



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Colegiado do Curso de Engenharia de Elétrica



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**PROJETO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA
E ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

MADSON QUINTÃO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

JOÃO MONLEVADE

2017



MADSON MAURÍCIUS GONÇALVES QUINTÃO

**PROJETO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA
E ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Renan Fernandes Bastos

Universidade Federal de Ouro Preto

João Monlevade-MG

Junho de 2017



ATA DE DEFESA

Aos 02 dias do mês de junho de 2017, às 13 horas, no bloco E deste instituto, foi realizada a defesa de monografia pelo aluno **Madson Maurícus Gonçalves Quintão**, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Renan Fernandes Bastos (orientador), Victor Costa da Silva Campos (membro), Felipe Eduardo Moreira Cota (membro). O candidato apresentou a monografia intitulada: **Projeto de um Sistema de Geração Fotovoltaica e Análise de Eficiência Energética**. A comissão examinadora deliberou, por unanimidade, pela Aprovação do candidato, com a nota média 6,3, de acordo com a Tabela 1. Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da comissão examinadora e pela aluno.

Tabela 1 – Notas de avaliação da banca examinadora

Banca Examinadora	Nota
Felipe Eduardo Moreira Cota	6,0
Victor Costa da Silva Campos	6,0
Renan Fernandes Bastos	6,9
Média	

João Monlevade, 02 de junho de 2017.

Professor Orientador

Aluno

Professor Convidado

Professor Convidado



ANEXO X - TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado “**PROJETO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA E ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**” é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 13 de Julho de 2017


Nome completo do aluno

Q79p

Quintão, Madson Maurícus Gonçalves.

Projeto de um sistema de geração fotovoltaica e análise de eficiência energética [manuscrito] / Madson Maurícus Gonçalves Quintão. - 2017.

51f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Renan Fernandes Bastos.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Engenharia Elétrica. 2. Sistemas de energia fotovoltaica. 3. Controle de processos. 4. Geração de energia fotovoltaica. 5. Energia - fontes alternativas. I. Bastos, Renan Fernandes. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 621.31

Catálogo: ficha@sisbin.ufop.br

Dedicatória

Este trabalho é dedicado à minha família, aos meus amigos. Agradeço todas as dificuldades que enfrentei; não fosse por elas, eu não teria saído do lugar. As facilidades nos impedem de caminhar. Mesmo as críticas nos auxiliam muito.

Epígrafe

Lembremo-nos de que o homem interior se renova sempre. A luta enriquece-o de experiência, a dor aprimora-lhe as emoções e o sacrifício tempera-lhe o caráter. O Espírito encarnado sofre constantes transformações por fora, a fim de acrisolar-se e engrandecer-se por dentro.

Chico Xavier

Resumo

Palavras-chave: Eficiência Energética, Sistemas Fotovoltaicos, Controle, Geração de energia.

Considerando o aumento significativo de crises no sistema de abastecimento dos reservatórios das hidroelétricas, vê-se cada vez mais como necessidade o estudo de eficiência de fontes alternativas para a geração de energia elétrica. Nesse contexto, é desenvolvido uma análise para otimização da geração de energia de um sistema fotovoltaico autônomo para uma empresa de pequeno porte. São apresentados os princípios de funcionamento de módulos fotovoltaicos, a dinâmica necessária para projetar os arranjos, a modelagem de um painel fotovoltaico, o módulo de simulação de diferentes arranjos fotovoltaicos auxiliados pelos softwares *PSIM* e *MATLAB*. Um sistema de controle também foi desenvolvido, com o objetivo de manter todas as topologias em seu ponto ótimo, ou seja, a análise de rendimento é feita sobre a consideração de que o sistema está sempre gerando seu máximo de energia. De maneira geral é realizado uma análise da potência de entrada em razão a potência de saída e as perdas sofridas por componentes em seu processo natural na geração de energia elétrica.

Abstract

Keywords: Energy Efficiency, Photovoltaic Systems, Control, Power Generation.

Considering the significant increase of crises in the system of supply of hydroelectric reservoirs, it is increasingly necessary to study the efficiency of alternative sources for the generation of electric energy. In this context, an analysis is developed to optimize the power generation of an autonomous photovoltaic system for a small company. The principles of operation of photovoltaic modules, the dynamics necessary to design the arrangements, the modeling of a photovoltaic panel, the simulation module of different photovoltaic arrangements supported by the PSIM and MATLAB software are presented. A control system has also been developed with the aim of keeping all topologies at their optimal point, ie, the performance analysis is done on the consideration that the system is always generating its maximum energy. In general, an analysis of the input power is made based on the output power and the losses suffered by components in their natural process in the generation of electric energy.

Lista de Figuras

Figura 1: Evolução do consumo de eletricidade – TWh e da potência instalada – GW. Fonte: (MME, 2005).....	12
Figura 2: Índice de Radiação Solar no Brasil Fonte: (ATLAS Solarimétrico do Brasil Recife, 2000.).....	16
Figura 3: Bandas de Valência, banda proibida e banda de condução. Elaborado pelo autor.	18
Figura 4: Ilustrativo de um sistema Fotovoltaico. Elaborado pelo autor.....	20
Figura 5: Sistema solar interligado a rede. Fonte: (REMES, 2013) ADAPTADO.	20
Figura 6: Modelo simplificado de uma célula solar (REMES, 2013).....	21
Figura 7: Influência da Radiação Solar e Temperatura em painéis fotovoltaicos. Fonte (PINHO; GALDINO, 2014).....	22
Figura 8: Componentes da Radiação Solar. Elaborado pelo autor.....	23
Figura 9: a) Variação MPPT em função da radiação b) temperatura Fonte (PINHO; GALDINO, 2014).....	24
Figura 10: Histórico de consumo da empresa. Elaborado pelo autor.....	25
Figura 11: Topologias dos Arranjos Fotovoltaicos. Elaborado pelo autor.	27
Figura 12: Painéis em um arranjo série/paralelo. Elaborado pelo autor.....	28
Figura 13: Conversor Boost (BARBI, 2001)	30
Figura 14: Conversor Buck (BARBI, 2001).....	30
Figura 15: a) Circuito de Controle da Tensão Circuito linearizado Fonte (BASTOS, 2013). Adaptado.	31
Figura 16: Modelo dos Conversores acoplados ao painel linearizado. Elaborado pelo autor.	32
Figura 17: Conversor Boost chave Fechada e Chave aberta. Elaborado pelo autor.	33
Figura 18: Conversor Buck chave Fechada e Chave aberta. Elaborado pelo autor.	34
Figura 19: Diagrama de Bloco PI. Elaborado pelo autor.	40
Figura 20: Ferramenta <i>sisotool</i> extraída do Software <i>Matlab</i> . Elaborado pelo autor.....	41
Figura 21: Variação da Referência em Rampa. Elaborado pelo autor.	42
Figura 22: Variação da Referência em Degrau. Elaborado pelo autor.....	43
Figura 23: Montagem do Circuito no PSIM. Elaborado pelo autor.....	43
Figura 24: Seleção dos dados de entrada do Arranjo Fotovoltaico. Elaborado pelo autor.	44

Figura 25: Algoritmo para abertura da chave. Elaborado pelo autor.	45
Figura 26: Diagrama do cálculo do rendimento no PSIM através dos sensores de medição. Elaborado pelo autor.	45

Lista de Tabelas

Tabela 1: A participação percentual dos tipos de centrais na capacidade instalada (MW). Fonte: (ANEEL, 2015).	14
Tabela 2: Evolução das Células fotovoltaicas (REMES, 2013). Adaptado.....	19
Tabela 3: Valores do Painel Fotovoltaico. Elaborado pelo autor.	25
Tabela 4: Fórmulas do indutor e capacitor conversores Boost e Buck. Elaborado pelo autor.	37
Tabela 5: Valores calculados dos conversores. Arranjos 1, 2, 3, 4 e 5. Elaborado pelo autor.	38
Tabela 6: Valores calculados dos conversores. Arranjos 6, 7, 8 e 9. Elaborado pelo autor.	39
Tabela 7: Ganhos das topologias. Elaborado pelo autor.....	42
Tabela 8: Rendimento das Topologias. Elaborado pelo autor.	46

Sumário

1.1. Disponibilidade de recursos Hídricos e Geração de Energia	12
1.2. Termoelétricas.....	14
1.3. Custos e consequências associados ao uso das termoelétricas.....	15
1.4. Potencialidade da Energia Solar no Brasil	15
2.1. Introdução	18
2.2. Fundamentos de conversão de energia solar em elétrica.	18
2.2.1. Materiais Utilizados na construção de Células Fotovoltaicas	19
2.3. Tipos de Sistemas Fotovoltaicos.....	19
2.4. Modelos Matemáticos da Célula Fotovoltaica	21
2.5. Condições padrão de teste	22
2.6. Aumento da eficiência em sistemas Fotovoltaicos	23
2.7 Dimensionamento de um sistema Fotovoltaico.	24
2.8 Introdução a análise de rendimento e conversores.....	26
3.1. Introdução	29
3.2 Conversores CC-CC	29
3.2.1 Funcionamento do conversor Boost - Elevador de Tensão.	29
3.2.2 Funcionamento do conversor Buck – Abaixador de tensão.....	30
3.3. Modelo Linearizado dos conversores acoplados ao Painel.....	31
3.4 Conversores Boost e Buck acoplados ao Painel Linearizado.....	32
3.4.1 Modelagem do Conversor Boost acoplado ao modelo do painel linearizado	32
3.4.2 Modelagem do Conversor Buck acoplado ao modelo do painel linearizado.....	34
3.5 Linearização do estágio de potência usando valores médios das variáveis de estado.....	34
3.5 Cálculo dos elementos passivos.	37
4.1. Introdução	40
4.2. Controlador aplicado ao controle da tensão terminal do painel.	40
4.3. Consolidação do PI	42
4.4. Análise de Rendimento.....	43
5. Análise dos resultados	47
Bibliografia.....	49
Anexos. Parte da Conta de luz da Empresa de Pequeno porte.....	51

Lista de Siglas e Abreviaturas

AM- *Air Mass*

ANEEL- Agência Nacional de Energia Elétrica

CA- Corrente Alternada

CC-CC – Conversor de Corrente Contínua para Corrente Contínua

CC-CA – Conversor de Corrente Contínua para Corrente Alternada

EPE- Empresa de Pesquisa Energética

EPIA- *European Photovoltaic Industry Association*

FV- Fotovoltaico

IPEA- Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

MMA- Ministério do Meio Ambiente

MME- Ministério de Minas e Energia

MCC- Modo de Condução Contínua

MPPT- *Maximum Power Point Tracking*

PI- Proporcional Integral

PMP- Ponto da Máxima Potência

ONS- Operador Nacional de Sistemas

SIN- Sistema Interligado Nacional

STC- *Standart Test Conditions*

Introdução

1.1. Disponibilidade de recursos Hídricos e Geração de Energia

O Brasil detém aproximadamente 12% da água doce superficial disponível no planeta e 28% da disponibilidade nas Américas. Segundo a ANA (Agencia Nacional das Águas) o país possui em seu território a maior reserva de água doce subterrânea, o Aquífero Guarani, com 1,2 milhões de quilômetros quadrados. A abundância de recursos hídricos disponível em território nacional faz com que o potencial hidroelétrico brasileiro represente uma vantagem se comparado com matrizes energéticas de outros países, que utilizam como fornecedor principal usinas nucleares ou usinas a base de combustíveis fósseis para a geração de energia elétrica.

Atualmente grande parte das hidrelétricas possuem nível de água menor que em 2001, período de forte estiagem e conseqüente racionamento de energia como observado na Figura-1 pela queda relativa no consumo de energia em todos os segmentos.

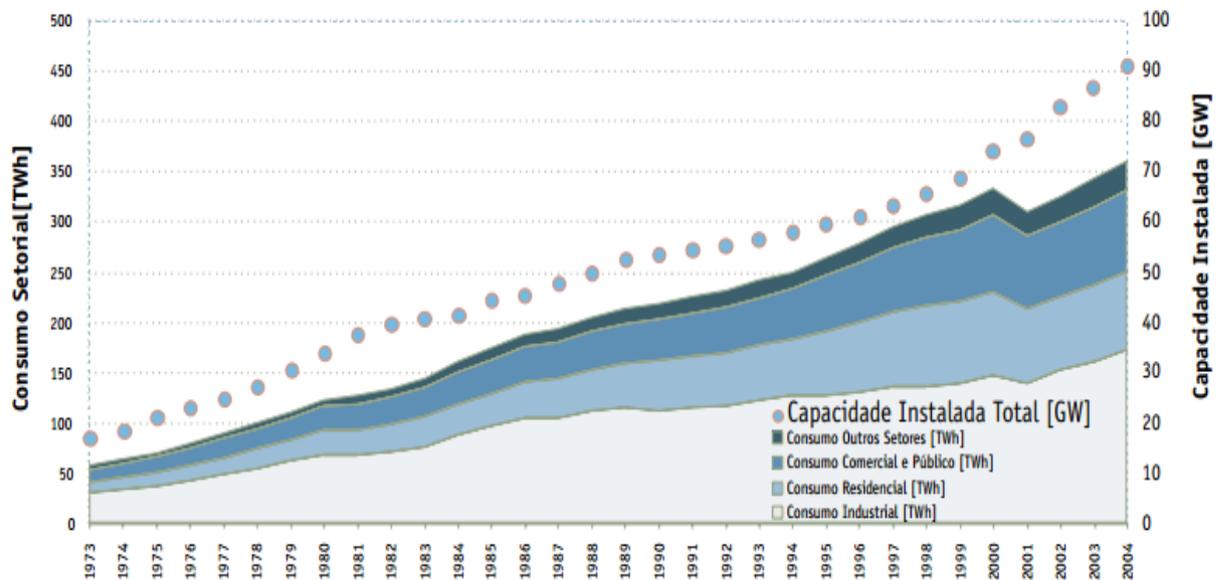


Figura 1: Evolução do consumo de eletricidade – TWh e da potência instalada – GW. Fonte: (MME, 2005).

O consumo de eletricidade aumenta em todos os setores e em contrapartida a este cenário cresce uma das maiores crises no sistema de abastecimento dos reservatórios das hidroelétricas.

Quando as hidroelétricas não conseguem sustentar a matriz, são auxiliadas por usinas termoelétricas e a estiagem tem obrigado o sistema elétrico a ficar cada vez mais dependente deste tipo de geração de energia. Afonso Henrique Moreira Santos, ex-secretário nacional de Energia na época do racionamento de 2001, faz um comparativo da época do apagão com a atualidade (MADEIRO, 2015):

“- A crise hídrica atual é bem mais intensa que a da década passada. Do ponto de vista de reservatórios a situação é muito pior. Aliás, já era pior desde o ano passado. As termoelétricas já estão operando de forma praticamente plena desde o final de 2013. Os apagões só não ocorreram por conta da construção de termoelétricas na década anterior. O país deveria ter adotado medidas que dessem maior eficiência energética e ao mesmo tempo, reduzissem o consumo. Assim, teria evitado que os reservatórios chegassem a níveis tão críticos. Não só o país opera errado seus reservatórios, mas errou ao não decretar racionamento ou fazer algo para reduzir o consumo. Tem um rombo hoje de R\$ 60 bilhões pelo uso das termoelétricas para o consumidor pagar.”

Quanto maior for o uso de energia gerada pelas usinas termoelétricas, maior será o custo da geração. Fato que tem feito o consumidor pagar mais caro.

Em janeiro de 2015 o governo brasileiro fez a implantação do sistema de bandeiras tarifárias para quatro subsistemas do SIN (Sistema Interligado Nacional).

As bandeiras têm como objetivo, funcionar de alerta com as cores verde, amarela e vermelha indicando o custo da geração de energia no país.

Um exemplo desta aplicação seria um mês com poucas chuvas e conseqüente nível baixo dos reservatórios das hidroelétricas, tendo como conseqüência direta um maior uso das termoelétricas. Neste caso adota-se a bandeira vermelha e é cobrada uma tarifa adicional ao consumidor. A conta de luz com a bandeira verde significa que o custo de geração de energia não teve dependência significativa das termoelétricas e por conseqüência o consumidor não será punido com acréscimos. A bandeira amarela tem o objetivo de deixar a população em alerta, pois os custos da geração aumentaram e haverá um acréscimo menor em relação à bandeira vermelha nas contas de energia.

Exceto nos estados do Amazonas, Amapá e Roraima a implantação da tarifação significa um acréscimo, para cada 100 quilowatts-hora nos meses tarifados, de R\$3,00 para bandeira vermelha e de R\$1,50 para bandeira amarela (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2015). O método de tarifação representa uma cobrança adicional na conta de luz pelo uso de energia de termoelétricas pelas distribuidoras. Em períodos de estiagem, quanto

mais as usinas termoelétricas emergenciais são acionadas mais cara fica a conta do consumidor.

1.2. Termoelétricas

O funcionamento de uma termoelétrica é definido como um processo dividido em três seguimentos. O primeiro consiste na queima de um combustível que na maioria das vezes é um combustível fóssil, como carvão, óleo ou gás transformando a água em vapor com o calor gerado nas caldeiras. A segunda etapa consiste na utilização deste vapor, em alta pressão, para girar a turbina, que por sua vez aciona um gerador elétrico. E na última etapa, o vapor é condensado, transferindo o resíduo de sua energia térmica para um circuito independente de refrigeração.

A potência mecânica é obtida pela passagem do vapor através da turbina. O gerador gira acoplado mecanicamente à turbina e transforma potência mecânica em potência elétrica (SISTEMAS FURNAS DE GERAÇÃO E TRANSMISSÃO, 2015).

As termoelétricas são responsáveis por aproximadamente 27% da geração de energia elétrica no Brasil. A participação percentual dos tipos de centrais na capacidade instalada (MW) para a geração de energia elétrica no Brasil é mostrada na Tabela 1.

EMPREENDIMENTOS EM OPERAÇÃO				
Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (KW)	Potência Fiscalizada (KW)	%
Central Geradora Hidrelétrica- CGH	496	324.546	326.443	0,24
Central Geradora Eólica -EOL	266	5.966.761	5.862.249	4,3
Pequena Central Hidrelétrica - PCH	477	4.827.148	4.797.722	3,52
Central Geradora Solar Fotovoltaica - UFV	317	19.179	15.179	0,01
Usina Hidroelétrica - UHE	201	87.308.965	84.778.838	62,22
Usina Termelétrica - UTE	2.404	39.969.759	38.476.340	28,24
Usina Termonuclear - UTN	2	1.990.000	1.990.000	1,46
Total	4.163	140.406.358	136.246.771	100

Tabela 1: A participação percentual dos tipos de centrais na capacidade instalada (MW). Fonte: (ANEEL, 2015).

1.3. Custos e consequências associados ao uso das termoeletricas

O preço da energia no mercado de curto prazo (determinado pelo PLD, Preço de Liquidação das Diferenças) do Sudeste, que em 2013 teve um valor médio de R\$294/MWh, em 2014 teve um aumento para R\$823/MWh. Este valor é muito superior ao preço médio de R\$400/MWh das usinas termoeletricas (sem contabilizar as nucleares) despachadas pelo ONS (Operador Nacional de Sistemas). Este alto valor impôs pesados impactos financeiros às distribuidoras que, além de serem contratantes de grande parte da geração termoeletrica, apresentaram em 2014 insuficiências nos contratos, precisando comprar mais energia em um curto prazo. Como está ocorrendo desde setembro de 2013, em ocasiões de estresse hidrológico, quando é necessário despachar intensamente térmicas caras, não há justificativa econômica para se fixar um preço de curto prazo para a energia muito superior ao custo médio de geração térmica (CASTRO; BRANDÃO, 2014).

A energia das termoeletricas tem maior custo de geração e fazem a emissão de gases do efeito estufa. Os danos causados pela emissão de poluentes gerados pela queima de combustíveis fósseis nas termoeletricas à saúde humana são os mais diversos. O Ministério do Meio Ambiente (MMA) cita dentre os danos efeitos como irritação nos olhos, nas mucosas do nariz, irritações nas vias respiratórias que podem causar crises asmáticas e o aumento de internações hospitalares decorrentes de problemas respiratórios. A emissão de gases poluentes gera chuva ácida que é altamente danosa à saúde, pois causa doenças pulmonares além de ser prejudicial à natureza quando polui rios, fontes de água e principalmente o lençol freático.

Investimentos em energia renovável amortecem tanto o custo quanto a geração de gases poluentes emitidos por termoeletricas. Por conta dessas adversidades, a geração solar por meio do sistema fotovoltaico, ganha impulso no Brasil e apresenta um futuro promissor para consumidores residenciais e industriais.

1.4. Potencialidade da Energia Solar no Brasil

Como visto na Tabela 1 o uso da energia solar é responsável por aproximadamente 0,01% da geração de energia elétrica no Brasil. Tal porcentagem é uma parcela sem expressão se comparado a qualquer outra forma de geração. Um levantamento divulgado pela Associação Europeia da Indústria Fotovoltaica (EPIA, sigla em inglês) mostra que, por ano, a energia solar poupa 53 milhões de toneladas de gás carbônico despejados na atmosfera.

Altos níveis de radiação levam o Brasil a possuir enorme potencial para geração de energia solar, entretanto este recurso é pouco explorado. Países como Alemanha, China, Itália, Estados Unidos e Japão são pioneiros no desenvolvimento de tecnologias associadas e

energia solar nas grandes cidades brasileiras. Entre as medidas estimuladas estão a simplificação nas regras para a geração em casas e prédios comerciais, mudança na tributação da energia produzida e fomento ao investimento industrial no setor. (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2015). Com isto, outro benefício deve ser enfatizado, a descentralização da matriz energética, tendo em vista que os consumidores estarão perto da fonte.

Com um dos maiores potenciais energéticos fotovoltaicos, o Brasil ainda é um país em ascensão na exploração e no desenvolvimento de engenharia nesse setor. Entretanto, este cenário vem mudando com as crises no setor energético e a necessidade de modernizar a exploração de matéria prima para geração de energia.

A energia fotovoltaica para consumo próprio é uma referência em sustentabilidade. Esse tipo de tecnologia contribui para a redução de impactos ambientais causados pela geração de energia elétrica.

Fundamentação Teórica

2.1. Introdução

Neste capítulo são descritos os conceitos dos sistemas fotovoltaicos, fundamentos de conversão de energia solar em elétrica, componentes necessários para a construção do sistema, resoluções normativas e métodos para a otimização da potência gerada.

2.2. Fundamentos de conversão de energia solar em elétrica.

O efeito fotovoltaico dá-se em materiais de natureza semicondutora. Eles se caracterizam pela presença de faixas de energia onde é permitida a presença de elétrons (faixa de valência) e de outra totalmente “vazia” (faixa de condução). Entre essas duas faixas se encontra a faixa proibida. É a largura da faixa proibida que determina a natureza do material: condutora, isolante ou semicondutora (BRAGA, 2008). Tal análise fica mais clara com o auxílio da Figura 3.

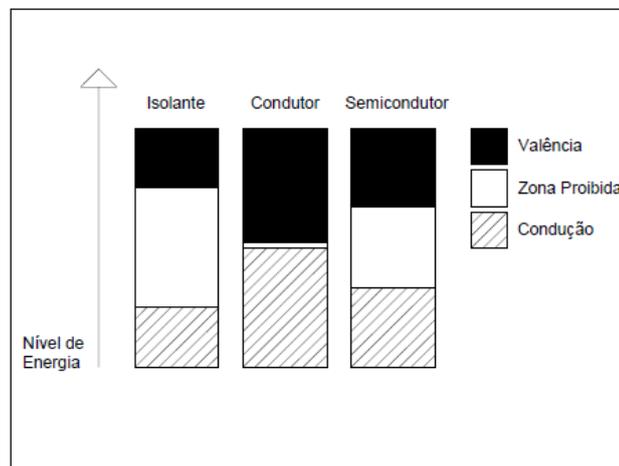


Figura 3: Bandas de Valência, banda proibida e banda de condução. Elaborado pelo autor.

No efeito fotovoltaico a eletricidade gerada é proveniente dos fótons, que são partículas energéticas de luz que viajam do Sol à Terra. É gerada energia elétrica quando o elétron salta da camada de valência para camada de condução.

Quando os fótons incidem sobre um semicondutor com energia suficiente para fazer o elétron saltar a zona proibida, esse movimento será convertido em eletricidade. Quando incidem com energia menor do que a suficiente para que ele atravesse a banda proibida, essa energia é convertida em calor e não se gera energia elétrica. Quando a energia for maior do

que a necessária para fazer o elétron saltar da camada de valência para a camada de condução, gera-se eletricidade e o excedente dessa energia é dissipado na forma de calor.

2.2.1. Materiais Utilizados na construção de Células Fotovoltaicas

A Tabela 2 mostra os diferentes materiais utilizados na construção de células fotovoltaicas. A primeira e segunda geração são as mais ofertadas no mercado tendo em vista seu baixo custo e chegam na casa dos 20% de eficiência.

Células de Silício	Rígidas	Monocristalino	Primeira Geração
		Policristalino	
Células de Silício	Filme Fino	Amorfo (a-Si)	Segunda Geração
		Cristalino	
		a-Si/Cristalino	
Células de Composto Químico	II-VI	CIS/CIGS	Segunda Geração
		CdTe	
Células de Composto Químico	III-V	GaInP/GaAs	Terceira Geração
		InGaP/InGaAs/Ge	
Células de novos Materiais	DSC	Eletrolítico Líquido	
		Eletrolítico Pastoso	
		Eletrolítico Sólido	
	Orgânicos	Polímero-Polímero	
Híbridos	Polímero-Inorgânico		

Tabela 2: Evolução das Células fotovoltaicas (REMES, 2013). Adaptado

A terceira geração de células solares merece destaque, pois faz parte de uma das mais novas tecnologias existentes, a das células de multijunção, podendo estas serem construídas a partir de duas, três ou quatro junções semicondutoras, ao invés de uma única. Estas células têm capacidade de absorver uma gama maior de fótons, e por consequência sua eficiência é aumentada para cerca de 40%(REMES, 2013).

2.3. Tipos de Sistemas Fotovoltaicos

Sistemas fotovoltaicos podem ser classificados como sistemas isolados, sistemas conectados à rede e sistemas híbridos.

Em geral, no sistema isolado é feito o uso de elementos armazenadores de energia (baterias estacionárias). Nesse tipo de sistema é recomendável o uso de controladores de

carga e descarga que funcionam como uma central elétrica do sistema solar fotovoltaico que controla a carga desligando a saída automaticamente (corte por mínima tensão).

O religamento é feito, pelo controlador, quando a bateria atinge determinado valor de tensão que consiga suprir o sistema. A função do controlador é evitar danos que reduzem drasticamente a vida útil das baterias.

Quando há necessidade de alimentar cargas com tensão contínua o sistema fotovoltaico pode ser usado para suprir diretamente este tipo de consumidor, porém se há necessidade de alimentar com tensão alternada (CA) um conversor de corrente contínua para corrente alternada deve ser usado. Um sistema genérico é mostrado na Figura 4.

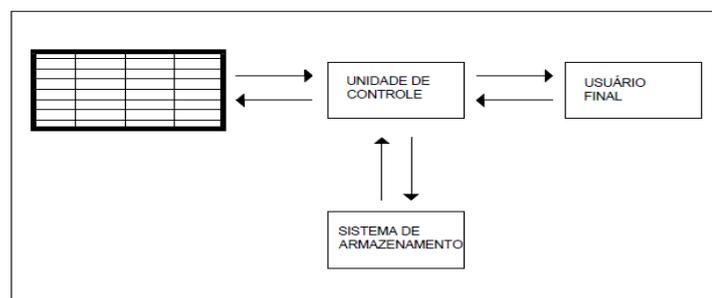


Figura 4: Ilustrativo de um sistema Fotovoltaico. Elaborado pelo autor.

Sistemas interligados à rede não fazem o uso do armazenamento de energia, uma vez que toda energia gerada é injetada. Consumidores adeptos a esta topologia são conectados à rede e o sistema solar fotovoltaico atua como fonte complementar de energia. A energia solar é injetada na rede elétrica e funciona como um sistema de créditos. A RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº482/12, DE 17 DE ABRIL DE 2012, estabelece as condições gerais para o acesso à microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica.



Figura 5: Sistema solar interligado a rede. Fonte: (REMES, 2013) ADAPTADO.

A junção de ambas as arquiteturas, sistemas isolados e sistemas interligados, é o conceito de sistema híbrido.

2.4. Modelos Matemáticos da Célula Fotovoltaica

A célula fotovoltaica pode ser analisada como uma junção p-n de um semicondutor, que quando exposto à luz solar, apresenta movimento de elétrons. A taxa do movimento de elétrons depende da quantidade de luz incidente sobre o material e da capacidade de o mesmo absorver luz (tamanho da zona proibida). Tendo como base esta análise, a corrente na célula fotovoltaica é dependente da quantidade de luz incidente.

Pode-se então representar a energia gerada pelo efeito fotoelétrico como uma fonte de corrente I_{ph} em paralelo a um diodo que representa a junção p-n. Perdas sobre a célula fotovoltaica devem ser consideradas. Duas resistências são adicionadas ao modelo, R_s (resistência série) que representa perdas em função dos condutores metálicos e R_p (resistência paralela) que representa perdas por correntes de fuga. É importante ressaltar que a resistência série é muito menor do que a resistência em paralelo (REMES, 2013).

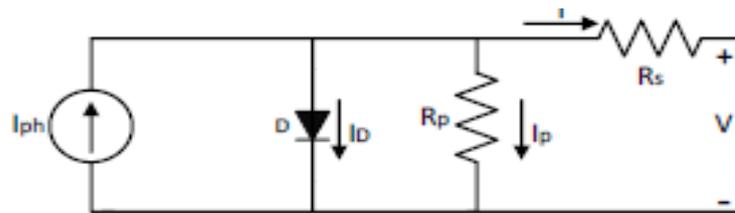


Figura 6: Modelo simplificado de uma célula solar (REMES, 2013).

Através da lei de Kirchhoff das correntes, é obtida a equação.

$$I = I_{ph} - I_D - I_p \quad (2.1)$$

Onde a corrente no diodo é dada por:

$$I_D = I_o \left(\exp \left(\frac{V + R_s I}{V_T \alpha} \right) - 1 \right) \quad (2.2)$$

A corrente do painel (I_p) é relacionada por um divisor de tensão e é encontrada no terceiro termo da equação a seguir. A relação corrente em função da tensão do módulo fotovoltaico é não linear e implícita, necessitando de métodos iterativos para solucioná-la.

$$I = I_{ph} - I_o \left(\exp \left(\frac{V + R_s I}{V_T \alpha} \right) - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (2.3)$$

O termo I_{ph} é a corrente induzida pela luz, I_o é a corrente de saturação do diodo, α é o fator de idealidade do diodo, $V_T = N_s KT/q$ é a tensão térmica do painel com N_s células conectadas em série, k é a constante de Boltzmann [$1,3806503 \times 10^{-23} \text{ J/K}$], $T(\text{K})$ é a temperatura da junção p-n, e q é a carga elementar do elétron [$1,60217676 \times 10^{-19} \text{ C}$]. Se o módulo é composto por N_p células conectadas em paralelo, então a corrente induzida e de saturação do módulo fotovoltaico podem ser expressas por $I_{ph} = I_{ph,cell} N_p$ e $I_o = I_{o,cell} N_p$ respectivamente. A corrente I_{ph} depende tanto do nível de radiação $G[\text{W/m}^2]$ quanto da temperatura T , enquanto que I_o depende apenas da temperatura (MOÇAMBIQUE, 2012).

A influência da variação da radiação solar sobre uma célula fotovoltaica é mostrada na Figura 7 sobre condições padrões de teste que serão discutidas no próximo tópico. A corrente elétrica gerada por uma célula fotovoltaica é diretamente proporcional à radiação solar incidente. O aumento da temperatura na célula é inversamente proporcional à tensão gerada.

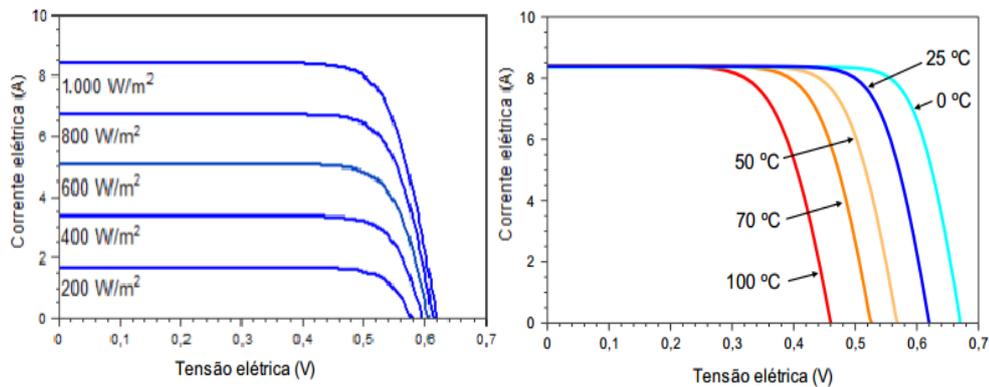


Figura 7: Influência da Radiação Solar e Temperatura em painéis fotovoltaicos. Fonte (PINHO; GALDINO, 2014)

2.5. Condições padrão de teste

Na modelagem do painel fotovoltaico, fabricantes estabeleceram condições para padronizar as principais grandezas: radiação solar, temperatura e massa de ar.

A radiação solar diz respeito à potência das ondas eletromagnéticas incidentes na superfície da célula fotovoltaica, medida em W/m^2 (Watts por metro quadrado). Logo, fatores como sombreamento, principalmente ocasionados por nuvens, chuva e horário do dia, influenciam drasticamente nesta variável. Em geral, dos 1366 W/m^2 médios de radiação que chegam na atmosfera, somente 1000 W/m^2 atingem efetivamente a superfície da terra sob forma de radiação direta, como ilustrado na Figura 8.

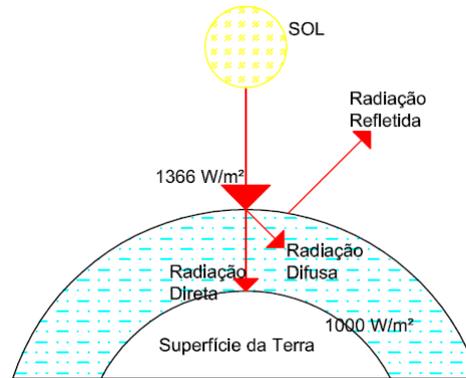


Figura 8: Componentes da Radiação Solar. Elaborado pelo autor.

A temperatura é a medida do grau de agitação das moléculas. Esta é uma variável que afeta muito as condições de operação de semicondutores e até de condutores. Por fim, o índice AM (*Air Mass* ou *Massa de Ar*) corresponde à massa de ar atmosférico que a radiação deve atravessar para incidir sobre a superfície terrestre.

Matematicamente, o índice AM é descrito como sendo o inverso do cosseno do ângulo formado entre a superfície terra e o raio incidente, ou seja:

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta)} \quad (2.4)$$

As condições padrões para teste estipulam que os valores de radiação, temperatura e AM de referência devem ser, respectivamente, $S_r = 1000\text{W/m}^2$, $T_r=25^\circ\text{C}$ e $AM=1,5$ (REMES, 2013) para testes dos painéis em todo o mundo.

2.6. Aumento da eficiência em sistemas Fotovoltaicos

Há conversores eletrônicos que são necessários para efetuar a conexão dos conjuntos fotovoltaicos e possuem o papel de aumentar a eficiência de todo sistema. Primeiramente, o conversor deve fazer com que a máxima energia seja constantemente extraída do painel solar. Isto é feito através de um recurso de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT).

Devido ao fato de as condições de operação do painel mudarem aleatoriamente ao longo do dia, a estratégia de MPPT é necessária em todos os sistemas fotovoltaicos para maximizar a produção de energia, proporcionando maior rendimento do sistema (VILLALVA, 2010).

É observado pela Figura 9 que sempre há um ponto em que a potência fornecida pelo dispositivo é máxima. Os conversores eletrônicos devem buscar maneiras de operar neste ponto para aumentar a eficiência da geração.

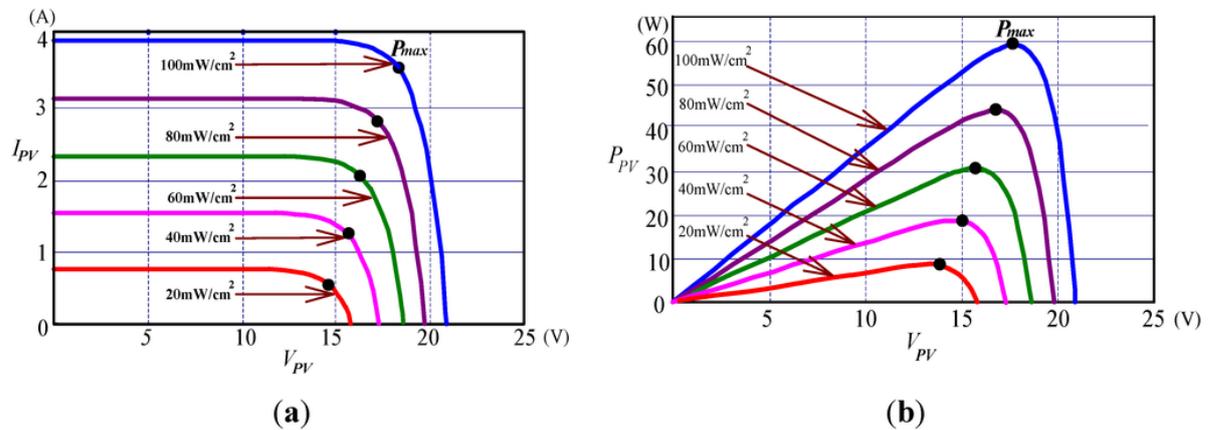


Figura 9: a) Variação MPPT em função da radiação b) temperatura Fonte (PINHO; GALDINO, 2014).

Como o objetivo deste trabalho é a análise do rendimento de diferentes arranjos, submete-se, ao sistema, que a geração sempre opere no ponto de máxima potência.

2.7 Dimensionamento de um sistema Fotovoltaico.

A primeira etapa para dimensionar um sistema fotovoltaico é saber a demanda que se deseja suprir. No projeto apresentado neste trabalho, tomou-se como base o estudo de caso de uma empresa de pequeno porte. Foi projetado um sistema fotovoltaico para suprir a demanda energética. Assim para o cálculo do número necessário de painéis, foi utilizado o consumo médio anual da empresa obtido a partir da conta de energia elétrica (anexada ao final do trabalho). Com auxílio da Figura 10, a média encontrada foi de 3291KW.

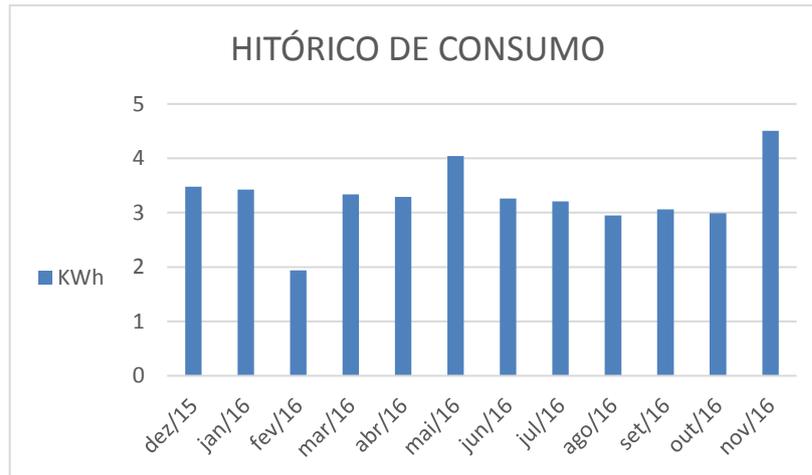


Figura 10: Histórico de consumo da empresa. Elaborado pelo autor.

A energia produzida por um módulo fotovoltaico depende da insolação ($W \cdot h/m^2 \cdot dia$), área do módulo (m^2), período em dias e eficiência.

Para o conhecimento prévio da insolação é utilizado o *GOOGLE MAPS* para a busca de coordenadas geográficas (latitude e longitude) no endereço em questão. A localização da empresa possui as seguintes coordenadas geográficas: $19^{\circ}48'31.5''S$ $43^{\circ}03'38.2''W$.

O programa *SunData* destina-se ao cálculo da irradiação solar diária média mensal em qualquer ponto do território nacional e constitui-se em uma ferramenta de apoio ao dimensionamento de sistemas fotovoltaicos. O programa fornece os dados de irradiação solar para no mínimo 3 localidades disponíveis próximas do ponto de interesse (latitude e longitude) (CRESESB, 2017). Foi encontrada uma insolação média para as coordenadas obtidas através do *GOOGLE MAPS* de $4430 W \cdot h/m^2 \cdot dia$.

O modelo do painel escolhido foi *KYOCERA KB260-6bpa*. A escolha é justificada por ter um preço de mercado competitivo e ser de uma marca de referência. Os dados referentes ao painel são descritos na Tabela 3.

Altura (m)	Largura (m)	Ponto Max. Potência (W)	Tensão de Max. (V)	Corrente de Max (A)	Voc (V).	Isc (A)
1,66	0,99	260	31	8,39	38,3	9,09

Tabela 3: Valores do Painel Fotovoltaico. Elaborado pelo autor.

A eficiência do módulo, equação (2.5), é dependente da área da placa, da potência máxima e da radiação solar incidente.

$$\eta = \frac{P_{\max}}{A} \Rightarrow \frac{260}{(1,66 * 0,99)} = 0,158 \Rightarrow 15,8\% \text{ de eficiência} \quad (2.5)$$

A energia mensal produzida pelo módulo, equação (2.6) em *Quilo Watt Hora* (KW.h) depende da Insolação média, da área do módulo, da quantidade média de dias no mês e da eficiência.

$$E = \text{InsolaçãoMédia} * A * \text{Dias} * \eta \Rightarrow 4430 * 1,64 * 30 * 0,158 = 34,5 \quad (2.6)$$

A quantidade de módulos necessários para cobrir todo o consumo é calculada através da equação (2.7) e está relacionada com a energia mensal consumida em KW.h e a energia do módulo também expressa em KW.h.

$$\text{Qtd. Módulos} = \frac{\text{Energia Mensal}}{\text{Energia do Módulo}} \Rightarrow \frac{3291}{34,55} = 95,25 \quad (2.7)$$

São necessários então cerca de 96 módulos fotovoltaicos *KYOCERA KB260-6bpa* para a demanda da empresa. Para facilitar os cálculos são considerados 100 painéis.

2.8 Introdução a análise de rendimento e conversores.

Afim de posicionar todos os 100 painéis, diversos arranjos podem ser explorados com o objetivo de se obter melhor eficiência.

Os arranjos diferem-se uns dos outros em relação à quantidade de painéis em série, que a partir deste momento será chamando de array, e da quantidade de arrays em paralelo. Aleatoriamente foram escolhidos 9 arranjos diferentes, todos com 100 painéis para a análise. A Figura 11 apresenta como cada arranjo foi montado.

A energia fotovoltaica é gerada em corrente contínua. Para aumentar a eficiência do sistema e converter para corrente alternada é necessário um conversor CC-CC (Conversor de corrente contínua em corrente contínua). As características e elementos que constituem um conversor CC-CC mudam de acordo com os valores de corrente e tensão de entrada e corrente e tensão de saída. Sobre as propriedades dos conversores é realizada a análise de rendimento dos 9 arranjos.

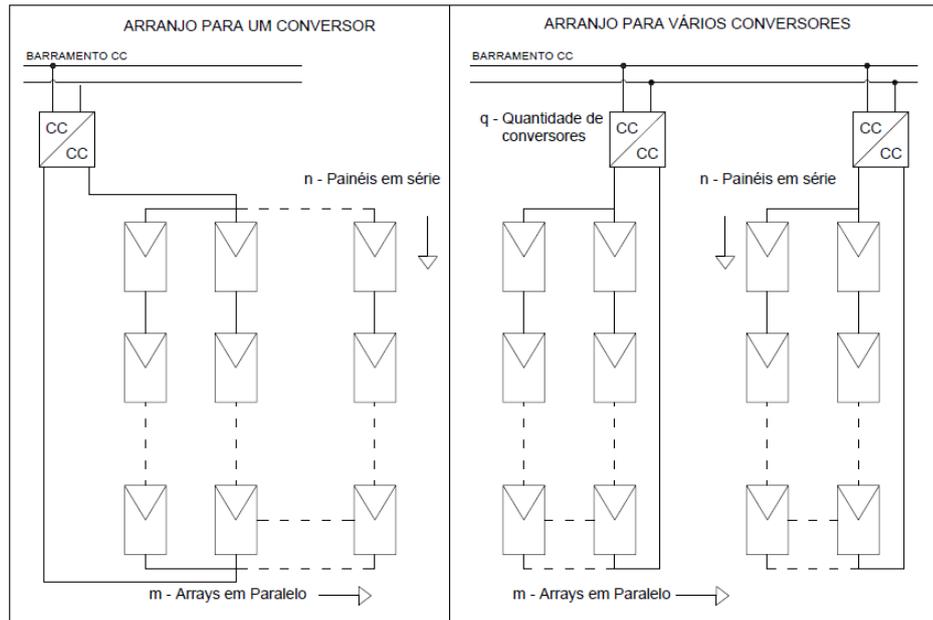


Figura 11: Topologias dos Arranjos Fotovoltaicos. Elaborado pelo autor.

Os arrays são representados pela letra n , a quantidade de arrays em paralelo é representado pela letra m e a quantidade de conversores pela letra q .

1. Arranjo para 1 conversor: $n = 5$, $m = 20$.
2. Arranjo para $q=5$, em cada conversor $n=5$, $m=4$.
3. Arranjo para $q=10$, em cada conversor $n=5$, $m=2$.
4. Arranjo para 1 conversor: $n = 10$, $m = 10$.
5. Arranjo para $q=5$, em cada conversor $n=10$, $m=2$.
6. Arranjo para 1 conversor: $n = 20$, $m = 5$.
7. Arranjo $q=5$, em cada conversor $n=20$, $m=1$.
8. Arranjo para 1 conversor: $n = 25$, $m = 4$.
9. Arranjo $q=4$, em cada conversor $n=25$, $m=1$.

Para cada topologia é adotado um conversor com valores diferentes. Cada um possui tensão e corrente dependente da organização do arranjo. Quanto maior a quantidade de painéis em um array, maior o valor da tensão do conjunto e quanto maior a quantidade de arrays, maior o nível de corrente na entrada do conversor, conforme Figura 12 e equações (2.8) e (2.9).

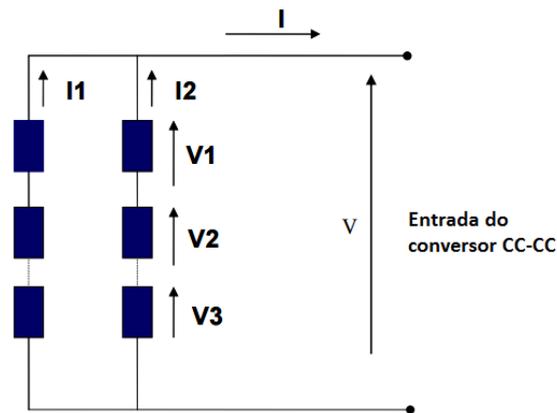


Figura 12: Painéis em um arranjo série/paralelo. Elaborado pelo autor.

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + \dots V_n \quad (2.8)$$

$$I = I_1 + I_2 + \dots I_n \quad (2.9)$$

Todos os arranjos fornecem ao barramento CC uma tensão de 400V contínuos. Isso é justificado pelo fato de que é necessário converter a tensão contínua gerada pelos painéis em tensão alternada que é fornecida pela rede. Um conversor CC-CA deverá ser acoplado ao barramento CC-CC e possuir uma tensão mínima de entrada de 380V para ser obtido a saída trifásica 220V no conversor CC-CA. Por esse motivo a tensão de saída de todas os arranjos é fixada em 400V. A tensão 220V trifásica é a alimentação do ramal de entrada da empresa em questão.

Modelagem e Dimensionamento dos Conversores

3.1. Introdução

Para modificar o valor nos terminais de um painel fotovoltaico é necessário um conversor. Manipulando a tensão terminal é possível controlar a potência de saída e o rendimento do painel.

3.2 Conversores CC-CC

Conversores CC-CC são sistemas formados por semicondutores de potência que funcionam com chaves e com elementos armazenadores de energia, capacitores e indutores. Os elementos armazenadores de energia possuem função de controlar o fluxo de potência da alimentação de entrada para saída. (BARBI, 2001).

A adoção de qual conversor usar é dependente do arranjo. Diferentes arranjos combinam diferentes níveis de tensões de entrada.

Como a tensão de saída é fixa e a tensão de entrada é dependente da quantidade de painéis inseridos em um array, é necessário elevar ou reduzir a tensão de entrada em relação à tensão de saída. Conversores CC-CC controlam o ganho de tensão. Quando houver necessidade de elevar a tensão de entrada, será usado o conversor Boost e quando a necessidade for diminuir a tensão de entrada, será usado o conversor Buck.

Foram escolhidos esses conversores, em detrimento da robustez e da facilidade de modelagem e dos cálculos de seus componentes.

3.2.1 Funcionamento do conversor Boost - Elevador de Tensão.

O funcionamento do circuito do conversor pode ser dividido em duas etapas. Na primeira etapa a chave fecha (conduz). Durante este período a corrente circula pelo indutor (L) e pela chave (S), sendo acumulada energia no indutor.

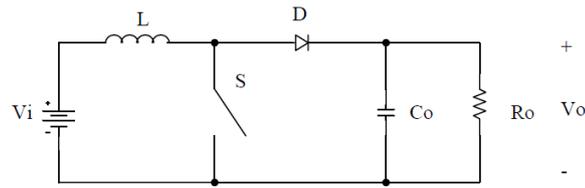


Figura 13: Conversor Boost (BARBI, 2001)

Na segunda etapa a chave abre (não conduz). A corrente flui pelo indutor, pelo diodo e pelo resistor de carga (R_o). A corrente diminui até que o transistor seja novamente ligado no ciclo seguinte, sendo que a energia armazenada no indutor é transferida à carga e ao capacitor. Como o ciclo de trabalho possui variação entre 0 e 1, o conversor eleva tensão na saída (BARBI, 2001). A relação da tensão de entrada com a tensão de saída está relacionada pela equação (3.1).

$$V_o = \frac{1}{1 - D} * V_i \quad (3.1)$$

3.2.2 Funcionamento do conversor Buck - Abaixador de tensão.

O funcionamento do circuito do conversor é dividido em duas etapas. Na primeira etapa a chave está fechada (conduz). Durante este período a corrente circula pela chave (S) e pelo indutor (L), sendo acumulada energia no indutor.

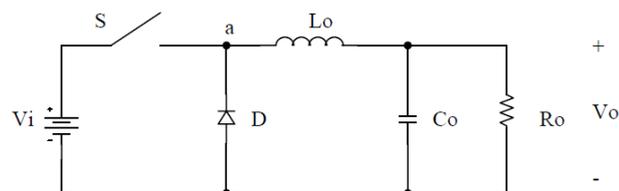


Figura 14: Conversor Buck (BARBI, 2001)

Na segunda etapa a chave (S) não conduz. A corrente flui pelo indutor, pelo diodo e pelo resistor de carga (R_o). A corrente diminui até que o transistor seja novamente ligado no ciclo seguinte, sendo que a energia armazenada no indutor é transferida para o capacitor. Como o ciclo de trabalho é menor que 1, a tensão de saída é menor que a tensão de entrada (BARBI, 2001), o que fica explícito pela equação (3.2).

$$\frac{V_o}{V_i} = D \quad (3.2)$$

3.3. Modelo Linearizado dos conversores acoplados ao Painel

Uma analogia do sistema de conversão do painel pode ser feita no sentido de compará-lo com transformadores cuja tensão é referida do secundário para o primário, de modo que se pode escrever a tensão em função de uma variável α (relação de transformação do conversor). Controlando o ponto de operação do conversor CC-CC controla-se a carga vista pelo painel fotovoltaico e, em consequência, a tensão em seus terminais. O controle do conversor deve trabalhar de maneira a igualar a impedância vista pelo painel R/α^2 à impedância equivalente do próprio painel R_{eq} . Onde V_{eq} e R_{eq} são os equivalentes Thévenin do painel linearizado em torno do ponto de interesse (BASTOS, 2013). Essa relação é expressa através da equação (3.3).

$$V = V_{eq} \frac{R}{\alpha^2} \frac{1}{R_{eq} + \frac{R}{\alpha^2}} \quad (3.3)$$

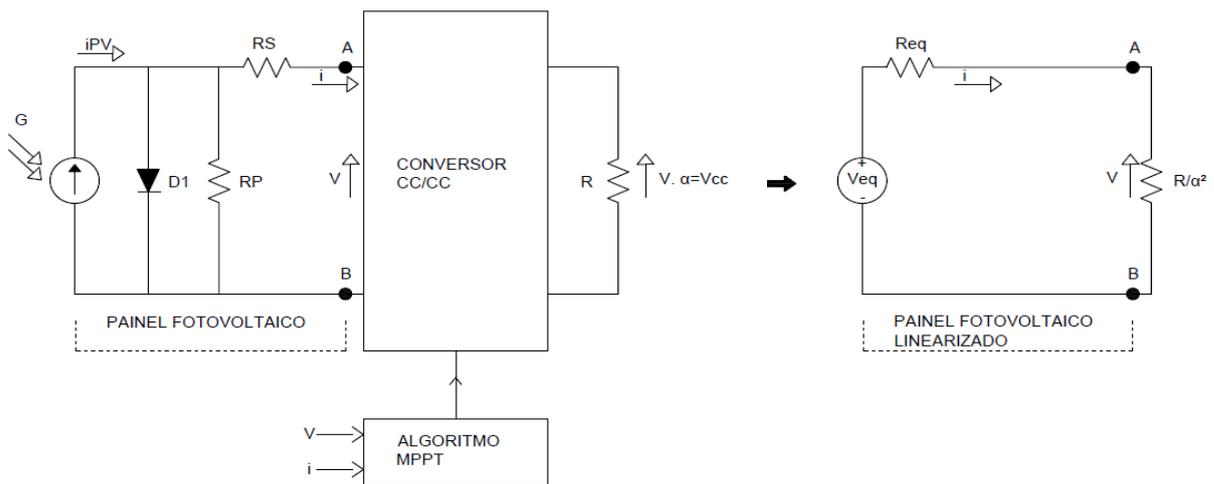


Figura 15: a) Circuito de Controle da Tensão Circuito linearizado Fonte (BASTOS, 2013). Adaptado.

O cálculo da resistência equivalente é realizado através de um divisor de tensão. A tensão de máxima potência V_{mp} , no ponto A-B da Figura 14, será máxima quando a impedância vista pelo painel for igual à impedância equivalente do próprio painel. Onde P_{mp} é a potência de máximo e I_{mp} é a corrente de máxima potência.

$$P_{mp} = \frac{V_{mp}^2}{R_{eq}} \Rightarrow R_{eq} = \frac{V_{mp}^2}{P_{mp}} \Rightarrow \frac{V_{mp}^2}{I_{mp} * V_{mp}} \Rightarrow R_{eq} = \frac{V_{mp}}{I_{mp}} \quad (3.4)$$

Com ambas as impedâncias iguais, a tensão equivalente é duas vezes a tensão de máxima potência.

$$V_{eq} = 2 * V_{mp} \quad (3.5)$$

3.4 Conversores Boost e Buck acoplados ao Painel Linearizado

Com o objetivo de manipular a tensão terminal (V_{cc}), um controlador PI (Proporcional Integral) é projetado. Sua função é manter o sistema estável e operando no ponto de máxima potência. Para o projeto do controlador é necessário modelar o sistema completo, conversor acoplado ao modelo linearizado painel. Na Figura 16 são mostrados os sistemas que as matrizes de estado serão montadas. Para a modelagem foi considerada apenas a perda no indutor, sendo as outras consideradas nas simulações.

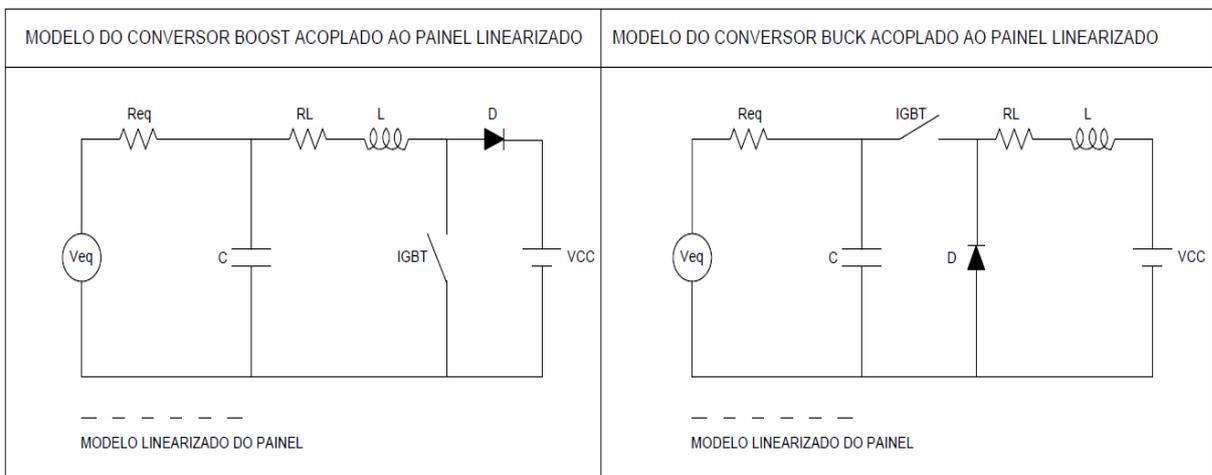


Figura 16: Modelo dos Conversores acoplados ao painel linearizado. Elaborado pelo autor.

A resistência do indutor é R_l , R_{eq} é a impedância equivalente do painel, C é o valor do capacitor de entrada, L o valor do indutor, D representa o diodo de roda livre e V_{cc} o valor da tensão de saída.

3.4.1 Modelagem do Conversor Boost acoplado ao modelo do painel linearizado

O sistema apresenta dois estados em seu funcionamento: Quando a chave conduz e quando a chave não conduz. A lei de Kirchhoff das correntes é aplicada ao conversor acoplado em ambos os estados, com o objetivo de obter as equações na forma matricial.

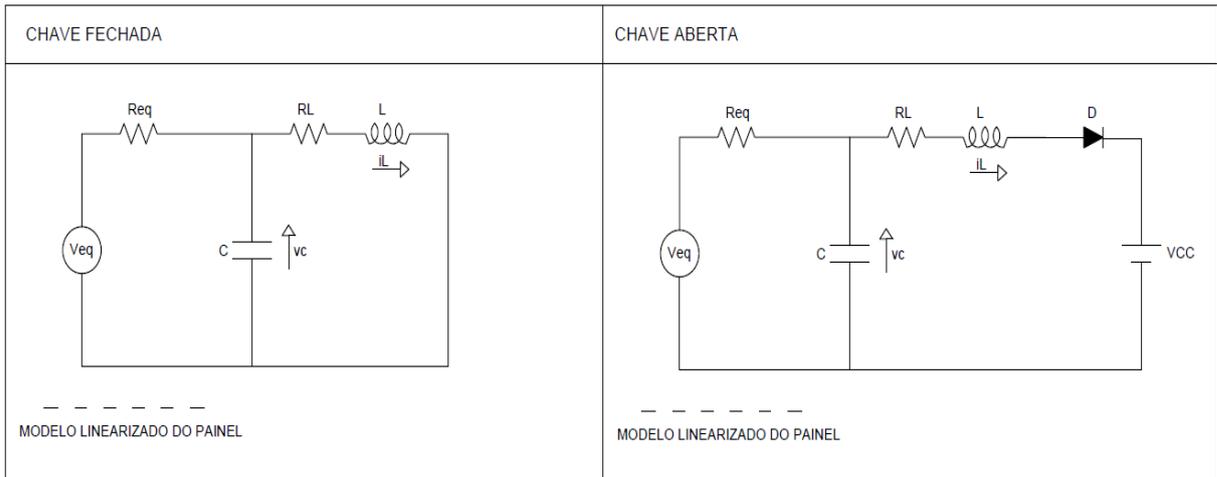


Figura 17: Conversor Boost chave Fechada e Chave aberta. Elaborado pelo autor.

Equações na forma matricial para o Conversor Boost com a chave fechada.

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_C}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_1 & \frac{1}{L} \\ \frac{L}{-1} & -1 \\ \frac{C}{R_{eq}C} & \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_L \\ V_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{eq}C} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_{cc} \\ V_{eq} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_L \\ V_C \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Equações na forma matricial para o conversor Boost com a chave aberta.

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_C}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_1 & \frac{1}{L} \\ \frac{L}{-1} & -1 \\ \frac{C}{R_{eq}C} & \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_L \\ V_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{eq}C} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_{cc} \\ V_{eq} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_L \\ V_C \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

3.4.2 Modelagem do Conversor Buck acoplado ao modelo do painel linearizado

De maneira análoga ao conversor Boost, são obtidas as equações de estado conversor Buck.

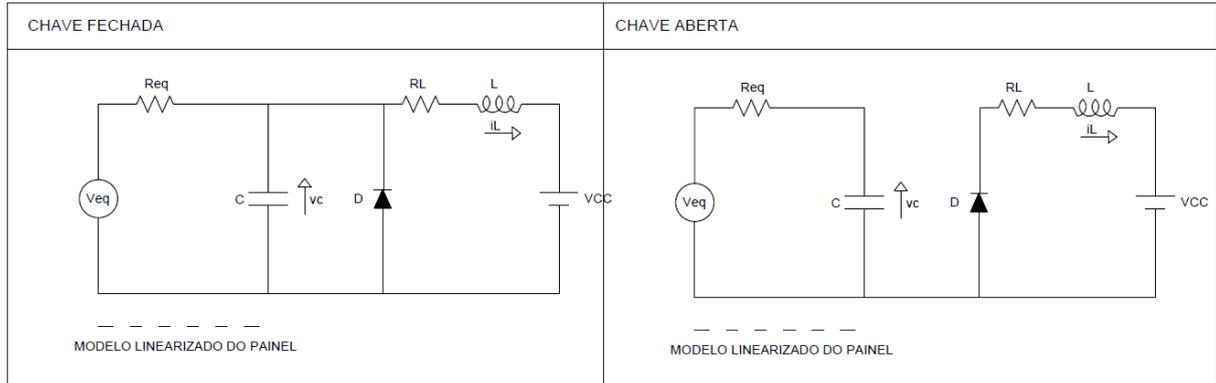


Figura 18: Conversor Buck chave Fechada e Chave aberta. Elaborado pelo autor.

Equações na forma matricial para o Conversor Buck com a chave fechada.

$$\begin{bmatrix} \frac{diL}{dt} \\ \frac{dVc}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_1}{L} & \frac{1}{L} \\ -1 & -1 \\ \frac{1}{C} & \frac{1}{R_{eq}C} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} iL \\ Vc \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{eq}C} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} Vcc \\ Veq \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} iL \\ Vc \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Equações na forma matricial para o conversor Buck com a chave aberta.

$$\begin{bmatrix} \frac{diL}{dt} \\ \frac{dVc}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{LR_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{eq}C} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} iL \\ Vc \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{eq}C} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} Vcc \\ Veq \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} iL \\ Vc \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

3.5 Linearização do estágio de potência usando valores médios das variáveis de estado.

A linearização do estágio de potência usando valores médios das variáveis de estado tem o objetivo de encontrar uma função de transferência para pequenos sinais entre uma tensão “ v_c ” e o ciclo de trabalho “ δ ”, em torno de seus pontos de operação V_c e D, respectivamente.

Esta modelagem do conversor considera o modo de operação contínuo, ou seja, modo no qual a corrente não zera. O circuito linear é descrito através de seu vetor de estado “ x ”, o

qual é composto de correntes do indutor e tensão no capacitor que são as variáveis de estado para conversores do tipo Buck, Boost e Buck-Boost (POMILIO, 2014).

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$\dot{X} = A_1 X + B_1 V_i \text{ Durante } \delta \tau \quad (3.15)$$

$$\dot{X} = A_2 X + B_2 V_i \text{ Durante } (1-\delta) \tau \quad (3.16)$$

Introdução de pequenas perturbações e separação de componentes CC e CA.

$$X = \mathbf{X} + x \quad (3.17)$$

$$V = V_c + v_c \quad (3.18)$$

$$\delta = D + d \quad (3.19)$$

Como o objetivo é a obtenção de uma função entre a tensão de entrada e o ciclo de trabalho pode-se considerar a tensão de saída sem variação. Reconhecendo que $\dot{X}=0$ e que x e d são duas variações pequenas, o seu produto pode ser desprezado:

$$\dot{x} = AX + BV_i + Ax + [(A_1 - A_2)X + (B_1 - B_2)V_i]d \quad (3.20)$$

$$A = A_1 D + A_2 (D - 1) \quad (3.21)$$

$$B = B_1 D + B_2 (D - 1) \quad (3.22)$$

O comportamento em regime permanente pode ser obtido nas equações (3.20), (3.21) e (3.22). Anulando-se os termos variáveis no tempo e as perturbações, $AX + BV_i = 0$ e isolando o X obtém-se a equação (3.23):

$$X = A^{-1}BV \quad (3.23)$$

A expressão apenas para as componentes alternadas (3.24):

$$\dot{x} = Ax + [(A_1 - A_2)X + (B_1 - B_2)V_i]d \quad (3.24)$$

De maneira análoga são obtidas as duas equações (3.25) e (3.26).

$$V_o + v_o = CX + Cx + [(C_1 - C_2)X]d \quad (3.25)$$

$$C = C_1 D + C_2 (1 - D) \quad (3.26)$$

Das equações, em regime permanente tem-se:

$$V_o = CX \quad (3.27)$$

$$v_o = Cx + [(C_1 - C_2)X]d \quad (3.28)$$

Convertendo a equação CA para o domínio da frequência para obter a função de transferência e aplicando-se a transformada de Laplace .

$$x(S) = [SI - A]^{-1}[(A_1 - A_2)X + (B_1 - B_2)V_i]d(S) \quad (3.29)$$

Onde I é a matriz identidade, a função de transferência para pequenos sinais de saída é dada pela equação (3.30).

$$G(S) = \frac{v(S)}{d(S)} = [SI - A]^{-1}[(A_1 - A_2)X + (B_1 - B_2)V_i] + [(C_1 - C_2)X] \quad (3.30)$$

Um aspecto importante a ser notado é que além do conhecimento prévio das matrizes A , B e C , é preciso conhecer o vetor X expresso pela equação (3.23). Esta equação é referente aos valores médios de regime permanente para as variáveis de estado (POMILIO, 2014).

$$A = A_1D + (1 - D)A_2 \quad B = B_1D + (1 - D)B_2 \quad C = C_1D + (1 - D)C_2 \quad (3.31)$$

Na seção 3.4 foram obtidas as matrizes de estado tanto do conversor Boost quanto do conversor Buck, expressas pelas equações (3.6) até a (3.13). Com linearização do estágio de potência é obtido uma função de transferência entre a tensão de entrada e o ciclo de trabalho.

Matrizes do conversor Boost:

$$A_1 = \begin{bmatrix} \frac{-R_1}{L} & \frac{1}{L} \\ -1 & -1 \\ \frac{1}{C} & \frac{1}{R_{eq}C} \end{bmatrix} \quad B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{eq}C} \end{bmatrix} \quad C_1 = |0 \quad 1| \quad (3.32)$$

$$A_2 = A_1 \quad B_2 = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{eq}C} \end{bmatrix} \quad C_2 = C_1 \quad (3.33)$$

Matrizes do conversor Buck:

$$A_1 = \begin{bmatrix} \frac{-R_1}{L} & \frac{1}{L} \\ -1 & -1 \\ \frac{1}{C} & \frac{1}{R_{eq}C} \end{bmatrix} \quad B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{eq}C} \end{bmatrix} \quad C_1 = |0 \quad 1| \quad (3.34)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ \frac{-R_1L}{0} & R_{eq}C \end{bmatrix} \quad B_2 = B_1 \quad C_2 = C_1 \quad (3.35)$$

Com as matrizes de estado dos conversores acoplados ao modelo do painel linearizado e suas respectivas funções de transferência, são formados os elementos necessários para o projeto do controle de tensão de entrada. É importante ressaltar que a tensão de saída do conversor CC-CC é fixa. O controle de tensão é feito na tensão de entrada do conversor, que muda conforme são mudados os arranjos. O sistema sempre estará gerando seu máximo de potência para análise de rendimento.

3.5 Cálculo dos elementos passivos.

Com a tensão de saída fixada e os arranjos definidos é possível calcular todos os elementos passivos dos conversores CC-CC. O ciclo de trabalho de ambos os conversores é uma relação da tensão de entrada (dependente do arranjo) e da tensão de saída.

$$D = 1 - \frac{V_{\text{entrada}}}{V_{\text{saída}}} \quad \text{Cálculo do ciclo de trabalho (ganho) para o Boost.} \quad (3.36)$$

$$D = \frac{V_{\text{saída}}}{V_{\text{entrada}}} \quad \text{Cálculo do ciclo de trabalho (ganho) para o Buck.} \quad (3.37)$$

A potência média na carga é calculada através da equação (3.38). O valor médio encontrado nas literaturas referente a fontes chaveadas, estipulam, em média, um rendimento de 85%, considerado para o cálculo dos elementos passivos.

$$P_{\text{saída}} = \eta * P_{\text{entrada}} \quad (3.38)$$

A corrente média na carga é calculada através da equação (3.39). São consideradas apenas cargas resistivas.

$$I_{\text{carga}} = \frac{P_{\text{saída}}}{V_{\text{saída}}} \quad (3.39)$$

As ondulações tanto da corrente de saída quanto da tensão são obtidas pela multiplicação do valor de corrente de saída e tensão de saída pelas respectivas ondulações desejadas. Foi cogitada uma máxima ondulação de corrente de saída de 1% e uma máxima ondulação de tensão de 5%. Segundo (POMILIO, 2014) são valores de ondulações máximas aceitáveis para fontes chaveadas.

$$\Delta I_{\text{saída}} = 0,01 * I_{\text{saída}} \quad (3.40)$$

$$\Delta V_{\text{saída}} = 0,05 * V_{\text{saída}} \quad (3.41)$$

Com os valores de corrente média na carga e tensão de saída, calcula-se a resistência média na carga através da equação (3.42).

$$R_{\text{carga}} = \frac{V_{\text{saída}}}{I_{\text{carga}}} \quad (3.42)$$

Com estes valores dimensiona-se o capacitor e o indutor. É adotado uma frequência de comutação f_s de 10Khz.

Conversor	Boost	Buck
Cálculo do Indutor	$L = \frac{V_{\text{entrada}} * D}{\Delta I_{\text{saída}} * f_s}$	$L = \frac{V_{\text{entrada}}(1-D) * D}{\Delta I_{\text{saída}} * f_s}$
Cálculo do Capacitor	$C = \frac{I_{\text{carga}} * D}{\Delta V_{\text{saída}} * f_s}$	$C = \frac{V_{\text{carga}}(1-D)}{8 * L * \Delta V_{\text{saída}} * f_s^2}$

Tabela 4: Fórmulas do indutor e capacitor conversores Boost e Buck. Elaborado pelo autor.

Após a obtenção dos valores das equações (3.36) à (3.42) para cada arranjo, é calculado os valores dos elementos passivos utilizando as fórmulas da Tabela 4.

A tensão de entrada dos conversores é dependente da quantidade de painéis em série e a corrente de entrada é dependente da quantidade de arrays ligados aos conversores. As organizações de todos os 9 arranjos definiram os valores expressos nas Tabelas 5 e 6.

Arranjo/Conversor		Arranjo 1	Arranjo 2	Arranjo 3	Arranjo 4	Arranjo 5
Parâmetros	Unid.	Boost	Boost	Boost	Boost	Boost
Potência de Entrada	KW	26,009	5,201	2,6009	26,009	5,2018
Tensão de Entrada	V	155	155	155	310	310
Corrente de Entrada	A	167,8	33,56	16,78	83,9	16,78
Tensão de Saída	V	400	400	400	400	400
Máxima Ondulação de Corrente		0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Máxima Ondulação de Tensão		0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Valores de saída dos Arranjos com Conversor Boost						
Ciclo de Trabalho		0,612	0,612	0,612	0,225	0,225
Potência Média de Saída	KW	22,107	4,421	2,210	22,107	4,425
Corrente Média de Saída	A	55,269	11,053	5,526	55,269	11,053
Max. Ondulação de corrente	A	0,552	0,110	0,055	0,552	0,110
Max. Ondulação de Tensão	V	20	20	20	20	20
Resistência da Carga	Ω	7,237	36,186	72,373	7,237	36,186
Valor do Indutor	H	0,01717	0,0858	0,171	0,01262	0,063
Valor do Capacitor	F	0,000170	3,419E-05	1,709E-05	6,279E-05	1,255E-05

Tabela 5: Valores calculados dos conversores. Arranjos 1, 2, 3, 4 e 5. Elaborado pelo autor.

Os 5 primeiros arranjos usam o Boost elevador de tensão, tendo em vista que são compostos de arrays de 5 e 10 painéis. Um array de 5 painéis fornece uma tensão de 155V na entrada do conversor, pois são 5 painéis em série de 31V. Arrays de 10 painéis fornecem uma tensão de 310V na entrada do conversor. Como os conversores precisam ter na saída 400V (tensão no barramento CC), foi usado o conversor Boost para elevar a tensão com ganhos de 0,612 para os 3 primeiros arranjos e ganhos de 0,225 para os arranjos 4 e 5.

Arranjo/ Conversor		Arranjo 6	Arranjo 7	Arranjo 8	Arranjo 9
Parâmetros	Unid.	Buck	Buck		
Rendimento do Conversor		0,85	0,85	0,85	0,85
Potência de Entrada	KW	26,009	5,2018	26,009	26,009
Tensão de Entrada	V	620	620	775	775
Corrente de Entrada	A	41,95	8,39	33,56	33,56
Tensão de Saída	V	400	400	400	400
Máxima Ondulação de Corrente		0,01	0,01	0,01	0,01
Máxima Ondulação de Tensão		0,05	0,05	0,05	0,05
Valores do Conversor					
Ciclo de Trabalho		0,645	0,645	0,516	0,516
Potência Média de Saída	KW	22,107	4,423	22,107	5,5269
Corrente Média de Saída	A	55,269	11,053	55,269	13,817
Max. Ondulação de corrente	A	0,552	0,110	0,552	0,138
Max. Ondulação de Tensão	V	20	20	20	20
Resistência da Carga	Ω	7,237	36,186	7,23	28,94
Valor do Indutor	H	0,0256	0,128	0,0350	0,140
Valor do Capacitor	F	2,76E-06	5,52E-07	3,454E-07	8,63E-08

Tabela 6: Valores calculados dos conversores. Arranjos 6, 7, 8 e 9. Elaborado pelo autor.

Os 4 últimos arranjos usaram o Buck abaixador de tensão, tendo em vista que são compostos de arrays de 20 e 25 painéis. Um array de 20 painéis fornece uma tensão de 620V na entrada do conversor, pois são 20 painéis em série de 31V. Arrays de 25 painéis fornecem uma tensão de 775V na entrada do conversor. Como os conversores precisam ter na saída 400V (tensão no barramento CC), foi usado o conversor Buck para abaixar a tensão com ganhos de 0,645 para os arranjos 6 e 7 e de 0,516 para os arranjos 4 e 5.

Controlador PI e Análise de Rendimento

4.1. Introdução

Com a obtenção das funções de transferência do sistema linearizado, é possível aplicar as ferramentas convencionais de projetos de controladores para que o sistema apresente a dinâmica desejada.

4.2. Controlador aplicado ao controle da tensão terminal do painel.

O controlador tem a função de melhorar o desempenho do sistema em relação a alguma variação que possa acarretar em uma mudança na variável de interesse. Nos conversores estáticos, o controlador deve fazer o sistema trabalhar em uma margem de fase positiva. Ou seja, garantir que o sistema seja estável e também fazer com que a variável de saída (tensão) se mantenha estável, mesmo com a presença de distúrbios (VILELA, 2011).

Como na modelagem do sistema foi levado em conta apenas a resistência do indutor, o sistema deverá ser estável e manter a tensão de entrada fixa mesmo quando forem consideradas outras resistências, tais como a resistência da chave e a do diodo.

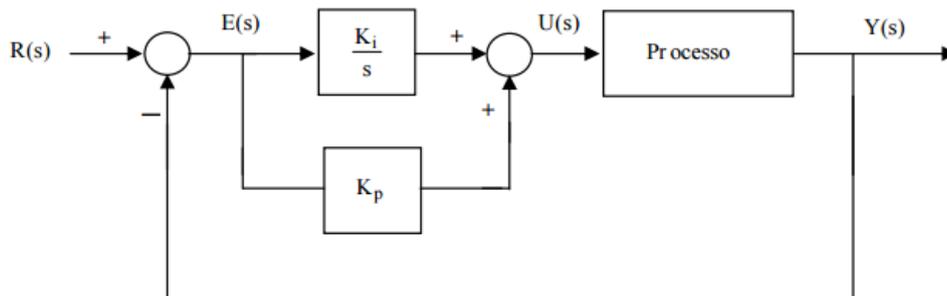


Figura 19: Diagrama de Bloco PI. Elaborado pelo autor.

$$C(s) = Kp + \frac{Ki}{s} \quad (4.1)$$

Após a obtenção da função de transferência para pequenos sinais indicada como "Processo" na Figura 19, é utilizada a ferramenta "sisotool" do Matlab, para obter os parâmetros do controlador (equação acima) que são os ganhos proporcional (Kp) e integral (Ki). Tais grandezas variam de acordo com a topologia desejada visto que cada uma demanda um conversor com parâmetros de entrada diferentes. O sisotool é a janela representada pela

Figura 20. Os campos a serem preenchidos são frequência de corte (*Bandwidth*) e margem de fase (*Phase margin*). É necessário também escolher o tipo de controlador (*Controller type*) e foi escolhido o PI.

A escolha por esse controlador foi devido ao fato de que é necessário ter o erro o mais próximo de zero possível, característica principal da ação integral.

De acordo com (VILLALVA, 2010) pode-se sintonizar os ganhos K_i e K_p pelo ajuste da margem de fase, que varia entre 70° e 80° , com uma frequência de corte na ordem de um décimo da frequência de chaveamento para o sistema em malha fechada. Como foi usado 10KHz, o valor da frequência de corte é 6,28K rad/s.

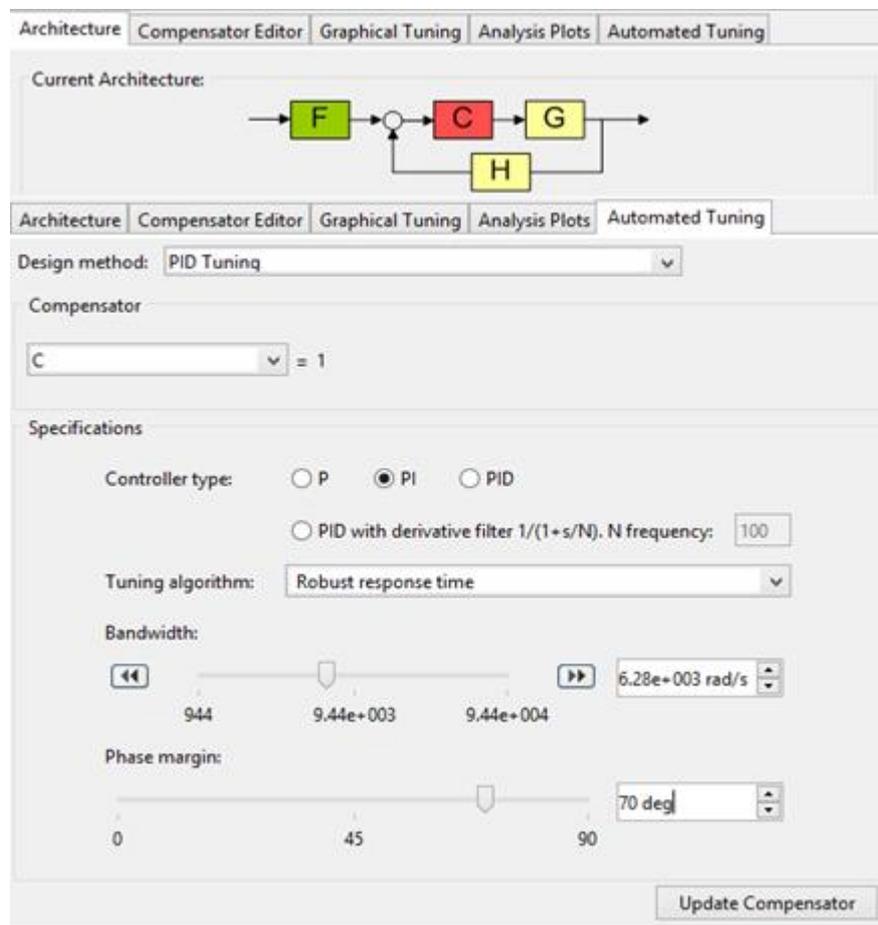


Figura 20: Ferramenta *sisotool* extraída do Software *Matlab*. Elaborado pelo autor.

Os ganhos obtidos pelo *sisotool* estão representados na Tabela 7.

Topologia	Kp	Ki
1	-0,330	-37,164
2	-0,836	-92,909
3	-0,790	-88,067
4	-0,136	-15,321
5	-0,125	-14,084
6	-0,005	-23,241
7	-0,005	-23,209
8	-0,061	-6,921
9	-0,061	-6,701

Tabela 7: Ganhos das topologias. Elaborado pelo autor.

4.3. Consolidação do PI

Para consolidação do PI foram alteradas as formas de onda da tensão de referência do sistema com o objetivo de examinar tanto o funcionamento quanto a robustez. Nas simulações para análise de rendimento a referência é a tensão de máxima potência (V_{mp}) do arranjo. Entretanto, para a verificação da eficiência do controle foi mudado o valor da referência para uma variação em rampa e em degrau como observado nas Figuras 21 e 22.

Verifica-se que o sistema se mantém estável para uma variação significativa da tensão de referência ($RefV$). A tensão do arranjo (V_{painel}) segue a referência com um erro muito pequeno em ambos os casos. O arranjo 3 foi usado para plotar as figuras abaixo com a tensão de máximo de 155V.

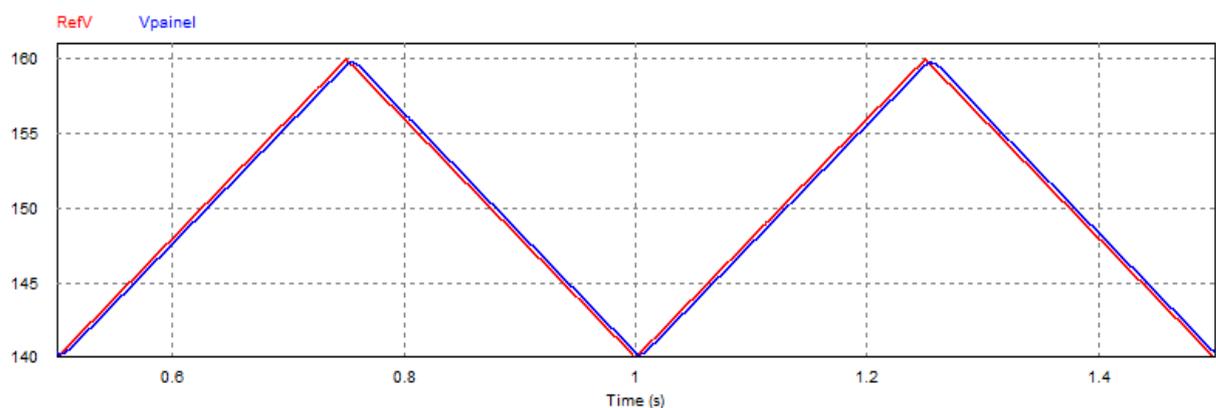


Figura 21: Variação da Referência em Rampa. Elaborado pelo autor.

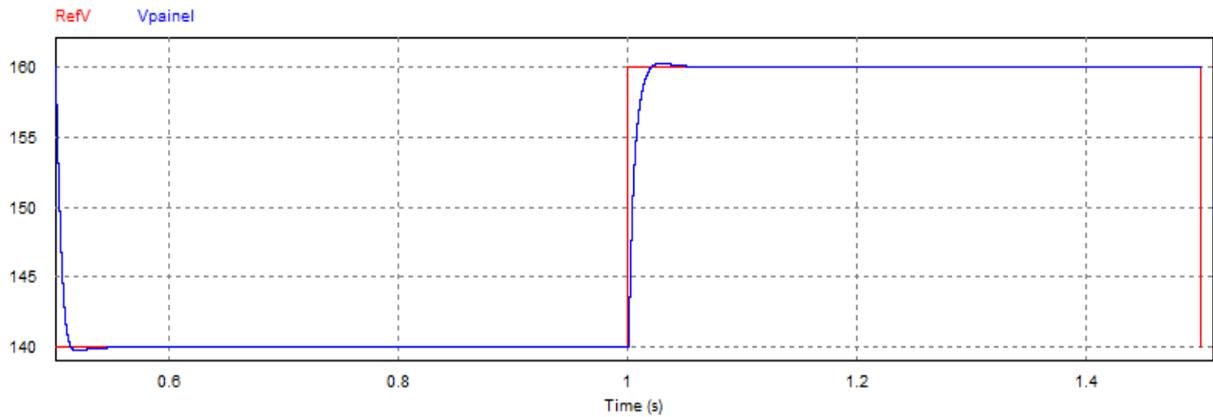


Figura 22: Variação da Referência em Degrau. Elaborado pelo autor.

4.4. Análise de Rendimento

Com a obtenção do modelo do painel linearizado e acoplado aos conversores, as topologias definidas, os valores dos componentes dos conversores calculados e os ganhos do PI para o controle da tensão de entrada, é possível estimar os rendimentos de cada topologia.

O Software escolhido para ser feita a análise foi o *PSIM*, onde já é encontrado o modelo do painel que foi usado para simular as topologias acopladas aos conversores. A Figura 23 ilustra a montagem do circuito dividida em 3 partes. No caso específico da imagem é o conversor Boost. A parte 1 é o modelo do painel fotovoltaico, a parte 2 o modelo do conversor e a parte 3 é o controle de tensão.

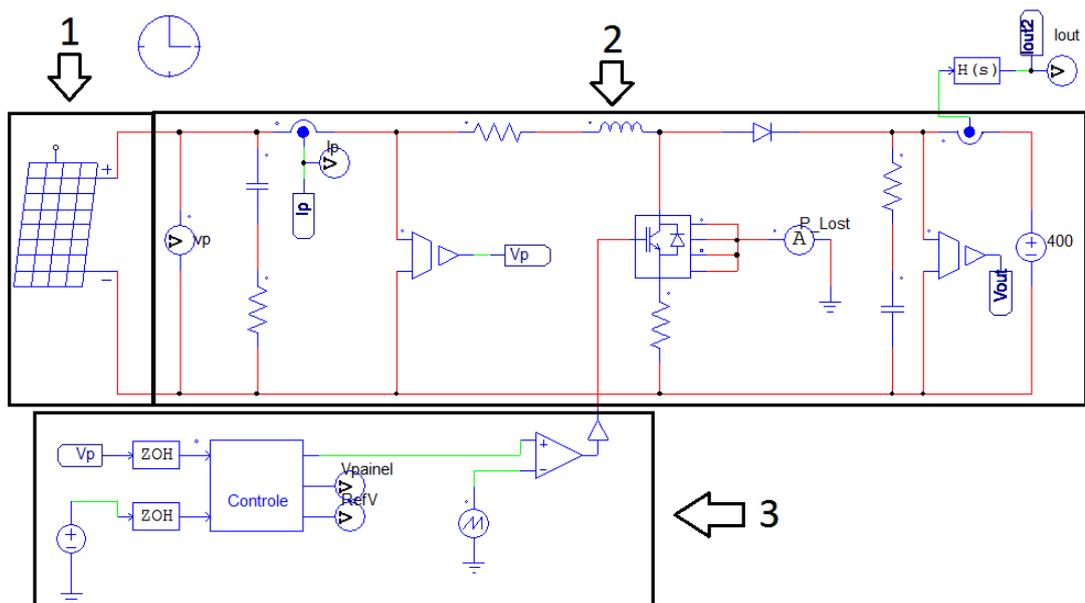


Figura 23: Montagem do Circuito no PSIM. Elaborado pelo autor.

O modelo do painel é usado com os valores do arranjo. Cada topologia possui seus dados de corrente (*Maximum Power Current Im*) e tensão (*Maximum Power Voltage*), apresentados na Figura 24, que são os valores de entrada dos conversores CC-CC.

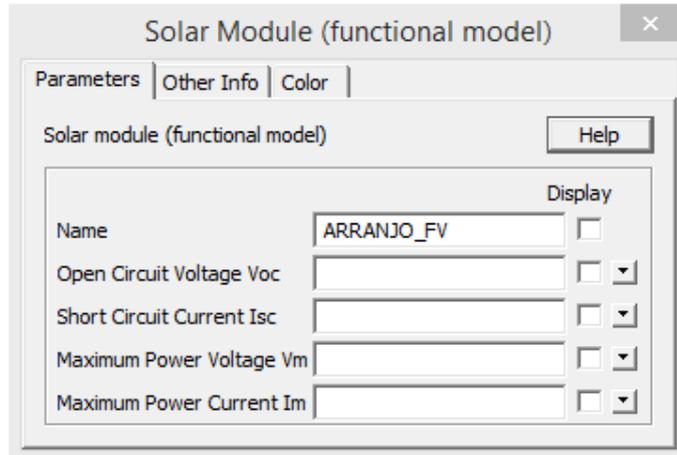


Figura 24: Seleção dos dados de entrada do Arranjo Fotovoltaico. Elaborado pelo autor.

No modelo do conversor são consideradas perdas resistivas em todos os componentes com os respectivos valores expressos abaixo.

- ✓ Resistência do Indutor=0,4Ω
- ✓ Resistencia do Diodo= 0,4Ω
- ✓ Resistencia da Chave= 0,4Ω
- ✓ Resistencia dos Capacitores= 0,005 Ω.

A terceira parte da Figura 23 é o controle de tensão do arranjo fotovoltaico. Como é considerado que existem perdas, há um ponto de máxima razão entre a tensão de entrada e o ciclo de trabalho que mantém o sistema estável. Distúrbios no controle de tensão podem ocorrer em virtude do aumento das perdas do conversor.

Para que não ocorra variação na tensão de entrada, o circuito de controle terá de atuar sobre o ciclo de trabalho (ganho do conversor) de maneira a ser mantida a tensão ótima, ou seja, a tensão de máxima potência de todo o arranjo. A análise do rendimento é feita quando o circuito entra em regime permanente, pois há um transitório inicial por limitação do modelo usado.

A saída do Bloco de Controle (Erro PI) é a entrada do circuito comparador que realiza o cálculo da razão de condução da chave através da modulação por largura de pulso. O circuito comparador gera um trem de pulsos, de amplitude constante, com largura proporcional a um sinal de entrada, nesse caso o sinal do Erro PI, proveniente do Algoritmo de controle. A Figura 25 evidencia o processo.

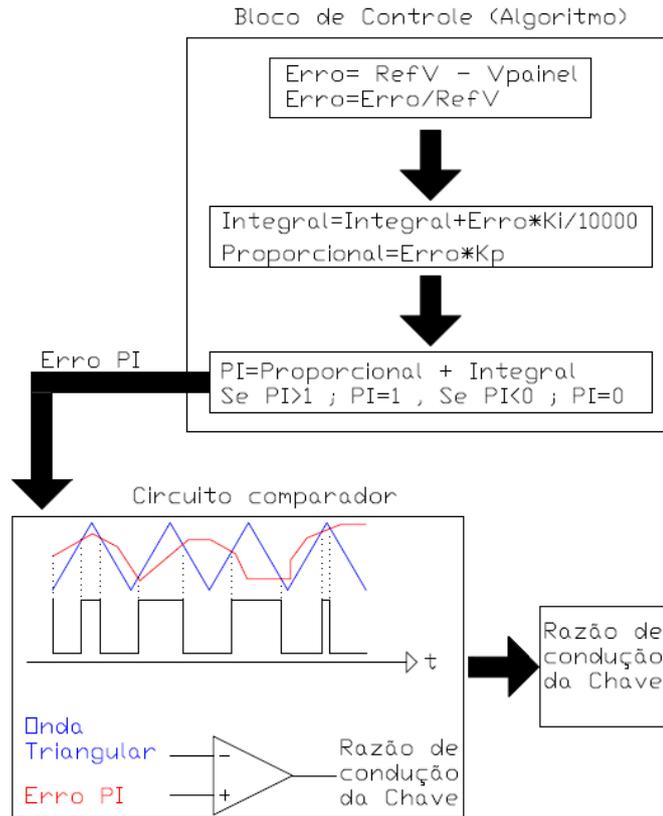


Figura 25: Algoritmo para abertura da chave. Elaborado pelo autor.

Para o cálculo de rendimento foram feitas medições de entrada e saída do sistema. Sensores no *PSIM* fazem a medição dinâmica do arranjo. I_p e V_p são a corrente e a tensão de entrada do conversor (corrente e tensão de saída do arranjo fotovoltaico) e I_{out} e V_{out} são a corrente e a tensão de saída do conversor. Os sensores são ilustrados pela Figura 26 onde η é o rendimento (potência de entrada dividida pela potência de saída).

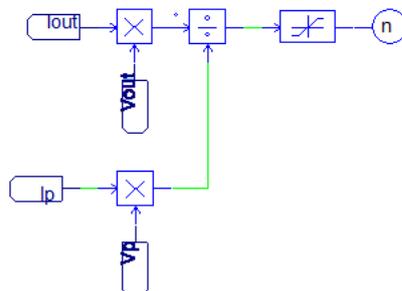


Figura 26: Diagrama do cálculo do rendimento no PSIM através dos sensores de medição. Elaborado pelo autor.

É importante ressaltar que uma das premissas do desenvolvimento da análise do rendimento é que o sistema esteja em seu ponto de máximo. A Tabela 8 expressa os valores de rendimento de todos os 9 arranjos.

Topologia	Corrente de entrada do conversor (A)	Rendimento médio (%)	Conversor
1	167,8	68,1	Boost
2	33,56	81,7	Boost
3	16,78	90,3	Boost
4	83,9	77,7	Boost
5	16,78	95,3	Boost
6	41,95	88,2	Buck
7	8,39	97,0	Buck
8	33,56	89,1	Buck
9	8,39	97,0	Buck

Tabela 8: Rendimento das Topologias. Elaborado pelo autor.

Conclusão

5. Análise dos resultados

Os arranjos que possuem maiores correntes de entrada foram as que obtiveram menores rendimentos, são as topologias 1 e 4. Pelo fato de terem correntes mais elevadas as perdas por efeito Joule e por chaveamento são maiores.

Juntamente aos arranjos citados anteriormente são encontrados os arranjos 6 e 8 que não possuem elevada corrente de entrada. Porém, apresentam dependência de todo o sistema ligado a somente um conversor, o que tornaria todo o arranjo inviável devido ao fato de que quando houver uma deficiência e ou uma falha no conversor, todo o sistema se tornará obsoleto.

O conversor Boost mostrou ter menor rendimento que o conversor Buck, pelo fato da alta corrente circular pelo indutor e pela chave, que são elementos que causam grandes perdas. Já no Buck a alta corrente passa apenas pelos elementos passivos. Portanto, há correntes de menor valor circulando nos elementos que causam maiores perdas.

Dentre os que obtiveram os melhores rendimentos estão os dois com a menor corrente de entrada, arranjo 7 e 9, tendo perdas menores. Entretanto, há uma forte dependência do sistema a um número significativo de potência relacionado a somente um conversor.

Tendo em vista que 20% da potência gerada na topologia 7 e 25% da potência gerada na topologia 9 estão atreladas diretamente a somente um conversor, torna-se inviável situações de manutenção e ou falhas atreladas aos conversores. Porém, se comparado às topologias que possuem somente um conversor para todo o sistema, já se tornam mais atrativas.

O arranjo 3 foi montado no sentido tanto de se tentar obter uma menor dependência de um conversor em relação à potência gerada, quanto para se obter uma boa eficiência. Entretanto, em relação aos melhores rendimentos expressos na Tabela 8 que são as topologias 7 e 9, a topologia 3 ficou cerca de 7% abaixo. O que resulta em 90% de rendimento e uma perda de 1,82KW de potência do sistema em relação às topologias mais eficientes.

Houve um aumento do rendimento se comparado a todos os sistemas que usaram o conversor Boost e uma diminuição da dependência de conversores acoplados ao sistema, já que nesta topologia foram usados 10 conversores.

As topologias 3, 7 e 9 foram as que obtiveram os resultados mais significativos dentro dos critérios de rendimento e dependência do conversor.

Recomendações de trabalhos futuros podem partir do princípio da análise de rendimento de diferentes arranjos acopladas a conversores CC-CA.

Bibliografia

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Bandeiras tarifárias valem a partir de janeiro**: 2015. Disponível em: < <http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2015/01/sistema-de-bandeiras-tarifarias-sera-incorporado-nas-contas-em-janeiro>>. Acesso em: 03 abr. 2017.

ANICETO, José Manuel Antunes. **CONVERSOR DC-DC COM BUSCA DE PONTO DE POTÊNCIA MÁXIMA (MPPT) PARA PAINÉIS SOLARES**. 2010. 110 F. Tese (Mestre) - Curso de Engenharia Elétrica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2010, Cap. 4.

BARBI, Ivo. **INTRODUÇÃO A CONVERSORES CC-CC**. 2001 . Capítulo 2, Capítulo 3 e Capítulo 4. Disponível em: www.inep.ufsc.br. Acesso em: 24/02/2017.

BASTOS, Renan Fernandes. **SISTEMA DE GERENCIAMENTO PARA CARGA E DESCARGA DE BATERIAS (CHUMBO ÁCIDO) E PARA BUSCA DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA GERADA EM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS EMPREGADOS EM SISTEMAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**. 2013. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013. Cap. 2.

BRAGA Renata Pereira. **ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA; FUNDAMENTOS E APLICAÇÕES**. 2008. 80 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Bacharel, Rio de Janeiro, 2008. Cap. 2.

CASTRO, Nivalde; BRANDÃO, Roberto. **Preço x custo da energia no setor elétrico brasileiro**: Valor Econômico. 2014. Disponível em: <http://www.portaldoeconomista.org.br/comunicacao/noticias_detalhes.php?notId=2764>. Acesso em: 03 jun. 2016.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO BRITO. **Potencial Solar Sun Data**. Disponível em: < <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata&> >. Acesso em: 24 fev.2017.

DEUTSCHE WELLE, (Comp.). **Energia solar: veja países com maior capacidade instalada**: Sustentabilidade. 2013. Disponível em: <<http://noticias.terra.com.br/ciencia/sustentabilidade/energia-solar-veja-paises-com-maior-capacidade-instalada,bdde94fdabe30410VgnCLD2000000dc6eb0aRCRD.html>>. Acesso em: 03 jun. 2016.

MADEIRO, Carlos. **Nível de água de 85% das hidrelétricas é menor que em 2001, ano do apagão**: Cotidiano. 2015. Disponível em: <<http://noticias.uol.com.br/cotidiano/ultimas-noticias/2015/01/21/nivel-de-agua-de-85-das-hidreletricas-e-menor-que-em-2001-ano-do-apagao.htm>>. Acesso em: 21 jan. 2016.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Governo prepara salto da energia solar em residências e empresas:** Em 10 anos, 700 mil unidades consumidoras deverão ter painéis fotovoltaicos. 2015. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/web/guest/area-de-imprensa/-/asset_publisher/AiNH1N2aVCzE/content/governo-prepara-salto-da-energia-solar-em-residencias-e-empresas;jsessionid=56033C46475CC198C2425FFA9F7883F0.srv154>. Acesso em: 03 jun. 2015.

MOÇAMBIQUE, Nilton Eufrázio Martinho. **APLICAÇÃO DE ALGORITMOS DE BUSCA DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA E CONTROLADORES LINEARES E/OU FUZZY PARA REGULAÇÃO DA TENSÃO TERMINAL DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS.** 2012. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. Cap. 2.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antônio. **MANUAL DE ENGENHARIA PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.** Rio de Janeiro: Revisada e Atualizada, 2014. 530 p. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf>. Acesso em: 31 mai. 2016.

POMILIO, José Antenor. **Fontes Chaveadas.** 2014. Capítulo 1 e Capítulo 8 Disponível em: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/files/CAP8.pdf>. Acesso em: 06/06/2016

REMES Chrystian Lenon. **CARACTERIZAÇÃO POR SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS E MÉTODO DE RASTREAMENTO DO MÁXIMO PONTO DE POTÊNCIA BASEADO EM REDES NEURAS ARTIFICIAIS.** 2013. 91 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Elétrica, Centro de Ciências Tecnológicas, Bacharel, Joinville, 2013. Cap. 2.

SISTEMA FURNAS DE GERAÇÃO E TRANSMISSÃO. **Usina termelétrica Convencional:** Parque Gerador. Disponível em: <http://www.furnas.com.br/hotsites/sistemafurnas/usina_term_funciona.asp>. Acesso em: 03 jun. 2016.

VILELA, Afrânio Ornelas Ruas. **PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM CONVERSOR BOOST CONTROLADO EM MODO DE TENSÃO.** 2011. 69 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011. Cap. 2.

VILLALVA, Marcelo Gradella. **Conversor Eletrônico de Potência Trifásico para Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica.** 2010. 292 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010. Cap. 2.

Anexos. Parte da Conta de luz da Empresa de Pequeno porte.

NOTA FISCAL - CONTA DE ENERGIA ELÉTRICA - SÉRIE					
Classe		Subclasse		Data	
Industrial Trifásico		Industrial		ANTERIOR 26/10	
Tipo de Medição		Medição		Leitura Anterior	
Energia kWh		ARB137009376		58.423	
Indicadores de Qualidade de Fornecimento					
Nova Era					
Mês: 09/2016					
Apurado Mensal			Valores Permitidos:		
	Mensal	Mensal	Trimestral	Anual	
DIC	2,72	10,87	21,74	43,49	
FIC	1,00	7,52	15,04	30,09	
DMIC	2,72	5,88	-	-	
DICRI	0,00	16,60	-	-	
Tensão: Nominal=127/220 V Min.=117/202 V Máx.=133/231 V					
Valor Encargo Uso Sist. Distribuição: R\$851,90					
Informações de Faturamento					
Parcelas	Valor R\$	%	Parcelas	Valor R\$	%
Energia	1.181,52	36,65	Enc. Setoriais	447,79	13,89
Distribuição	716,08	22,22	Tributos	772,31	23,96
Transmissão	105,69	3,28	Total	3.223,39	100,00
Histórico do Consumo					
Mês/Ano	Consumo kWh	Média kWh/Dia	Dias de Faturamento		
NOV/16	4.508	150,26	30		
OUT/16	2.988	90,54	33		
SET/16	3.059	98,67	31		
AGO/16	2.949	101,68	29		
JUL/16	3.205	103,38	31		
JUN/16	3.263	105,25	31		
MAI/16	4.041	139,34	29		
ABR/16	3.289	99,66	33		
MAR/16	3.338	119,21	28		
FEV/16	1.939	64,63	30		
JAN/16	3.426	103,81	33		
DEZ/15	3.479	124,25	28		
NOV/15	0	0,00	30		