

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

NATÁLIA APARECIDA CARNEIRO FERNANDES

**ANÁLISE DE RASTREADORES FOTOVOLTAICOS APLICADOS À
SISTEMAS DE CARREGAMENTO DE BATERIAS BASEADO NO
CONVERSOR *BUCK***

VIÇOSA
2016

NATÁLIA APARCEIDA CARNEIRO FERNANDES

**ANÁLISE DE RASTREADORES FOTOVOLTAICOS APLICADOS À
SISTEMAS DE CARREGAMENTO DE BATERIAS BASEADO NO
CONVERSOR *BUCK***

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Heverton Augusto Pereira.

VIÇOSA
2016

Nesta página será inserida a ficha catalográfica correspondente à sua Monografia. Ela será elaborada pelo pessoal da Biblioteca Central da UFV.

A priori deixa a página em branco.

NATÁLIA APARECIDA CARNEIRO FERNANDES

**ANÁLISE DE RASTREADORES FOTOVOLTAICOS APLICADOS À
SISTEMAS DE CARREGAMENTO DE BATERIAS BASEADO NO
CONVERTOR *BUCK***

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 05 de DEZEMBRO de 2016.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Heverton Augusto Pereira - Orientador
Universidade Federal de Viçosa

Prof. M. Sc. Allan Fagner Cupertino - Membro
Universidade Federal de Viçosa

Prof. M. Sc. Erick Matheus da Silveira Brito - Membro
Universidade Federal de Minas Gerais

Eng. Lucas Santana Xavier - Membro
Universidade Federal de Minas Gerais

“Não é a vida que importa, mas sim a maneira como a vivemos, pois há vidas que não valem um momento, mas há momentos que valem uma vida.”

(Autor Desconhecido)

Aos meus pais, Rosália e Antônio.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por iluminar minha vida e por ter me concedido uma família tão maravilhosa. Agradeço imensamente aos meus pais Rosália e Antônio por terem feito do meu sonho o deles, me dando todo o carinho, amor, zelo, conselhos, possibilitando essa grande conquista em nossas vidas. Aos meus queridos irmãos, avós, tios, primos, amigos pelo incentivo e amparo. À meu namorado, Túlio, pela motivação, sendo meu porto seguro nos momentos mais difíceis desta jornada.

Às escolas as quais estudei, muito obrigada pelo acolhimento, pelos conhecimentos repassados, em especial ao professor Ladinho agradeço pelo incentivo, conselhos e por despertar o amor pela área acadêmica que escolhi. Ao departamento de Engenharia Elétrica-UFV por me tornar Engenheira Eletricista!

Ao GESEP pela possibilidade de realizar trabalhos engrandecedores, onde fui muito bem orientada pelo meu orientador, professor, incentivador e amigo, Heverton Augusto Pereira. Agradeço-o pela confiança e disposição para a realização deste trabalho.

Aos amigos do Gesep pela amizade, pelos ensinamentos e pela disposição em sanar minhas dúvidas. À CNPq pelo apoio financeiro concedido, sem o qual esta pesquisa não teria sido possível.

Aos melhores amigos que a UFV poderia me dar, Laíne, Rodrigo Barros, Shi, Thaís, Ícaro, Dhiogo, Clara, Mateus, Sacul, Cath, Brayan, Rodrigo Santos, muito obrigado pelo companheirismos nos estudos, pelas brincadeiras, viagens, almoços, por tudo aquilo que tornaram essa jornada inesquecível.

Resumo

No atual quadro político e social em que vivemos, a busca por fontes de energia limpas e renováveis se tornou uma necessidade. Diante deste contexto, a energia fotovoltaica se apresenta como uma fonte que além de apresentar as características citadas acima, também tem se tornado economicamente viável, crescendo continuamente sua participação na matriz energética mundial. O nível de irradiação que incide perpendicularmente sobre os painéis fotovoltaicos, responsáveis pela conversão da energia solar em energia elétrica, influencia diretamente na potência gerada por ele. No entanto, devido principalmente ao movimento aparente solar durante o dia, o painel estático não capta a maior irradiação disponível. Assim, para aumentar a eficiência dos painéis fotovoltaicos, estes podem ser acoplados a seguidores solares que permitem a variação da posição do painel conforme localização do sol, permitindo que um maior nível de irradiação seja absorvida pelo painel e conseqüentemente maior potência seja produzida por ele. Este trabalho objetiva analisar o funcionamento dos sistemas de rastreamento solar unidirecional e bidirecional e verificar o ganho de energia gerada por um painel com a utilização de seguidores solares quando comparados com sistema fixos. Para alcançar os objetivos almejados foi realizada uma simulação computacional onde a irradiação incidente sobre um painel fotovoltaico, conectado a uma bateria por meio de um conversor *buck*, poderá apresentar diferentes perfis da irradiação tipicamente captada durante um dia por painéis estáticos ou móveis, de um ou dois eixos. Além disso, como uma etapa importante deste trabalho, foi realizada a modelagem do conversor *buck*, e, posteriormente, o projeto de controladores para atuar sobre a planta simulada. Os resultados observados possibilitaram chegar à conclusão que painéis fotovoltaicos acoplados a sistemas de rastreamento solar geram um acréscimo significativo na energia produzida, quando comparada à energia gerada por painéis fixos. Houve um ganho de 15% para painéis com seguidor de 1 eixo e de 24% para painéis com seguidor de 2 eixos.

Abstract

In the current political and social context in which we live the search for clean and renewable energy sources has become a necessity. Therefore, in addition to the characteristics mentioned above, photovoltaic energy has become economically feasible, and its participation in the world energy matrix has continuously increased. The irradiation level which perpendicularly affects the photovoltaic panels is responsible for the conversion of solar energy into electric energy and directly influence the power generated by it. However, due mainly to the apparent solar movement during the day, the static panel does not capture the largest irradiation available. Thus, to increase the efficiency of photovoltaic panels, these can be coupled to solar trackers that allow the variation of the panel position according to the location of the sun, allowing a higher level of irradiation to be absorbed by the panel and consequently more power is produced by it. This work aims to analyze the operation of the unidirectional and bidirectional solar tracking systems and verify the energy gain generated by a panel with the use of solar trackers when compared with fixed systems. In order to reach the desired objectives, a computational simulation was created. The goal is analyze the irradiation incident on a photovoltaic panel connected to a battery by means of a buck converter. The simulation intends to present the same profile of the irradiation typically captured during one day by static or mobile panels. In addition, as an important step of this work, the buck converter modeling and the design of controllers to act on the simulated plant were performed. The found results allowed us to conclude that panels coupled with solar tracking systems generate an increase in the energy produced.

Sumário

1	Introdução.....	15
1.1	Evolução e Panorama da Energia Solar no mundo.....	16
1.2	Energia Solar no Brasil.....	18
1.3	Eficiência das células fotovoltaicas.....	19
1.4	Objetivo Geral.....	20
3.1.2	Objetivos Específicos.....	20
1.5	Motivação.....	20
1.6	Organização do Trabalho.....	20
2	Revisão Bibliográfica.....	22
2.1	Energia Solar.....	22
2.2	Influência da temperatura e da irradiação incidente.....	23
2.3	Movimento solar aparente.....	24
2.4	Seguidor Solar.....	25
2.4.1	Tipos de Seguidores Solares.....	25
3	Metodologia.....	28
3.1	Cálculo da Irradiação.....	28
3.1.1	Sistema estático.....	29
3.1.2	Seguidor solar de um eixo.....	30
3.1.3	Seguidor solar de dois eixo.....	31
3.2	Modelagem do conversor cc/cc Buck.....	31
3.3	Malha de controle.....	38
3.3.1	Projeto dos controladores por Alocação de Polos.....	39
4	Resultados e Discussões.....	44
4.1	Análise do Sistema de Controle.....	44
4.1	Resultados da simulação no PLECS.....	46

5	Conclusões.....	52
6	Referências Bibliográficas	53

Lista de Figuras

Figura 1- Evolução do potencial energético fotovoltaico no mundo [2].	16
Figura 2 - Contribuição global na potência instalada de energia fotovoltaica ao final de 2015 [2].	17
Figura 3 - Previsão do crescimento do potencial fotovoltaico até 2020 [2].	17
Figura 4 - Curvas V-I e V-P para diferentes níveis de irradiação [15].	23
Figura 5 - Curvas IxV e PxV para diferentes níveis de temperatura [15].	23
Figura 6 - Posição solar descrita em termos dos ângulos de altitude e de azimute [16].	24
Figura 7 - Classificação dos Seguidores Solares quanto ao número de eixos: 1) painel estático - 0 eixos, 2) painel com controle unidirecional - 1 eixo, 3) painel com controle bidirecional - 2 eixos [23].	26
Figura 8 - Capacidade de captação da irradiação solar para painéis estáticos e móveis de um e dois eixos [24].	27
Figura 9 - Esquema para carregamento de bateria [23].	31
Figura 10 - Topologia de um conversor buck [23].	32
Figura 11 - Circuito equivalente para o dispositivo semiconductor em saturação [23].	32
Figura 12 - Circuito equivalente para o dispositivo semiconductor em corte [23].	33
Figura 13 - Malha de controle completa.	38
Figura 14 - Malha de controle interna.	39
Figura 15 - Coeficiente de Amortecimento x Ultrapassagem Máxima Percentual [27].	41
Figura 16 - Malha de controle externa.	41
Figura 17 - (a) Resposta da malha de controle à entrada degrau; (b) Destaque para resposta da malha interna e da malha completa.	45
Figura 18 - (a) Entrada rampa; (b) Resposta da malha de controle completa à entrada rampa.	46

Figura 19 - Irradiação absorvida pelo painel fixo e móvel.....	46
Figura 20 - (a) Painel estático; (b) Painel móvel (1 eixo); (c) Painel móvel (2eixos).....	47
Figura 21 - (a) Painel estático; (b) Painel móvel (1 eixo); (c) Painel móvel (2eixos).....	48
Figura 22 - (a) Painel estático; (b) Painel móvel (1 eixo); (c) Painel móvel (2 eixos).....	49
Figura 23 - Corrente do painel para os 3 perfis de irradiação.	50
Figura 24 - Potência gerada para os diferentes perfis de irradiação.....	50
Figura 25 - Eficiência Instantânea para as configurações de irradiação analisada.....	51

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Rendimento médio obtidos em células e módulos fotovoltaicos [11].....	19
Tabela 2 - Comparação das características dos tipos de seguidores solares [22].....	26
Tabela 3 - Valor das variáveis do sistema.	38

1 Introdução

O Sol é, sob todos os aspectos, responsável direto pela manutenção da vida em nosso planeta, e é a origem de todas as formas de energia conhecidas, direta ou indiretamente.

A energia que a Terra recebe do Sol anualmente é estimada em $1,5 \times 10^{18}$ KWh, este número corresponde cerca de 10.000 vezes o consumo mundial de energia em todas as formas conhecidas [1]. No entanto, apenas uma pequena percentagem desse total de energia solar que atinge a atmosfera é aproveitada para a produção de energia elétrica, visto que, a capacidade instalada mundial de energia fotovoltaica em 2015 era de 229.3 GW [2].

Nota-se assim, que a energia solar, sendo uma fonte renovável e limpa, pode ser explorada em uma proporção muito maior para a produção de energia elétrica. Tal exploração em escala maior não ocorre devido ao alto custo associado ao baixo rendimento na produção de energia, e, também, em consequência a falta de maiores investimento governamentais. Um exemplo da falta de investimentos é o primeiro leilão de energia solar no Brasil ocorrido em 2013 [3].

Não se pode ainda afirmar que a energia solar se configura como a solução final para o problema da produção de energia mundial atualmente, mas os ganhos com sua utilização são notáveis [4]:

- Facilidade para realização da instalação, exigindo manutenções raras;
- Descentralização da geração de energia elétrica, tornando possível a aplicação em locais remotos;
- Alta durabilidade, no quesito vida útil dos painéis, responsáveis pela conversão da energia solar em elétrica.

Percebe-se pelos benefícios citados acima e também pelo cenário mundial favorável à utilização de fontes renováveis, que a energia fotovoltaica tende a crescer.

A geração de energia solar pelos painéis fotovoltaicos têm muito a evoluir ainda, mas é notável que a energia solar com seus grandes benefícios poderá se tornar uma das principais fontes a integrar os meios de geração existentes, possibilitando ao planeta um desenvolvimento sustentável, e à população a possibilidade de reduzir os gastos com a conta de luz, gerando eletricidade em suas próprias casas.

1.1 Evolução e Panorama da Energia Solar no mundo

Um estudo divulgado pela EPIA (European Photovoltaic Industry Association) com base na coleção de dados do setor fotovoltaico nas indústrias, concessionárias de energia, associações e agências nacionais de energia revela a evolução da capacidade instalada mundial de energia fotovoltaica entre os anos de 2000 e 2015 [2].

Nota-se pela Figura 1 o grande crescimento da capacidade instalada mundial entre os anos 2000-2015. Os dados apresentados nesta figura são todos em GW.

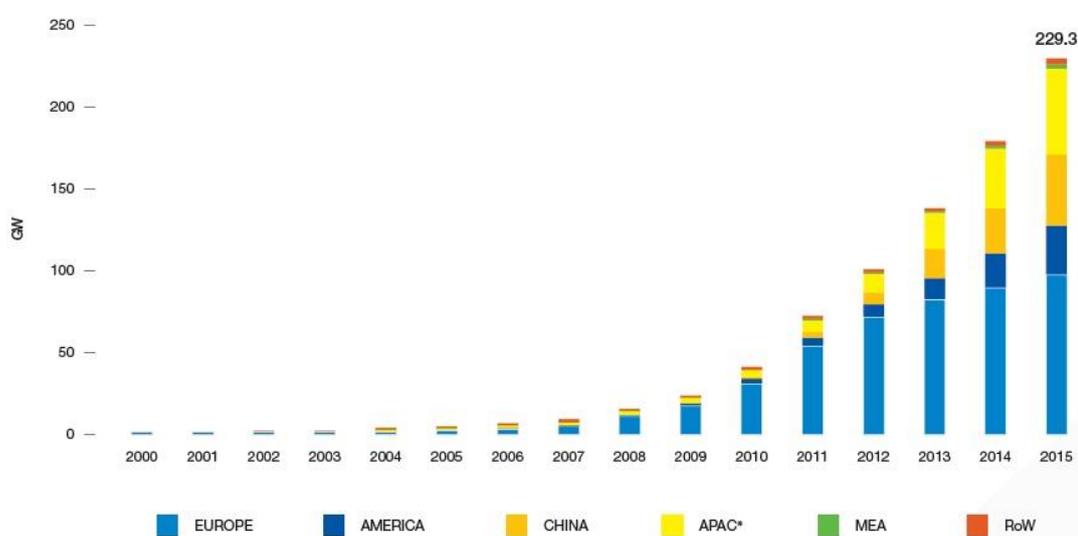


Figura 1- Evolução do potencial energético fotovoltaico no mundo [2].

Deve-se salientar que no cenário atual de tecnologias de geração de energia, a fotovoltaica é a que apresenta crescimento mais rápido no mundo [2]. Tal crescimento é devido principalmente à China, Alemanha e ao Japão, como mostra a Figura 2.

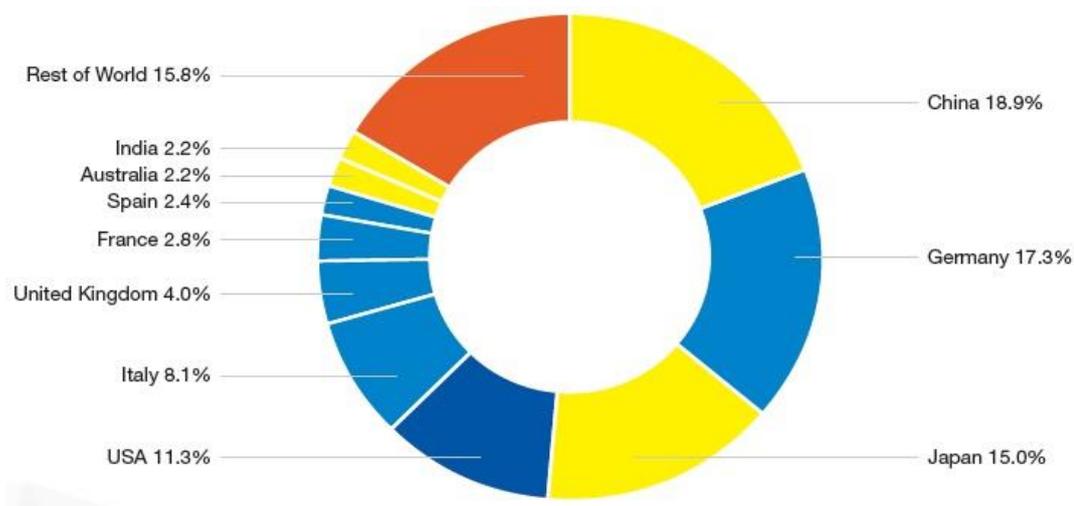


Figura 2 - Contribuição global na potência instalada de energia fotovoltaica ao final de 2015 [2].

Pela primeira vez na década a Alemanha não é o país com maior capacidade solar instalada acumulada. Além de instalar potência fotovoltaica maiores por ano, a China assumiu a liderança na capacidade global de energia solar instalada, atingindo 43,5 GW, equivalente a 19% da capacidade total global ao final de 2015.

É disponibilizada também pelo EPIA, a previsão para o aumento do potencial fotovoltaico instalado mundial baseado em três cenários. O primeiro, otimista, com incentivos e políticas dirigidas para a instalação de painéis em telhados nas residências de todo o mundo, o segundo, moderado, sem incentivos fiscais e o último, um cenário médio entre os dois anteriores. Este estudo é mostrado abaixo, na Figura 3.

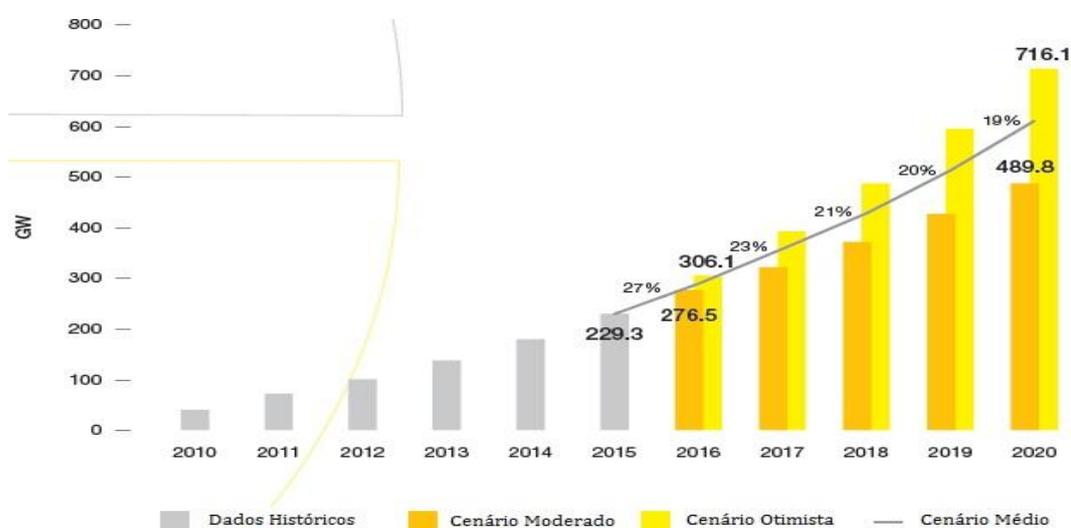


Figura 3 - Previsão do crescimento do potencial fotovoltaico até 2020 [2].

Percebe-se um aumento positivo da potência instalada em todos os três cenários. Para um cenário positivo, nota-se um crescimento de mais de três vezes em relação à potência instalada em 2015.

1.2 Energia Solar no Brasil

O Brasil possui atualmente um total de 4.596 empreendimentos em operação, totalizando 148.330.096 KW de potência instalada. Apenas 42 destes empreendimentos são de energia fotovoltaica gerando 27.008 KW de potência, um valor de pouca expressão comparado com o valor total de energia gerada [6].

Em [7], o autor questiona porque um país como o Brasil, situado em uma zona de insolação considerável, explora pouco a energia fotovoltaica. Uma resposta para este questionamento é o grande potencial instalado de energia proveniente de usinas hidrelétricas, devido ao fato da grande disponibilidade de recursos hídricos. Este conceito está mudando. A geração de energia fotovoltaica se apresenta como uma solução viável economicamente para aplicação em lugares remotos, isolados e distantes da rede elétrica, visto que, não necessita de linhas de transmissão para a energia chegar até estes locais.

O governo tem investido na mudança deste cenário de pouca expressão da energia fotovoltaica no Brasil. Em 2012, foi aprovada a Resolução Normativa (RN) 482, pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração aos sistemas de distribuição de energia, onde a energia elétrica de fonte solar entra como um dos principais destaques na produção por parte dos consumidores residenciais, comerciais e industriais [8].

Segundo as novas regras, que começaram a valer em 1º de março de 2016, caso a energia injetada na rede seja superior à consumida, cria-se um “crédito de energia” que não pode ser revertido em dinheiro, mas pode ser utilizado para abater o consumo da unidade consumidora nos meses subsequentes ou em outras unidades de mesma titularidade (desde que todas as unidades estejam na mesma área de concessão), com validade de 60 meses [9].

A mudança na matriz energética brasileira nos próximos anos também pode impulsionar a energia solar. O Plano Decenal de Expansão de Energia (PDEE) 2023 prevê a

queda, em termos proporcionais, da geração de fonte hidráulica, e um aumento correspondente na participação de outras fontes renováveis [10].

1.3 Eficiência das células fotovoltaicas

Com as atuais tecnologias, sob condições padrões de teste, ou em condições laboratoriais, CTP (irradiação solar padrão de $1000\text{W}/\text{m}^2$, temperatura de 25°C e espectro solar AM=1,5), é possível alcançar uma eficiência superior a 25% com células individuais de cristal de silício. Devido a consecutivas pesquisas sobre células solares o valor teórico da eficiência alcançável caminha aos 30%, o que é muito pequeno. Ainda, em aplicações com os painéis comercializados, a eficiência cai, sendo apenas de 13 a 19% [11].

A eficiência global inferior da operação em módulo em relação à eficiência das células individuais, segundo [12], é devido ao fator empacotamento, à eficiência ótica do módulo e, à perda nas interconexões elétricas das células.

Alguns rendimentos, de acordo com a tecnologia e/ou matérias das células, podem ser vistos na Tabela 1:

Tabela 1 - Rendimento médio obtidos em células e módulos fotovoltaicos [11].

MATERIAIS E/OU TECNOLOGIAS	CÉLULAS	MÓDULOS
Silício Monocristalino	14 a 25%	14 a 21%
Silício Policristalino	20%	13 a 16,5%
Orgânicas	12%	7 a 12%
Filmes Finos	9 a 16%	7 a 13%
Silício Amorfo	9%	6 a 9%
Telureto de Cádmio	14,4%	9 a 11%
Seleneto de Cobre, Índio e Gálio	22%	10 a 12%
Híbrido	—	23%

1.4 **Objetivo Geral**

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo sobre os diferentes tipos de seguidores solares e seu funcionamento. Visa-se também, validar a eficiência dos seguidores solares ao comparar a energia gerada pelo painel estático em relação à produzida por painéis acoplados a sistemas de rastreamento solar.

3.1.2 **Objetivos Específicos**

Implementar no *software* PLECS, uma simulação contendo um painel fotovoltaico de 48W conectado à uma bateria de 12V através de um conversor *buck* .

Realizar a modelagem do conversor utilizado bem como o projeto dos controladores para a planta, e, implementar tal controle na simulação.

Aplicar à simulação a irradiação tipicamente absorvida por painéis fixos e a captada por sistemas contendo seguidores solares.

1.5 **Motivação**

Como os seguidores solares são uma inovação tecnológica no mercado que permite aumentar a irradiação sobre aos painéis fotovoltaicos, aumentando a potência produzida por estes e conseqüentemente reduzindo o custo associado à geração de energia solar, estudar e analisar tal tecnologia é o primeiro passo para implementar melhorias.

1.6 **Organização do Trabalho**

Inicialmente será apresentada uma revisão bibliográfica sobre a energia solar. Também será mostrada a influência da temperatura e da irradiação sobre a eficiência dos painéis, a variação da posição solar durante o dia, e, exposto o mecanismo utilizado para reverter o problema da irradiação em painéis fixos: os seguidores solares.

Posteriormente será mostrada a metodologia utilizada para alcançar os objetivos do trabalho.

Por fim, serão exibidos os resultados obtidos com a simulação proposta, onde uma análise será feita comparando os resultados dos diferentes tipos de seguidores solares em relação ao painel estático.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Energia Solar

A Energia Solar Fotovoltaica se baseia no efeito fotovoltaico através da conversão direta da luz solar em eletricidade. Tal efeito foi observado em 1839 por Edmond Becquerel, que notou nos extremos de uma estrutura de material semicondutor o aparecimento de uma diferença de potencial quando este absorvia luz [13].

O dispositivo essencial no sistema de conversão da energia solar em energia elétrica é a célula fotovoltaica [13].

As células fotovoltaicas são feitas de material semicondutor, tal material é mais apropriado quanto maior for o produto corrente-tensão gerada para a luz visível. Isto porque, da energia fornecida pelos raios solares a maior parte está dentro do espectro da faixa visível. Para que o material semicondutor se torne uma célula fotovoltaica é necessário que este material passe por um processo. Generalizando, o semicondutor passa por uma etapa de purificação, seguida por uma etapa de dopagem, onde adiciona-se impurezas em quantidade certa. Os principais tipos de materiais semicondutores utilizados em células fotovoltaicas são silício monocristalino, silício multicristalino, filmes finos, silício amorfo e células com concentração [13].

A capacidade de produção de energia elétrica de uma única célula fotovoltaica operando separadamente é de 1 a 2W, referente a uma corrente entre 2 a 4A e uma tensão de 0,5V. Associando várias células em série e em paralelo, pode-se alcançar níveis maiores de tensão e corrente, formando assim os painéis fotovoltaicos [14]. Normalmente, cerca de 33 a 36 células ligadas em série formam um painel.

2.2 Influência da temperatura e da irradiação incidente

Os principais fatores que influenciam nas características elétricas de um módulo fotovoltaico, e, conseqüentemente na eficiência são: intensidade da irradiação solar e temperatura de operação [15].

A intensidade da irradiação solar muda a cada instante em função da rotação da terra e de sua translação ao redor do sol. Na Figura 4, abaixo, é apresentado o impacto da redução da irradiação incidente sobre as curvas características V-I e P-V do painel.

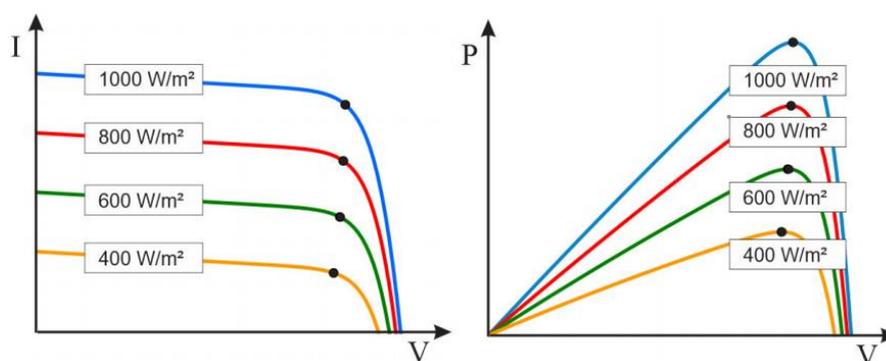


Figura 4 - Curvas V-I e V-P para diferentes níveis de irradiação [15].

A Figura 5 exibe o impacto do aumento da temperatura sobre as curvas características IxV e PxV do painel.

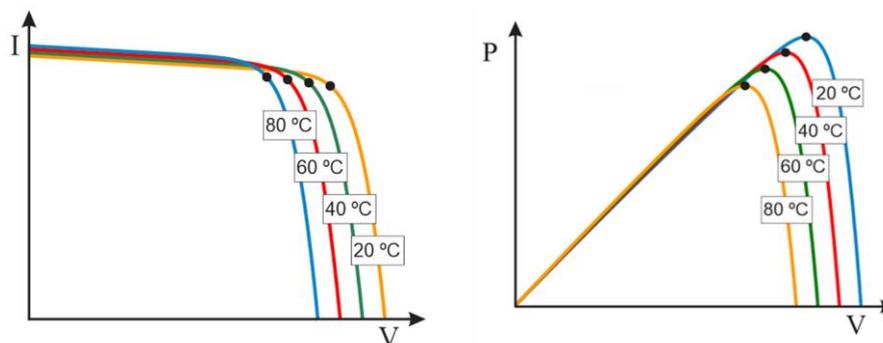


Figura 5 - Curvas IxV e PxV para diferentes níveis de temperatura [15].

O aumento da irradiação aumenta a corrente de máxima potência, já a tensão de máxima potência praticamente se mantém a mesma para os diferentes níveis de irradiação. Com isso a potência gerada aumenta.

Já o aumento da temperatura eleva ligeiramente a corrente de máxima potência e diminui em proporção maior a tensão de máxima potência, assim, reduz a a potência gerada pelo painel. A influência do aumento da irradiação é positiva, no entanto, o aumento da temperatura prejudica a eficiência do painel.

2.3 Movimento solar aparente

O movimento aparente do Sol resulta do movimento de rotação da terra. Outras consequências da rotação da Terra traduzem-se na sucessão do dia e da noite e na variação da temperatura do ar ao longo das 24 horas do dia. Já, devido ao movimento de translação da terra e à inclinação do seu eixo, o sol não faz o mesmo trajeto (movimento aparente) ao longo do ano.

Para determinar a posição do sol a qualquer hora do dia deve-se analisar a variação do ângulo de altitude β e do ângulo de azimute ϕ_s , como mostrado na Figura 6 [16]. A altitude solar é o ângulo que o sol faz com o plano horizontal, enquanto o azimute é o ângulo da projeção do sol em relação ao norte.

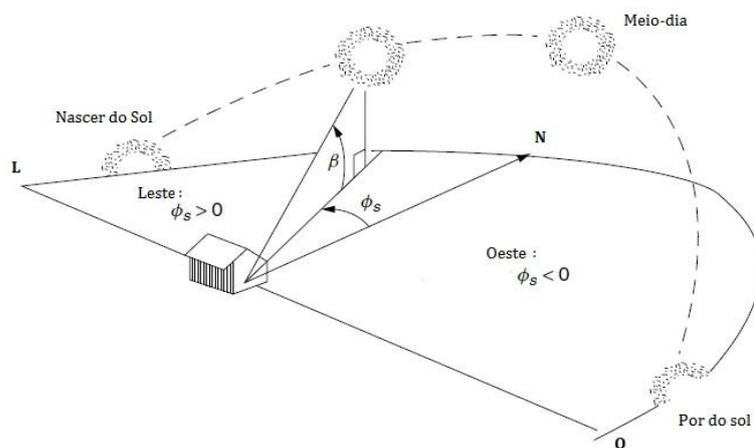


Figura 6 - Posição solar descrita em termos dos ângulos de altitude e de azimute [16].

Estes ângulos dependem da latitude, número do dia do ano, e o mais importante, da hora do dia.

Pode-se notar pela Figura 6 que pela manhã o ângulo de azimute é positivo, quando o sol se encontra no leste, e negativo durante as tardes, quando o sol se encontra no oeste. Para a construção de um seguidor solar tais ângulos são importantes.

2.4 Seguidor Solar

Uma das possibilidades para aumentar o rendimento da energia proveniente dos painéis fotovoltaicos, melhorando sua eficiência, visando diminuir o custo associado a este tipo de produção de energia e atraindo incentivos é com a aplicação de seguidores solares, dispositivo responsável por seguir o sol diariamente.

Tal tecnologia faz com que os raios solares sempre incidam perpendicularmente ao plano do painel, aumentando a captação da energia do sol. Como a eficiência da geração de energia elétrica por meio da energia solar está intimamente relacionada ao nível de irradiação incidente sobre o painel [17], sendo que o movimento diário do sol prejudica a absorção da irradiação em painéis fixos [18], tem-se, com a utilização de rastreadores solares, a otimização da potência elétrica produzida pelo módulo.

Assim, o princípio básico de funcionamento de um seguidor solar é a movimentação do painel solar conforme o movimento solar, fazendo com que os raios solares sempre incidam perpendicularmente ao plano do módulo, possibilitando o melhor aproveitamento da energia solar disponível [19] [20].

Conforme [21], a depender da tecnologia usada para o rastreamento solar, é possível que a eficiência dos painéis possa atingir valores maiores que 50% no verão e valores superiores a 20% em outras estações do ano, como no outono.

2.4.1 Tipos de Seguidores Solares

Os tipos de seguidores solares existentes diferenciam-se quanto ao tipo de estrutura de sustentação do painel fotovoltaico, tipo de controle aplicado ao movimento da estrutura e quanto ao número de eixos rotativos [22]. Na Figura 7, é mostrada a classificação dos seguidores solares com relação ao número de eixos rotativos:

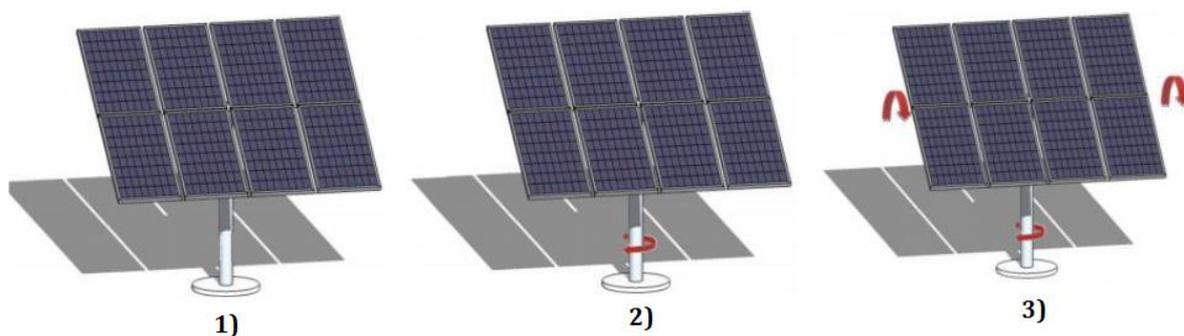


Figura 7 - Classificação dos Seguidores Solares quanto ao número de eixos: 1) painel estático - 0 eixos, 2) painel com controle unidirecional - 1 eixo, 3) painel com controle bidirecional - 2 eixos [23].

A escolha do tipo de seguidor solar para um projeto irá depender das características requisitadas pelo projetista, como: custo, precisão, área do terreno ocupada, mecânica e controle. A comparação das características dos tipos de seguidores analisados é exibida na Tabela 2.

Tabela 2 - Comparação das características dos tipos de seguidores solares [22].

TIPO CARACTERÍSTICAS	PAINEL ESTÁTICO	PAINEL COM 1 EIXO	PAINEL COM 2 EIXOS
CUSTO	Nenhum	Baixo	Alto
PRECISÃO	Baixa	Média	Alta
ÁREA DO TERRENO OCUPADA	Baixa	Baixa	Alta
MECÂNICA E CONTROLE	Nenhum	Simples	Complexo

A utilização de sistemas com seguidor solar aumenta a captação da irradiação dos painéis. Um estudo mostrado na Figura 8, destaca o ganho positivo do fator de capacidade de captação da irradiação para os painéis móveis de um e dois eixos em comparação aos painéis fixos [24].

Note também pela figura seguinte que cidades mais frias tendem a ter um baixo aproveitamento com os seguidores. Já para cidades mais quentes, nota-se um aproveitamento considerável.

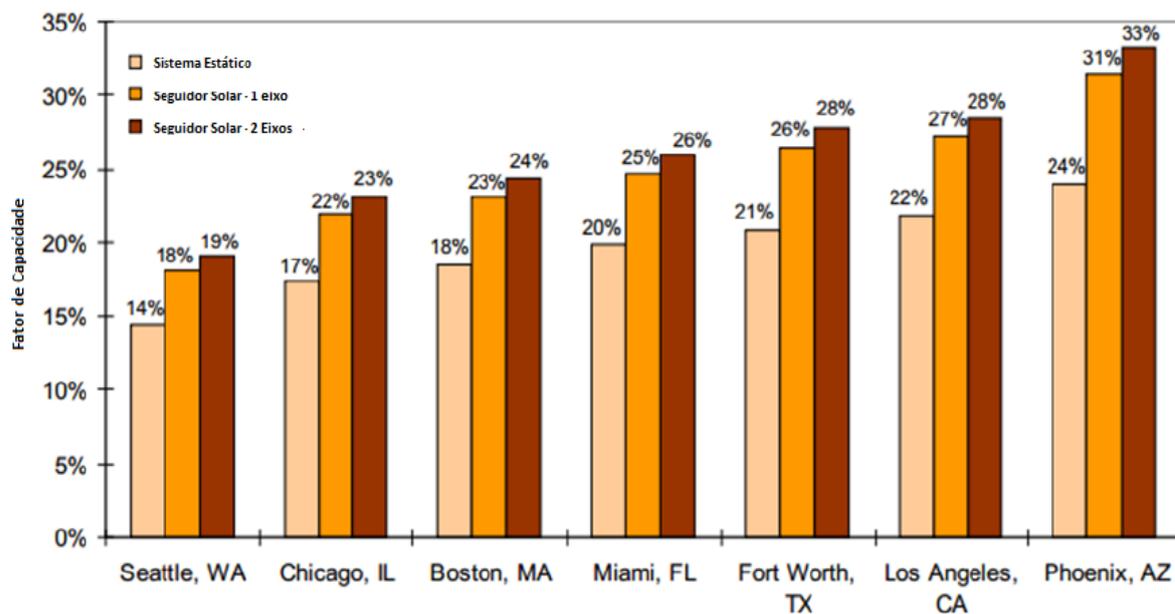


Figura 8 - Capacidade de captação da irradiação solar para painéis estáticos e móveis de um e dois eixos [24].

3 Metodologia

Para alcançar os objetivos desse projeto a metodologia é dividida em duas partes fundamentais. A primeira é a demonstração das equações utilizadas para o cálculo do perfil de irradiação para painéis fixos e para sistemas com seguidores solares, em função da data e das condições de instalação dos mesmos. A segunda parte constitui da modelagem do conversor *buck*, seguido do projeto dos controladores para este conversor.

3.1 Cálculo da Irradiação

A presença de irradiação solar é indispensável para produção de eletricidade utilizando painéis fotovoltaicos, sendo assim, visando evitar desperdícios de energia para controlar o seguidor solar nos momentos em que não existe a presença do sol, faz-se necessário saber o horário que o sol nasce e se põe. As Equações (3) e (4) mostram os cálculos destes horários, sendo δ o ângulo de declinação solar, n_{ud} o número do último dia do ano (365 ou 366, a depender se o ano for bissexto) L a latitude do local onde está instalado o dispositivo, n o número do dia do ano (entre 1 e 365 ou 1 e 366), H_{sr} uma variável auxiliar, $H_{nascente}$ o horário do nascer do sol e H_{poente} o horário do pôr do sol [16].

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} \left[\frac{360}{n_{ud}} (n - 81) \right] \quad (1)$$

$$H_{sr} = \cos^{-1}[-\operatorname{tg}(L) \operatorname{tg}(\delta)] \quad (2)$$

$$H_{nascente} = 12 - \frac{H_{sr}}{15} \quad (3)$$

$$H_{poente} = 12 + \frac{H_{sr}}{15} \quad (4)$$

A seguir serão apresentadas as equações para o cálculo da irradiação máxima teórica incidente sobre o painel para os casos a serem analisados, que são: painel estático e sustentado

por 1 eixo e 2 eixos. Tais equações são utilizadas para implementação do perfil de irradiação em um dia para cada situação listada acima na simulação construída no *software* PLECS.

3.1.1 Sistema estático

Sistemas estáticos não captam a máxima irradiação disponível pelo sol, já que para um mesmo nível de irradiação, o raio solar incide em uma área menor neste painel em comparação a painéis moveis, assim a potência gerada por este é menor. A irradiação máxima absorvida pelo painel para cada hora do dia, pode ser obtida pelas equações (5)-(18) [16].

$$\beta = \text{sen}^{-1}[\cos(L)\cos(\delta)\cos(H_{\text{dia}}) + \text{sen}(L)\text{sen}(\delta)] \quad (5)$$

$$\phi_s = \frac{\cos(\delta)\text{sen}(H_{\text{dia}})}{\cos(\beta)} \quad (6)$$

$$m = \frac{1}{\text{sen}(\beta)} \quad (7)$$

$$A = 1160 + 75\text{sen}\left[\frac{360}{n_{ud}}(n - 275)\right] \quad (8)$$

$$k = 0,174 + 0,035\text{sen}\left[\frac{360}{n_{ud}}(n - 100)\right] \quad (9)$$

$$I_b = Ae^{-kn} \quad (10)$$

$$\theta = \cos^{-1}[\cos(\beta)\cos(\phi_s - \phi_c)\text{sen}(e) + \text{sen}(\beta)\cos(e)] \quad (11)$$

$$I_{bc} = I_b \cos(\theta) \quad (12)$$

$$C = 0,095 + 0,04\text{sen}\left[\frac{360}{n_{ud}}(n - 100)\right] \quad (13)$$

$$I_{dh} = CI_b \quad (14)$$

$$I_{bh} = I_b \text{sen}(\theta) \quad (15)$$

$$I_{dc} = I_{dh} \left[\frac{1 + \cos(e)}{2} \right] \quad (16)$$

$$I_{rc} = \rho I_b (C + \text{sen}(\beta)) \left[\frac{1 - \cos(e)}{2} \right] \quad (17)$$

$$I_c = I_{bc} + I_{dc} + I_{rc} \quad (18)$$

Sendo β o ângulo de altitude solar, H_{dia} a hora do dia em que se quer calcular a máxima irradiação, ϕ_s o ângulo azimutal solar, m a relação de massa de ar, A a insolação extraterrestre aparente, k a profundidade ótica da atmosfera, I_b a insolação incidente sobre a superfície extraterrestre, θ ângulo de incidência, ϕ_c o ângulo azimutal do coletor, e o ângulo de inclinação do coletor, I_{bc} a insolação incidente diretamente sobre o coletor, C o fator de difusão do céu, I_{dh} a componente difusa de insolação sobre uma superfície horizontal, I_{bh} a componente direta incidente sobre uma superfície horizontal, I_{dc} a insolação refletida pelo solo, I_{rc} a insolação difusa na atmosfera, ρ a refletância do solo, I_c a irradiação absorvida pelo painel fotovoltaico.

3.1.2 Seguidor solar de um eixo

Para este tipo de sistema, as equações são simplificadas e a irradiação captada pelo painel fotovoltaico é dada pelas equações (19)-(22) [16].

$$I_{bc} = I_b \text{sen}(\delta) \quad (19)$$

$$I_{dc} = CI_b \left[\frac{1 + \cos(90 - \beta + \delta)}{2} \right] \quad (20)$$

$$I_{rc} = \rho(I_{bh} + I_{dh}) \left[\frac{1 - \cos(90 - \beta + \delta)}{2} \right] \quad (21)$$

$$I_c = I_{bc} + I_{dc} + I_{rc} \quad (22)$$

3.1.3 Seguidor solar de dois eixo

O sistema em questão também apresenta equações simplificadas e a máxima irradiação captada pelo painel com este seguidor é dada pelas equações (23)-(26)[16].

$$I_{bc} = I_b \quad (23)$$

$$I_{dc} = CI_b \left[\frac{1 + \cos(90 - \beta)}{2} \right] \quad (24)$$

$$I_{rc} = \rho(I_{bh} + I_{dh}) \left[\frac{1 - \cos(90 - \beta)}{2} \right] \quad (25)$$

$$I_c = I_{bc} + I_{dc} + I_{rc} \quad (26)$$

3.2 Modelagem do conversor cc/cc Buck

A Figura 9 abaixo, apresenta um painel fotovoltaico conectado a um conversor CC-CC, que é usado para carregar uma bateria. A potência de saída do painel solar é controlada pelo conversor de forma que o painel sempre opere no ponto de máxima potência [25].

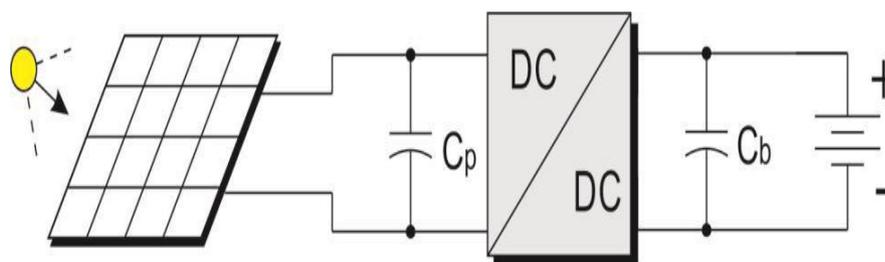


Figura 9 - Esquema para carregamento de bateria [23].

Para a modelagem do conversor buck, o painel fotovoltaico é linearizado em torno do ponto de máxima potência, sendo representado assim por uma fonte de tensão V_{eq} e uma resistência R_{eq} [25], como pode-se ver na Figura 10.

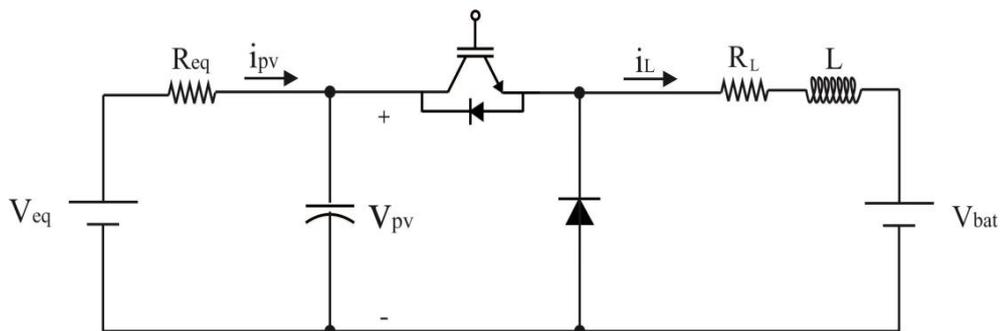


Figura 10 - Topologia de um conversor buck [23].

Operando no modo contínuo, existem apenas duas configurações topológicas para o circuito, uma quando a chave controlada está conduzindo e outra quando está bloqueada e o diodo está conduzindo.

Para o dispositivo semicondutor em condução (situação idealizada como uma chave fechada), temos uma situação como mostrado na Figura 11. As equações nesse estado são:

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = -\frac{R_L}{L}i_L + \frac{1}{L}V_{pv} - \frac{1}{L}V_{bat} \\ \frac{dV_{pv}}{dt} = -\frac{1}{C}i_L - \frac{1}{R_{eq}C}V_{pv} + \frac{1}{R_{eq}C}V_{eq} \end{cases} \quad (27)$$

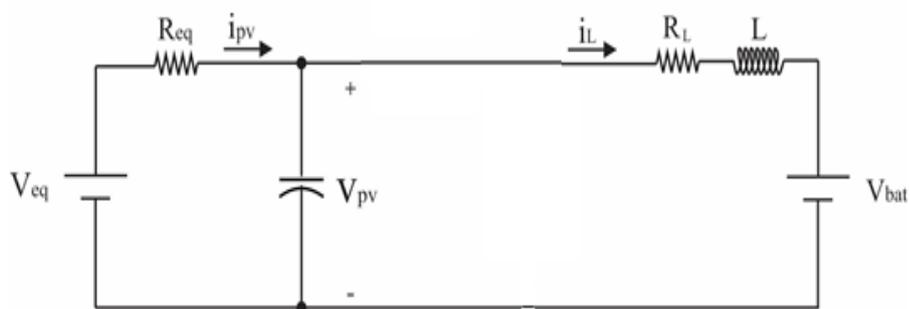


Figura 11 - Circuito equivalente para o dispositivo semicondutor em saturação [23].

Uma forma de escrever essas equações é na forma matricial. Esta notação facilita a linearização do modelo e define grandezas muito comuns na modelagem de sistemas em geral.

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_{pv}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & -\frac{1}{CR_{eq}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_{pv} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{CR_{eq}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{eq} \\ V_{bat} \end{bmatrix} \quad (28)$$

Assim, quando é realizada a linearização do sistema, tem-se:

$$A_1 = \begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & -\frac{1}{CR_{eq}} \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{CR_{eq}} & 0 \end{bmatrix} \quad (30)$$

Para o caso do dispositivo semiconductor em corte, o circuito equivalente será representado como indicado na Figura 12. A queda de tensão no diodo foi desprezada. Nesse caso, as equações que descrevem o sistema são:

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = -\frac{R_L}{L} i_L - \frac{1}{L} V_{bat} \\ \frac{dV_{pv}}{dt} = -\frac{1}{R_{eq}C} V_{pv} + \frac{1}{R_{eq}C} V_{eq} \end{cases} \quad (31)$$

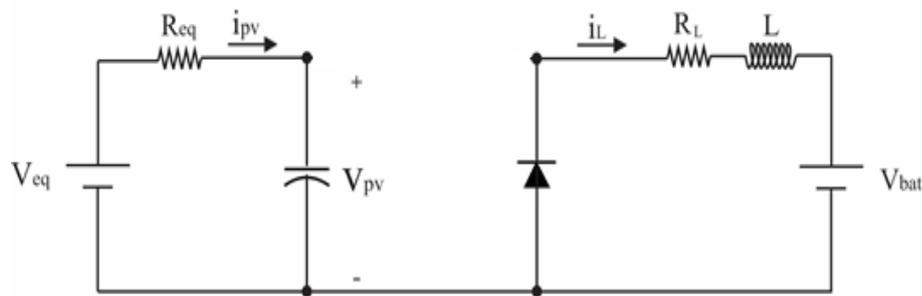


Figura 12 - Circuito equivalente para o dispositivo semiconductor em corte [23].

Escrevendo-se (31) na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_{pv}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{CR_{eq}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_{pv} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{CR_{eq}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{eq} \\ V_{bat} \end{bmatrix} \quad (32)$$

Assim, quando é realizada a linearização:

$$A_0 = \begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{CR_{eq}} \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$B_0 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{CR_{eq}} & 0 \end{bmatrix} \quad (34)$$

A Equação (28) e a Equação (32) podem ser escritas por:

$$\dot{X} = A \cdot X + B \cdot U \quad (35)$$

$$\text{Sendo } \dot{X} = \begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_{pv}}{dt} \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} i_L \\ V_{pv} \end{bmatrix}, U = \begin{bmatrix} V_{eq} \\ V_{bat} \end{bmatrix}.$$

Como se pôde verificar anteriormente, para cada situação em que a chave se encontra as matrizes A e B mudam de valor.

Para produzir uma descrição média das variáveis em um período de chaveamento, as equações correspondentes às duas variações topológicas são ponderadas em relação ao tempo, resultando em:

$$\dot{X} = [A_0 + d(A_1 - A_0)] \cdot X + [B_0 + d(B_1 - B_0)] \cdot U \quad (36)$$

A Equação (36) é não-linear pois envolve multiplicação de termos variantes no tempo. Assim, torna-se necessário linearizar o modelo. Então o método de análise de pequenos sinais é utilizado. O primeiro passo desse método é gerar um pequeno distúrbio em regime permanente e verificar o que ocorre no sistema [26]. Assim:

$$\begin{cases} d = D_{ss} + \hat{d} \\ X = X_{ss} + \hat{x} \\ U = U_{ss} + \hat{u} \end{cases} \quad (37)$$

Onde D_{ss} , X_{ss} , U_{ss} são os valores quiescente da razão cíclica, estados e entradas do modelo. As variáveis \hat{d} , \hat{x} , \hat{u} são pequenas perturbações em torno do ponto de operação. Sendo que a condição para pequenos sinais é que $D_{ss} \gg \hat{d}$, $X_{ss} \gg \hat{x}$ e $U_{ss} \gg \hat{u}$.

Assim, substituindo (37) em (36), tem-se:

$$(\dot{X}_{ss} + \dot{\hat{x}}) = [A_0 + (D_{ss} + \hat{d})(A_1 - A_0)] \cdot (X_{ss} + \hat{x}) + [B_0 + (D_{ss} + \hat{d})(B_1 - B_0)] \cdot (U_{ss} + \hat{u}) \quad (38)$$

Considerando:

$$A = A_1 \cdot D_{ss} + A_0 \cdot (1 - D_{ss}) \quad (39)$$

e

$$B = B_1 \cdot D_{ss} + B_0 \cdot (1 - D_{ss}) \quad (40)$$

Tem-se a partir da Equação (38) o comportamento em regime permanente, fazendo-se nulos os termos variáveis no tempo e as perturbações:

$$A \cdot X_{ss} + B \cdot U_{ss} = 0 \quad (41)$$

Ou seja:

$$X_{ss} = -(A)^{-1} \cdot B \cdot U_{ss} \quad (42)$$

E, substituindo as Equações (29)-(40) em (42), tem-se:

$$X_{ss} = \begin{bmatrix} \frac{D}{(R_L + D^2 R_{eq})} & \frac{-1}{(R_L + D^2 R_{eq})} \\ \frac{R}{(R_L + D^2 R_{eq})} & \frac{R_{eq} D}{(R_L + D^2 R_{eq})} \end{bmatrix} \cdot U_{ss} \quad (43)$$

Da Equação (38) a expressão apenas para a componente alternada, desprezando os termos contendo produto de duas variações as quais, por definição, são pequenas, é:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + B\hat{u} + [(A_1 - A_0)X_{ss} + (B_1 - B_0)U_{ss}] \hat{d} \quad (44)$$

Realizando a substituição dos termos da Equação (44), por equações anteriores, tem-se:

$$\hat{\dot{x}} = \begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{CR_{eq}} \end{bmatrix} \hat{x} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{CR_{eq}} & 0 \end{bmatrix} \hat{u} + \left(\begin{bmatrix} \frac{R_L}{L(R_L + D^2 R_{eq})} & \frac{R_{eq} D}{L(R_L + D^2 R_{eq})} \\ -D & 1 \\ \frac{C(R_L + D^2 R_{eq})}{C(R_L + D^2 R_{eq})} & \frac{1}{C(R_L + D^2 R_{eq})} \end{bmatrix} U_{ss} \right) \hat{d} \quad (45)$$

Aplicando a transformada de Laplace, isolando o termo \hat{x} e fazendo algumas manipulações matemáticas, tem-se:

$$\begin{bmatrix} \hat{i}_L \\ \hat{V}_{pv} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{L(CR_{eq}s + 1)}{CLR_{eq}s^2 + (CR_L R_{eq} + L)s + D^2 R_{eq} + R_L} & \frac{CDR_{eq}}{CLR_{eq}s^2 + (CR_L R_{eq} + L)s + D^2 R_{eq} + R_L} & 0 \\ \frac{-DLR_{eq}}{CLR_{eq}s^2 + (CR_L R_{eq} + L)s + D^2 R_{eq} + R_L} & \frac{CR_{eq}(R_L + Ls)}{CLR_{eq}s^2 + (CR_L R_{eq} + L)s + D^2 R_{eq} + R_L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \quad (46)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} & 0 \\ \frac{1}{CR_{eq}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{R_L}{L(R_L + D^2 R_{eq})} & \frac{R_{eq} D}{L(R_L + D^2 R_{eq})} & 0 \\ -D & 1 & 0 \\ \frac{C(R_L + D^2 R_{eq})}{C(R_L + D^2 R_{eq})} & \frac{1}{C(R_L + D^2 R_{eq})} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{eq_{ss}} & 0 & 0 \\ V_{bat_{ss}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{V}_{eq} \\ \hat{V}_{bat} \\ \hat{d} \end{bmatrix}$$

Resolvendo:

$$\begin{bmatrix} \hat{i}_L \\ \hat{V}_{pv} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{D}{CLR_{eq}s^2 + (CR_L R_{eq} + L)s + D^2 R_{eq} + R_L} & \frac{-(CR_{eq}s + 1)}{CLR_{eq}s^2 + (CR_L R_{eq} + L)s + D^2 R_{eq} + R_L} & 0 \\ \frac{R_L + Ls}{CLR_{eq}s^2 + (CR_L R_{eq} + L)s + D^2 R_{eq} + R_L} & \frac{DR_{eq}}{CLR_{eq}s^2 + (CR_L R_{eq} + L)s + D^2 R_{eq} + R_L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \quad (47)$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{(CV_{bat_{ss}} DR_{eq}^2 + CR_L V_{eq_{ss}} R_{eq})s + 2V_{bat_{ss}} DR_{eq} - V_{eq_{ss}} D^2 R_{eq} + R_L V_{eq_{ss}}}{[CLR_{eq}s^2 + (CR_L R_{eq} + L)s + D^2 R_{eq} + R_L](R_L + D^2 R_{eq})} \\ 0 & 0 & \frac{-R_{eq}[(DLV_{eq_{ss}} - LV_{bat_{ss}})s + (D^2 R_{eq} V_{bat_{ss}} - R_L V_{bat_{ss}} + 2DR_L V_{eq_{ss}})]}{[CLR_{eq}s^2 + (CR_L R_{eq} + L)s + D^2 R_{eq} + R_L](R_L + D^2 R_{eq})} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{V}_{eq} \\ \hat{V}_{bat} \\ \hat{d} \end{bmatrix}$$

Finalizando, com mais algumas manipulações:

$$\begin{bmatrix} \hat{i}_L \\ \hat{V}_{pv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{D}{CLR_{eq}s^2 + (CR_L R_{eq} + L)s + D^2 R_{eq} + R_L} & \frac{-(CR_{eq}s + 1)}{CLR_{eq}s^2 + (CR_L R_{eq} + L)s + D^2 R_{eq} + R_L} \\ \frac{(R_L + Ls)}{CLR_{eq}s^2 + (CR_L R_{eq} + L)s + D^2 R_{eq} + R_L} & \frac{DR_{eq}}{CLR_{eq}s^2 + (CR_L R_{eq} + L)s + D^2 R_{eq} + R_L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{V}_{eq} \\ \hat{V}_{bat} \\ \hat{d} \end{bmatrix} \quad (48)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{(CV_{bat_{ss}} DR_{eq}^2 + CR_L V_{eq_{ss}} R_{eq})s + 2V_{bat_{ss}} DR_{eq} - V_{eq_{ss}} D^2 R_{eq} + R_L V_{eq_{ss}}}{[CLR_{eq}s^2 + (CR_L R_{eq} + L)s + D^2 R_{eq} + R_L](R_L + D^2 R_{eq})} \\ -R_{eq} [(DLV_{eq_{ss}} - LV_{bat_{ss}})s + (D^2 R_{eq} V_{bat_{ss}} - R_L V_{bat_{ss}} + 2DR_L V_{eq_{ss}})] \\ \frac{[CLR_{eq}s^2 + (CR_L R_{eq} + L)s + D^2 R_{eq} + R_L](R_L + D^2 R_{eq})} \end{bmatrix}$$

Assim, a relação entre a corrente no indutor para um dado *duty cycle* (d), é dada por:

$$\frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{(CV_{bat_{ss}} DR_{eq}^2 + CR_L V_{eq_{ss}} R_{eq})s + 2V_{bat_{ss}} DR_{eq} - V_{eq_{ss}} D^2 R_{eq} + R_L V_{eq_{ss}}}{[CLR_{eq}s^2 + (CR_L R_{eq} + L)s + D^2 R_{eq} + R_L](R_L + D^2 R_{eq})} \quad (49)$$

A equação que relaciona para a tensão do painel para um dado *duty cycle* (d), é dada por :

$$\frac{\hat{V}_{pv}(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{-R_{eq} [(DLV_{eq_{ss}} - LV_{bat_{ss}})s + (D^2 R_{eq} V_{bat_{ss}} - R_L V_{bat_{ss}} + 2DR_L V_{eq_{ss}})]}{[CLR_{eq}s^2 + (CR_L R_{eq} + L)s + D^2 R_{eq} + R_L](R_L + D^2 R_{eq})} \quad (50)$$

E, dividindo a Equação (50) pela Equação (49) encontra-se a relação da tensão no painel pela corrente no indutor:

$$\frac{\hat{V}_{pv}(s)}{\hat{i}_L(s)} = \frac{-R_{eq} [(DLV_{eq_{ss}} - LV_{bat_{ss}})s + (D^2 R_{eq} V_{bat_{ss}} - R_L V_{bat_{ss}} + 2DR_L V_{eq_{ss}})]}{(CV_{bat_{ss}} DR_{eq}^2 + CR_L V_{eq_{ss}} R_{eq})s + 2V_{bat_{ss}} DR_{eq} - V_{eq_{ss}} D^2 R_{eq} + R_L V_{eq_{ss}}} \quad (51)$$

Substituindo o valor das variáveis do sistema simulado, mostrados na Tabela 3, as Equações (49) e (51) ficam como as Equações (52) e (53) respectivamente:

Tabela 3 - Valor das variáveis do sistema.

Variável	Valor
$V_{eq_{ss}}$	37,0516V
R_{eq}	7,1280Ω
C	300 μF
L	1 mH
R_L	1 Ω
$V_{bat_{ss}}$	12V
D	0,6452

$$\frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{1,9198 \cdot 10^4 s + 6,3205 \cdot 10^5}{s^2 + 567,7036s + 1,4343 \cdot 10^6} \quad (52)$$

$$\frac{\hat{V}_{pv}(s)}{\hat{i}_L(s)} = \frac{-0,08485s - 279,3}{0,1259s + 4,145} \quad (53)$$

3.3 Malha de controle

A Figura 13 ilustra a malha de controle, sendo \hat{V}_{ref} a tensão de saída do MPPT, \hat{V}_{pv} a tensão de saída do painel, $G_{c1}(s)$ o controlador PI da malha externa, $G_{c2}(s)$ o controlador PI da malha interna, $i_L(s)$ a corrente no indutor.

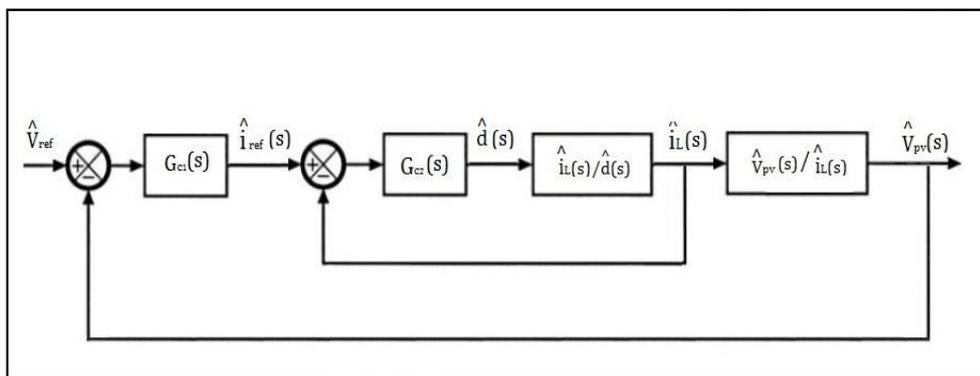


Figura 13 - Malha de controle completa.

3.3.1 Projeto dos controladores por Alocação de Polos

Sabe-se que muitas propriedades dos sistemas dependem da localização dos polos. A ideia da sintonia por alocação de polos é modelar um controlador que possua uma resposta em malha fechada que atenda aos requisitos da planta. Ou seja, através de simplificações no modelo devem-se posicionar os polos do sistema em locais do plano s que atendam aos critérios de sobressinal, tempo de acomodação, dentre outros [27].

Portanto, é necessário o conhecimento do modelo, ou pelo menos, sua aproximação. A Figura 14 mostra a malha de controle interna.

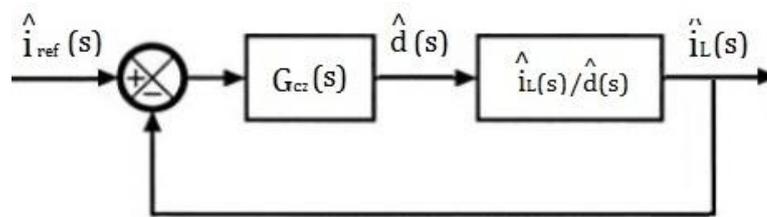


Figura 14 - Malha de controle interna.

A equação que relaciona a corrente no indutor para um dado *duty cycle* apresentada na Equação (49) presente na Figura 14 pode ser expressa por:

$$\frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{as + b}{c(es^2 + fs + c)} \quad (54)$$

Ao considerar:

$$a = CV_{bat_{ss}} DR_{eq}^2 + CR_L V_{eq_{ss}} R_{eq} \quad (55)$$

$$b = 2V_{bat_{ss}} DR_{eq} - V_{eq_{ss}} D^2 R_{eq} + R_L V_{eq_{ss}} \quad (56)$$

$$c = R_L + D^2 R_{eq} \quad (57)$$

$$e = CLR_{eq} \quad (58)$$

$$f = CR_L R_{eq} + L \quad (59)$$

A função de transferência do controlador proporcional integrativo $G_{C2}(s)$ é dada por:

$$Gc_2(s) = kp_2 + \frac{ki_2}{s} \quad (60)$$

A equação característica da função de transferência de malha fechada da malha interna, é dada por:

$$\Delta(s) = 1 + \left(\frac{\frac{a}{ce}s + \frac{b}{c}}{s^2 + \frac{f}{e}s + \frac{c}{e}} \times \frac{kp_2s + ki_2}{s} \right) \quad (61)$$

$$\Delta(s) = s^3 + \left(\frac{f}{e} + \frac{akp_2}{ce} \right) s^2 + \left(\frac{c}{e} + \frac{aki_2}{ce} + \frac{bcp_2}{ce} \right) s + \frac{bki_2}{ce} = 0 \quad (62)$$

Analisando este sistema de 3ª ordem através de um de 2ª ordem de polos dominantes:

$$(s + \alpha\omega_0) \cdot (s^2 + 2\xi\omega_0s + \omega_0^2) = 0 \quad (63)$$

$$s^3 + (2\xi\omega_0 + \alpha\omega_0)s^2 + (\omega_0 + 2\xi\alpha\omega_0^2)s + \alpha\omega_0^3 = 0 \quad (64)$$

Igualando a Equação (62) à Equação (64), obtêm-se os ganhos do controlador da malha interna:

$$kp_2 = \frac{2\xi\omega_0ce + \alpha\omega_0ce - fc}{a} \quad (65)$$

$$ki_2 = \frac{\alpha\omega_0^3ce}{b} \quad (66)$$

Sendo ξ o coeficiente de amortecimento associado diretamente com a especificação requerida de percentual de sobressinal, α o coeficiente que influencia na forma da resposta temporal do processo controlado e ω_0 relacionado à velocidade desta resposta. Estes parâmetros são escolhidos de forma a atender às especificações desejadas do projeto, sendo que ω_0 é dado pela seguinte equação, considerando o critério de 2%:

$$\omega_0 = \frac{4}{T_s \xi} \quad (67)$$

Onde T_s é o tempo de acomodação da resposta escolhido de forma também a atender às especificações desejadas.

A Figura 15 mostra qual o valor de ξ que está relacionado à ultrapassagem máxima percentual admitida no projeto.

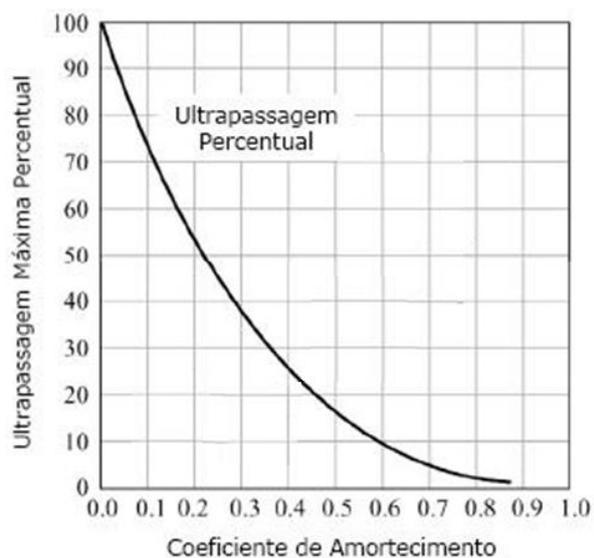


Figura 15 - Coeficiente de Amortecimento x Ultrapassagem Máxima Percentual [27].

Para o projeto do controlador da malha interna foi admitido um percentual de sobressinal de 10%, um tempo de acomodação da resposta de 0,166s e α igual a 1000. Assim, os valores dos ganhos calculados foram $k_p = 20,8353$ e $k_i = 3,33 \cdot 10^6$.

Os ganhos do controlador da malha externa, mostrada abaixo, foram encontrados de forma semelhante ao mostrado para a malha interna.

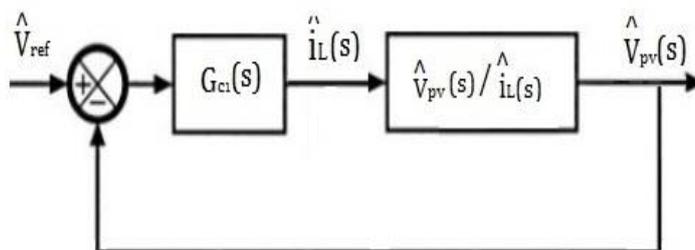


Figura 16 - Malha de controle externa.

A equação que relaciona a tensão do painel com a corrente no indutor apresentada na Equação (51) presente na Figura 16 acima, pode ser expressa pela Equação (68):

$$\frac{\hat{V}_{pv}(s)}{\hat{i}_L(s)} = \frac{ts + g}{hs + j} \quad (68)$$

Ao considerar:

$$t = -R_{eq} (DLV_{eq_{ss}} - LV_{bat_{ss}}) \quad (69)$$

$$g = -R_{eq} (D^2 R_{eq} V_{bat_{ss}} - R_L V_{bat_{ss}} + 2DR_L V_{eq_{ss}}) \quad (70)$$

$$h = (CV_{bat_{ss}} DR_{eq}^2 + CR_L V_{eq_{ss}} R_{eq}) \quad (71)$$

$$j = 2V_{bat_{ss}} DR_{eq} - V_{eq_{ss}} D^2 R_{eq} + R_L V_{eq_{ss}} \quad (72)$$

A função de transferência do controlador proporcional integrativo $G_{c1}(s)$ é dada por:

$$G_{c1}(s) = kp_1 + \frac{ki_1}{s} \quad (73)$$

A equação característica da função de transferência de malha fechada da malha externa é dada por:

$$\Delta(s) = 1 + \left(\frac{ts + g}{hs + j} \times \frac{kp_1 s + ki_1}{s} \right) = 0 \quad (74)$$

$$\Delta(s) = s^2 + \frac{(tki_1 + gkp_1 + j)}{(h + kp_1 t)} s + \frac{gki_1}{(h + kp_1 t)} = 0 \quad (75)$$

Igualando a Equação (74) à Equação (76), de 2ª ordem de polos dominantes, obtêm-se os ganhos do controlador da malha externa, apresentados nas Equações (77) e (78):

$$s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2 = 0 \quad (76)$$

$$kp_1 = \frac{2\xi\omega_0 hg - jg - th\omega_0^2}{t^2\omega_0^2 + g^2 - 2\xi\omega_0 tg} \quad (77)$$

$$ki_1 = \frac{(h + kp_1 t)\omega_0^2}{g} \quad (78)$$

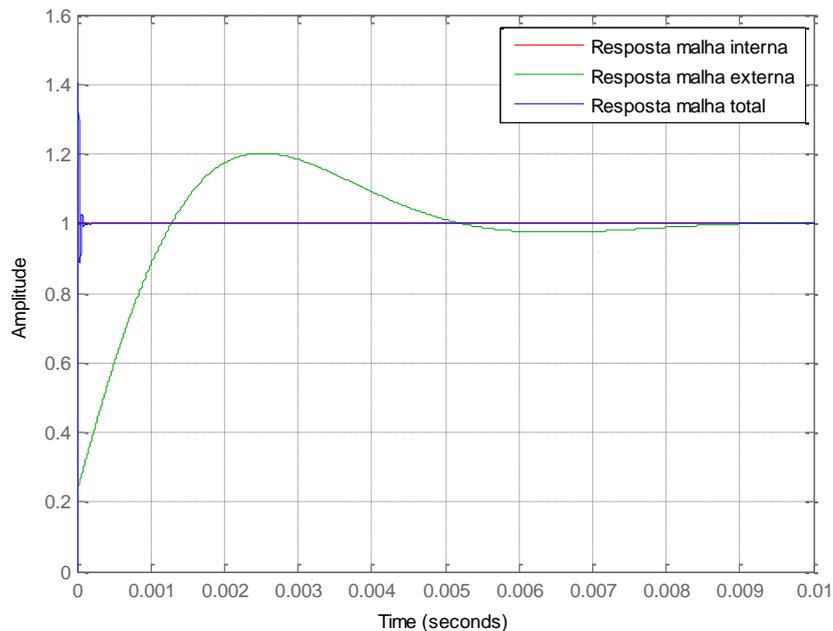
Para o projeto do controlador da malha externa foi admitido um percentual de sobressinal de 15%, um tempo de acomodação da resposta de 0,007s e α igual a 1000. Assim, os valores dos ganhos calculados foram de $kp = -528,93$ e $ki = -0,43$.

4 Resultados e Discussões

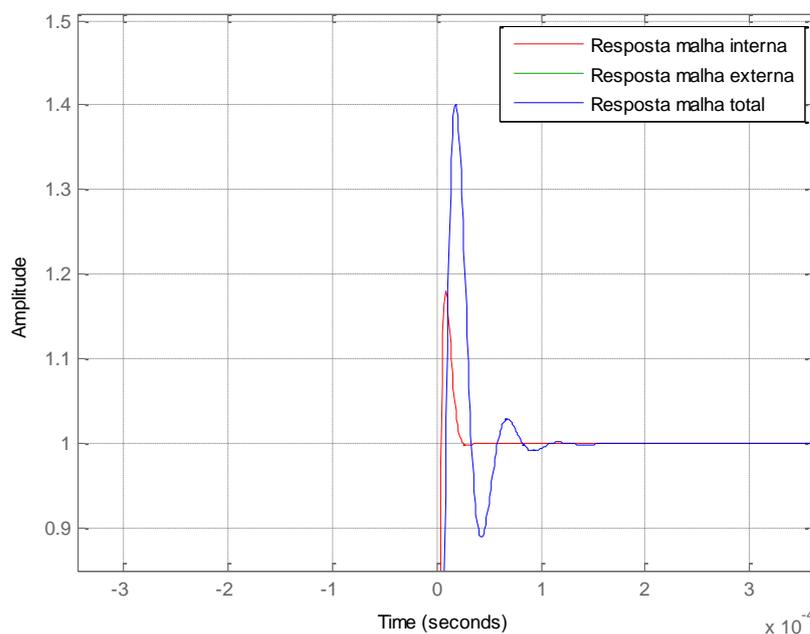
Este capítulo é composto de duas seções, a primeira apresenta a análise do sistema de controle projetado e a segunda expõe os resultados da simulação computacional do painel fotovoltaico conectado à uma bateria por meio de um conversor *buck*, contendo o controle projetado. Os três perfis de irradiação analisados são: irradiação captada por um painel fixo, irradiação absorvida por um painel acoplado a um seguidor solar de um eixo e irradiação absorvida por um painel acoplado a um seguidor solar de dois eixos.

4.1 Análise do Sistema de Controle

Para análise do sistema de controle projetado, verificou-se a resposta da malha de controle às seguintes entradas teste: degrau e rampa. A resposta da malha de controle à entrada degrau unitário é apresentada na Figura 17:



a)



b)

Figura 17 - (a) Resposta da malha de controle à entrada degrau; (b) Destaque para resposta da malha interna e da malha completa.

É notável que a malha de controle apresenta uma resposta à entrada degrau unitário indesejável, apresentando a malha externa um sobressinal de 20% enquanto o proposto no projeto era de 15%. No entanto, a entrada degrau caracteriza-se por uma mudança instantânea de um valor inicial para um valor final, não se assemelhando ao tipo de entrada a que o sistema de controle terá de responder.

Como a entrada rampa varia constantemente com o tempo, apresentando comportamento parecido com a entrada a que o sistema de controle irá ser submetido, foi feita a análise da resposta à esta entrada para validar o sistema de controle. A entrada rampa utilizada bem como a resposta da malha completa de controle a esta entrada é exposta na Figura 18:

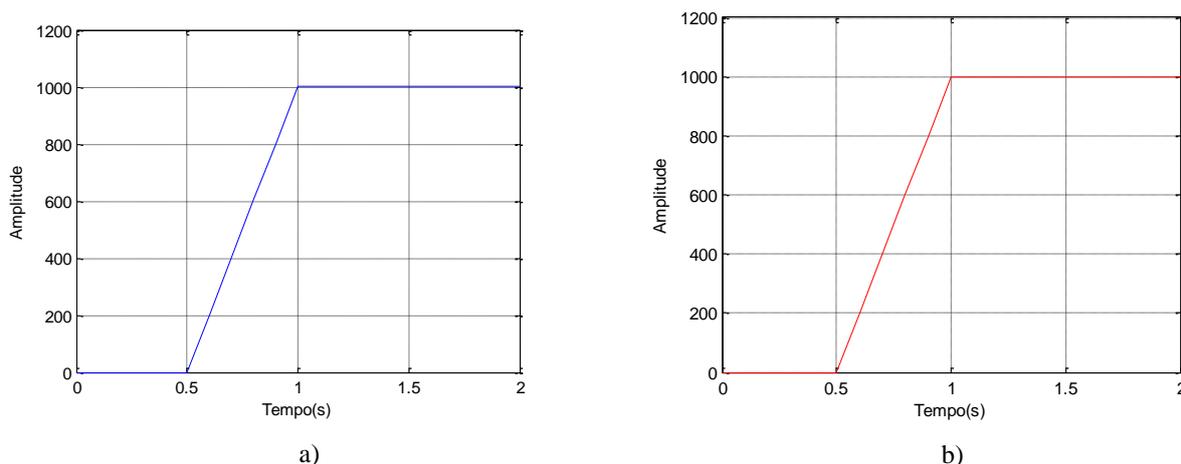


Figura 18 - (a) Entrada rampa; (b) Resposta da malha de controle completa à entrada rampa.

Como pode-se notar a resposta está coincidindo com a entrada rampa submetida, validando o sistema de controle.

4.1 Resultados da simulação no PLECS

Os perfis de irradiação implementados foram simulados para o dia 14 de novembro de 2016, para uma latitude de 20° , referente à cidade de Viçosa-Mg, para um painel de 48W voltado para o norte, que equivale a um ângulo azimutal do painel de 0° , para uma inclinação do painel de 20° e refletância do solo de 0.5. Considerando uma temperatura fixa de 25°C , ambiente.

A irradiação absorvida pelo painel estático e pelos painéis móveis de um e dois eixos é exibida na Figura 19:

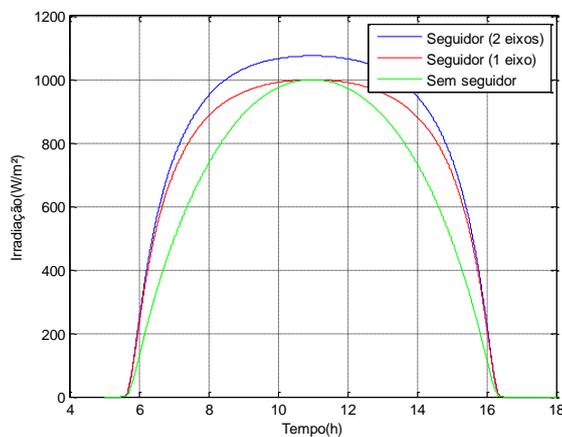


Figura 19 - Irradiação absorvida pelo painel fixo e móvel.

Observa-se por esta figura que a presença do seguidor solar, que faz com que a irradiação incida sempre perpendicular ao plano do painel fotovoltaico, aumenta a irradiação captada pelo mesmo, sendo que no caso do painel acoplado a um seguidor solar de dois eixos a irradiação absorvida chega ao valor de $1074W/m^2$.

A tensão do painel V_{pv} e a referência V_{ref} para cada um dos três casos da irradiação mostrados acima é mostrada na Figura 20:

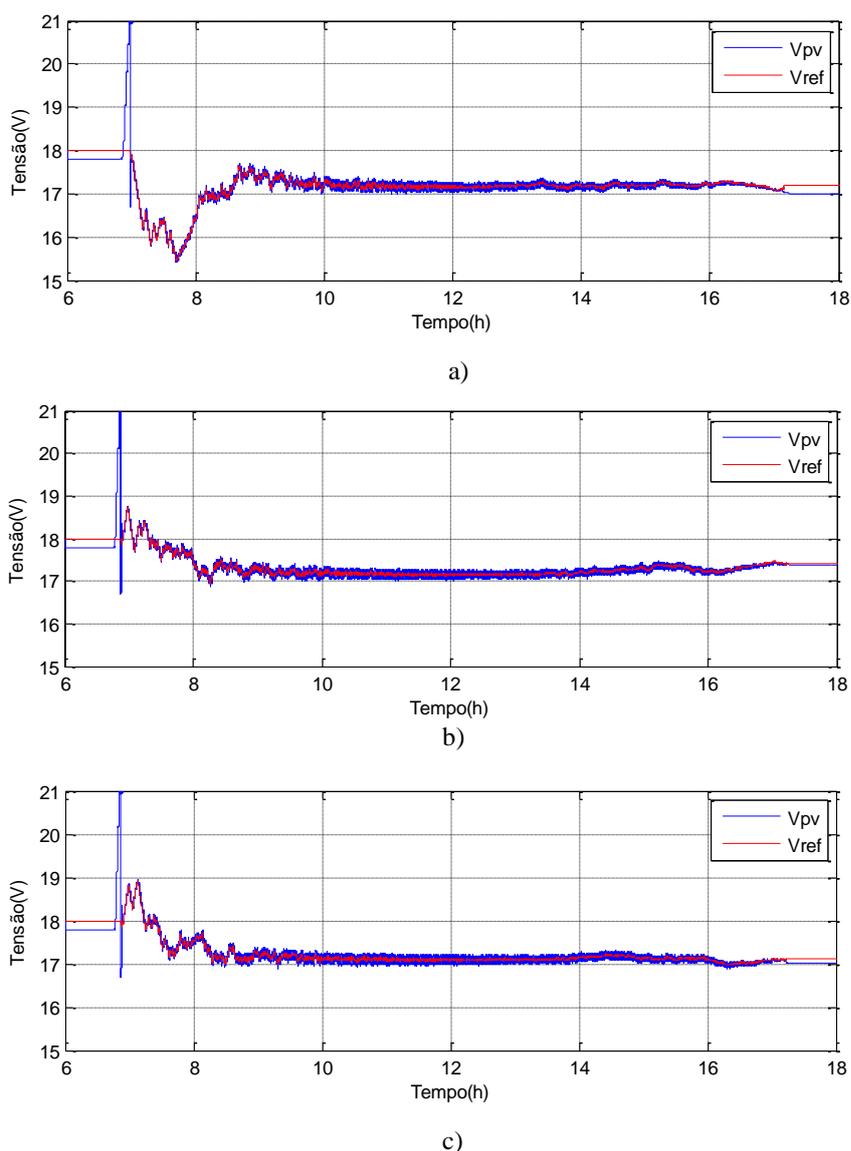


Figura 20 - (a) Painel estático; (b) Painel móvel (1 eixo); (c) Painel móvel (2eixos).

Nota-se que o MPPT é eficaz ao fazer com que o painel fotovoltaico opere na tensão de máxima potência. Verifica-se também que a tensão do painel durante o dia simulado é praticamente constante entre os horário de 8:00 às 16:00 horas. Tal fato é explicado pela

característica dos painéis fotovoltaicos no geral de apresentarem praticamente a mesma tensão de máxima potência para diferente níveis de irradiação. Como explicado na seção 2.2, a influência da irradiação na curva característica P_xV do painel. O fato da descontinuidade da tensão antes das 8 horas é devido a instabilidade do painel para baixos níveis de irradiação.

O sinal de saída do sistema de controle proposto é mostrado na Figura 21:

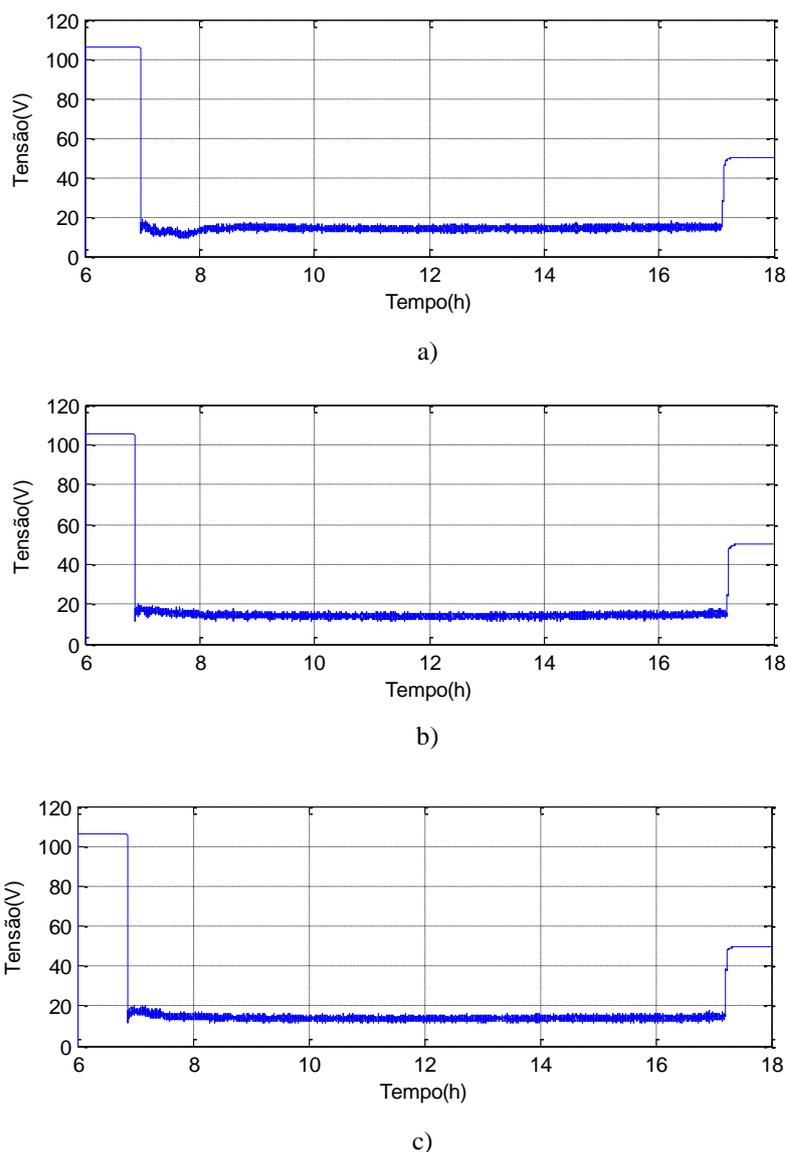
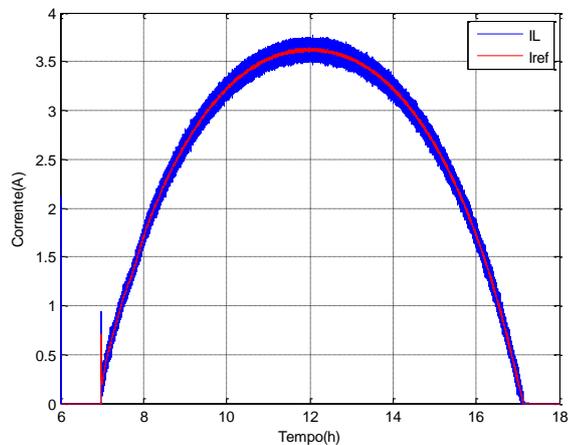


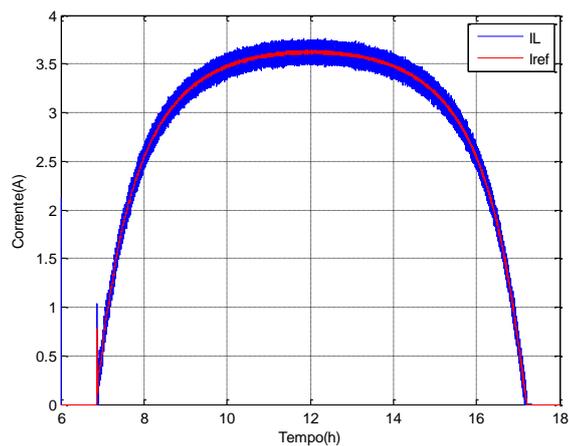
Figura 21 - (a) Painel estático; (b) Painel móvel (1 eixo); (c) Painel móvel (2eixos).

Como pode ser observado o controle aplicado, que atua sobre o conversor, também contribui para que o painel opere na tensão de máxima potência em todos os três casos. Observa-se que mesmo para diferentes condições de operação os conversores operam em condições semelhantes.

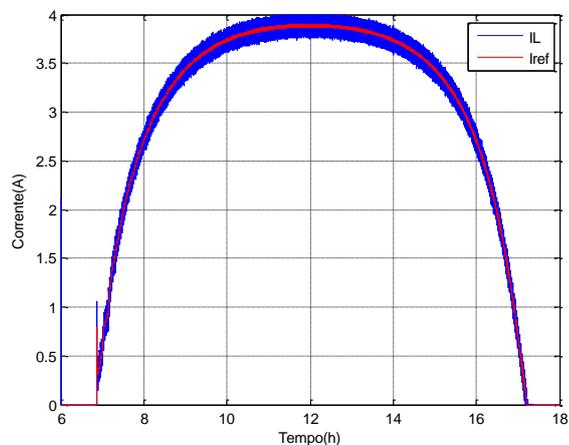
A comparação entre a corrente no indutor e a referência dada pelo controle é exibida para os perfis de irradiação na Figura 22.



a)



b)



c)

Figura 22 - (a) Painel estático; (b) Painel móvel (1 eixo); (c) Painel móvel (2 eixos)

Assim como a corrente no painel, a corrente no indutor aumenta com aumento da irradiação, apresentando o painel com rastreador solar de dois eixos a maior corrente durante todo o dia. Nesta figura também nota-se o efeito do controle, efetivo, uma vez que a corrente no indutor segue a referência.

A corrente do painel para os diferentes perfis de irradiação pode ser observado na Figura 23:

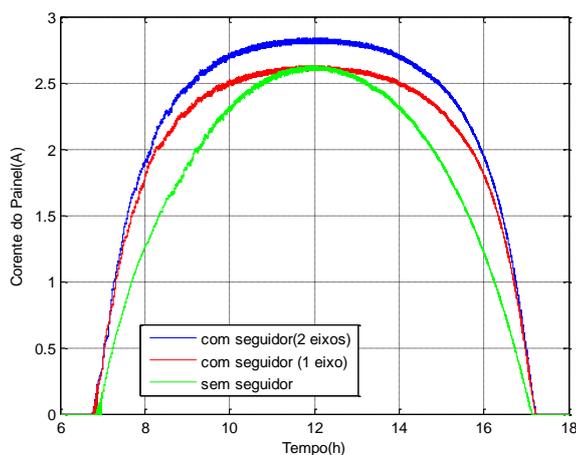


Figura 23 - Corrente do painel para os 3 perfis de irradiação.

Devido à corrente de painéis fotovoltaicos aumentarem com o aumento da irradiação pode-se notar que a corrente para sistemas com seguidor solar apresentam valores mais elevadas em relação a sistema fixos.

A Figura 24 apresenta a comparação da potência gerada para os 3 casos de irradiação:

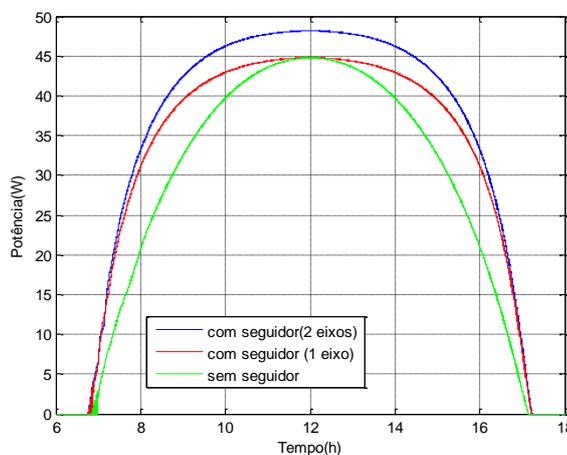


Figura 24 - Potência gerada para os diferentes perfis de irradiação.

Uma vez que, a tensão do painel fotovoltaico é praticamente a mesma e a corrente aumenta com o aumento da irradiação absorvida, a potência gerada pelos painéis acoplados a seguidores solares são maiores. Ao realizar cálculos, a partir desta figura, a energia gerada no dia simulado pelo painel fixo foi de 324,85Wh, pelo painel com seguidor unidirecional de 375,80Wh e pelo painel com seguidor bidirecional de 403,65Wh.

O painel com seguidor de dois eixos apresenta a maior potência porque capta maior irradiação, visto que acompanha as variações do ângulo de altitude e de azimute solar.

Por fim, a Figura 25 mostra a eficiência dinâmica para os perfis de irradiação. Nesta Figura é possível observar que a eficiência é maior para os painéis acoplados a um seguidor solar, apresentando o rastreador de dois eixos o maior valor durante todo o dia.

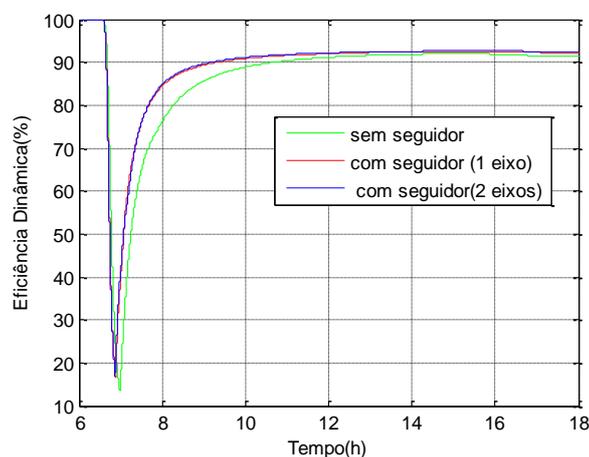


Figura 25 - Eficiência Instantânea para as configurações de irradiação analisada.

5 Conclusões

Neste trabalho foi apresentado a modelagem e o projeto de controladores por alocação de polos para atuar sobre um conversor *buck* conectado a um painel fotovoltaico, a fim de analisar o efeito da inserção de sistemas de rastreamento solar sobre a irradiação captada pelo painel. O trabalho buscou validar o projeto do controle e a eficiência dos seguidores solares.

Os resultados obtidos com a simulação mostram que o acoplamento do painel fotovoltaico a seguidores solares aumentam a irradiação absorvida por ele e conseqüentemente aumenta a potência gerada. Houve um ganho na potência gerada em relação à gerada pelo painel fixo de 15% pelo painel com seguidor unidirecional e de 24% pelo painel com seguidor bidirecional.

Algumas melhorias podem ser feitas, como exemplo, ajustes no sistema de controle que resultaria em uma resposta mais eficaz.

6 Referências Bibliográficas

- [1] ELÉTRICA(CEPEL), C. D. P. D. E. **Energia Solar Princípios e Aplicações**. Centro de referência para energia solar e eólica Sérgio de Salvo Brito. Rio de Janeiro. 2006.
- [2] EPIA, E. P. I. A.-. **Global Market Outlook for Solar Power 2016-2020**. 2015.
- [3] UOL. Estreante, fonte solar não atrai interesse em leilão de energia. **Folha de São Paulo**, 2013. Disponível em:
<<http://www1.folha.uol.com.br/mercado/2013/11/1373072-estreante-fonte-solar-nao-atrai-interesse-em-leilao-de-energia.shtml>>. Acesso em: 18 out. 2016.
- [4] CAMPOS, E. **Construção de um caracterizador de painéis solares utilizando um conversor boost**. Viçosa-MG, 2013.
- [5] QUIGGIN, J. **The end of the nuclear renaissance**. [S.l.]. 2012.
- [6] ANEEL. BIG - Banco de Informações Gerais. **ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica**, 2016. Disponível em:
<<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 16 out. 2016.
- [7] ANEEL. **Atlas de Energia Eletrica do Brasil**. Agência Nacional de Energia Elétrica. 2010.
- [8] ANEEL. **RN 482**. 2012.
- [9] ANEEL. Geração Distribuída. **Agência Nacional de Energia Elétrica**, 2016. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/destaques-distribuicao/-/asset_publisher/zRFisxBAsbz9/content/geracao-distribuida-introducao-1/656827?inheritRedirect=false&redirect=http%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Fdestaques-distribuicao%3Fp_p_id%3D101_INSTANCE_zRFisxBAsbz9%26p_p_li>. Acesso em: 16 out. 2016.
- [10] SILVA, R. M. **Energia Solar no Brasil: dos incentivos aos desafios**. Nucleo de Estudos e Pesquisas/COLEG/Senado. Brasília. 2015.
- [11] GREEN, M. **Solar cell efficiency tables (version 45)**. 1. ed. Amsterda, v. 23, 2015
- [12] SEVERINO, M.; OLIVEIRA, M. **Fontes e Tecnologias de Geração Distribuída para Atendimentos a Comunidade Isoladas**. Energia, Economia, Rotas Tecnológicas: textos selecionados. Palmas, ano 1, p. 265-322. 2010.
- [13] GUIMARÃES, A. **Manual para Engenharia de Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: Especial, 2004.

- [14] SEGUEL, J. I. L. **Projeto de um sistema fotovoltaico autonomo de suprimento de energia utilizando tecnica MPPT e controle digital**. Dissertacao de Mestrado Apresentado na Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG. Belo Horizonte-MG. 2009.
- [15] PEREIRA, H. A. Cursos. **GESEP-Gerência de Especialistas em Sistemas Elétricos de Potência**, 2016. Disponível em: <http://www.gesep.ufv.br/wp-content/uploads/Aula_01-Painel-Fotovoltaico.pdf>. Acesso em: 20 out. 2016.
- [16] MASTERS, G. M. **Renewable and Efficient Eletric Power Systems**. John Wiley & Sons. 2004.
- [17] LEHMAN, D.; NGUYEN, B. **A Reconfigurable Solar Photovoltaic Array Under Shadow Conditions**. Applied Power Eletronics Conference and Exposition. 2008.
- [18] DONG, H. et al. **Research and design on a robust sun-tracker**. International Conference on a Sustainable Power. [S.l.]. 2009.
- [19] KO, J. et al. **A novel tracking system development of photovoltaic for low radiation**. Telecommunications Energy conference. [S.l.]. 2009.
- [20] NEVES, M.; RODRIGUES, C. C.; EMANUEL, F. M. **Módulo fotovoltaico com seguimento da posição solar**. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. 2009.
- [21] TUDORACHE, T. K. L. **Design of a Solar Tracker System for PV Power Plants**. Acta Polytechnica Hungarica. 2010.
- [22] M., A. M.; PINTO, Z. R. **Descrição de seguidores solares e sua aplicação em centros fotovoltaicos conectados à rede**. III Congresso Brasileiro de Energia Solar. Belém-PA. 2010.
- [23] OLIVEIRA, J. H. **Projeto e Desenvolvimento de um Carregador de Bateria através de um conversor Buck**. Universidade Federal de Vicosa. Vicosa. 2014.
- [24] LABORATORY, N. R. E. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/>>.
- [25] VILLALVA, M. G. **Conversor Eletrônico de Potência Trifásico para Sistema fotovoltaico conectado à rede**. UNICAMP. Campinas. 2010. (Tese de Doutorado).
- [26] ERICKSON, R. W.; MAKSIMOVIC, D. **Fundamentals of Power Eletronics**. Klumer Academic Publishers. New York. 2004.
- [27] COELHO MACIEL, H. C. **Implementação de uma Ferramenta para Auxilio à Sintonia de Controladores PID**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte-MG. 2010.