

A relação de transformação necessária para que o conversor opere em modo de condução contínua, será calculada de forma a atingir um limite máximo em 0,4, por razões de segurança e porque não deve haver chaveamento concordante entre os dois grupos de transistores. A relação de transformação pode ser dada por:

$$\frac{N1}{N2} = 2 * D_{chave, \text{máx}} * \left(\frac{V_{in \text{ min}} - V_{chave}}{V_{out} + V_d} \right) \quad (18)$$

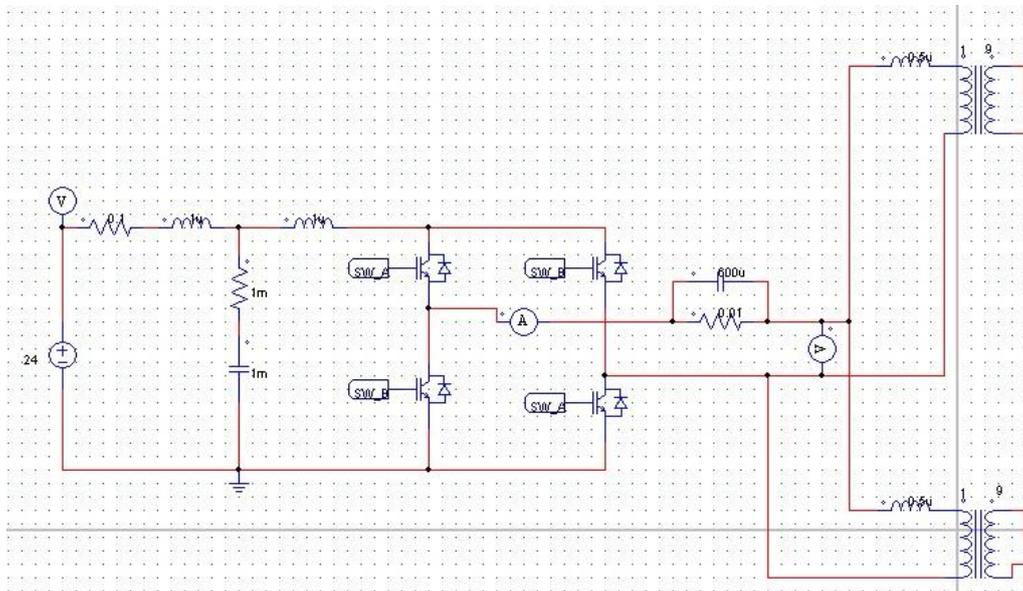
$$\frac{N1}{N2} = 2 * 0,4 * \left(\frac{20-1}{200+1} \right) = 0,075 \quad (18.1)$$

$$\frac{N2}{N1} = \frac{1}{0,075} = 13,33 \quad (18.2)$$

Essa relação de espiras encontrada é teórica, na prática será utilizada uma razão com a qual o circuito se mostra com desempenho maior. Nas figuras 2.21 e 2.22 é possível identificar através dos diagramas esquemáticos o conversor em

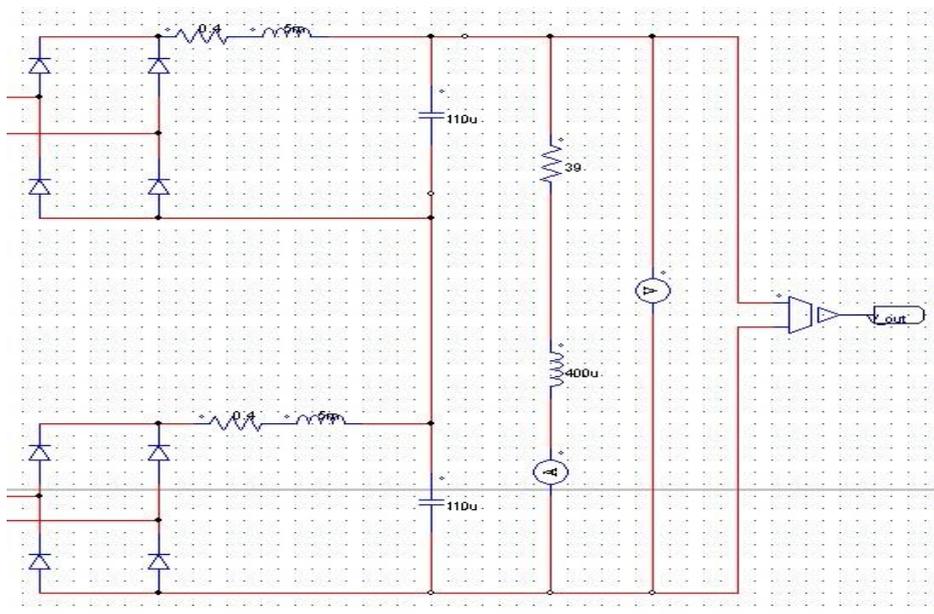
ponte completa que será utilizado no projeto. A separação em parte um e parte dois é feita entre os lados do primário e secundário do transformador [14].

Figura 2.20 – Diagrama esquemático do conversor em ponte completa utilizado parte Um



Fonte: Autor, 2016.

Figura 2.21 – Diagrama esquemático do conversor ponte completa utilizado parte Dois.



Fonte: Autor, 2016.

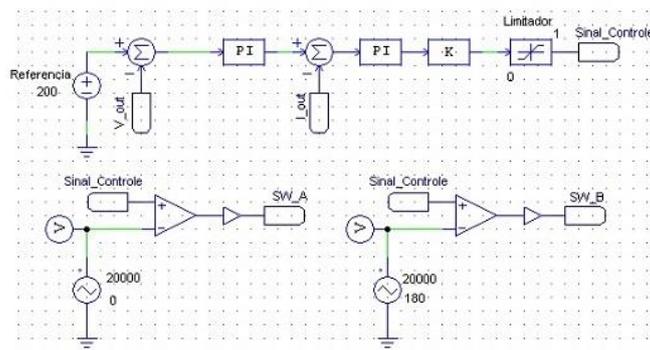
O transformador que possui um único enrolamento primário, com dois enrolamentos no secundário, foi projetado de forma que fossem criados dois transformadores secundários comuns com seus respectivos componentes após a elevação de tensão, e espelhados para reproduzir comportamento similar. A conexão elétrica dos dois transformadores que foram separados é feita na saída do barramento, com a união dos capacitores de filtragem, e em seguida conectado a carga.

2.2.2 PROJETO DA MALHA DE CONTROLE PARA O CONVERSOR PONTE COMPLETA

A malha de controle que será projetada para controlar o conversor em ponte completa é similar à malha projetada para controlar o ciclo de trabalho do conversor *boost*, para isso utiliza-se da mesma técnica de PWM para gerar pulsos nos transistores de condução, porém neste conversor, diferentemente do conversor *boost*, existem dois grupos chaveados que deverão ser controlados isoladamente, ou seja, os períodos ativos de condução dos dois grupos de transistores não devem coincidir. Para isso será utilizado um artifício que consiste na defasagem angular de 180° na ação de chaveamento de um grupo de transistores em relação ao outro, porém com a mesma ação de controle calculada pelo controlador PI em cascata. Os parâmetros dos controladores foram obtidos através de tentativa e erro. A malha de controle é evidenciada na figura 2.23.

As variáveis de processo monitoradas pela malha de controle serão a tensão no barramento de saída e a corrente de saída, da mesma forma que foi feito na malha de controle do conversor *boost*.

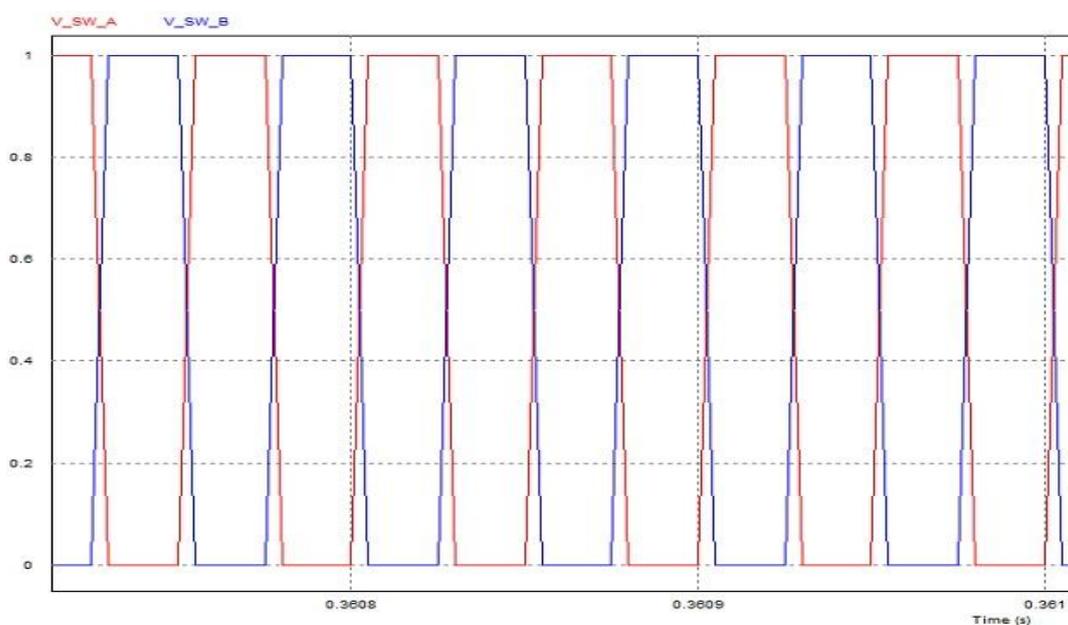
Figura 2.22 - Diagrama esquemático descrevendo a malha de controle utilizada no conversor em ponte completa.



Fonte: Autor, 2016

A defasagem angular necessária nos dois grupos de transistores é incluída no sinal dente de serra para cada grupo de transistor, com isso são aplicados dois dentes de serra idênticos, porém com um atraso de 180° , para evitar o chaveamento concordante no tempo. O modo com que os polos de transistores irão conduzir a corrente é mostrado na figura 2.24.

Figura 2.23 – Gráfico apresentando o ciclo de trabalho nos grupos de transistores.



Fonte: Autor, 2016.

Os parâmetros da malha de controle encontrados pelo método de tentativa e erro são mostrados na tabela 2.6:

Tabela 2.6 – Parâmetros do controlador para o conversor em ponte completa

PI - TENSÃO	
K _{pi}	0,0044
T _i	0,0055
PI - CORRENTE	
K _{pi}	0,05
T _i	0,0125
GANHO K	
K	1

Fonte: Autor, 2016.

2.2.3 UNIÃO DA MALHA DE CONTROLE AO CONVERSOR PONTE COMPLETA

Nesta etapa serão unidos o conversor ponte completa, propriamente dito, com a malha de controle projetada para o mesmo e, em seguida, serão coletados os resultados.

As condições de flutuação de tensão de entrada às quais o conversor em ponte completa será submetido, serão de 23 V para tensão mínima e 26 V para tensão máxima de alimentação, com isso espera-se que o controlador consiga retornar a tensão de saída V_{out} para a tensão de referência com um erro mínimo, que se possa considerar desprezível. A relação de transformação utilizada em simulação apresentou melhor comportamento, e maior estabilidade quando utilizada $N2/N1=9$. Um resumo dos parâmetros de projeto pode ser visto na tabela 2.7.

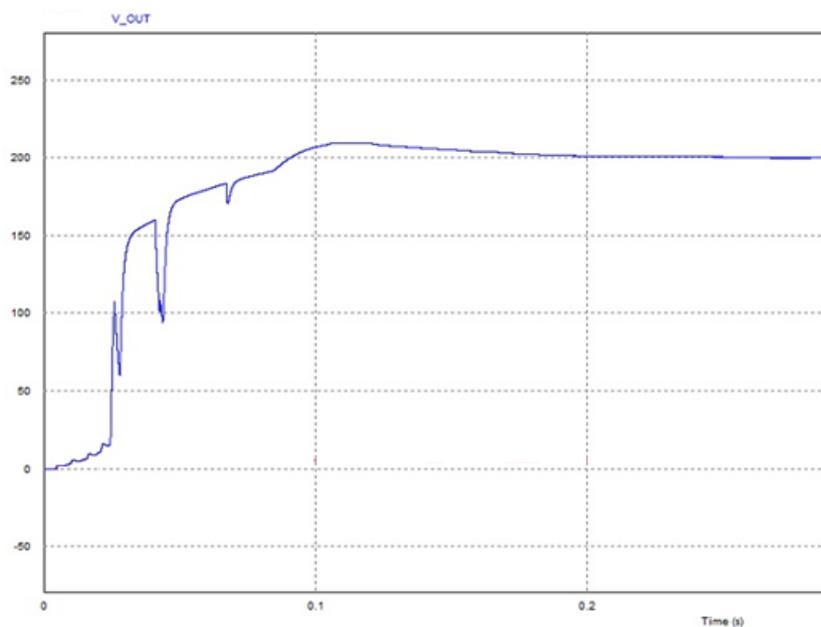
Tabela 2.7 – Parâmetro de saída do conversor em ponte completa

V _{in}	24 V
ΔV_{in}	1 V
R	39 Ω
f _s	20 kHz
D _{máx}	0,4
C	110 μF
L	5 mH
N ₂ /N ₁	9
T _{pertubação}	0,25 s

Fonte: Autor, 2016.

Nas figuras 2.25, 2.26 e 2.27 é mostrado o gráfico do comportamento da tensão no barramento de saída do conversor ponte completa sob as condições de operação, que envolvem a tensão de entrada nominal e as oscilações em seu sinal, representadas por um degrau positivo, para o caso de sobre alimentação e um degrau negativo para o caso de subalimentação.

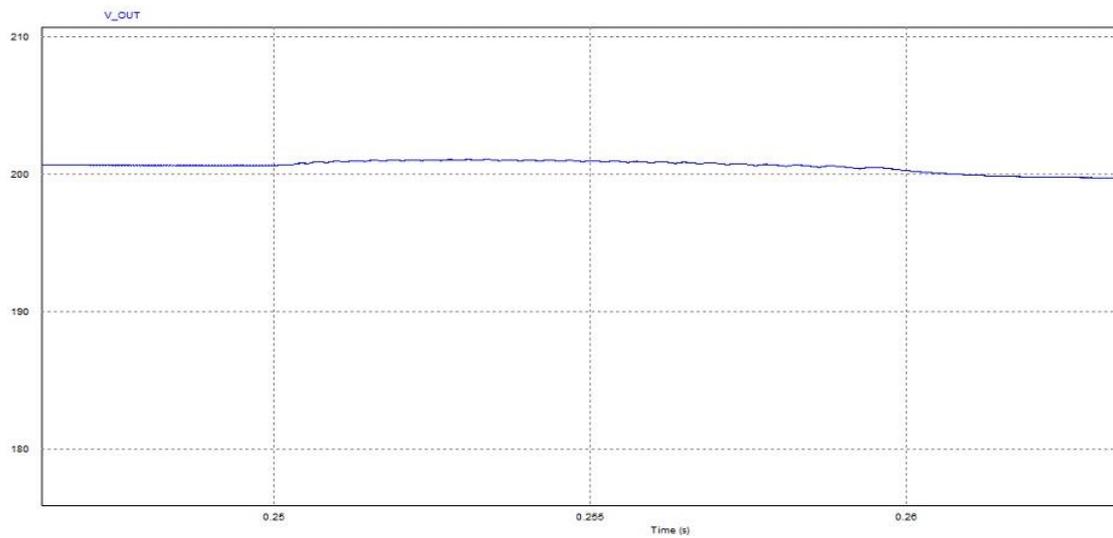
Figura 2.24 – Gráfico da tensão de saída do conversor ponte completa à tensão de entrada nominal.



Fonte: Autor, 2016.

Nas figuras 2.26 e 2.27 são ilustrados os gráficos da tensão de saída do conversor em ponte completa, a partir de um zoom da figura original, para que a compreensão seja mais fácil, para evidenciar a oscilação na tensão de saída. A perturbação de +1 V é adicionada a tensão nominal de entrada, como mostrado no gráfico da figura 2.26 no instante $t = 0,25$ s.

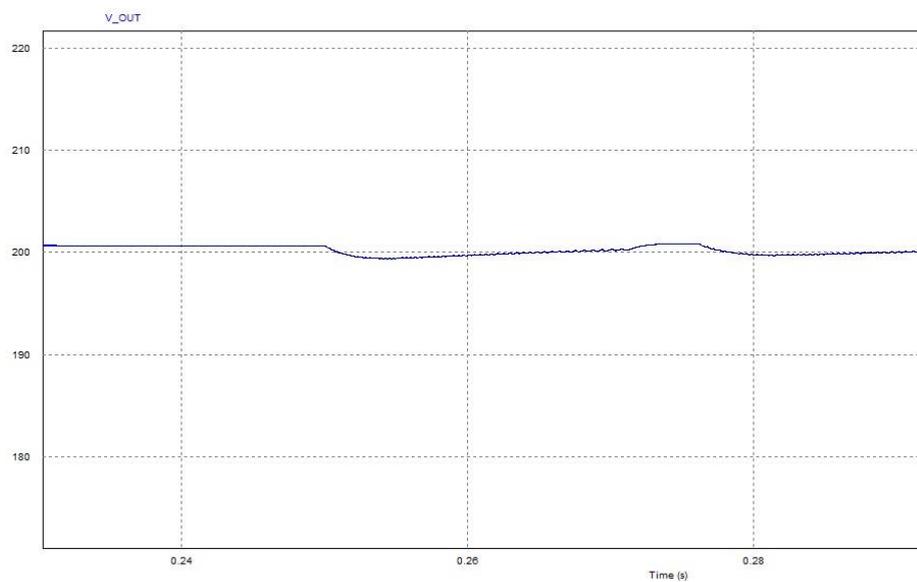
Figura 2.25 - Gráfico da tensão de saída do conversor ponte completa à perturbação na entrada positiva em degrau.



Fonte: Autor, 2016.

A perturbação de -1 V é adicionada a tensão nominal de entrada, como mostrado no gráfico da figura 2.27 no instante $t = 0,25$ s.

Figura 2.26 - Gráfico da tensão de saída do conversor ponte completa a perturbação na entrada negativa em degrau.



Fonte: Autor, 2016.

Com base nas figuras 2.26 e 2.27 é possível observar que após sofrer a perturbação na tensão de entrada, o conversor tem seu estado alterado de forma que a perturbação na entrada repercute em oscilações no barramento de saída. O conversor em ponte completa consegue retornar a tensão nominal de operação em cerca 0,03 segundos após a perturbação ser aplicada, para ambos os casos.

Na tabela 2.8 é possível comparar os diferentes valores das razões de trabalho para cada grupo de transistor, nas diferentes condições de tensão de entrada.

Tabela 2.8 – Razões de trabalho do conversor em ponte completa

V_{in}	D
23 V	0,40
24 V	0,34
25 V	0,30

Fonte: Autor, 2016.

As características de operação foram observadas, com o conversor em funcionamento são apresentadas na figura 2.9:

Tabela 2.9 – Parâmetros obtidos no barramento de saída do conversor em ponte completa

Vout	200,5 V
ΔV_{out}	0,7 V
Iout	5,55 A
ΔI_{out}	0,02 A
Pout	1102 W

Fonte: Autor, 2016.

A seguir será feita a análise do rendimento do conversor em ponte completa, para que possa ser feita uma comparação quantitativa com o conversor *boost* projetado anteriormente.

$$\text{Rendimento} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_{out} \cdot I_{out}}{V_{in} \cdot I_{in}} = \frac{200,5 \cdot 5,55}{24 \cdot 85} = \frac{1112,8}{2040} = 0,55 \quad (19)$$

Feito o projeto dos dois conversores, é possível compará-los para decidir qual o melhor conversor para este projeto. O conversor em ponte completa apresenta rendimento menor do que o conversor *boost*. Porém o ciclo de trabalho a qual o *boost* está dimensionado é um fator que merece atenção. Por ter um ciclo de trabalho em torno de 0,9, o intervalo de comutação é muito curto, sendo um sério problema quando em operação. O ciclo de trabalho do conversor em ponte completa ficou próximo de 0,7, mas neste conversor o período ativo de condução é dividido entre os dois transistores, ficando cada um com a metade do período de condução. Por essa razão o conversor em ponte completa foi adotado neste projeto.

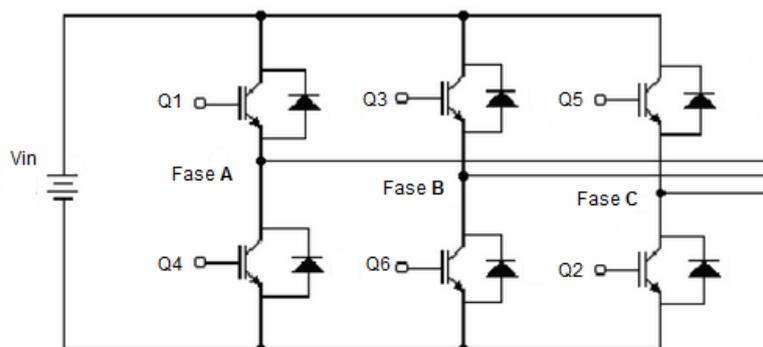
3. INVERSOR DE TENSÃO, MOTOR BOMBA E CARGA

No capítulo anterior foram dimensionados os conversores elevadores CC-CC e suas malhas de controle. A função desses conversores é garantir uma tensão contínua no barramento de saída para alimentar o inversor de tensão trifásico que será introduzido, através de simulações neste capítulo. Depois de feito a montagem do inversor trifásico no software, será feito o dimensionamento do motor bomba de indução e da carga com a qual o motor bomba deverá operar em condições reais de trabalho. A malha de controle projetada para este inversor terá como função manter a velocidade do motor bomba constante. Para isso ela atuará no ciclo de trabalho dos transistores dependendo do valor da carga em que estiver acoplado.

3.1 O INVERSOR DE TENSÃO TRIFÁSICO

A função básica de um inversor de potência é converter uma tensão de entrada de natureza CC para uma tensão no seu barramento de saída de natureza CA. Para isso os inversores realizam comutação diferenciada em seus transistores, a fim de se obter uma tensão senoidal a partir de um nível constante. O inversor utilizado neste trabalho possui três fases em seu barramento de saída, defasadas em 120 graus entre si. O diagrama esquemático do circuito pode ser visto na figura 3.1.

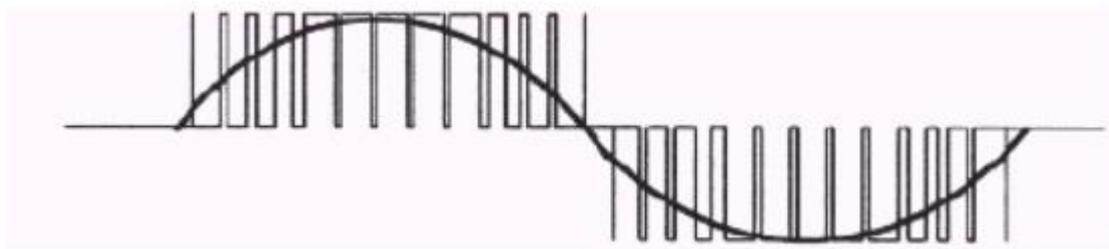
Figura 3.1 - Diagrama esquemático de um inversor de tensão trifásico.



Fonte: Autor, 2016.

A técnica de chaveamento dos transistores utilizada neste trabalho é a mesma utilizada nos conversores CC-CC boost e ponte completa. A única diferença é que a referência para o sinal de chaveamento deixa de ser um valor constante, e passa a ser um sinal senoidal de frequência de 60 Hz para ser comparado a uma senóide de 10 kHz. A ideia de como a tensão é convertida para um sinal oscilatório é mostrada na figura 3.2.

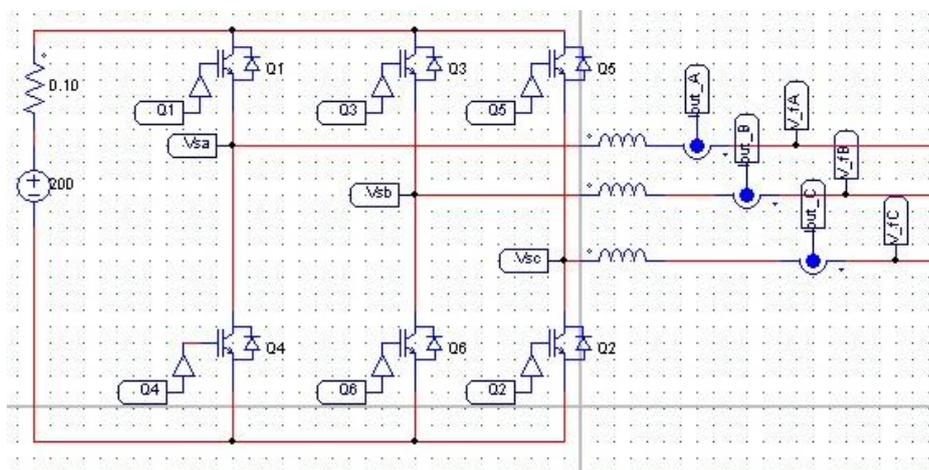
Figura 3.2 – Gráfico representando o esquema de chaveamento dos transistores de um inversor trifásico.



Fonte: Escola da Vida. Disponível em http://www.escoladavida.eng.br/mecfluquimica/planejamento_12009/Inversores_de_Frequencia.pdf. Acesso em 11 de maio de 2016 [12].

Para que a tensão de cada transistor resulte num comportamento similar a uma senóide, o ciclo de trabalho deve variar entre zero e um, de acordo com o nível da referência que está mudando constantemente. A estrutura do inversor trifásico utilizado no projeto é mostrada na figura 3.3.

Figura 3.3 – Diagrama esquemático adotado para a configuração do inversor trifásico utilizado no projeto.



Fonte: Autor, 2016.

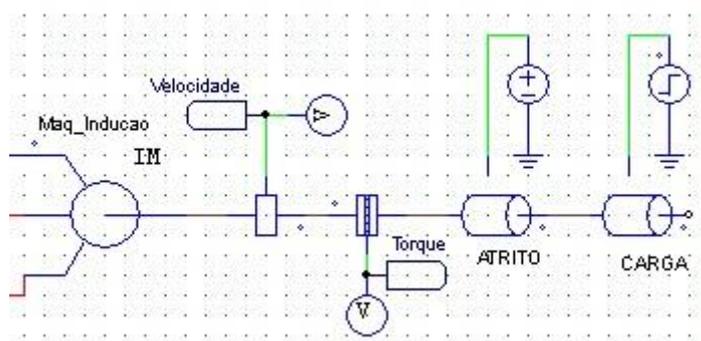
3.2 PROJETO DE CONTROLE DO INVERSOR TRIFÁSICO APLICADO AO MOTOR BOMBA

Nesta seção será detalhada a estratégia de controle utilizada para controlar a velocidade do motor bomba de indução através do controle do inversor trifásico. Da mesma forma que o conversor CC-CC elevador sofria perturbações na sua entrada devido a fatores externos ao sistema, o inversor também sofrerá com fatores externos. Como a bomba será responsável por pressionar a água salobra contra uma superfície porosa, será considerado que a bomba será vista como uma carga para o motor de indução trifásico, que deverá ser robusto o suficiente para que o fluxo volumétrico de água seja constante por entre a membrana. Porém com o passar do tempo, a membrana porosa sofrerá pequenos entupimentos, que serão responsáveis por diminuir a quantidade de poros, e isso repercutirá num aumento de carga que a bomba deverá suportar em operação para manter a vazão constante. Desta forma se nada for feito, cada vez menos água passará através da membrana, comprometendo a rendimento do dessalinizador.

A partir desse conceito, foi construída uma malha de controle pi série, capaz de monitorar a velocidade da bomba e atuar no chaveamento dos três pares de

transistores de modo a recuperar a vazão definida como referência. A malha de controle deverá ser capaz de manter o dessalinizador em operação entre os períodos agendados de manutenção, em que a membrana deverá ser substituída ou reutilizada de acordo com sua vida útil média para as condições de operação a que estiver submetida. O diagrama esquemático representa o motor bomba e a carga e pode ser visto na figura 3.4 e as cargas utilizadas na simulação de operação são mostradas na tabela 3.1.

Figura 3.4 - Diagrama esquemático do motor bomba acoplado a carga.



Fonte: Autor, 2016.

Tabela 3.1 – Características da carga utilizada

	Momento de Inércia	Conjugado
Carga de Atrito	0,001 Kg*m ²	0,1 N*m
Carga da Membrana	0,002 Kg*m ²	0,95 N*m

Fonte: Autor, 2016.

O controle utilizado neste trabalho para controlar o motor de indução trifásico é o controle escalar. Com ele é possível controlar o torque exercido pelo motor e a sua velocidade de operação. O princípio de funcionamento deste controle se baseia na variação da frequência da tensão alternada aplicada ao estator do motor, em

resposta a oscilação da tensão do estator, com o objetivo de manter o fluxo magnético constante. A equação descreve este comportamento.

$$V = 4,44 * f * N * \emptyset \quad (20)$$

$$\frac{V}{f} = 4,44 * f * N * \emptyset \quad (20.1)$$

$$\emptyset \propto \frac{V}{f} \quad (20.2)$$

Em que:

V = Tensão aplicada à bobina do estator

f = Frequência da tensão aplicada ao estator

N = Relação de espiras

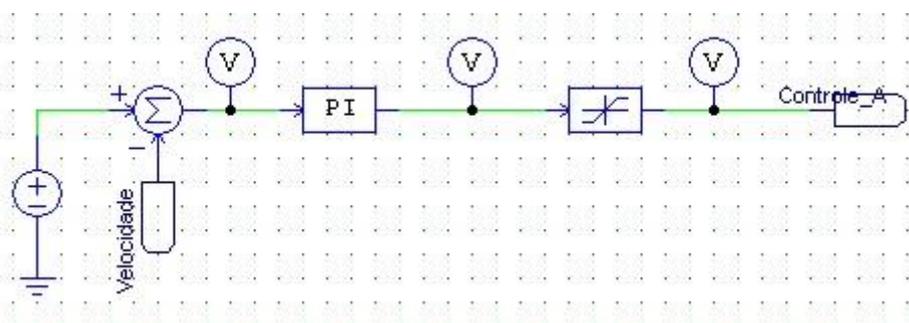
\emptyset = Fluxo magnético

Nas simulações foram incluídos dois sensores no eixo do motor bomba: de velocidade e de torque. Desta forma adota-se uma análise de natureza não mais elétrica, mas de natureza mecânica com relação à planta. Com essas grandezas sendo monitoradas é possível acompanhar o funcionamento do sistema de forma mais real. Foram adotadas duas cargas no motor bomba. A carga de atrito serve para representar as perdas rotacionais em vazio do sistema mecânico, enquanto que a outra carga representa a resistência do sistema de membranas, existente no dessalinizador, ou seja, o torque de carga quando a bomba do dessalinizador encontrar-se em operação é mostrado na tabela 3.1.

A partir da malha de controle do motor, é possível chegar ao diagrama esquemático adotado no projeto. Para gerar a ação de controle correspondente ao estado em que o sistema se encontra (solicitação de carga mecânica). No eixo em que as cargas estão presentes é inserido um sensor de velocidade. A partir da velocidade instantânea do motor bomba é possível utilizá-la como variável de

processo. Desta forma, a velocidade levada ao controlador e comparada a uma velocidade de referência gera uma ação de controle proporcional, baseada no erro obtido. A malha de controle utilizada neste trabalho é mostrada na figura 3.6, os parâmetros de controle utilizados são mostrados na tabela 3.2 foram obtidos através de tentativa e erro para encontrar o comportamento que melhor se adapta-se a esta aplicação. As características elétricas do motor bomba de indução trifásico são mostradas na tabela 3.3.

Figura 3.5 – Diagrama esquemático representando a malha de controle utilizada no projeto



Fonte: Autor, 2016.

Tabela 3.2 – Parâmetros do controlador PI

Controlador PI	
Kp	2
Ti	0,01

Fonte: Autor, 2016.

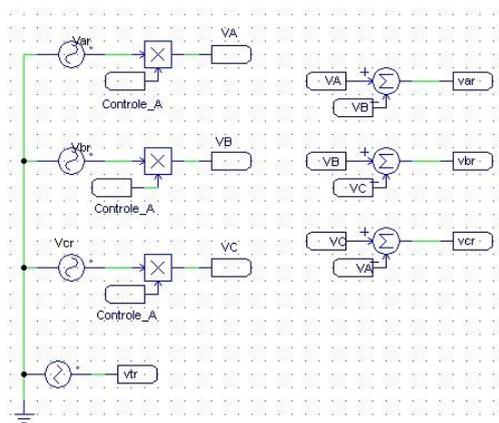
Tabela 3.3 – Características elétricas do motor bomba de indução

Frequência	60 Hz
Polos	6
Potência	1,1 kW
Conjugado Nominal	0,95 kgfm
Momento de Inércia	0,0056kgm ²
Peso	20 kg
RPM	1200

Fonte: WEG. **Motores Elétricos de Corrente Alternada**. Santa Catarina, 2012.
Apostila[16].

O sinal de controle gerado pela malha de controle funcionará como um atenuador. Serão gerados três sinais senoidais padrão de referência numa frequência de 60 Hz, defasados entre si 120° , com amplitude de um volt. O sinal de controle que terá amplitude limitada entre zero e um, multiplicará estas senóides de forma a atenuar sua amplitude, exceto no caso em que o sinal de controle for igual a um, em que não fará nenhuma alteração. Com os três sinais multiplicados pela ação de controle, são obtidas as tensões entre as fases A e B, B e C, e entre C e A. Este procedimento é mostrado na figura 3.7.

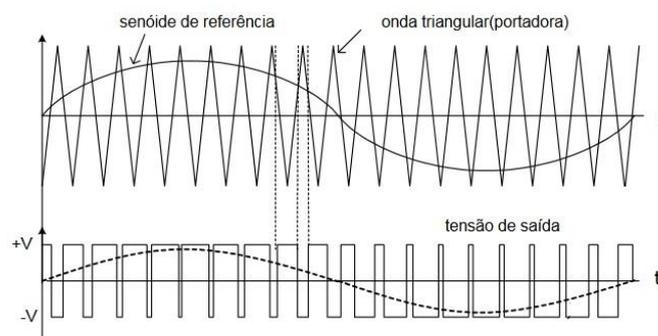
Figura 3.6 – Diagrama esquemático da estratégia de geração de sinal de controle para três fases.



Fonte: Autor, 2016.

Após esta etapa, os sinais obtidos irão gerar o pulso PWM para que seja realizado o chaveamento ordenado nas três fases. Para isso será utilizada a mesma estratégia que foi implementada nos conversores elevadores CC. Um sinal triangular será gerado para que a comparação das tensões de polo obtidas anteriormente seja feita com o mesmo, de modo a se obter valores digitais que realizarão o comando de chaveamento propriamente dito, conforme pode ser visto na figura 3.8.

Figura 3.7 – Gráfico representando a lógica de variação do ciclo de trabalho do inversor.



Fonte: Eletronic Electricity Softwares. Disponível em

http://www.corradi.junior.nom.br/eli_2011_apo.pdf. Acesso em 12 de maio de 2016

[13].

Para o chaveamento dos seis transistores existentes é necessário um ordenamento, que se repetirá no final de cada ciclo com o objetivo de evitar curto circuito entre as fases, e para que as tensões possuam o formato desejado. A ordem de chaveamento pode ser vista na tabela 3.4.

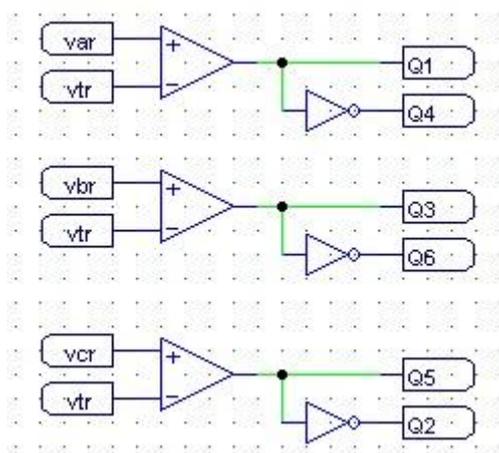
Tabela 3.4 – Sequência de chaveamento de transistores no inversor trifásico

Transistor Superior	Transistor Inferior
Q1	Q6
Q1	Q2
Q3	Q2
Q3	Q4
Q5	Q4
Q5	Q6

Fonte: Autor, 2016.

O esquema de chaveamento das fases adotado no circuito está representado na figura 3.9.

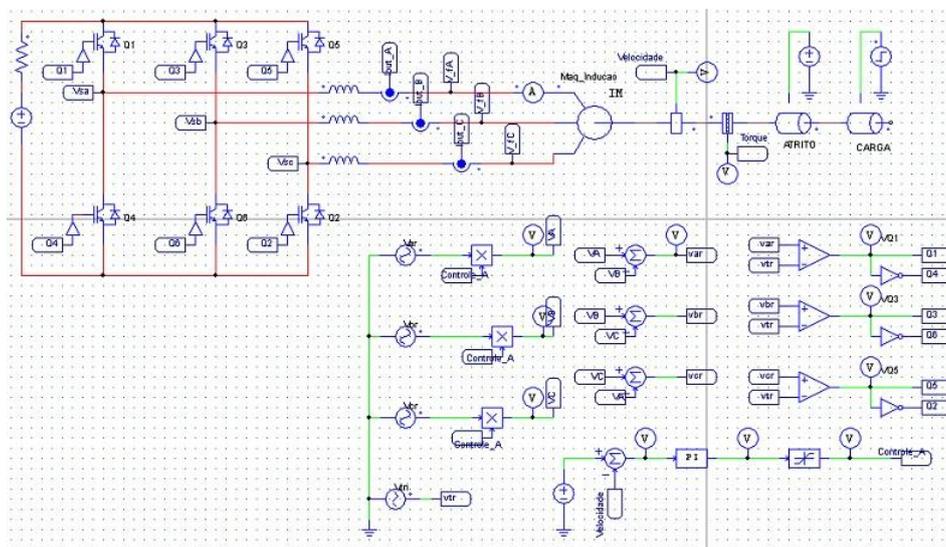
Figura 3.8 – Diagrama esquemático mostrando a ordenação de chaveamento de transistores no inversor trifásico.



Fonte: Autor, 2016.

O sistema projetado neste capítulo pode ser compreendido através do diagrama esquemático apresentado na figura 3.10.

Figura 3.9 – Diagrama esquemático do sistema Inversor de tensão acoplado à carga.



Fonte: Autor, 2016.

3.3 SIMULAÇÃO DO INVERSOR ACOPLADO AO MOTOR BOMBA E A CARGA

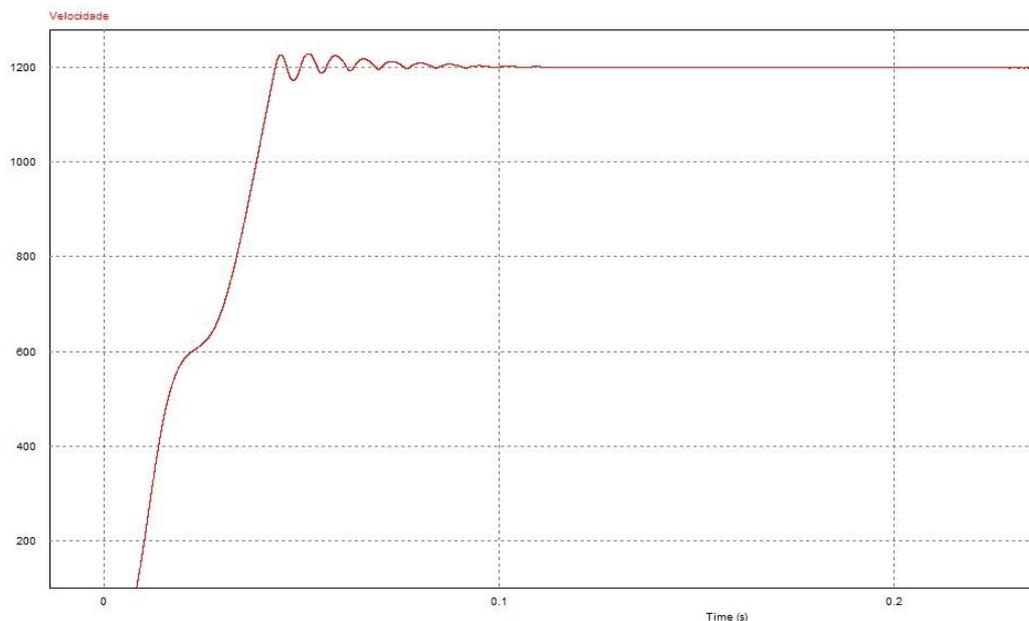
Nesta etapa é realizada a simulação computacional do circuito proposto, ou seja, inversor de tensão alimentando o motor bomba de indução e este acoplado à bomba, que é responsável pela operação de dessalinização propriamente dita. As condições de funcionamento do dessalinizador simuladas incluem:

- Partida em vazio (transitório)
- Alcance do regime permanente
- Inclusão de torque mecânico em degrau

As condições de simulação descritas acima buscam aproximar ao máximo o comportamento real. A operação de partida em vazio remete à aplicação de adicionar energia rotativa ao eixo do motor bomba de forma a garantir que a velocidade angular atinja 1200 rpm (rotações por minuto). A condição de regime permanente é obtida quando a velocidade do motor bomba chega a 1200 rpm, não sendo mais necessário adicionar energia para aumentar a velocidade angular. As demais especificações do motor utilizado neste trabalho encontram-se no catálogo WEG de motores elétricos de corrente alternada. Depois de atingido o comportamento de regime permanente é inserido um torque mecânico em degrau, que representa a conexão do motor bomba ao dessalinizador, que propiciará um freio mecânico no instante da união. A malha de controle será responsável por fazer com que a velocidade angular retorne àquela que foi adotada como referência. A inclusão de pequenos e gradativos torques mecânicos representa a condição de perda de rendimento da membrana responsável pelo processo de osmose reversa, até o ponto em que a operação torne-se inviável e seja aconselhada a manutenção ou reposição da membrana permeável.

Nas figura 3.11 e 3.12 é possível observar os gráficos dos comportamento da velocidade e do torque do motor bomba partindo em vazio e atingindo o comportamento de regime permanente. É possível inferir que o torque inicial é não nulo devido a necessidade de retirar o eixo da condição de inércia, e atinge um valor médio equivalente ao valor do torque mecânico das perdas rotacionais quando a velocidade nominal é alcançada.

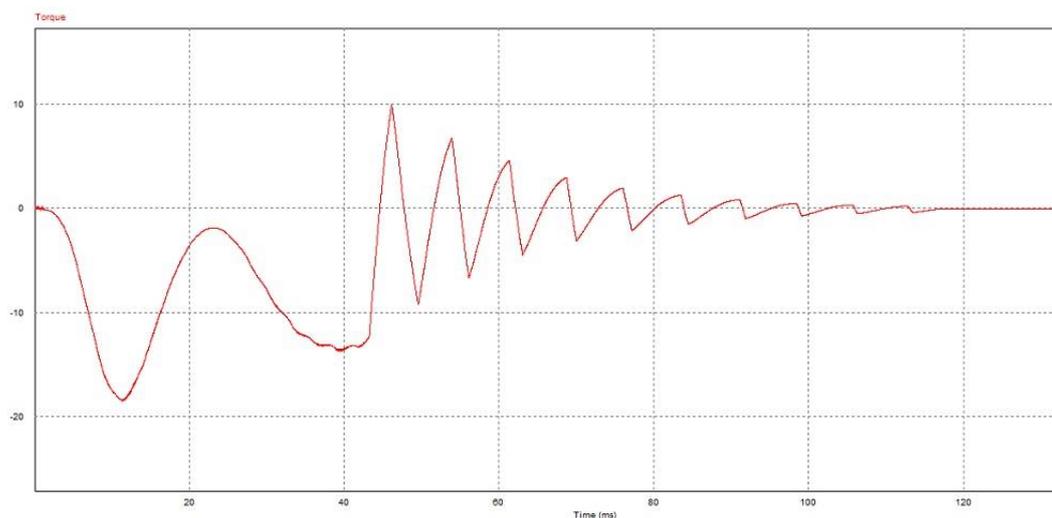
Figura 3.10 – Gráfico da Velocidade do sistema partindo em vazio e atingindo regime permanente.



Fonte:

Autor, 2016.

Figura 3.11 – Gráfico do torque do motor bomba com partida em vazio.

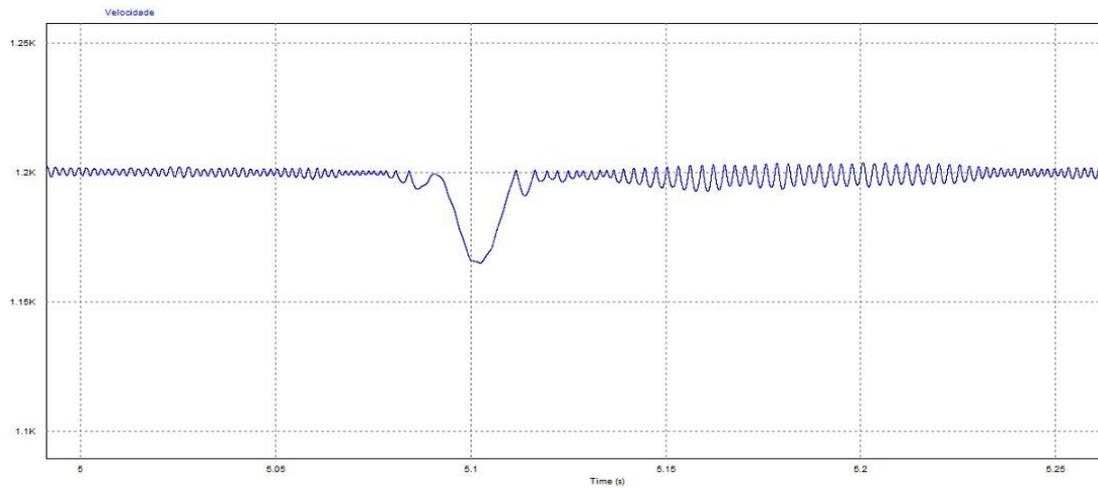


Fonte: Autor, 2016.

Nas figuras 3.13 e 3.14 são mostrados os gráficos do comportamento da velocidade e torque do motor bomba com a inserção de um torque mecânico em degrau na carga. Quando o torque mecânico é adicionado passa a existir uma componente média negativa no torque do motor bomba, esta componente que foi

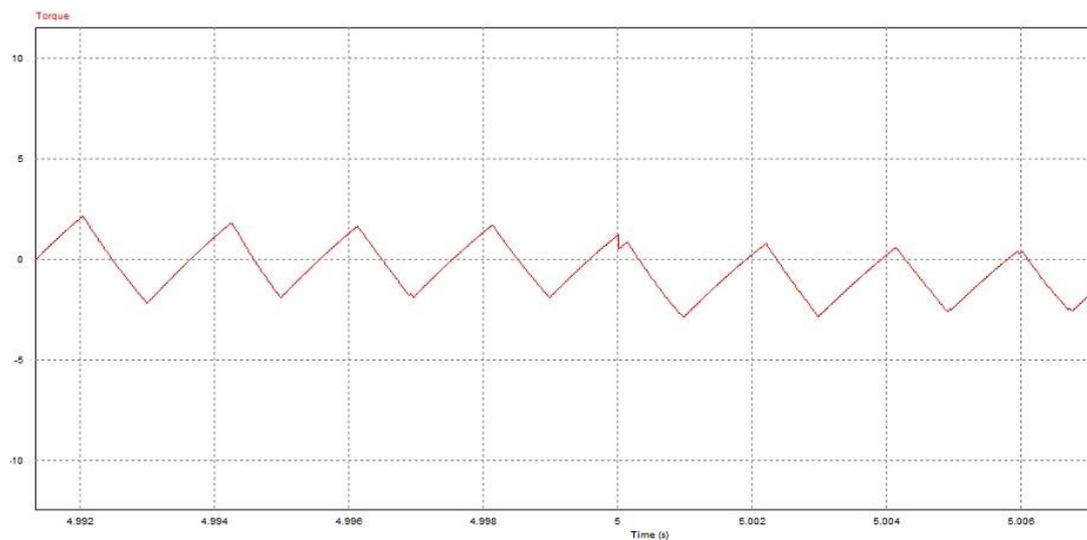
adicionada ao eixo do motor bomba é proporcional ao torque (que se opõe ao movimento).

Figura 3.12 – Gráfico da velocidade do motor bomba quando aplicado um torque mecânico em degrau.



Fonte: Autor, 2016.

Figura 3.13 – Gráfico do torque do motor bomba quando aplicado torque mecânico em degrau.



Fonte: Autor, 2016.

É possível verificar como o sistema sofre com o aumento de carga, diminuindo sua velocidade. Neste capítulo as simulações foram feitas considerando que a fonte de alimentação do inversor trifásico é uma fonte ideal. Desta forma o comportamento real difere, pois a potência é limitada pelos painéis fotovoltaicos. O sistema real será mais lento e mais frágil a variações abruptas de carga em seu eixo. O torque existente no início da simulação é referente à energia necessária para aumentar a velocidade de forma a atingir a rotação nominal de 1200 rpm.

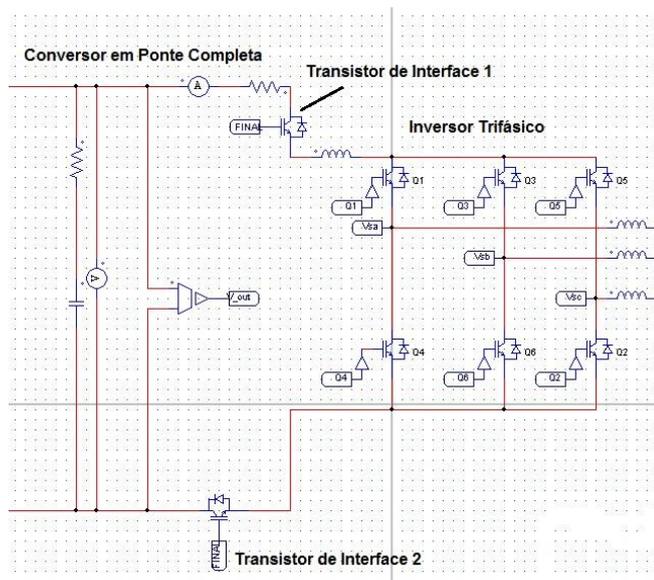
4. UNIÃO DOS SISTEMAS DE ELEVAÇÃO DE TENSÃO, INVERSÃO DE TENSÃO E MOTOR BOMBA

Até este ponto foram simulados todos os subsistemas separadamente, sem a consideração da perturbação que um faz ao outro. Neste capítulo será feita a união do conversor elevador em ponte completa com o inversor que está acoplado ao motor bomba de indução. Com isso será possível observar o comportamento de todo o sistema em operação.

4.1 OPERAÇÃO COMPLETA COM E SEM CARGA

Nesta seção é feita a integração do sistema de elevação de tensão por meio do conversor em ponte completa com o sistema inversor de tensão acoplado à bomba dessalinizadora. Com a união dos sistemas que foram previamente projetados individualmente, foram necessárias algumas adaptações para que o comportamento desejado fosse mantido como requisitado no projeto. A interface entre elevação de tensão pelo conversor em ponte completa e a inversão de tensão do inversor trifásico, foi realizada depois de alcançada a tensão nominal de 200V no barramento de saída do conversor em ponte completa. A carga resistiva anteriormente posicionada na saída do conversor em ponte completa foi substituída por um capacitor de 1 mF a fim de manter a tensão de saída estável. Após a estabilização desta, em 0,2 s, foi feita a ligação elétrica, através da comutação de dois transistores IGBT's (posicionados entre o conversor em ponte completa e inversor trifásico) para o estado ligado. Esta abordagem foi realizada devido ao comportamento instável dos controladores durante o regime transitório do conversor em ponte completa, quando foi atingida a tensão nominal de 200V no barramento de saída. Este diagrama esquemático pode ser visto na figura 4.1.

Figura 4.1- Diagrama esquemático de interface entre elevação de tensão e inversão de tensão.



Fonte: Autor, 2016.

Foi preciso realizar uma nova sintonia dos controladores do conversor em ponte completa que foram dimensionados no capítulo 2, devido à nova dinâmica a qual os mesmos foram submetidos. Os valores de sintonia obtidos encontram-se na tabela 4.1.

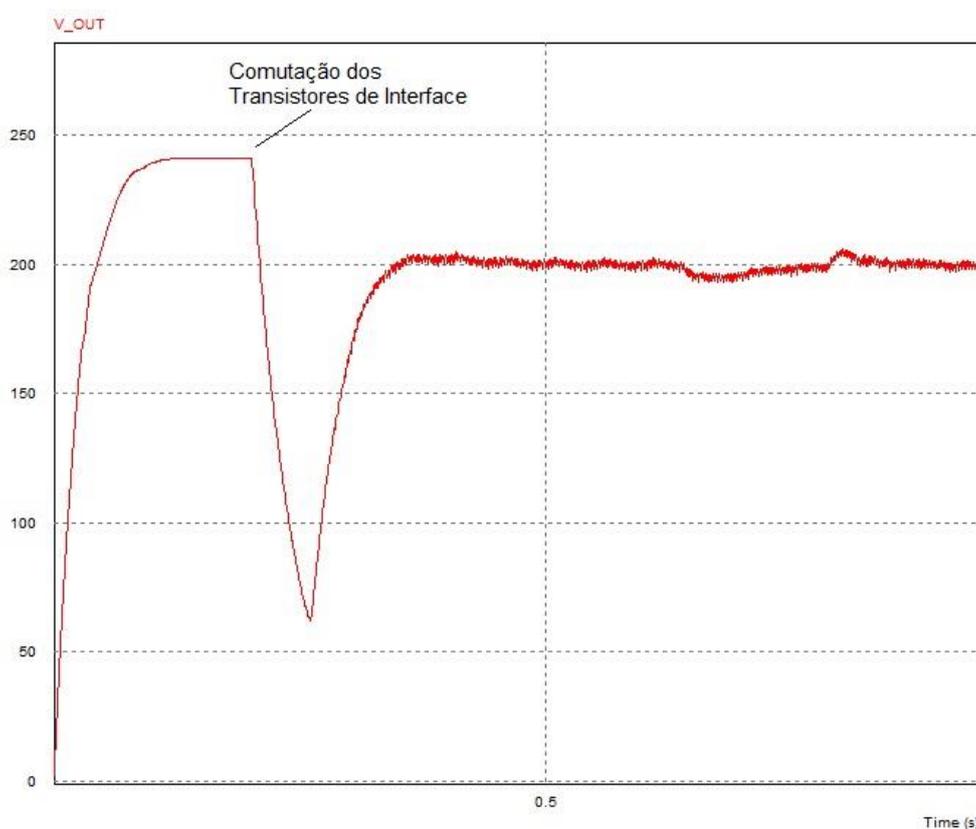
Tabela 4.1 – Novos parâmetros de controle do conversor em ponte completa

PI - TENSÃO	
K _{pi}	0,06
T _i	0,07
PI - CORRENTE	
K _{pi}	0,07
T _i	0,0125
GANHO K	
K	1

Fonte: Autor, 2016.

O gráfico de tensão no barramento de saída do conversor em ponte completa apresentou o comportamento descrito conforme a figura 4.2.

Figura 4.2 – Gráfico de tensão de saída do conversor em ponte completa quando feita a conexão ao inversor trifásico.



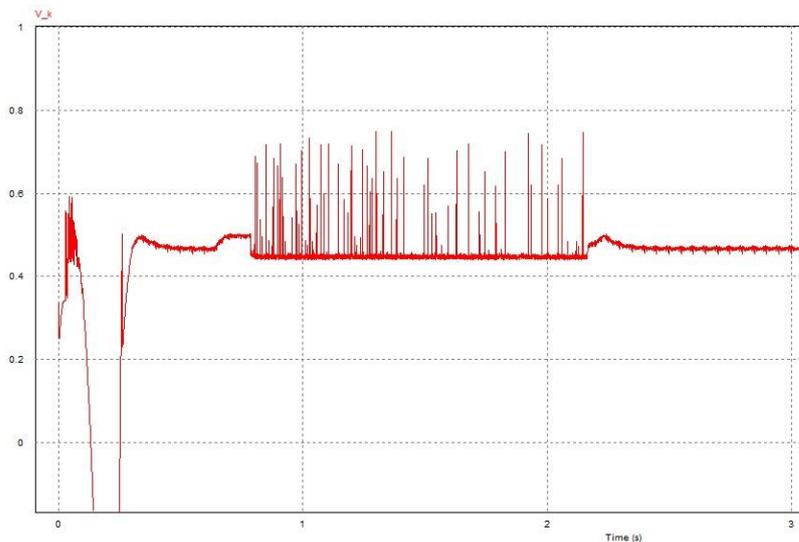
Fonte: Autor, 2016.

É possível observar que após a conexão de todo o sistema ser realizada em 0,2 s, a tensão no barramento de saída do conversor em ponte completa oscila, mas devido a ação de controle, consegue alcançar o valor nominal de 200 V em 0,4 s.

A ação de controle obtida pela malha de controle, que coordena o ciclo de trabalho imposta aos dois transistores do conversor em ponte completa é demonstrada na figura 4.3. É importante destacar que, no momento do chaveamento dos transistores de interface existe uma variação brusca da ação de controle, que retorna a um comportamento aceitável somente 2 segundos depois de

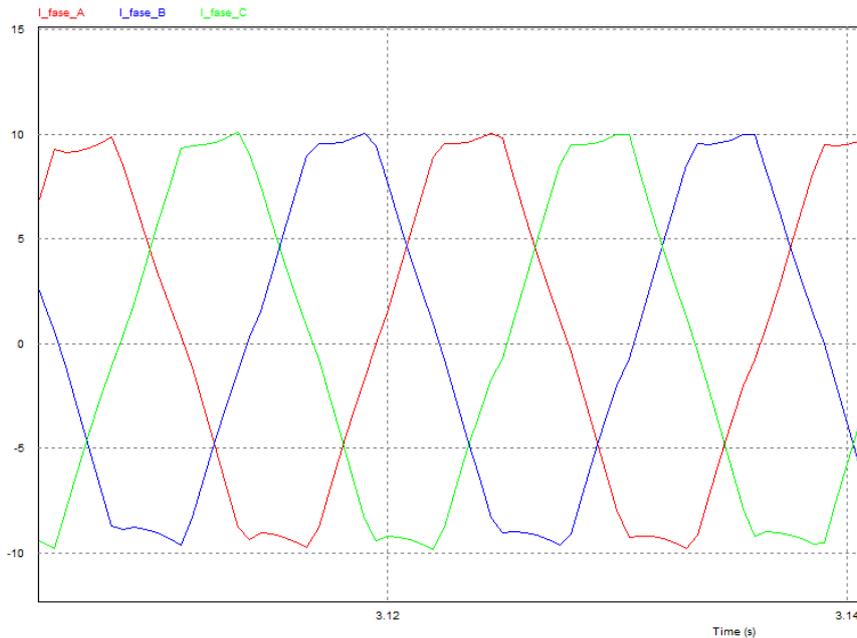
realizado o chaveamento. A ação de controle manteve-se estável após a oscilação no valor de 0,43, próxima ao regime crítico aceitável para o conversor em ponte completa.

Figura 4.3 – Gráfico representando a ação de controle dos transistores no conversor em ponte completa, depois de feita a união ao inversor trifásico.



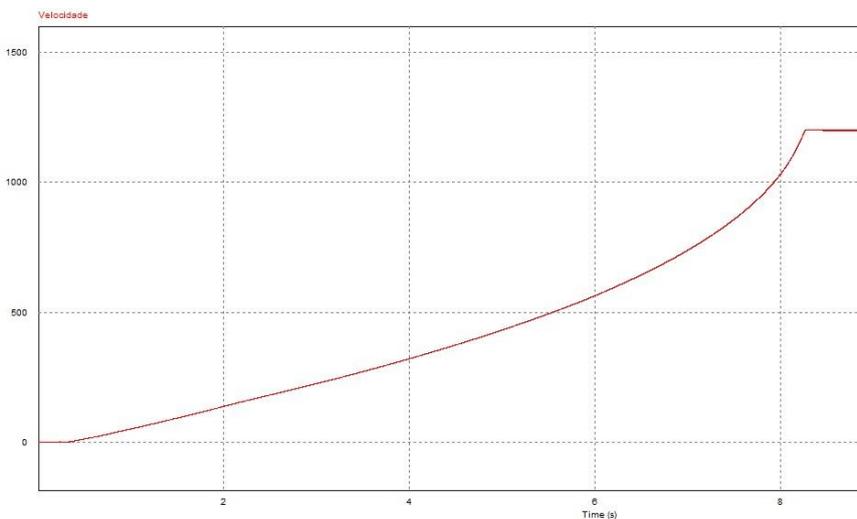
Fonte: Autor, 2016.

No inversor trifásico as correntes que fluíam através das fases A, B e C para alimentar o motor bomba de indução, visto pelo lado CC depois de alcançado o regime permanente são mostradas na figura 4.4.

Figura 4.4 – Gráfico das correntes nas fases A, B e C do inversor trifásico.

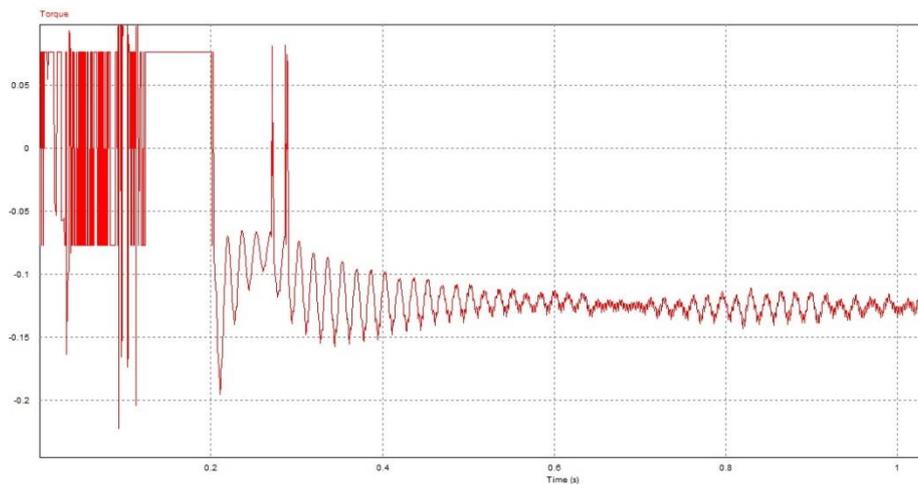
Fonte: Autor, 2016.

São importantes para a análise do seu funcionamento, no motor bomba de indução os valores de velocidade e de torque, em que estava operando na simulação. Estas grandezas são expostas nas figuras 4.5 e 4.6.

Figura 4.5 – Gráfico da velocidade do motor bomba de indução no sistema completo.

Fonte: Autor, 2016.

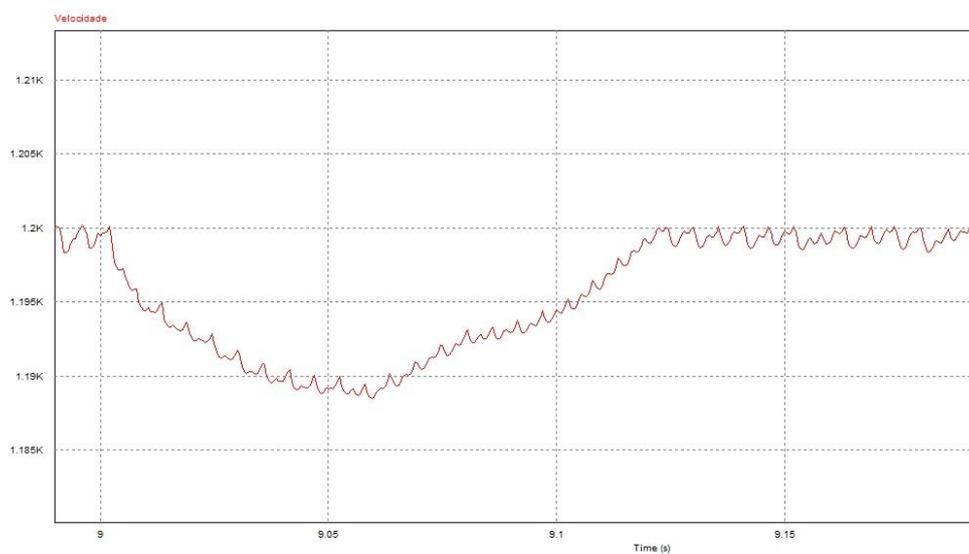
Figura 4.6 – Gráfico do torque no motor bomba após a conexão ao conversor elevador.



Fonte: Autor, 2016.

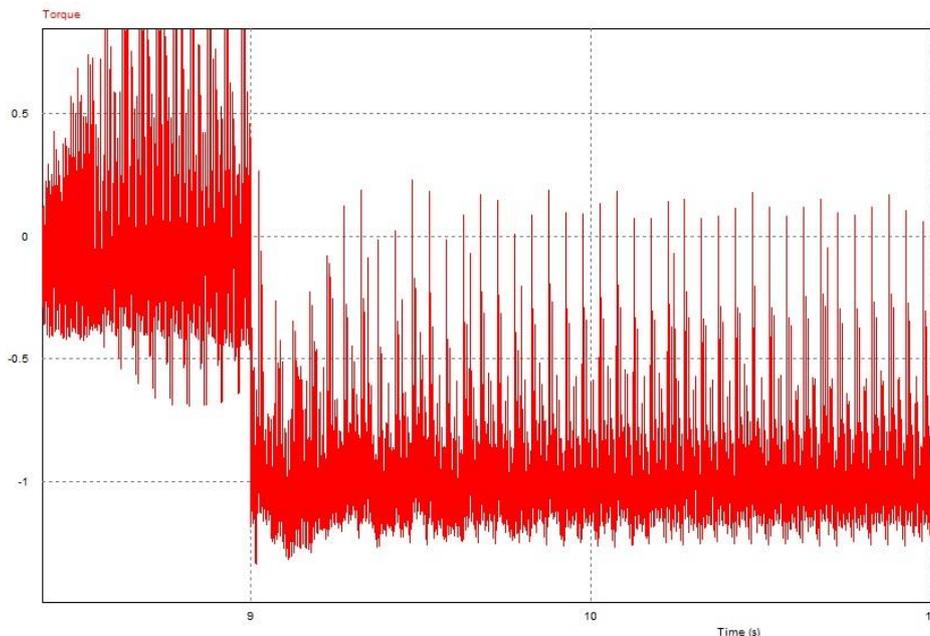
Nas figuras 4.8 e 4.9 são apresentados os gráficos da velocidade e de torque do motor bomba quando é adicionada uma carga mecânica em degrau ao eixo do motor bomba. A carga adicionada de $0,95 \text{ N}\cdot\text{m}$, é adicionada após o sistema alcançar o regime permanente, depois de feita a conexão com o conversor elevador.

Figura 4.7 – Gráfico da velocidade do motor bomba após a inclusão de carga mecânica.



Fonte: Autor, 2016.

Figura 4.8 – Gráfico do torque do motor bomba após a inclusão de carga mecânica.



Fonte: Autor, 2016.

A velocidade sofre uma queda após o momento em que a carga mecânica é imposta ao motor bomba, mas consegue retornar ao valor nominal com uma oscilação maior do que quando não havia carga mecânica. O torque no motor bomba possuía média nula antes de inserção da carga mecânica em 9 segundos. Depois que a carga foi inserida, o motor bomba desempenhou um torque constante proporcional ao valor do torque contrário ao movimento que a carga mecânica impôs ao sistema.

É possível observar que as condições de operação do dessalinizador afetam diretamente todo o sistema de potência e de controle para o fornecimento de energia elétrica ao dessalinizador. Se as condições de funcionamento tornarem-se severas ou suficientes, o funcionamento correto do sistema dessalinizador será comprometido.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Neste capítulo são feitas considerações finais sobre o projeto. São discutidas questões relevantes. Também são abordados temas de futuros trabalhos que podem contribuir com este projeto.

5.1 CONCLUSÕES

As motivações pelas quais este trabalho se faz presente são válidas. A utilização de energias alternativas para solucionar um problema grave que é a disponibilidade de água de qualidade em comunidades do semiárido nordestino que estão afastadas dos centros urbanos. Em algumas comunidades a água até existe, porém está armazenada em reservatórios subterrâneos, sendo salobra e, portanto, imprópria para o consumo humano. No oriente médio, a disponibilidade de água potável também é um problema. Para isso são utilizados sistemas de dessalinização de água, porém a água utilizada no processo é oriunda do mar diferentemente do que é proposto neste trabalho.

Este trabalho faz uma análise comparativa entre dois tipos diferentes de conversores elevadores o *boost* e ponte completa. O ciclo de trabalho que foi obtida no conversor *boost*, de aproximadamente 0,9, é demasiadamente alta, tornando-o inviável para esta aplicação. O conversor em ponte completa apesar de apresentar menor rendimento em comparação com o *boost* opera com um ciclo de trabalho de 0,43 em cada transistor, fazendo com que sua operação seja mais segura.

Os sistemas de controle projetados para gerenciar o ciclo de trabalho nos conversores elevadores, obtiveram rápida resposta e alcançaram o regime permanente com pequeno erro associado, considerado desprezível. As variações de tensões de entrada nos conversores elevadores, pelo descarregamento das baterias, decorrentes da baixa incidência de irradiação solar, serviram para demonstrar que é necessário manter o controle da tensão no barramento de saída, tornando possível minimizar as oscilações que comprometam o correto funcionamento da bomba dessalinizadora.

O inversor trifásico projetado neste trabalho operou conforme o esperado, quando foi submetido a diferentes razões de trabalhos de chaveamento em seus transistores. Nas simulações, as cargas às quais a bomba dessalinizadora foi acoplada, visaram aproximar ao máximo as condições reais a que esta é submetida.

A interface entre o sistema de elevação de tensão e o sistema de inversão de tensão foi de suma importância, pois sem a mesma o comportamento transitório de um sistema repercutia em um comportamento instável no outro e vice-versa. Desta forma, primeiro foi feita a estabilização de tensão de saída no conversor elevador, para somente depois, realizar a conexão elétrica com o sistema inversor de tensão. Foi preciso inserir um indutor de 50 mH no barramento de interface para limitar a corrente drenada pelo inversor no momento da conexão, e para que a tensão no capacitor se mantenha estável durante a conexão.

Depois de realizada a interface, quando os dois sistemas foram interligados, verificou-se um aumento gradativo da velocidade angular do motor bomba de indução, até que fosse atingida a velocidade nominal de 1200 rpm. Desta forma foi possível superar o torque mecânico adicionado ao eixo em decorrência de perdas rotacionais. O torque em degrau de maior magnitude adicionado ao eixo do motor bomba provocou uma diminuição da velocidade. Porém a ação da malha de controle do inversor trifásico, elevou a velocidade do motor ao valor nominal de 1200 rpm.

Para que este sistema funcione corretamente é preciso que duas variáveis externas, tensão dos painéis solares e carga resistiva da membrana na bomba estejam dentro de uma faixa aceitável. Como o sistema destina-se ao uso em regiões semiáridas, a incidência de sol durante boa parte do dia é praticamente constante, não sendo um grande problema no fornecimento de energia para os painéis solares. Em relação à membrana responsável pelo processo de osmose reversa, é preciso que se monitore sua condição de funcionamento. A manutenção desta é de vital importância para o correto funcionamento do sistema de dessalinização.

5.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho foram observadas algumas abordagens que podem ser exploradas para a melhoria do projeto, são elas:

- **Otimizar os valores dos controladores**

Nos controladores PI utilizados nos circuitos, para otimizar os valores de K_{pi} e de T_i , de modo a garantir uma resposta do sistema mais eficiente.

- **Projetar outros sistemas de controle**

Utilizar outras plataformas computacionais para implementar estratégias diferentes de controle, como por exemplo controle vetorial para o acionamento do motor de indução. Realizar um comparativo com o controle escalar utilizado neste trabalho.

- **Considerar os efeitos das condições climáticas sobre as fontes de energia alternativas**

Com isso será possível obter um projeto ainda mais próximo do modelo real.

- **Utilização na malha de controle da vazão e pressão na membrana do dessalinizador**

Entre a entrada e saída no sistema de filtração, é necessário garantir que o fluxo e que a vazão sejam constantes, para que a qualidade da água filtrada não seja comprometida. Neste projeto limitou-se a realizar o controle através da velocidade do motor bomba de indução. Nos futuros trabalhos deve-se evoluir para o controle da pressão e vazão na membrana de filtração.

- **Testes experimentais**

Implementação física dos sistemas projetados e análise de comportamento obtido em comparação com o comportamento previsto em simulação computacional. Análise da perda de carga real devido a perda de rendimento da membrana.

- **Estudo de Impacto Ambiental e Social**

Estudar os possíveis impactos ambientais oriundos do resíduo do processo de osmose reversa, sobre qual o destino mais adequado para a água rica em minerais e impurezas. Aspecto legal desta atividade, e impacto social que pode ser observado na população que dispõe deste sistema.

REFERÊNCIAS

- [1] Atlas Energia Eólica. Disponível em <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica%283%29.pdf>. Acesso em 25 de abril de 2016.
- [2] MOHAN, N. **Eletrônica de Potência Curso Introdutório**. 1ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- [3] MENEGHETTI, F. **Sistemas de Controle**. Natal, 2007. Apostila.
- [4] VILLALVA, M. **Energia Solar Fotovoltaica Conceitos e Aplicações**. 2ª Edição. São Paulo: Érica, 2015.
- [5] ALDABÓ, R. **Energia Solar**. 1ª Edição. São Paulo: Artliber, 2002.
- [6] Portal Energia. Disponível em <<http://www.portal-energia.com/downloads/energia-eolica-principios-tecnologias.pdf>>. Acesso em 26 de maio de 2016.
- [7] Atlas Energia Eólica. Disponível em <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica%283%29.pdf>. Acesso em 27 de maio de 2016.
- [8] Silva, P. V., 2015. **Regulador Eletromagnético de Frequência Aplicado no Controle de Velocidade de Geradores Eólicos**. 101 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Elétrica e Engenharia de Computação) - PPGEEC, UFRN, Natal.
- [9] Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar%283%29.pdf. Acesso em 22 de março de 2016.
- [10] SOUZA, Frankelene Pinheiro de. **Integração de sistema fotovoltaico à alimentação do REF para controle de bombeamento em sistemas de dessalinização**. 2015. 33f. Monografia (Curso de Engenharia Elétrica)- Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2015.

- [11] HART, D. **Eletrônica de Potência**. 1ª Edição. Porto Alegre: Bookman, 2012. 221 p.
- [12] Escola da Vida. Disponível em http://www.escoladavida.eng.br/mecfluquimica/planejamento_12009/Inversores_de_Frequencia.pdf. Acesso em 11 de maio de 2016.
- [13] Eletronic Electricity Softwares. Disponível em http://www.corradi.junior.nom.br/eli_2011_apo.pdf>. Acesso em 12 de maio de 2016.
- [14] FARIA, Julliano Henrique Santos de. **Conversor CC-CC elevador de tensão full-bridge para aplicações em célula a combustível**. 2012. 42f. Dissertação (Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica)-Núcleo de pesquisas em eletrônica de potência. Universidade Federal de Uberlândia, 2012.
- [15] Kimpara, M. **Controle do Motor de Indução**. Campo Grande, 2014. Apostila.
- [16] WEG. **Motores Elétricos de Corrente Alternada**. Santa Catarina, 2012. Apostila.
- [17] Instituto Newton C. Braga. Disponível em < <http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/artigos/67-historia-da-eletronica/407-a-historia-do-transistor.html>>. Acesso em 25 de abril de 2016.

Apêndice A

Sistema Completo

