

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

MARCELO SANTOS HONORATO

**ESTUDO SOBRE PROCESSAMENTO PARCIAL DE
ENERGIA FOTOVOLTAICA**

VITÓRIA
2022

MARCELO SANTOS HONORATO

**ESTUDO SOBRE PROCESSAMENTO PARCIAL DE ENERGIA
FOTOVOLTAICA**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Marcelo Santos Honorato**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Walbermark Marques dos Santos

VITÓRIA
2022

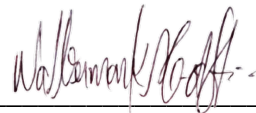
MARCELO SANTOS HONORATO

**ESTUDO SOBRE PROCESSAMENTO PARCIAL DE ENERGIA
FOTOVOLTAICA**

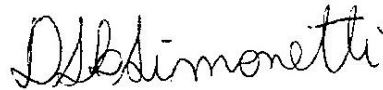
Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Marcelo Santos Honorato**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em (23) de (março) de (2022).

COMISSÃO EXAMINADORA:



Prof. Dr. Walbermark Marques dos Santos
UFES



Prof Dr. Domingos Sávio Lyrio Simonetti
UFES

Enga. Paula Sarmenghi Rodrigues
Martinelli
Atman System

Aos alunos e professores do Curso de Engenharia Elétrica da UFES.

AGRADECIMENTOS

Não apenas sobre o projeto de graduação, mas por todo o período do curso de engenharia elétrica da UFES, eu gostaria de agradecer primeiramente à Deus, pois diversas vezes pensei que as coisas não dariam certo, e por mais que a princípio não tivessem dado, tudo foi se resolvendo, pois ele me deu a perseverança de continuar tentando.

À minha família, por sempre me apoiar e acreditar em mim durante toda a minha vida acadêmica até o momento, pois eu sei que não importa quanto tempo passe, eu sempre vou ter um porto seguro em casa. Aos meus pais, Washington e Rosângela, minha avó Catarina, que descansa em paz, meus tios Adilson e Sandra, meu primo Anderson, meu mais sincero obrigado. Aos meus amigos, não tenho espaço para falar sobre cada um deles, mas eu tenho um grupo que me rende sempre bons momentos de diversão e relaxamento, algo muito importante para a saúde mental de alguém, principalmente num curso que exige tanto da mente de uma pessoa. Eu espero poder seguir com essa amizade pelos muitos anos que ainda virão.

Ao professor de dança de salão Djavan Ferreira, que me deu uma bolsa em sua academia de dança a alguns anos atrás, tendo sido isso uma grande ajuda para lidar com o estresse da faculdade, e embora eu não faça mais parte do corpo de monitores da escola, o que eu aprendi lá ajudou a moldar quem eu sou hoje, não apenas na questão de saber dançar, mas toda a questão de lidar melhor com as pessoas, coisa que eu não era muito bom.

Por último, ao Prof. Dr. Walbermark, pela oportunidade de trabalhar neste projeto, pela paciência, pois devido a algumas questões, a finalização deste trabalho demorou mais tempo do que eu gostaria e por ser muito criterioso durante a produção do mesmo.

RESUMO

Este trabalho de graduação visa o estudo e a aplicação de um modo de operação de conversores CC-CC denominado processamento parcial, aplicado num sistema de geração de energia fotovoltaica. Tal método consiste em fazer com que apenas parte da energia que chega no conversor seja processada pelo mesmo, de forma a diminuir as perdas do processo. Observando os trabalhos já realizados com este tema, percebe-se que este ainda é um campo com uma ampla área para ser explorada, com conceitos ainda não muito difundidos na literatura, como por exemplo, a potência não-ativa. Tendo isso em vista, replicou-se, utilizando o software PSIM, um projeto de um conversor CC-CC Full-Bridge Phase Shift (FBPS) aplicando processamento parcial, para que fosse possível observar os resultados obtidos em artigos anteriores e entender seu funcionamento. Além disso, buscando uma forma de otimizar o processo ao alterar o funcionamento do FBPS no intervalo de tensão em que sua eficiência cai ao se comparar com outras topologias, três diferentes alterações no projeto original foram testadas: uma que desliga o conversor ao chegar neste intervalo, conectando a entrada diretamente à rede; e duas versões que integram um conversor boost ao FBPS. Tais alterações geraram resultados interessantes quanto à diminuição da potência não-ativa do sistema.

Ao se preparar um projeto para a instalação de um sistema PV, é interessante analisar a viabilidade da aplicação, pois caso ela seja comprovada, poderá vir a gerar uma economia notável. Sabendo que os trabalhos anteriores foram feitos com dados climáticos de outras regiões do Brasil, e que nenhum estudo semelhante aplicado na região de Vitória, Espírito Santo foi encontrado, os experimentos realizados neste trabalho também foram simulados nesta região, e seus resultados, catalogados.

ABSTRACT

This graduation project aims the study and application of a DC-DC converter operation mode called partial-power processing, applied in a photovoltaic power generation system. This method consists of making only part of the power that enters the converter to be processed by it, in order to reduce the losses of the process. While observing previous works with this theme, it is visible that this is still a field with a wide area yet to be explored, with concepts not yet widespread in the literature, such as the non-active power. With this in mind, using the PSIM software, a project of a Full-Bridge Phase Shift DC-DC converter applying partial power processing was replicated, making it possible to observe the results that were achieved in previous works and understanding its operation. Furthermore, looking for a way to optimize the process by changing the operation of the FBPS in the voltage range where its efficiency drops when compared to other topologies, three different changes in the original design were tested: one that turns off the converter when reaching this voltage range, connecting the input directly to the output; and two versions that integrates a boost converter to FBPS. Such alterations generated interesting results regarding the decrease of the non-active power of the system.

When preparing a project for the installation of a PV system, it is interesting to analyze the feasibility of the application, because if it is proven, it could generate remarkable savings, and knowing that the previous works were done with climatic data from other regions of Brazil, and since no similar study applied in the Vitória, Espírito Santo region was found, the experiments carried out in this work were also tested in this region, and their results, cataloged.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema simplificado de um conversor CC-CC aplicado para realizar o MPPT.....	23
Figura 2 – Arquitetura MPPT tipo <i>string</i> adotando conversores CC-CC em S-PPC.....	27
Figura 3 – Principais tipos de operações de conversores CC-CC integrados em módulos PV.....	28
Figura 4 – Representações do S-PPC com método de ligação Tipo I (a) e Tipo II (b).....	29
Figura 5 – Potência ativa num S-PPC plotada contra variação de tensão de entrada.....	30
Figura 6 – Histograma de produção anual estimada de energia e nível de tensão de módulo PV.....	33
Figura 7 – Porcentagem da diferença de potência N processada pelo S-PPC em relação ao conversor de referência.....	35
Figura 8 – Esquemático de um FBPS aplicado num S-PPC.....	37
Figura 9 – Circuito do FBPS S-PPC feito no PSIM.....	40
Figura 10 – Corrente medida no indutor.....	41
Figura 11 – Representação da potência N do FPBS S-PPC para diferentes valores de tensão.....	42
Figura 12 – Representação da potência N do FPBS S-PPC da referência.....	43
Figura 13 – Comparação entre potência ativa e não-ativa na saída do conversor.....	43
Figura 14 – Rendimento do regulador e rendimento global.....	44
Figura 15 – Comparativo do circuito original (a), com a alteração proposta de ligação direta (b).....	45
Figura 16 – Circuito de Controle do FBPS S-PPC: Ligação Direta.....	46
Figura 17 – Primeira alteração proposta do FBPS S-PPC: ligação direta.....	47
Figura 18 – Representação da potência N do FPBS S-PPC na alteração proposta nº1.....	48
Figura 19 – Comparação entre potência ativa e não-ativa na alteração proposta nº1.....	48
Figura 20 – Comparação entre rendimento do S-PPC e o global na alteração proposta nº1.....	49
Figura 21 – Representação da alteração proposta nº2 – Boost Integrado.....	50
Figura 22 – Segunda alteração proposta: FBPS S-PPC/Boost Integrado.....	51
Figura 23 – Representação da potência N na alteração proposta: FBPS S-PPC/Boost Integrado.....	53

Figura 24 – Comparação entre a potência N original e a proposta: FBPS S-PPC/Boost Integrado	54
Figura 25 – Comparação entre potência ativa e não-ativa na proposta: FBPS S-PPC/Boost Integrado	55
Figura 26 – Terceira alteração proposta: FBPS S-PPC/Boost Integrado V2.....	56
Figura 27 – Comparação entre a potência N original e a proposta: FBPS S-PPC/Boost Integrado V2	57
Figura 28 – Comparação entre potência ativa e não-ativa na proposta: FBPS S-PPC/Boost Integrado V2	57
Figura 29 – Comparação de rendimentos entre o FPBS S-PPC original e o Boost Integrado V2	58
Figura 30 – Média mensal da radiação no plano inclinado no ES em Março	62
Figura 31 – Simulação do painel solar	64
Figura 32 – Parâmetros dimensionados de acordo com o datasheet	64
Figura 33 – Gráficos de tensão e potência do painel solar	65
Figura 34 – Potência ativa num S-PPC com uma faixa de tensão mais estreita.....	66
Figura 35 – Comparação das potências N totais de cada circuito trabalhado	68
Figura 36 – Comparação das potências ativas totais de cada circuito trabalhado	69

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Produção mundial bruta de eletricidade por fonte, 2016.....	19
Gráfico 2 – Projeção mundial para geração de energia fotovoltaica	19
Gráfico 3 – Preço de um painel fotovoltaico com o passar dos anos	20
Gráfico 4 – Influência da variação da irradiância solar na curva característica $I-V$	21
Gráfico 5 – Influência da temperatura de uma célula fotovoltaica na curva $I-V$	22
Gráfico 6 – Potência elétrica em função da tensão elétrica de uma célula fotovoltaica.....	22

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros e resultados aproximados das simulações.....	39
Tabela 2 – Valores de desvio de fase obtidos no trabalho para o FBPS S-PPC.....	40
Tabela 3 – Parâmetros e resultados aproximados das simulações.....	52
Tabela 4 – Valores da razão cíclica para o Boost.....	52
Tabela 5 – Comparação geral de resultados das propostas.....	59
Tabela 6 – Horas de sol aproximadas para cada mês	63
Tabela 7a – Dados Climatológicos para cada mês	65
Tabela 7b – Resultados do painel solar para cada mês.....	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BEN	Balanco Energético Nacional
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IEA	International Energy Agency
IRENA	International Renewable Energy Agency
MPP	Ponto de máxima potência
MPPT	Rastreamento do ponto de máxima potência (<i>maximum power point tracking</i>)
Mtep	Milhões de toneladas equivalentes de petróleo
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
PPP	Processamento parcial de energia (<i>partial power processing</i>)
PV	Módulo de geração fotovoltaica
S-PPC	Processamento parcial conversão em série (<i>series partial power conversion</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

t	Tempo (s)
R	Valor da resistência do resistor (Ω)
$i(t)$	Corrente instantânea no elemento (A)
L	Valor da indutância do indutor (H)
C	Valor da capacitância do capacitor (F)
N	Potência não-ativa
n	Relação de espiras do transformador
N_C	Potência não-ativa processada pelos capacitores do conversor
N_L	Potência não-ativa processada pelos indutores do conversor
N_{in}	Potência não-ativa na entrada do conversor
N_{total}	Potência não-ativa total do conversor
P	Potência ativa
P_{in}	Potência ativa de entrada do conversor CC-CC
P_{out}	Potência de saída do conversor CC-CC
P_{Cout}	Potência ativa do conversor do regulador tipo série
V_{in}	Tensão de entrada no conversor CC-CC
V_{out}	Tensão de saída no conversor CC-CC
V_{Cout}	Tensão média do capacitor de saída do conversor CC-CC
v'	Tensão em que ocorre o máximo de geração de energia num módulo PV para dada localidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	JUSTIFICATIVA	23
1.2	OBJETIVOS	24
1.2.1	Objetivo geral	24
1.2.2	Objetivos específicos	24
1.3	DIVISÃO DO TRABALHO	25
2	DESENVOLVIMENTO TEÓRICO.....	26
2.1	Introdução.....	26
2.2	Teoria do PPP.....	26
2.2.1	Análise matemática do Processamento Parcial.....	28
2.2.2	Parâmetros do S-PPC.....	29
2.2.3	Potência N, faixa de tensão e razão cíclica.....	31
2.3	Conversor Full-Bridge Phase Shift (FBPS) e sua operação em S-PPC	37
2.4	Comentários finais do capítulo.....	38
3	TOPOLOGIAS PROPOSTAS	39
3.1	Introdução.....	39
3.2	Projeto Inicial	39
3.3	Proposta de modificação	45
3.3.1	Proposta 1: alimentação direta.....	45
3.3.2	Proposta 2: circuito Boost integrado.....	50
3.3.3	Proposta 3: circuito Boost Integrado V2.....	55
3.3.4	Comparação geral de resultados	58
3.3.5	Vantagens e desvantagens	59
3.4	Comentários finais do capítulo.....	60
4	PROCESSAMENTO PARCIAL NA REGIÃO METROPOLITANA DE VITÓRIA-ES	61
4.1.1	Coleta de dados	62

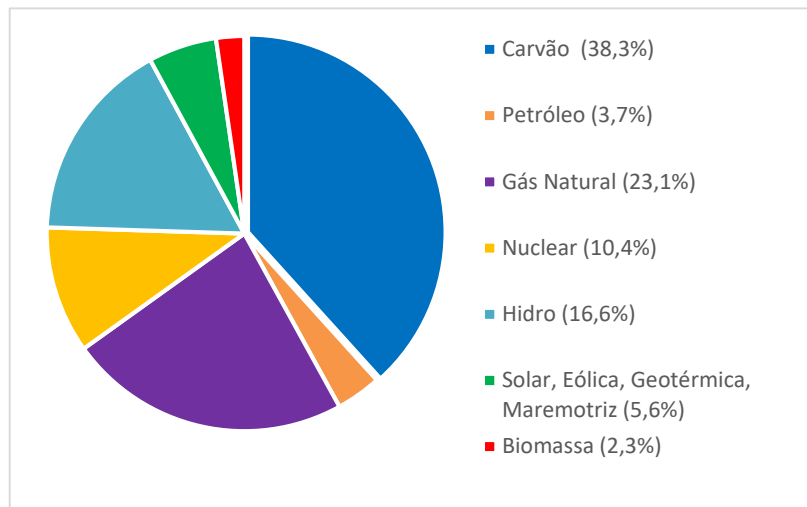
4.1.2	Aplicação das propostas nos dados de Vitória-ES.....	67
5	CONCLUSÃO	70
6	REFERÊNCIAS	72
7	APÊNDICE	76
7.1	Código Matlab FBPS S-PPC original	76
7.2	Código Matlab FBPS S-PPC/Ligação Direta	78
7.3	Código Matlab FBPS S-PPC/Boost Integrado	79
7.4	Código Matlab FBPS S-PPC/Boost Integrado V2	81
8	ANEXO.....	84

1 INTRODUÇÃO

Com a preocupação crescente de escassez de combustíveis fósseis, com a escalada do aumento no preço destes, e não menos importante, a questão ambiental, tem se tornado cada vez mais evidente a necessidade de pesquisa e desenvolvimento, de modo a aumentar a eficiência das fontes de geração de energia limpa e renovável.

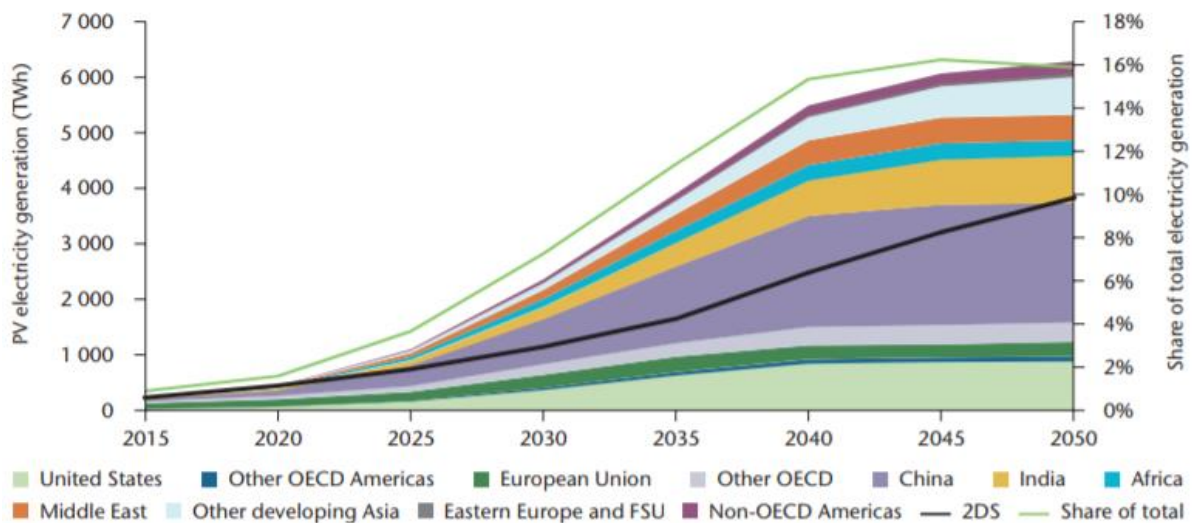
Um dos métodos que tem ganhado cada vez mais destaque na geração desse tipo de energia é a solar fotovoltaica, obtida através da conversão da luz solar em eletricidade, por meio de um painel fotovoltaico. Este método de produção de energia ainda representa uma pequena parte da matriz energética mundial, como pode ser visto no Gráfico 1. Entretanto, desde a criação do primeiro módulo até os dias de hoje, a energia fotovoltaica tem tido crescimentos significativos na sua capacidade de geração, com o aumento de eficiência, barateamento dos módulos e portanto, maior uso dos mesmos. A projeção é que até 2050, ela represente sozinha 16% da matriz energética mundial, como pode ser visto no Gráfico 2. Entretanto, a IEA, que publica estudos de previsão como este, é conhecida por subestimar a capacidade de crescimento de energias renováveis, visto que as previsões de 2014 para 2015 e 2018 se mostraram inferiores aos reais valores de geração observados quando tais datas ocorreram (SINGH, GUPTA, 2019). Outro estudo mostra que a capacidade de geração solar fotovoltaica global pode ultrapassar 2 TW em 2025 (CASARIN, 2021), valor que também supera as expectativas do estudo da IEA de 2014. Dito isto, nota-se que em diferentes previsões, mesmo que apresentem certa discrepância em seus resultados, mostram que a perspectiva para o futuro do uso da energia solar fotovoltaica é de constante crescimento.

Gráfico 1 – Produção mundial bruta de eletricidade por fonte, 2016



Fonte: IEA (2018).

Gráfico 2 – Projeção mundial para geração de energia fotovoltaica



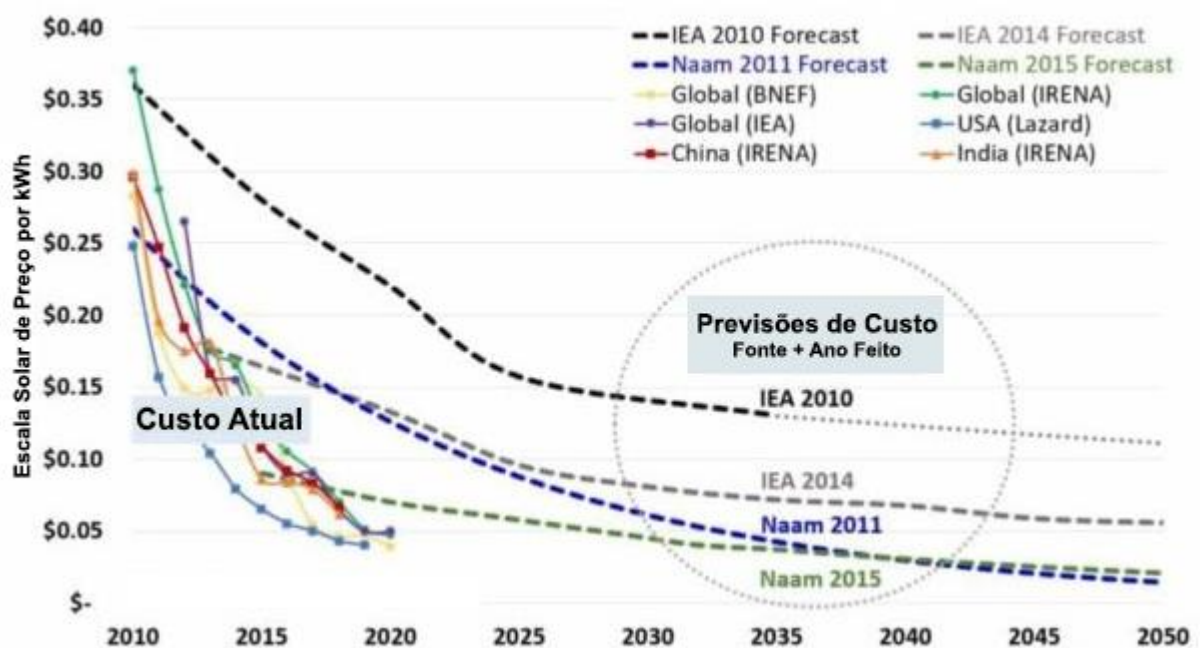
Fonte: IEA – Technology Roadmap – Solar Photovoltaic Energy (2014).

O Brasil está entre os países com o maior potencial para geração de energia fotovoltaica, isso se deve principalmente ao fato de ser um país de clima tropical e possuir uma vasta área territorial. Apesar disso, pouco desse potencial já foi devidamente explorado, se comparar com regiões como a Europa, onde a incidência média anual de luz é menor, mas existe um investimento maior nesse tipo de geração (IRENA, 2015). No Brasil, a média de irradiação solar é de 1.500-2.500 Wh/m², enquanto em regiões da Europa esse valor varia entre 900-1.850 Wh/m² (PEREIRA et al, 2006). Dessa forma, é de grande interesse procurar formas de aumentar o rendimento da geração fotovoltaica, melhorando cada vez mais o custo-benefício, para que se

possa diminuir a dependência de fontes não-renováveis, ou até mesmo as das renováveis que sofrem efeitos de sazonalidade, como a hidroelétrica, por exemplo. É claro, a geração de energia solar, fotovoltaica ou térmica, também sofre com os efeitos da intermitência, mas por isso mesmo é que se deve investir nela. Uma matriz energética que é diversificada terá sempre menos problemas com falta de energia do que uma que depende de menos meios de geração.

A energia solar fotovoltaica apresenta diversas vantagens em relação aos outros métodos de geração de energia: não polui o meio ambiente, como a termoelétrica, não gera lixo tóxico, como as nucleares, nem impacto sócio/ambiental, como as hidroelétricas. Um dos principais fatores que faz com essas fontes de energia sejam escolhidas antes da solar ainda é o preço do módulo fotovoltaico. Em janeiro de 2018, uma placa solar fotovoltaica de 330 W no Brasil, estava sendo vendida no varejo por um preço que variava de R\$ 700,00 a R\$ 900,00. Desta forma, o preço calculado em R\$/Watt estava entre 2,12 a 2,72 R\$/Watt (PORTAL SOLAR, 2021). Contudo, é notável que, desde o desenvolvimento desta tecnologia até os dias atuais, o valor dos painéis vêm diminuindo, e diversas pesquisas de previsão mostram que a tendência é de que esta queda de preço continue pelas próximas décadas, como pode ser visto no Gráfico 3.

Gráfico 3 – Preço de um painel fotovoltaico com o passar dos anos

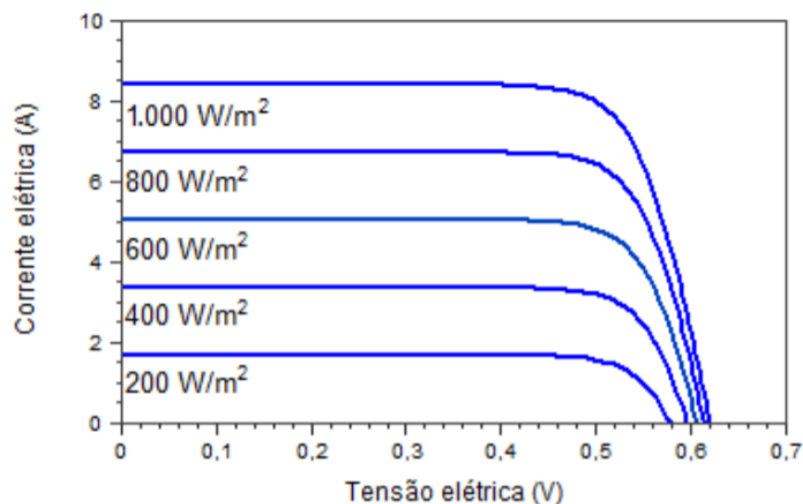


Fonte: TECHtricity (2020). Tradução: Próprio autor.

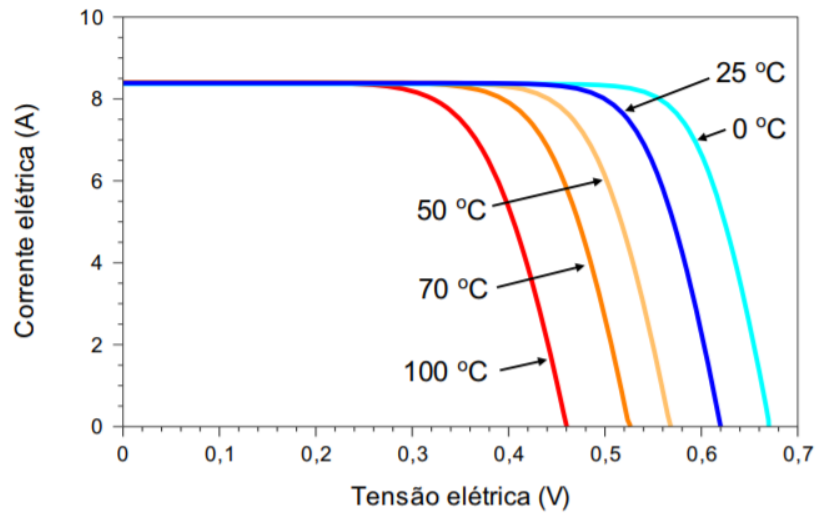
Percebe-se que mesmo as previsões mais otimistas quanto ao custo $\$/\text{kWh}$ têm demonstrado valores superiores aos reais, conforme as datas previstas se tornam dados históricos.

Mas para que um sistema de geração de energia possa ser instalado, são necessários outros equipamentos além do módulo fotovoltaico. Inversores de tensão são utilizados para o condicionamento e sincronismo da saída do arranjo fotovoltaico com a rede de energia elétrica. O controle exerce duas funções principais, rastrear o ponto de operação de máxima potência (MPPT) do arranjo fotovoltaico e injetar uma corrente senoidal na rede, com fator de potência próximo ao unitário (CASARO, MARTINS, 2010). Para entender como o MPPT é calculado pelo inversor, é preciso mostrar que existem vários fatores que podem influenciar na energia produzida pelo painel, como radiação, temperatura, sombras, nuvens, etc. A seguir, nota-se como alguns destes fatores exercem influência na curva tensão-corrente do painel (efeito da irradiância no Gráfico 4, e da temperatura no Gráfico 5).

Gráfico 4 – Influência da variação da irradiância solar na curva característica $I-V$



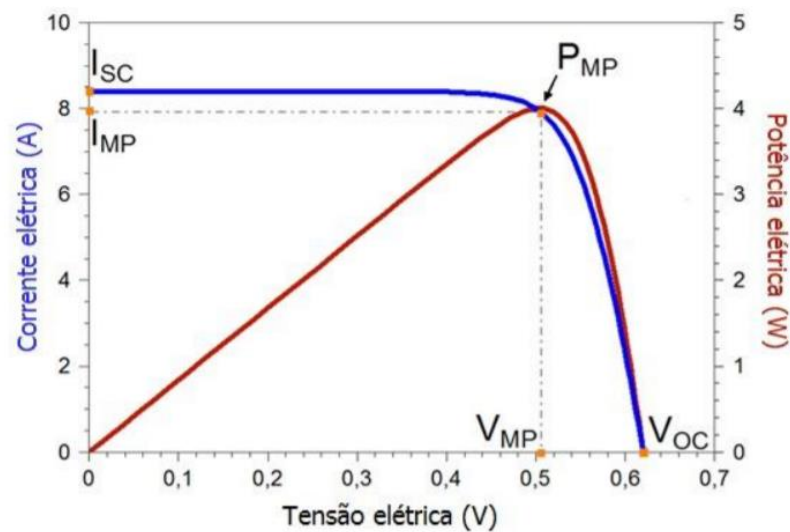
Fonte: PINHO; GALDINO, (2014).

Gráfico 5 – Influência da temperatura de uma célula fotovoltaica na curva $I-V$.

Fonte: PINHO; GALDINO, (2014).

Com os dados da curva $I-V$, pode ser determinada a curva de potência em função da tensão, denominada curva $P-V$, mostrada em vermelho no Gráfico 6, onde se destaca o MPP.

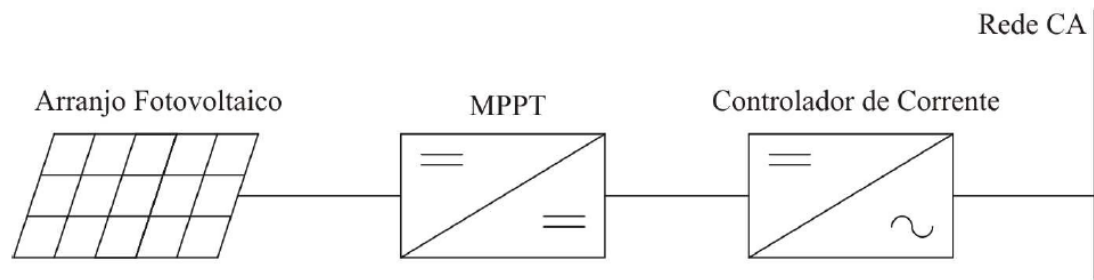
Gráfico 6 – Potência elétrica em função da tensão elétrica de uma célula fotovoltaica



Fonte: PINHO; GALDINO, (2014).

No caso de um conversor CC-CC, este realiza o MPPT ao mesmo tempo em que fornece isolamento ao sistema (isto só acontece se o CC-CC for isolado. Na Figura 1 este não é isolado). Enquanto isso, um conversor CC-CA tem a função de injetar na rede uma corrente senoidal com baixo THD e alto FP, como visto na Figura 1.

Figura 1 – Esquema simplificado de um conversor CC-CC aplicado para realizar o MPPT



Fonte: CASARO, MARTINS (2010).

Com base na Figura 1, o foco deste trabalho é no conversor CC-CC realizando o processamento parcial de energia (*partial power processing*, ou PPP), que consiste em permitir que somente uma pequena parcela da energia que flui da entrada para a saída seja processada pelo circuito conversor, enquanto que o restante possa fluir direto, sem ser processada.

1.1 JUSTIFICATIVA

O Brasil possui a maior parte de sua matriz elétrica proveniente de fontes renováveis, sendo aproximadamente 65% de hidrelétricas. Em 2019, o total da utilização destas fontes no Brasil para a geração de energia elétrica ultrapassou 80% e, em comparação com os 27% da média mundial (EPE, 2021), é uma diferença considerável. Apesar disto, ainda há condição para outras formas de energia limpa ganharem espaço, visto que as maiores hidrelétricas não estão próximas as regiões de grande consumo, o transporte desta energia por grandes distâncias acarreta em perdas de energia e em custos adicionais ao consumidor final, fora a questão de períodos de seca, que aumentam ainda mais o preço da energia.

Outra questão é que no processamento total, o conversor CC-CC é dimensionado para processar toda a potência disponível no PV, obviamente suas dimensões e as perdas envolvidas são consideráveis. Uma técnica para diminuir estas duas características do conversor (perda e volume) é fazê-lo processar somente parte da potência do PV, técnica conhecida como Processamento Parcial de Potência (PPP).

A ideia de um PPP vem sendo estudada a alguns anos. Tal conceito foi apresentado pela primeira vez por Enslin e Snyman, em 1991, num circuito de carga e descarga de baterias em sistemas PV, mas é notável que a partir de 2014, o número de pesquisas sobre o tema cresceu

consideravelmente. Desde então, diversos trabalhos sobre o tema tem sido produzidos, e em várias aplicações, como em arquiteturas de carregamento de carros elétricos ou mesmo além da própria energia fotovoltaica, como num sistemas de turbinas eólicas. Isso tudo mostra o quanto crescente o estudo sobre energia solar têm sido nos últimos anos, mas apesar disso, o assunto de processamento parcial é um nessa área que ainda tem muito o que ser pesquisado.

Com base no exposto no parágrafo anterior, este trabalho é baseado principalmente nas pesquisas feitas por J. R. R. Zientarski, M. L. da S. Martins, J. R. Pinheiro, and H. L. Hey, que realizaram estudos sobre PPP em diversos conversores CC-CC, trazendo algumas contribuições sobre topologias de conversores que minimizam o processamento da potência não-ativa no conversor.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

- Avaliar a viabilidade técnica de modificações topológicas em estruturas conversoras para processamento parcial de potência aplicadas a sistemas fotovoltaicos.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analisar a factibilidade técnica de alterações topológicas no conversor FBPS;
- Comparar os processamentos de potência ativa e não-ativa das topologias modificadas com as originais;
- Examinar o comportamento das topologias sugeridas sob condições de irradiância local de Vitoria-ES.

1.3 DIVISÃO DO TRABALHO

Este trabalho está dividido da seguinte forma: desenvolvimento da teoria do PPP, onde é explicado quais os requerimentos necessários para se aplicar este método, além de como é realizada a ligação do conversor. Posteriormente, alguns conceitos necessários para o entendimento da aplicação também são demonstrados conceitual e matematicamente, como a potência não-ativa, a faixa de tensão, dentre outros.

Com os conceitos básicos definidos, parte-se para o projeto simulado na ferramenta PSIM. Esta parte pode ser subdividida em:

- Recriação de um projeto já existente e seus resultados, para efeitos de demonstração do PPP e posterior comparação;
- Propostas de aprimoramento do projeto anterior, apresentando seus resultados e tirando as respectivas conclusões;
- Tendo em mente que as propostas de melhoria anteriores são aplicadas utilizando os dados climáticos do projeto original (para que a comparação possa ser validada), após elas serem concluídas, uma nova análise é feita, mas dessa vez, com os dados climatológicos da região de Vitória-ES;
- Conclusão final do trabalho e perspectiva de projetos futuros com o PPP.

2 DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

2.1 Introdução

Neste capítulo aborda-se o básico da teoria do processamento parcial de energia. Quais os tipos que existem e para quais situações cada um é mais aplicável. Dentre todos os conceitos que envolvem o PPP, foi realizada uma análise matemática dos principais parâmetros necessários para os cálculos feitos neste trabalho, com um detalhamento maior nas questões de potência não-ativa, a faixa de tensão e razão cíclica, além de, é claro, apresentar o conversor FPBS que será a base para o projeto simulado.

2.2 Teoria do PPP

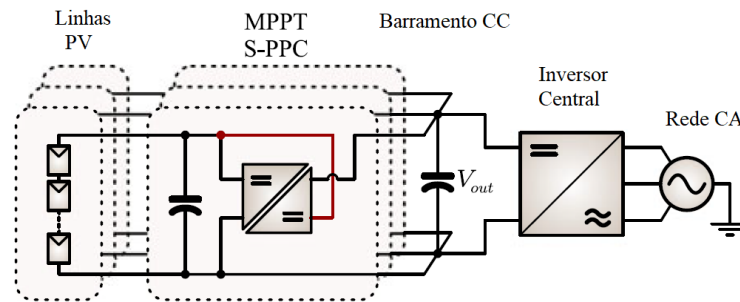
Ao se estudar os métodos de processamento parcial, a primeira subdivisão que pode ser feita é se a regulação é executada em paralelo ou em série. A regulação paralela, usualmente chamada na literatura de DPP (*differential power processing*) ou D-PPC (*differential partial power conversion*), é comumente utilizada em *strings* de módulos PV onde os conversores CC-CC são conectados em paralelo com os módulos. Isso proporciona a divisão da corrente da *string*, permitindo que cada módulo opere em níveis de corrente diferentes e adequados ao MPPT daquele módulo. Esta operação de MPPT individual é útil em casos de sombreamento de painéis por nuvens ou sombras que mudam devido à posição do sol durante o dia.

Quanto à regulação série, chamada de PPP ou ainda S-PPC (*series partial power conversion*), a saída do regulador CC-CC é conectada em série com a fonte de entrada. Assim, a tensão de saída do conversor (v_c) é a diferença entre a tensão de saída do estágio CC-CC (v_{out}) e a tensão de entrada (v_{in}).

Quanto menor essa diferença de tensão, menor é a potência ativa processada pelo conversor em relação à potência de saída do sistema. Uma vez que a tensão apresenta uma pequena faixa de variação, em torno de 20%, esta característica torna os reguladores série adequados para realizar o MPPT em sistemas fotovoltaicos na configuração *multi-string*, que são conectados a um barramento CC comum, por meio de um conversor CC-CC, conectado em série, como mostra-se na Figura 2 (ZIENTARSKI; MARTINS, 2018).

Isso possibilita que sejam utilizados conversores com baixa potência nominal, processando somente a quantidade de energia necessária para regular os níveis de tensão e corrente de entrada da *string*, permitindo o seu MPPT individual, enquanto que a tensão de saída v_{out} é regulada pelo inversor central (ZIENTARSKI; MARTINS, 2017).

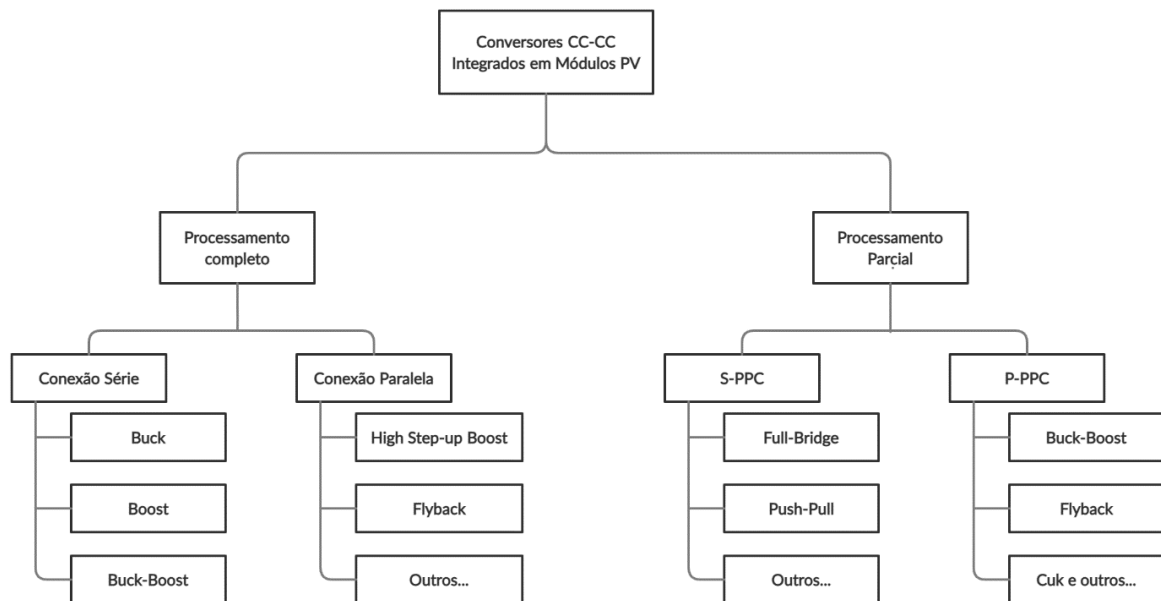
Figura 2 – Arquitetura MPPT tipo *string* adotando conversores CC-CC em S-PPC.



Fonte: ZIENTARSKI; MARTINS, 2018

Por ser um tema relativamente novo, vários trabalhos já foram apresentados de forma a tentar mostrar o efeito de um PPP, aplicando diversas topologias diferentes. Entretanto, estudos mais recentes mostram que algumas topologias de conversores podem não reduzir a eficiência do sistema ao aplicar este método (ZIENTARSKI; MARTINS, 2019). Tais estudos anteriores haviam chegado à conclusão que conversores tipo Boost ou Flyback, por exemplo, poderiam operar um PPP (AGAMY *et al*, 2014). Apesar de grande contribuição ao tema, estas referências não abordaram o processamento da potência não-ativa presente. Em algum desses casos, as configurações adotadas reduziam a potência ativa, mas exibiam um aumento na potência não ativa e total processada, gerando mais perdas do que um processamento completo (ZIENTARSKI; PINHEIRO 2015). Outro ponto importante que deve ser destacado é que, mesmo em topologias que podem realizar o PPP, fatores como ciclo de trabalho, relação de espiras do transformador e faixa de regulação de tensão podem fazer com que o conversor processe mais ou menos energia. Resumindo, um PPP deve ser bem dimensionado para realizar a função desejada. Na Figura 3, mostra-se um esquema simplificado com as formas de processamento de energia utilizando conversores CC-CC aplicados em módulos PV, nos modos completo e parcial, e com as divisões de quais topologias são possíveis para cada método. Tal esquema foi possível de ser montado justamente por estes trabalhos terem realizado testes para saber quais tipos de conversores seriam capazes de operar um PPP (KASPER *et. al*).

Figura 3 – Principais tipos de operações de conversores CC-CC integrados em módulos PV



Fonte: KASPER *et. al.* Tradução: Próprio autor

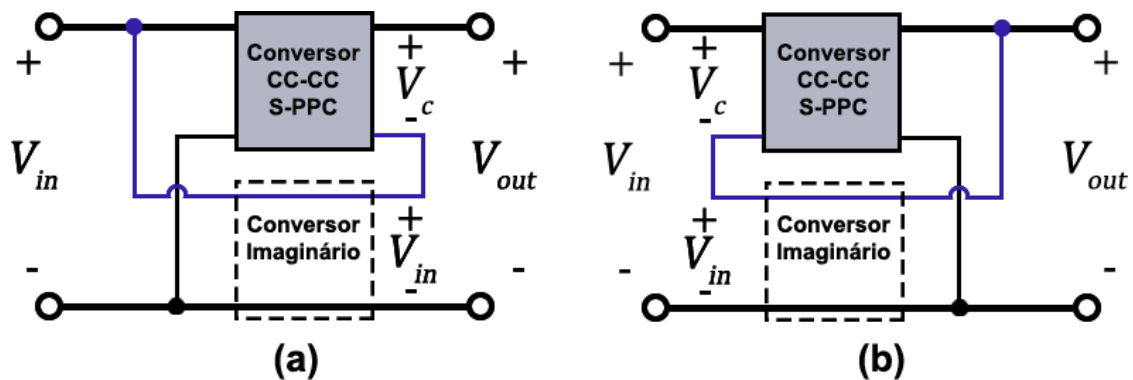
2.2.1 Análise matemática do Processamento Parcial

Para que seja possível avaliar a quantidade de energia processada de um conversor CC-CC comutado, é preciso que fique claro a noção de potência não-ativa e como isso está relacionado com mecanismos de perda de potência.

A potência ativa (P) é a potência média entregue à carga e a potência não-ativa (N) é uma medida da circulação de energia calculada diretamente a partir da energia armazenada nos componentes reativos (indutores e capacitores) de um conversor de potência. Em outras palavras, a potência N está relacionada à ondulação de corrente (*ripple*) nos indutores e a ondulação de tensão nos capacitores, bem como nos terminais de entrada do conversor. Em sistemas monofásicos com tensão e corrente de formas de onda senoidais, N é igual a Q (potência reativa). Logo, nesses casos, a potência N não possui nenhum outro componente. Em sistemas trifásicos, isso é verdadeiro apenas para sistemas senoidais simétricos com uma carga puramente resistiva balanceada (não tendo a presença de harmônicos).

O uso do S-PPC, adiciona um caminho extra para o fluxo de potência P da entrada para a saída, onde o S-PPC é diagramado em 2 conversores: um real e um fictício, mostrado na Figura 4, onde as entradas são conectadas em paralelo e as saídas são conectadas em série.

Figura 4 – Representações do S-PPC com método de ligação Tipo I (a) e Tipo II (b)



Fonte: Próprio autor

É interessante destacar que, devido à configuração série, o uso de S-PPC em qualquer topologia originalmente isolada, resulta na perda do isolamento galvânico. Apesar disso, é necessário que a topologia adotada possua isolamento, para evitar possíveis curtos circuitos (ZHAO; Yeates, 2013). Se a topologia representa um verdadeiro PPP, esta tem que processar uma menor quantidade de potências P e N nos seus elementos, se comparada com qualquer topologia não isolada convencional operando sob as mesmas condições de entrada e saída (ZIENTARSKI; MARTINS, 2019). Por exemplo, um Full-Bridge Push/Pull (FBPS) S-PPC não deve ser comparado com um FBPS de processamento completo, já que este possui isolamento. As referências principais deste trabalho, utilizaram para comparação com o S-PPC, um boost tradicional, que é uma topologia originalmente não-isolada.

2.2.2 Parâmetros do S-PPC

Antes de apresentar-se o equacionamento da potência N, destaca-se que as análises realizadas são referentes ao modo de conexão Tipo-I, mostrado na Figura 4(a), pois comparando os dois tipos de ligação, o Tipo-I apresenta melhor performance em termos de eficiência e stress nos seus componentes (ZHAO, *et al*), portanto, esse é o modelo de ligação adotado neste trabalho.

- **Potência ativa na saída do S-PPC ($P_{c_{out}}$):** É a média da potência instantânea nos terminais de saída durante um período. Desprezando as ondulações de corrente e tensão, para os conversores na configuração série como na Figura 2 tem-se:

$$P_{c_{out}} = V_c I_{out} \quad [1]$$

Em que:

$$V_c = V_{out} - V_{in} \quad [2]$$

- **Potência ativa de todo o sistema CC-CC (P_{out}):**

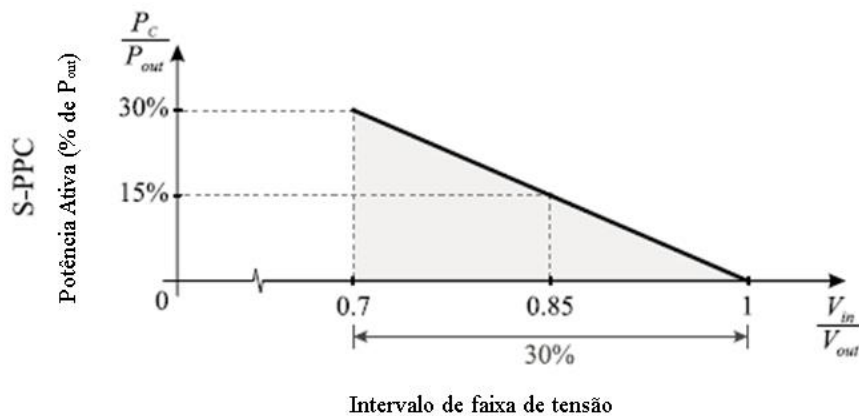
$$P_{out} = V_{out} I_{out} \quad [3]$$

Com as Equações 1 e 3, pode-se calcular a relação entre a potência de saída do conversor e do sistema:

$$\frac{P_{c_{out}}}{P_{out}} = \frac{V_c I_{out}}{V_{out} I_{out}} = \frac{V_{out} - V_{in}}{V_{out}} = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}} \quad [4]$$

Isso mostra que $P_{c_{out}}$ é proporcional à diferença entre as tensões de entrada e de saída. Por exemplo: para um conversor no qual a tensão de entrada varia entre 70% a 100% da tensão de saída, mantendo esta tensão de saída e potência constante, note que $P_{c_{out}}$ é apenas 30% de P_{out} quando $(V_{in}/V_{out}) = 0.7$ e igual a zero quando $V_{in} = V_{out}$, como demonstrado na Figura 5.

Figura 5 – Potência ativa num S-PPC plotada contra variação de tensão de entrada



Fonte: ZIENTARSKI; PINHEIRO, 2019

- **Eficiência do S-PPC**

$$\eta_{regulador} = \frac{P_{c_{out}}}{P_{c_{in}}} \quad [5]$$

- **Eficiência Global:** Uma vez que a potência ativa no S-PPC ($P_{C_{out}}$) é menor do que a potência de saída do estágio CC-CC (P_{out}), e todas as perdas ($P_{in} - P_{out}$) são concentradas no S-PPC, a eficiência global é maior do que a eficiência do S-PPC, usando as Equações 1, 3 e 5, tem-se:

$$\eta_{global} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = 1 - \frac{P_{C_{out}}}{P_{out}}(1 - \eta_{reg}) \quad [6]$$

Alguns autores interpretam que apenas reduzir a relação $\frac{P_{C_{out}}}{P_{out}}$ é suficiente para melhorar η_{global} em relação a um conversor convencional. Porém, eles ignoram o fato de que η_{reg} é não constante e independente de P_{out} . A eficiência total não depende exclusivamente da potência ativa no circuito S-PPC, mas também das perdas associadas, que dependem tanto do processamento da potência ativa quanto da não-ativa.

Para que não seja repetido este mesmo equívoco de simplesmente reduzir a diferença entre V_{in} e V_{out} para que se tenha um menor $P_{C_{out}}$, acreditando que apenas isso irá melhorar o η_{global} , é necessário entender alguns conceitos, que serão trabalhados no tópico 2.1.2 à seguir:

2.2.3 Potência N, faixa de tensão e razão cíclica

- **Potência N**

Recapitulando, em cada estágio de operação, a configuração do circuito é modificada pela comutação do semicondutor, resultando em circulação de potência sem que esta potência seja necessariamente transferida da fonte para a carga. Em circuitos CC, onde a frequência fundamental é zero, este fluxo de potência é denominado potência não-ativa, de acordo com a definição da IEEE Standard 1459-2010. Potência N, pode ser entendida então, como o fluxo de potência que não resulta em potência ativa em qualquer frequência, sendo medido em volt-ampère reativo (var).

Visto que a potência P de um conversor não inclui toda a potência sendo processada, a proporção de potência N no circuito é um indicador importante para distinguir, entre várias topologias, qual processa mais potência do que as outras.

Em regime permanente, por meio do balanço volt-segundo (balanço de fluxo) nos indutores e balanço de carga nos capacitores, a energia média em indutores e capacitores podem ser calculadas pelas respectivas equações:

$$E_{Lp} = \int_0^{T_s} v_L(t)i_L(t)dt = 0 \quad [7]$$

$$E_{Cp} = \int_0^{T_s} v_C(t)i_C(t)dt = 0 \quad [8]$$

Sendo T_s , o período de comutação. Essas equações implicam que P , em elementos que armazenam energia (capacitores de indutores) é idealmente zero. No entanto, a potência N que flui através destes elementos causam perdas, e portanto, deve ser considerada. A quantidade de energia que é absorvida e liberada nestes elementos durante T_s corresponde à variação da energia armazenada nos indutores (ΔE_L) e capacitores (ΔE_C).

$$\Delta E_L = \int_0^{dT_s} |v_L(t)i_L(t)|dt = \int_{dT_s}^{T_s} |v_L(t)i_L(t)|dt \quad [9]$$

$$\Delta E_C = \int_0^{dT_s} |v_C(t)i_C(t)|dt = \int_{dT_s}^{T_s} |v_C(t)i_C(t)|dt \quad [10]$$

Sendo d , a razão cíclica. A potência N processada durante uma comutação é definida por:

$$N_L = \frac{2\Delta E_L}{T_s} \quad [11]$$

$$N_C = \frac{2\Delta E_C}{T_s} \quad [12]$$

E a potência N total processada internamente no conversor, para n_L indutores e n_C capacitores é:

$$N_{\text{int}} = \sum_{j=1}^{n_L} N_{Lj} + \sum_{k=1}^{n_C} N_{Ck} \quad [13]$$

Considera-se também as potências N que circulam nos terminais de entrada e saída do conversor

$$N_{in} = \sqrt{S_{in}^2 - P_{in}^2} \quad [14]$$

$$N_{out} = \sqrt{S_{out}^2 - P_{out}^2} \quad [15]$$

Por fim, N_{Total} é a soma de todos os N anteriores:

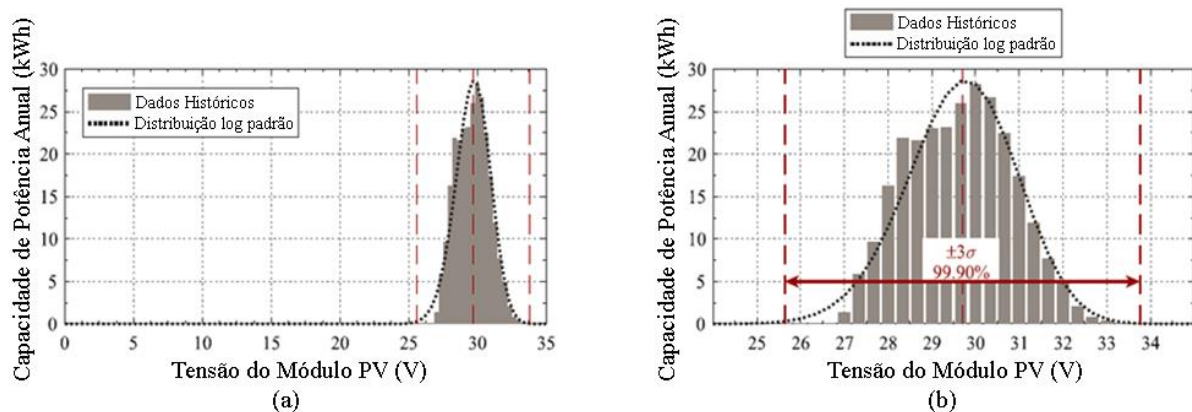
$$N_{Total} = N_{in} + N_{out} + N_{int} \quad [16]$$

- **Faixa de tensão (Δv)**

Ao dimensionar um projeto de processamento parcial, é necessário realizar um cálculo de um parâmetro denominado faixa de tensão do módulo PV. A potência entregue a esses módulos depende de condições climáticas como irradiação e temperatura, que possuem grande variações durante o dia e do ano e do local geográfico da instalação.

Sabendo de antemão os dados de irradiação solar e temperatura de uma dada localização, e os aplicando num modelo de uma célula PV operando no MPPT, é possível estimar a produção de energia e em qual nível de tensão ela ocorre. Por exemplo, é mostrado na Figura 6 um histograma com o perfil da tensão em relação à produção de energia num conjunto de dados coletados durante dez anos aplicado num módulo PV (modelo 235WSunEarth TPB 60-P), na localidade de São Martinho da Serra (Brasil), medida pelo projeto SONDA de 2005 até 2014 (DUPONT, RECH, Pinheiro, 2012).

Figura 6 – Histograma de produção anual estimada de energia e nível de tensão de módulo PV



Fonte: ZIENTARSKI; MARTINS, 2018. Tradução: Próprio autor

Os dados estatísticos são espalhados em uma função de distribuição de densidade logarítmica normal, vistos na Figura 6(b). Neste exemplo, a tensão de pico (v'), determinada pelo valor de tensão em que ocorre a maior geração de potência anual, é de 29,7 V. Observa-se que 99,90% da energia total é produzida dentro de uma faixa de tensão de seis desvios padrões ($\pm 3\sigma$), que nesse caso vai de 25,6 a 33,8 V (8,2 V), correspondendo esta faixa então, a $\pm 13,74\%$ de tensão de pico v' . Na definição da faixa de regulação de tensão do S-PPC (Δv), esta deve ser maior que 6σ para garantir uma boa captação de energia. Ou seja, maior do que $2 \cdot 13,74\% = 27,48\%$. No exemplo, foi adotado $\Delta v = 30\%$ de v' (ou $\pm 15\%$) (ZIENTARSKI; MARTINS, 2018).

Apesar do fato de que módulos PV muitas vezes operam em baixos níveis de irradiância, correspondendo a baixos níveis de tensão no MPPT, o exemplo ilustrado na Figura 6 mostra que na verdade, uma pequena quantidade de energia é gerada nestes níveis. Mesmo considerando que o regulador S-PPC não será capaz de rastrear o ponto de máxima potência fora do intervalo Δv , a perda em produção de energia elétrica é pequena comparada com a redução das perdas do conversor que pode ser alcançada ao operar dentro da faixa de Δv . Tendo este dado medido, é possível entender melhor a Figura 5 mostrada anteriormente:

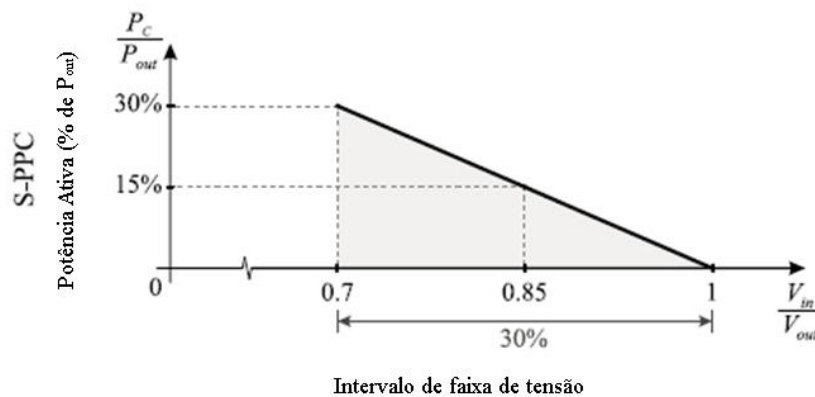


Figura 5, repetida para facilitar a visualização

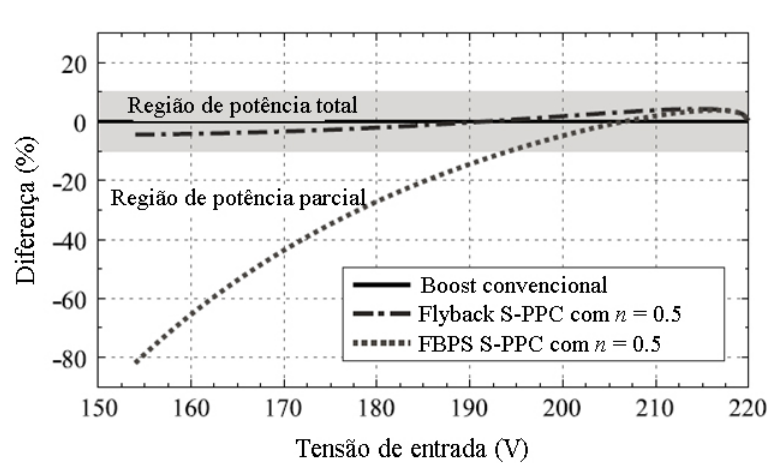
Nela, visualizou-se o comportamento da potência de saída de um conversor genérico aplicando S-PPC em relação à potência de saída total quando a tensão de entrada varia. Neste caso, a tensão de entrada do conversor excursiona entre 70% a 100% da tensão de saída. Tal intervalo no S-PPC é definido pela faixa $\Delta v = 30\%$, que irá delimitar que na grande maioria dos casos, o conversor operará nesta faixa.

Ao manter esta tensão de saída e potência constante, nota-se que P_{Cout} mantém uma relação inversa com a variação de V_{in} , sendo apenas 30% de P_{out} quando $(V_{\text{in}}/V_{\text{out}}) = 0,7$ e igual a zero quando $V_{\text{in}}=V_{\text{out}}$.

Para um valor de V_{out} de 220 V, o ponto onde $V_{\text{in}} = 0,7V_{\text{out}}$ (154 V) é chamado de ponto de máxima tensão, onde a eficiência do S-PPC é maior, a eficiência global é maior, é também o ponto de maior diferença entre a geração de potência N desta e das outras topologias.

Uma das utilidades deste cálculo da faixa de tensão, é saber se para dada determinada faixa, vale à pena ou não aplicar o PPP. Se em um lugar hipotético, fosse gerado um histograma com um intervalo Δv de aproximadamente 10%, isso faria com que V_{in} variasse entre 198 V e 220 V (V_{out}), e neste exemplo, a aplicação de PPP não seria viável, pois ela não ofereceria vantagens na redução de potência N. Isso pode ser melhor visualizado na Figura 7, que compara a geração de potência N gerada entre o conversor FBPS S-PPC e outras topologias não-isoladas, sobre as mesmas condições de operação:

Figura 7 – Porcentagem da diferença de potência N processada pelo S-PPC em relação ao conversor de referência



Fonte: ZIENTARSKI; PINHEIRO, 2019. Tradução: Próprio autor

Como é possível notar, para uma relação de espiras de $n=0,5$ para as topologias boost, flyback e FBPS, há uma faixa de $\pm 10\%$ ao redor da geração de potência N do Boost. Esta faixa representa a região onde a potência N gerada é considerada similar à do boost (ZIENTARSKI; MARTINS, 2019). Observa-se que para tensões entre 154 e 194V (a faixa de operação citada anteriormente), a potência N processada pelo FBPS S-PPC é consideravelmente menor do que a do boost convencional, e isso gera uma melhora na performance em comparação a um

conversor completo. Portanto, pode-se dizer que, nessa faixa de tensão, o conversor realiza o PPP. Pode-se ver também que para tensões acima de aproximadamente 205 V, este S-PPC passa a gerar ainda mais potência N do que um conversor completo, o que inviabiliza todo o projeto. Por este motivo, analisar as condições climáticas e calcular um Δv é importante para saber se um PPP é aplicável.

- **Razão cíclica**

Nesta topologia, não apenas a potência ativa, mas também a não-ativa, podem ser reduzidas com a escolha apropriada do valor da relação de espiras do transformador (n). Valores menores de n possibilitam então, uma redução significativa da potência N no FBPS S-PPC. No entanto, mesmo significando que quanto menor o valor de n , melhor é o processamento de potência do conversor, o seu valor mínimo é limitado pela razão cíclica máxima (d_{\max}). Sendo o ganho estático do conversor Full-Bridge calculado como $V_C/V_{in} = nd$, onde d é a razão cíclica que varia de 0 a 100% (o que corresponde ao intervalo de 0 a 180° no desvio de fase (Φ) entre os ramos do Full-Bridge), então um valor mínimo de n pode ser obtido pela seguinte equação:

$$n_{\min} = \frac{V_{C\max}}{V_{in\min} d_{\max}} = \frac{V_{out} - V_{in\min}}{V_{in\min} d_{\max}} \quad [17]$$

Considerando $d_{\max}=1$, para o valor de $V_{in\min}=154$ V, tem-se um $n = 0,428$, logo $n = 0,5$ é uma boa aproximação, tendo um valor máximo de d de 85,7%, que no desvio de fase do conversor, equivale a aproximadamente 154°. Os 14,3% restantes servem como uma margem de ação de controle para compensar perdas não calculadas e tempo morto (ZIENTARSKI, 2017). Obtido o valor de $n=0,5$, aplica-se a Equação 18, que é uma versão geral da Equação 17, para obter a razão cíclica de cada valor de tensão de entrada (ZIENTARSKI; MARTINS, 2019).

$$d = \frac{V_C}{V_{in} n} = \frac{V_{out} - V_{in}}{V_{in} n} \quad [18]$$

O valor de d será sempre um número entre 0 e 1, que é então, multiplicado por 180°, para que o valor do desvio de fase do FBPS seja definido.

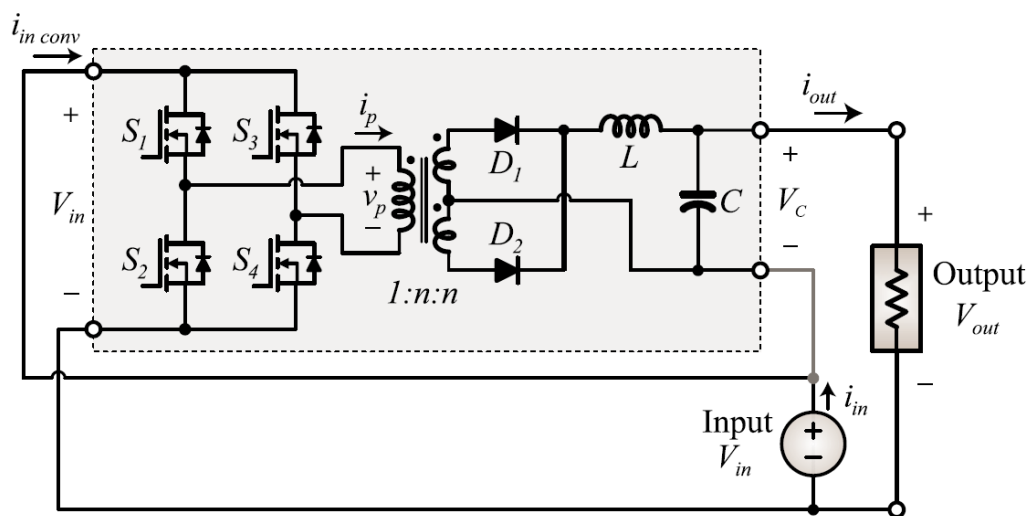
2.3 Conversor Full-Bridge Phase Shift (FBPS) e sua operação em S-PPC

Das tentativas estudadas em projetos anteriores que obtiveram mais sucesso em operar um S-PPC, as que apresentaram resultados positivos utilizavam um conversor FBPS (*Full Bridge Phase-Shift*). Este tópico mostra o funcionamento básico deste conversor, e como ele irá servir de base para a proposta deste projeto.

Os conversores FBPS são utilizados frequentemente como conversores abaixadores e/ou para prover isolamento em médias até altas potências, como fontes de alimentação, retificadores, de telecomunicação, sistemas de carregamento de bateria e sistemas de energia renováveis (TEXAS INSTRUMENTS, 2014).

Sua construção consiste em 4 chaves eletrônicas (MOSFETs ou IGBTs) que formam uma ponte completa no primário do transformador e diodos ou MOSFETs para retificação síncrona no secundário. Quando é utilizado o MOSFET para retificação síncrona, melhora-se a eficiência desta topologia (TEXAS INSTRUMENTS, 2014). Na Figura 8 é mostrado o esquema do FBPS destacado em cinza e já com as conexões que representam o processamento parcial.

Figura 8 – Esquemático de um FBPS aplicado num S-PPC



S1 e S2 tem a mesma duração de chaveamento, mas com defasamento de 180° entre si. Da mesma forma se encontram S3 e S4. Ajustando o desvio de fase entre S1 e S3, pode-se alterar o valor de V_{out} na saída do conversor.

2.4 Comentários finais do capítulo

Neste capítulo, foram abordados os principais conceitos matemáticos sobre a potência N envolvidos neste projeto, mostrando a metodologia utilizada pelas referências para calcular os parâmetros com base nos dados climatológicos, e como estes fatores influenciam no dimensionamento de um sistema de processamento parcial.

3 TOPOLOGIAS PROPOSTAS

3.1 Introdução

Neste capítulo, são abordadas as simulações na Plataforma PSIM que foram utilizadas na parte prática do trabalho. Inicialmente, foi replicado o projeto original do FBPS S-PPC para que fosse possível observar o comportamento das potências P e N e dos rendimentos na faixa de tensão estipulada. Os valores medidos no PSIM foram então salvos e compilados no Matlab para a exibição gráfica dos resultados. Repetindo este padrão, foram feitas as proposta de modificações do FBPS S-PPC, procurando uma forma de diminuir a geração de potência N dos sistema, sem que isso prejudicasse a geração de potência P. Ao todo, três modificações foram elaboradas:

- FBPS S-PPC/Ligação Direta
- FBPS S-PPC/Boost Integrado
- FBPS S-PPC/Boost Integrado V2

3.2 Projeto Inicial

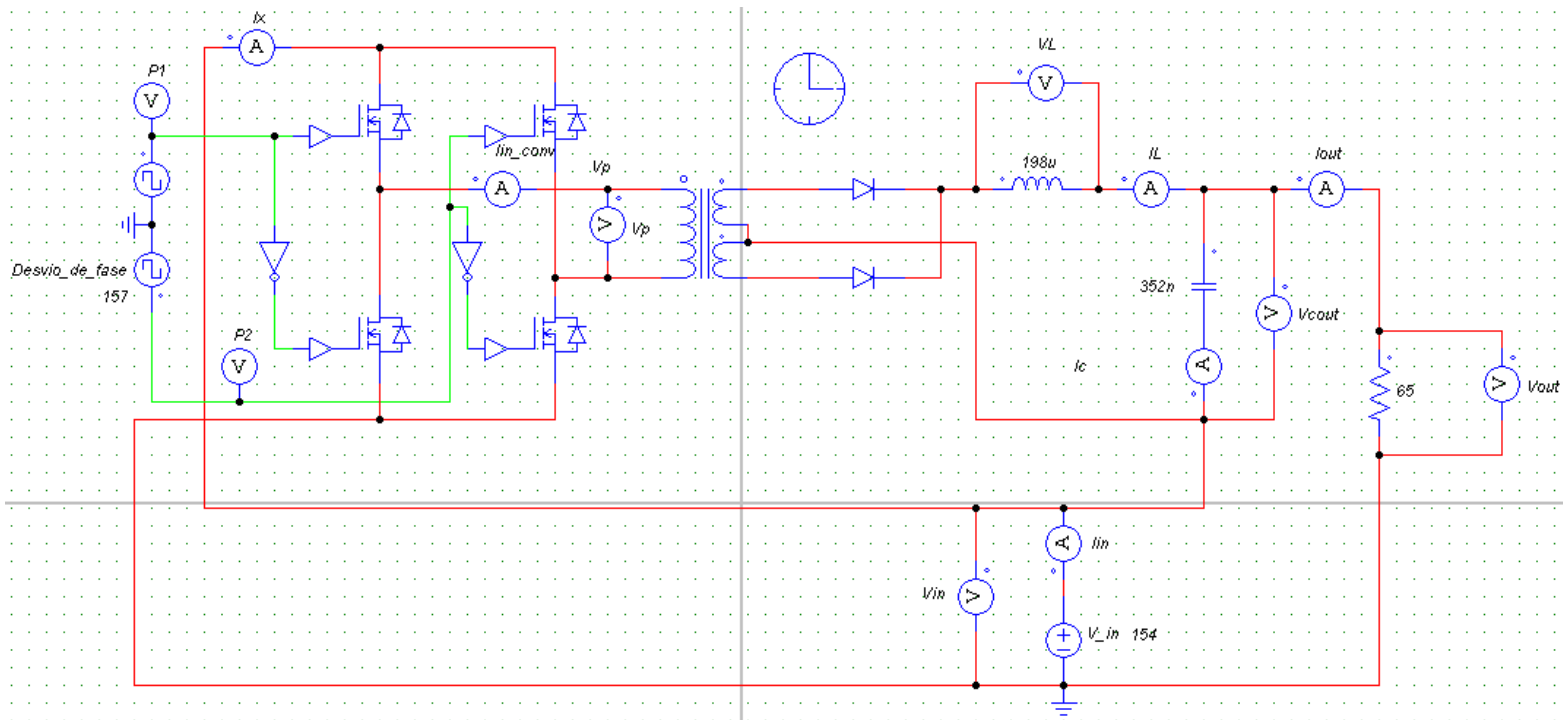
Primeiramente o circuito FBPS S-PPC original foi recriado para que seus resultados fossem comparados com a referência e, dessa forma, validar o funcionamento da simulação. Os parâmetros utilizados e o circuito simulado podem ser vistos na Tabela 1 e na Figura 9:

Tabela 1 – Parâmetros e resultados aproximados das simulações

Parâmetro	FBPS S-PPC
Tensão de entrada (V_{in})	de 154 a 220 V
Tensão de saída (V_{out})	220 V
Tensão máxima de saída do conversor (V_{Cout})	67 V
Potência de saída total (P_{out})	750 W
Frequência de chaveamento (f_s)	35 kHz
Valor do Indutor (L)	198 μ H
Valor do Capacitor (C)	352 nF
Frequência vista pelos elementos de filtro	70 kHz

Fonte: Próprio autor

Figura 9 – Circuito do FBPS S-PPC feito no PSIM



Fonte: Próprio autor

Neste circuito, é possível notar que a tensão de entrada está definida como 154 V (o início do intervalo do S-PPC, para o caso estudado), e para esta tensão, no primeiro estágio, tem-se os geradores de pulso que são utilizados para criar o desvio de fase entre os mosfets, com o valor correspondente de 157° , de forma a manter o valor da tensão de saída $V_{out} = 220$ V. É necessário ressaltar que o valor do desvio real calculado nesse caso é de $154,29^\circ$, não 157° , mas sabe-se que para este caso, o desvio de fase sofre ajustes já esperados, para ação de controle e compensar as perdas não modeladas (ZIENTARSKI, 2017). Na Tabela 2, é mostrado a diferença entre os valores de desvio calculados e os valores ajustados.

Tabela 2 – Valores de desvio de fase obtidos no trabalho para o FBPS S-PPC

		Valores de tensão (V)	154	160	170	180	190	200	210	220
Desvio de fase (graus)	Calculado		154.29	135	105.88	80	56.84	36	17.14	0
	Ajustado		157	136	106	80	56.84	36.5	18.75	0

Fonte: Próprio autor

Pode-se notar que para alguns valores de tensão de entrada, alguns desvios sofreram ajustes maiores do que outros, enquanto alguns não sofreram ajuste nenhum. Com isso, foi possível

controlar o circuito e realizar as medições necessárias para todos os cálculos posteriores ao projeto.

Para que seja possível calcular a potência N no circuito de maneira mais simples, é necessário obter os valores da variação de energia não-ativa presente nas equações 9 e 10. Entretanto, tais equações podem ser simplificadas nas seguintes equações de forma a facilitar os cálculos (ZIENTARSKI; MARTINS, 2019):

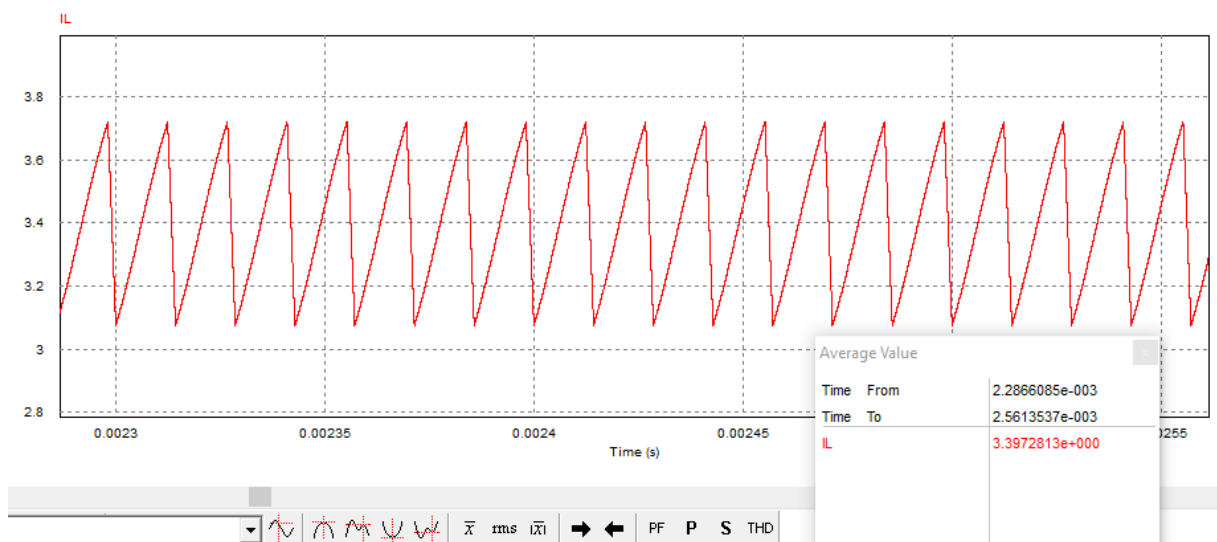
$$\Delta E_L = \overline{L} \overline{i_L} \Delta i_L \quad [19]$$

$$\Delta E_C = C \overline{v_C} \Delta v_C \quad [20]$$

Sendo $\overline{i_L}$ e $\overline{v_C}$ os valores médios de corrente e tensão no indutor e capacitor respectivamente. No exemplo Figura 10, apresenta-se o valor médio da corrente no indutor, que ficou em torno de 3,39 A.

Já Δi_L e Δv_C representam seus correspondentes valores de *ripple*, que são obtidos ao calcular a diferença entre os valores de pico máximo e de mínimo. Neste caso, tem-se um ripple de corrente no indutor de aproximadamente 0,55 A.

Figura 10 – Corrente medida no indutor

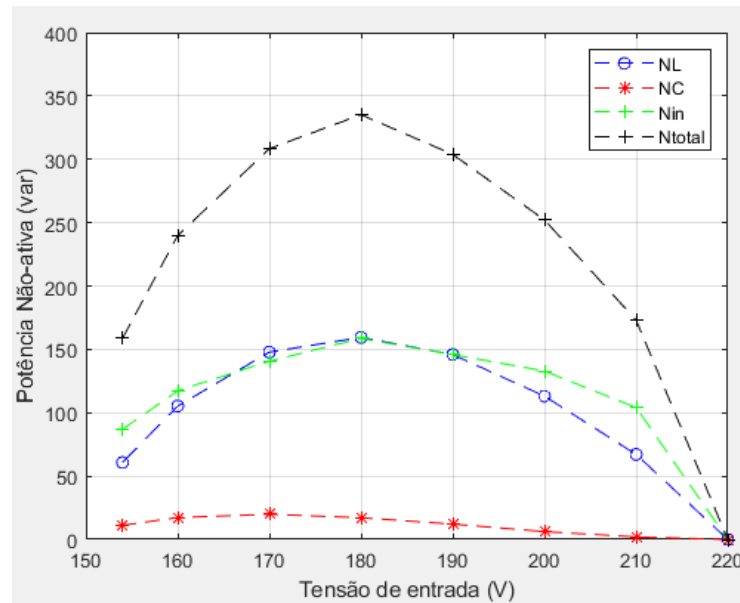


Fonte: Próprio autor

Com o *ripple* medido para cada um dos valores de tensão de entrada já apresentados, foi possível calcular a potência N no indutor e no capacitor utilizando as Equações 11 e 12.

Todos os códigos com os valores medidos no PSIM e compilados no Matlab podem ser encontrados no apêndice 1 no final do trabalho. Com as medições necessárias feitas, também realizou-se o cálculo da potência N interna do conversor, dada pela Equação 14, cujo resultado pode ser visto na Figura 11.

Figura 11 – Representação da potência N do FPBS S-PPC para diferentes valores de tensão

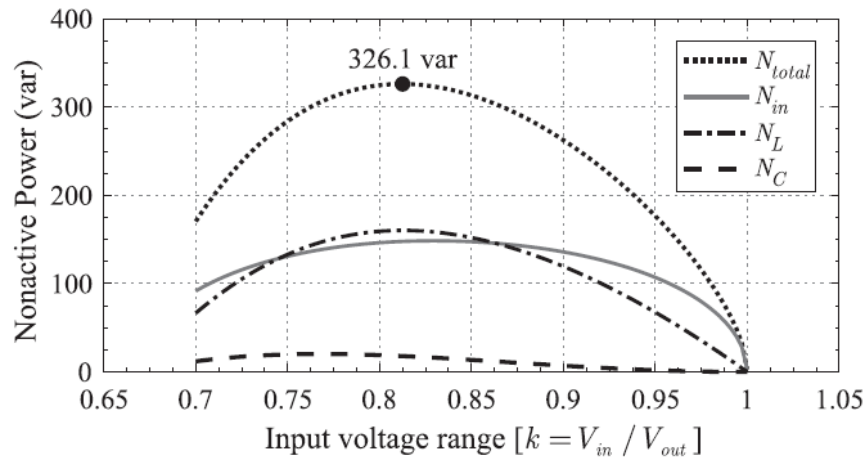


Fonte: Próprio autor

Como foi demonstrado na Figura 7, o ponto de 154 V é o ponto em que há a maior diferença de potência N entre os conversores FBPS, flyback e boost, mas, como ilustrado na Figura 11, isso não significa que este é necessariamente o ponto do FBPS que processa a menor quantidade de potência N. No entanto, como mostrado na Figura 7 a partir de 194 V, o FBPS entra num campo em que a potência N é semelhante a de um boost numa margem de $\pm 10\%$, logo, os pontos em que a potência N assume valores menores que em 154 V já estão na faixa que não é mais vantajoso aplicar o PPP em relação a um boost.

Para efeitos de comparação, na Figura 12, mostra-se o mesmo gráfico de potência N nos trabalhos de referência. Comparando com os resultados obtidos pela simulação na Figura 11, nota-se que os valores estão muito aproximados, o que valida o circuito montado no PSIM.

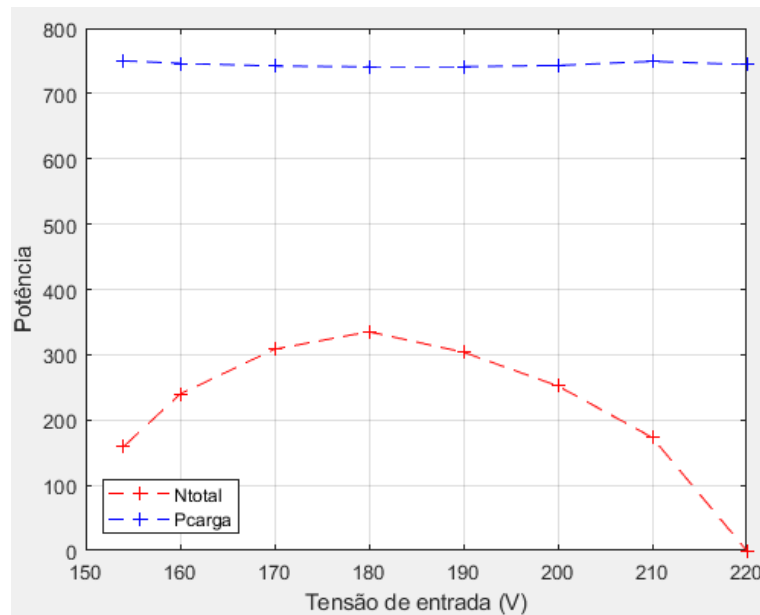
Figura 12 – Representação da potência N do FPBS S-PPC da referência



Fonte: ZIENTARSKI; MARTINS, 2018

Na Figura 13, é mostrado a relação entre as potências ativas e não-ativas totais deste circuito:

Figura 13 – Comparação entre potência ativa e não-ativa na saída do conversor

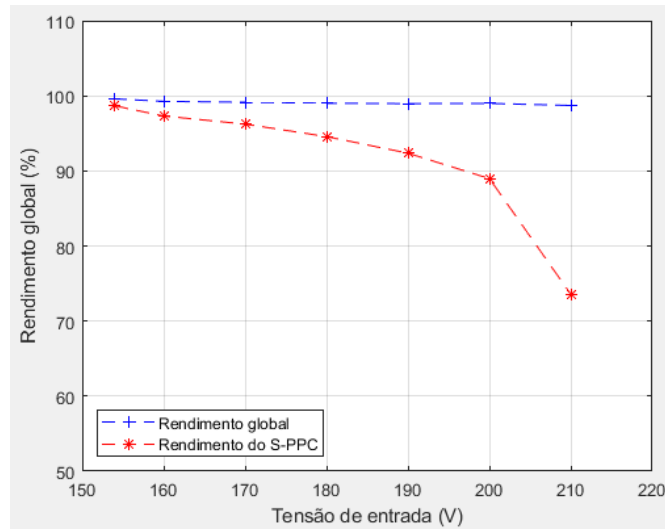


Fonte: Próprio autor

Percebe-se que a potência ativa na saída do conversor mante-se praticamente constante durante a faixa de tensão analisada. Nota-se também que o ponto de menor P, coincide com o ponto de maior N, em 180V.

Com os dados de potência medidos, e utilizando as Equações 5 e 6, é possível plotar o rendimento do FBPS S-PPC:

Figura 14 – Rendimento do regulador e rendimento global



Fonte: Próprio autor

Ao analisar a Figura 14, é possível confirmar as afirmações feitas a respeito dos rendimentos global e do S-PPC, feitos na sessão 2.2.2 deste trabalho. Para lembrar o que foi tratado anteriormente, trabalhos passados, que não levaram alguns fatores importantes em conta, como a própria potência N , afirmavam que diminuir a relação entre $\frac{P_{C_{out}}}{P_{out}}$ seria suficiente para melhorar η_{global} em relação a um conversor convencional. Mostrando novamente as Equações 5 e 6 para melhor visualização:

$$\eta_{regulador} = \frac{P_{C_{out}}}{P_{C_{in}}} \quad [5]$$

$$\eta_{global} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = 1 - \frac{P_{C_{out}}}{P_{out}} (1 - \eta_{reg}) \quad [6]$$

Como é possível ver claramente na Figura 14, conforme $P_{C_{out}}$ segue diminuindo ao aumentar a tensão de entrada, a eficiência do regulador segue em queda, e isso não melhora a eficiência global do circuito, pelo contrário, ele sofre uma ligeira queda.

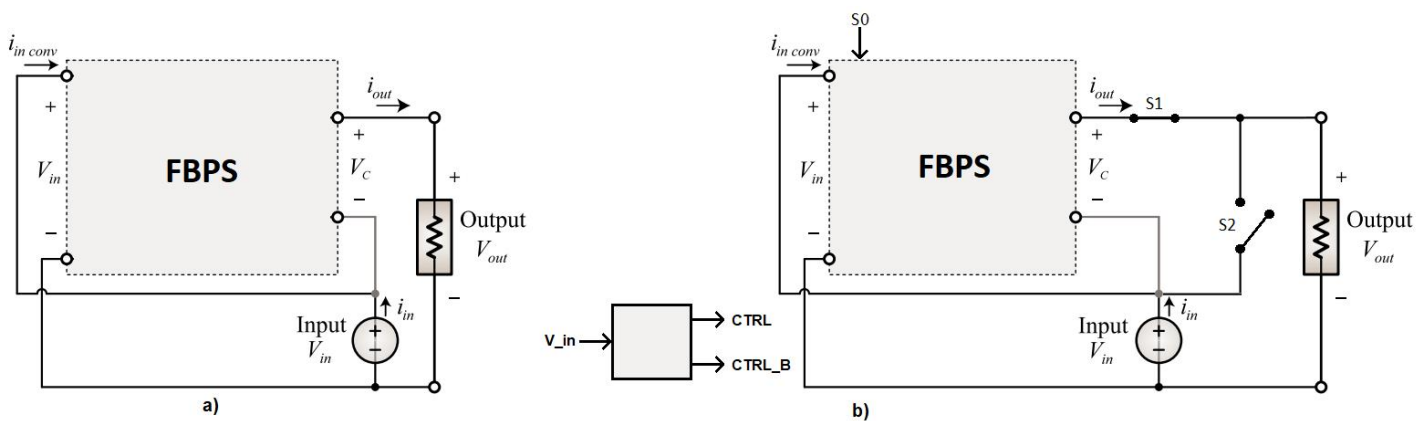
3.3 Proposta de modificação

No âmbito de propor uma modificação do projeto existente na literatura, foi pensado em algo que poderia ser feito para melhorar a atuação do FBPS S-PPC no momento em que ele atinge a faixa entre 194~220 V, que corresponde ao intervalo de tensão dos trabalhos de referência, onde o circuito não realiza mais o PPP, ou em outras palavras, não é melhor em nada do que um Boost regular, como é demonstrado na Figura 7. Neste trabalho, três abordagens que foram idealizadas, executadas e avaliadas serão mostradas a seguir.

3.3.1 Proposta 1: alimentação direta

Nesta primeira ideia, foi projetado uma alteração do circuito que, ao atingir o valor de 194 V de tensão de entrada, o conversor é desligado, sendo substituído por uma alimentação direta da fonte de alimentação para com a carga. Na Figura 15, tem-se o esquemático simplificado feito para facilitar a visualização da ideia:

Figura 15 – Comparativo do circuito original (a), com a alteração proposta de ligação direta (b)

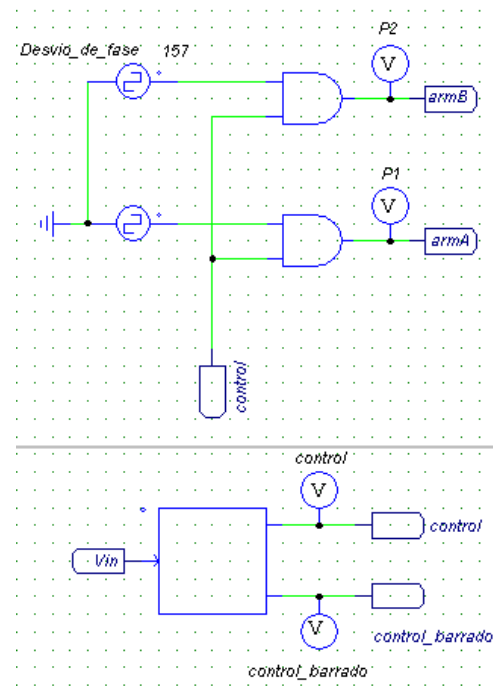


Fonte: ZIENTARSKI; PINHEIRO, 2019, modificado pelo autor

O esquema funciona de maneira simples, o sistema possui um bloco de controle com a tensão V_{in} como entrada e com duas saídas: “CTRL” e “CTRL_B”, ilustradas na Figura 15. De acordo com o código demonstrado no anexo 1, valores de entrada menores do que 194 V mantém “CTRL” com o valor igual a 1 e “CTRL_B” igual a 0. O sinal “S0” é que habilita o acionamento dos mosfets dentro do primeiro estágio do FBPS, e tanto ela quanto “S1”, permanecem em nível 1 “CTRL” for igual a 1. “S2” funciona da mesma maneira para o comando “CTRL_B”. No

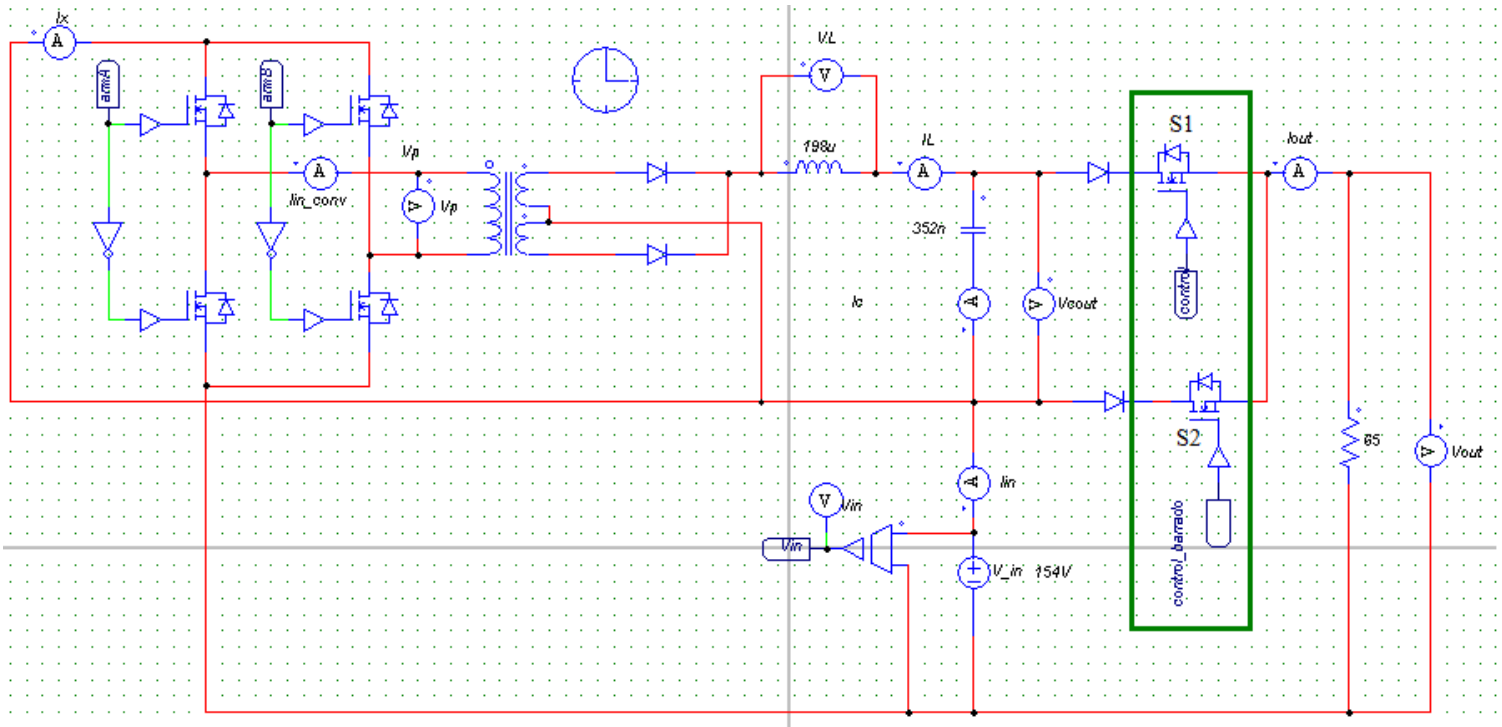
momento em que a entrada é igual ou maior que 194 V, os valores das saídas se invertem, e com este sistema, as chaves que controlam o acionamento o circuito são ligadas e/ou desligadas. No circuito simulado, S2 são mosfets. O esquemático do circuito de controle pode ser visualizado na Figura 16, e o FBPS S-PPC: Ligação Direta na Figura 17, destacado em verde, a parte modificada que realiza o chaveamento.

Figura 16 – Circuito de Controle do FBPS S-PPC: Ligação Direta



Fonte: Próprio autor

Figura 17 – Primeira alteração proposta do FBPS S-PPC: ligação direta

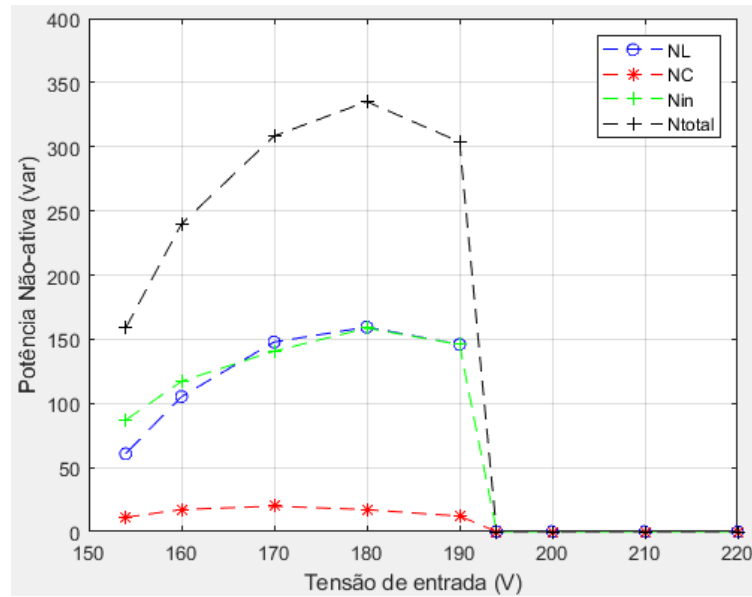


Fonte: Próprio autor

O sinal “CTRL” aciona as chaves “armA” e “armB” e habilita os pulsos de comando da ponte completa do primeiro estágio, de forma de que, no momento em que o sinal muda de 1 para 0, tanto a entrada quanto a saída do FBPS são desativadas, dando lugar à ligação direta, pois agora, “CTRL_B” é igual a 1. É interessante destacar o uso de 2 diodos antes de cada chave Mosfet na saída do FBPS. Tais componentes têm a função de impedir quaisquer correntes de retorno que podem vir a aparecer devido ao diodo interno contidos nos Mosfets.

Após estas alterações, a potência N do circuito foi totalmente anulada, como pode ser visto na Figura 18, pois com o conversor desligado, não há mais indutores e capacitores no processo gerando correntes e tensões de *ripple*.

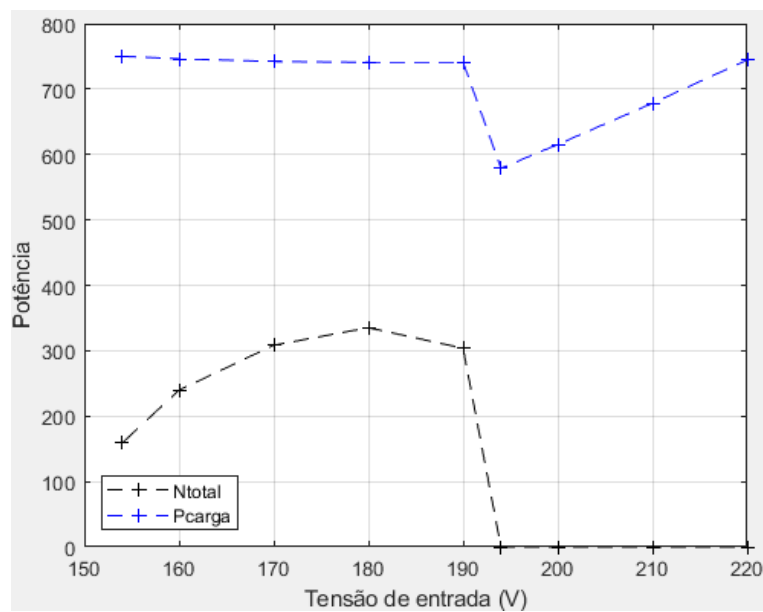
Figura 18 – Representação da potência N do FPBS S-PPC na alteração proposta nº1



Fonte: Próprio autor

Como já era óbvio de se imaginar, ao desligar o conversor, não há mais nenhum componente que pode gerar alguma potência N, isto poderia significar um ganho considerável na eficiência do circuito. Entretanto, ao olhar o gráfico da potência ativa na Figura 19, pode-se notar o contrário:

Figura 19 – Comparação entre potência ativa e não-ativa na alteração proposta nº1



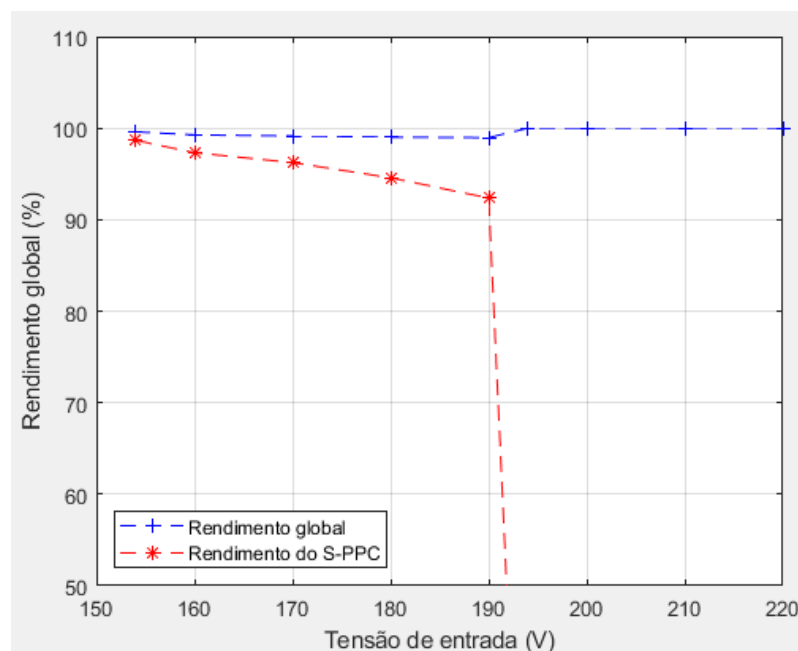
Fonte: Próprio autor

Ao zerar-se a potência N desligando o conversor, a geração de potência ativa na carga sofre uma queda considerável, aumentando seu valor gradualmente conforme a V_{in} aumenta, e só no ponto onde $V_{in} = V_{out}$ (220 V), que ela assume um valor semelhante ao caso original. Como já foi discutido neste trabalho, o intervalo de operação de V_{in} simula a situação de um painel solar que opera sob uma dada faixa de tensão (neste caso, 30%), delimitada pelo ambiente em que esta placa está instalada. Portanto, mesmo que para $V_{in} = 220$ V esta abordagem tenha atingido o valor de potência esperado, dificilmente este nível de potência será atingido com frequência. Ao olhar os gráficos da Figura 6, seria mais correto aplicar uma média ponderada baseando-se em quais pontos de tensão são mais frequentes, para então ver se este método é mais vantajoso ou não. Mas, mesmo se puder ser levado em consideração que todos os valores de tensão têm pesos iguais (o que não tem, esta é apenas uma simplificação do cálculo), e aplicando uma média simples, ainda assim é possível notar que a média da potência P gerada no intervalo de tensão desta proposta, é menor do que na abordagem original, com uma diferença de 5,43%.

$$P_{out_med1} = 744,7062 \text{ W}$$

$$P_{out_med2} = 704,2688 \text{ W}$$

Figura 20 – Comparação entre rendimento do S-PPC e o global na alteração proposta nº1



Fonte: Próprio autor

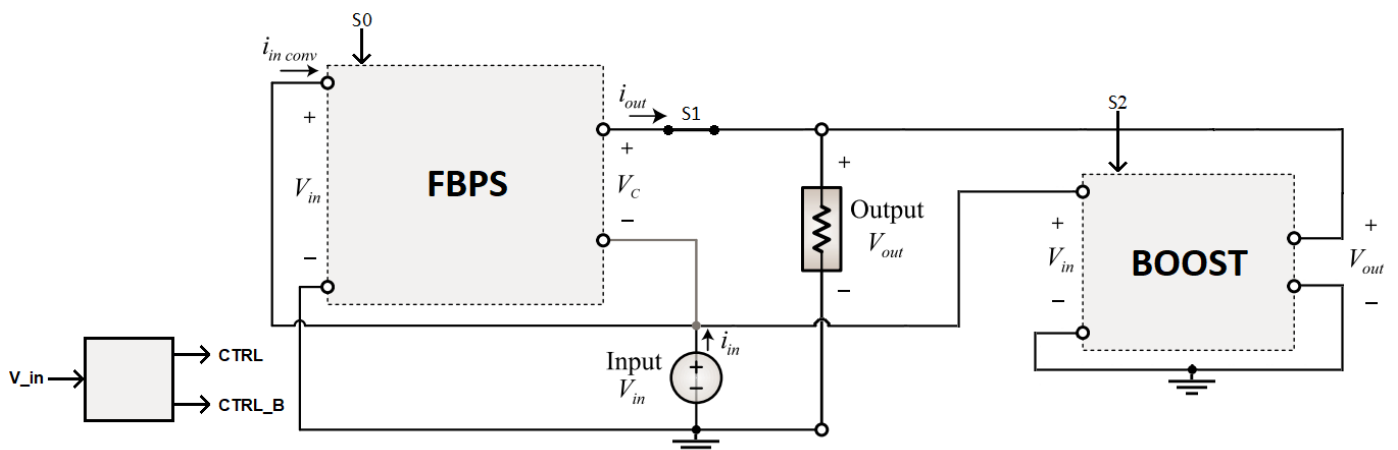
Na Figura 20, ao desligar-se completamente o S-PPC, o rendimento global se torna unitário. Mas nota-se que, ao contrário do que prega algumas literaturas que visam diminuir ao máximo $P_{c_{out}}$ para aumentar o rendimento, neste momento o conversor não está operando, logo, aquelas equações anteriores de rendimento não se aplicam. Como já fora provado na Figura 14, com o FBPS S-PPC ativo, com a diminuição de η_{reg} , o η_{global} sofre um pequeno decréscimo.

Dessa forma, conclui-se que, apesar de zerar a potência N no processo, a queda acentuada da potência P em um intervalo de tensão faz com que tal abordagem não seja vantajosa à primeira vista.

3.3.2 Proposta 2: circuito Boost integrado

Um dos requisitos necessários para se poder dizer que um circuito opera um PPP, é de que ele precisa processar menos potência N do que uma topologia não isolada operando em processamento total. Usualmente, um Boost é usado como referência. Pensando nisso, se no intervalo entre 194~220 V, o FBPS S-PPC se torna irrelevante em relação ao Boost, pode ser interessante aplicar uma combinação entre estas duas topologias, colocando o Boost para operar justamente nesta faixa em que o FBPS S-PPC é mais deficiente. Na Figura 21 é mostrado o esquemático simplificado:

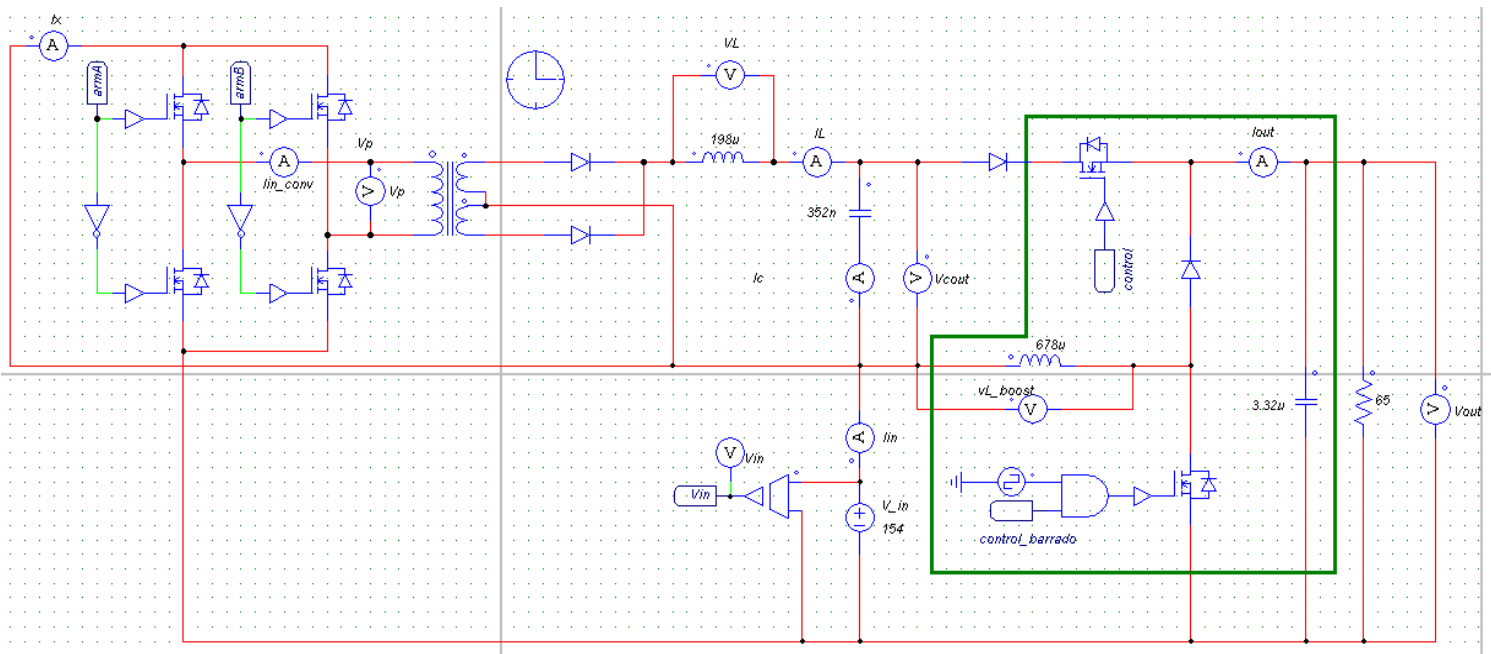
Figura 21 – Representação da alteração proposta nº2 – Boost Integrado



Fonte: ZIENTARSKI; PINHEIRO, 2019, modificado pelo autor

Com o chaveamento funcionando da mesma forma da proposta nº1 de ligação direta, com a diferença de que neste caso, a chave S2 controla agora o acionamento da chave do Boost. Assim como na proposta 1, no momento em que a tensão de entrada atinge um valor dentro do intervalo de 194~220 V, as chaves invertem seus estados, dando lugar para o Boost operar. Nesta abordagem, não há como esperar uma diminuição total da potência N como na proposta 1, pois o Boost apresenta elementos que a geram, mas espera-se que ela seja menor do que o circuito original, e também, que não haja quedas bruscas de potência ativa. O circuito simulado encontra-se na Figura 22, sem a parte de controle, que é idêntica à da Figura 16, e com destaque em verde para a parte modificada com a inserção do boost:

Figura 22 – Segunda alteração proposta: FBPS S-PPC/Boost Integrado



Fonte: Próprio autor

Da mesma forma como foi feito para o FBPS S-PPC, o Boost foi projetado para entregar valores aproximados de tensão e potência ativa na carga (220 V e 750 W aproximadamente). Os parâmetros de dimensionamento podem ser visualizados na Tabela 3:

Tabela 3 – Parâmetros e resultados aproximados das simulações

Parâmetros	FBPS S-PPC	Boost
Tensão de entrada (V_{in})	de 154 a 220 V	de 154 a 220 V
Tensão de saída (V_{out})	220 V	220 V
Tensão máxima de saída do conversor (V_{Cout})	67 V	220 V
Potência de saída total, p/ $V_{in} = 154$ V (P_{out})	750 W	750 W
Frequência de chaveamento (f_s)	35 kHz	70 kHz
Valor do Indutor (L)	198 μ H	678 μ H
Valor do Capacitor (C)	352 nF	3.32 μ F
Frequência vista pelos elementos de filtro	70 kHz	70 kHz

Fonte: Próprio autor

Assim como o FBSP S-PCC, o Boost também opera conforme sua razão cíclica, que muda de acordo com a tensão de entrada. Adaptando a fórmula que relaciona as tensões de saída e entrada com a razão cíclica do Boost, tem-se:

$$d = \frac{V_{out} - V_{in}}{V_{out}} \quad [21]$$

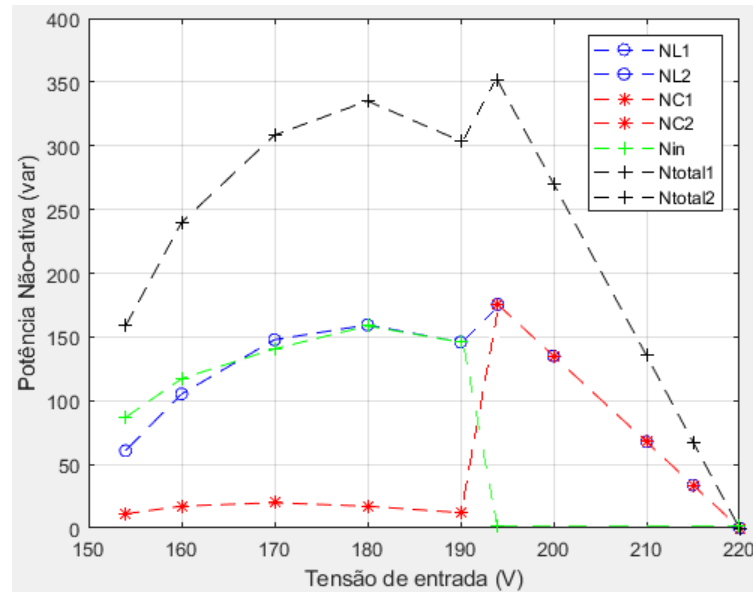
Tabela 4 – Valores da razão cíclica para o Boost

Valores de tensão (V)	154	160	170	190	194	200	210	220
Razão Cíclica (d)	-	-	-	-	0,1182	0,0909	0,0455	0

Fonte: Próprio autor

Os resultados da abordagem para as potências P e N podem ser visualizados a seguir:

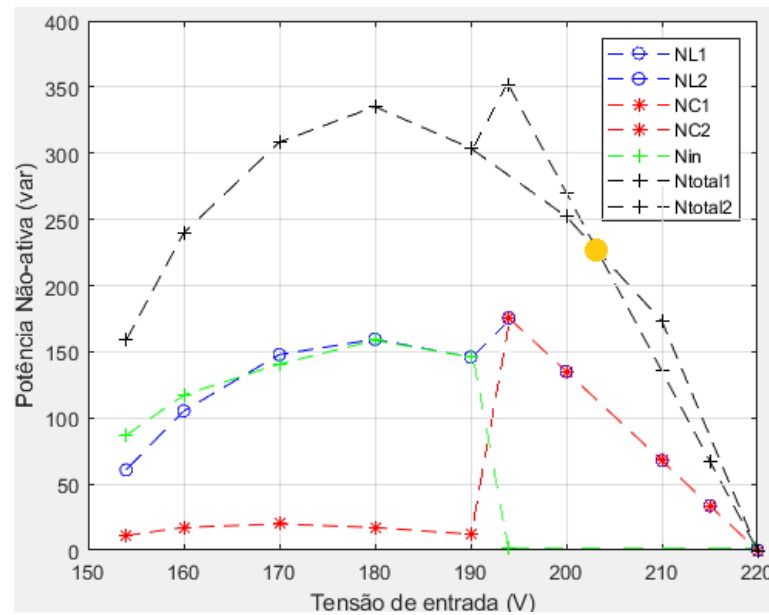
Figura 23 – Representação da potência N na alteração proposta: FBPS S-PPC/Boost Integrado



Fonte: Próprio autor

Na legenda da Figura 23, a marcação “1” nos indicadores de N representa o intervalo correspondente ao FBPS S-PPC, enquanto o “2” representa a faixa do Boost. É notável que enquanto a potência N do indutor sofreu um pequeno aumento em relação a sua “trajetória” original, a do capacitor apresentou um aumento considerável, fazendo com que o valor total fosse ainda maior do que o FBPS S-PPC original, mesmo com a potência N interna do FBPS (destacada em verde) tendo seu valor zerado. Reiterando o que foi comentado anteriormente, a partir de 194 V, não existe uma vantagem prática em se usar o FBPS ao se comparar com um Boost em questões de investimento, mas é aproximadamente em 205 V que ele se torna verdadeiramente inferior ao Boost, o que pode ser notado se os 2 gráficos forem sobrepostos:

Figura 24 – Comparação entre a potência N original e a proposta: FBPS S-PPC/Boost Integrado

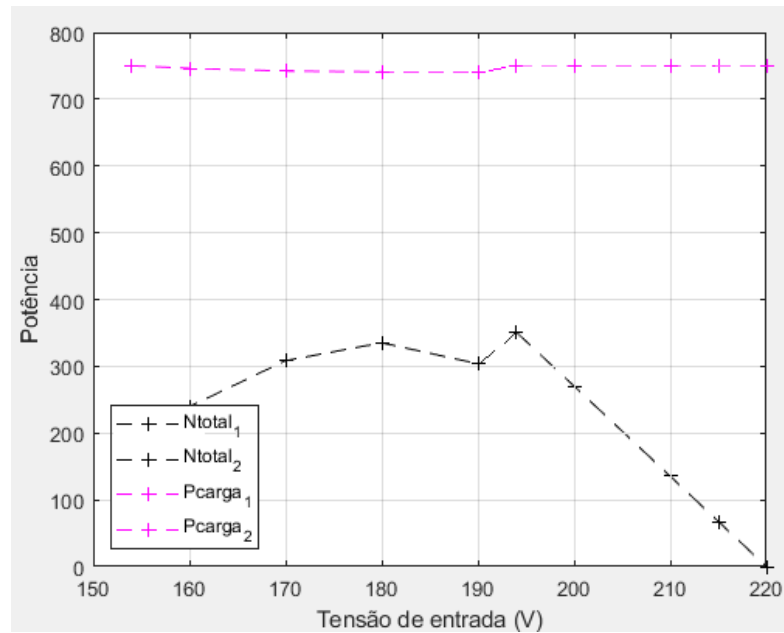


Fonte: Próprio autor

Para corrigir este circuito e fazê-lo tecnicamente viável, seria necessário limitarmos a faixa de ativação do Boost de 194~220 V para 205~220V. O problema é que, a diferença de potência N que deixaria de ser gerada neste intervalo não é significativa para justificar esta aplicação, e mesmo se fosse, ao analisar o histograma na Figura 6 que delimita o intervalo de operação, nota-se os painéis solares produzem pouca energia nas extremidades da faixa de tensão, ao comparar-se com as tensões mais intermediárias. Logo, ao propor uma alteração numa faixa de tensão tão próxima de 220 V, os resultados finais não justificariam o investimento.

Em seguida, é mostrado como se comportou a potência ativa:

Figura 25 – Comparação entre potência ativa e não-ativa na proposta: FBPS S-PPC/Boost Integrado



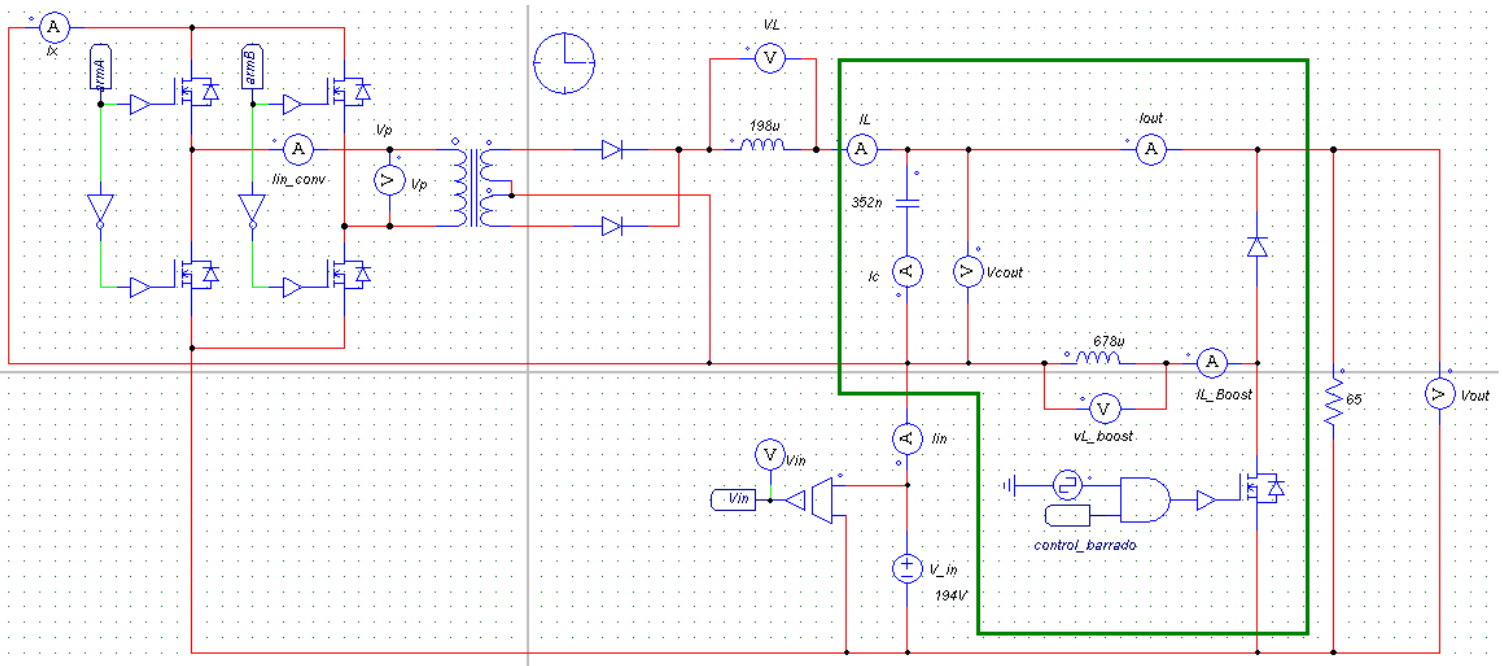
Fonte: Próprio autor

Neste caso, é notável que a potência ativa não apenas se manteve na faixa esperada, como ela ainda demonstrou um valor ligeiramente superior à abordagem original. Em contrapartida, foi verificado o aumento da potência N, como já foi discutido. Dados estes resultados aquém do esperado, pensou-se em algo que pudesse otimizar o processo, o que nos leva ao tópico a seguir.

3.3.3 Proposta 3: circuito Boost Integrado V2

Querendo melhorar a proposta anterior e fazê-la mais viável, foram realizadas algumas alterações no circuito FBPS S-PPC/Boost Integrado de forma a tentar mais uma vez, diminuir a potência N no momento em que o Boost é acionado. A Figura 26 segue o mesmo padrão das anteriores, sem o sistema de controle e destacado em verde a modificação:

Figura 26 – Terceira alteração proposta: FBPS S-PPC/Boost Integrado V2



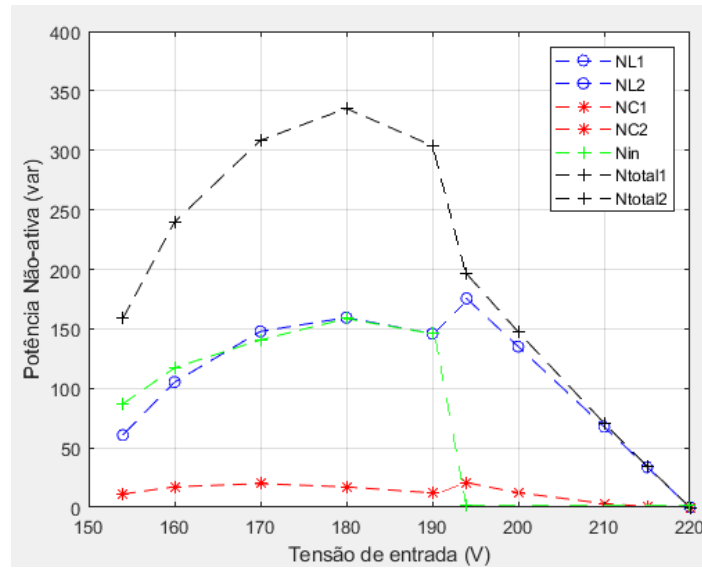
Fonte: Próprio autor

A diferença crucial entre este o circuito anterior é que este possui uma chave de acionamento a menos, de forma que o boost aproveita o mesmo capacitor de 352 nF previamente instalado na saída do FBPS, justificando a ausência do capacitor de 3,32 μF que havia na saída do boost. Como mostra a Equação 20, um dos fatores responsáveis pela potência N no capacitor é a tensão existente no mesmo.

$$\Delta E_C = C \overline{v_C} \Delta v_C \quad [20]$$

Na abordagem do Boost Integrado V1, o parâmetro $\overline{v_C}$ estava sempre no valor de 220 V, que é a tensão de saída do circuito, o que resultou no aumento brusco da potência N no capacitor, como pôde-se ver na Figura 23. Neste caso, V_{Cout} assume valores bem menores, o que influencia e muito no resultado da potência N , como nota-se na Figura 27:

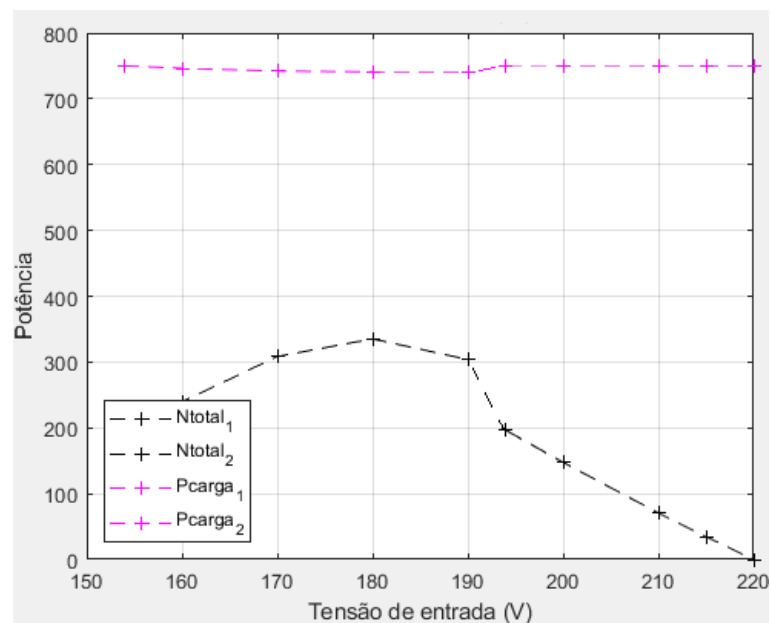
Figura 27 – Comparação entre a potência N original e a proposta: FBPS S-PPC/Boost Integrado V2



Fonte: Próprio autor

Desta vez, foi obtida uma queda considerável na geração de potência N total, visto que foi possível deixar a potência N do capacitor bem baixa, de forma semelhante a como ela operava no circuito FBPS S-PPC original. Aliando-se à anulação total da potência N interna do FBPS pois o mesmo não se encontra mais em operação, mesmo com o pequeno aumento da potência N no indutor, o resultado final apresentou uma melhora considerável em relação às tentativas anteriores.

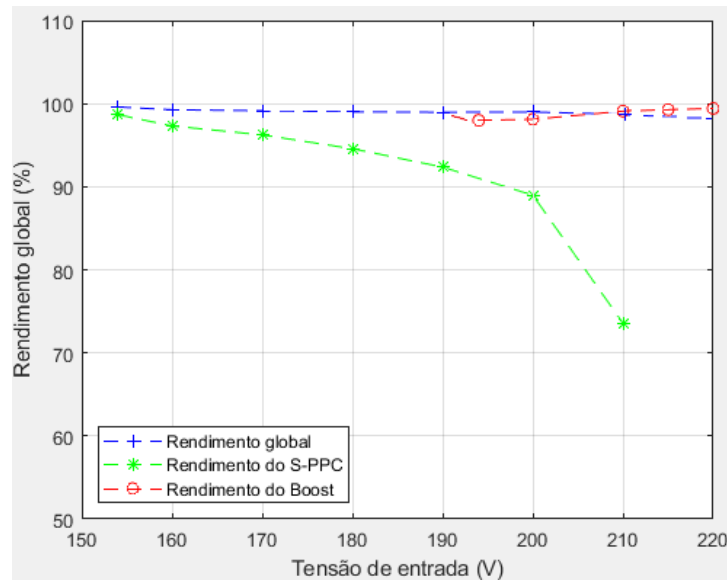
Figura 28 – Comparação entre potência ativa e não-ativa na proposta: FBPS S-PPC/Boost Integrado V2



Fonte: Próprio autor

Aqui é possível notar que a potência ativa permaneceu da mesma forma que a proposta FBPS S-PPC/Boost Integrado, mas com o decréscimo da potência N que era desejado. Pode-se considerar que esta alteração é superior ao primeiro FBPS S-PPC/Boost Integrado em todos os aspectos.

Figura 29 – Comparação de rendimentos entre o FPBS S-PPC original e o Boost Integrado V2



Fonte: Próprio autor

Ao sobrepor os gráficos de rendimento dos circuitos FPBS S-PPC original e o FPBS S-PPC /Boost Integrado V2, nota-se que aproximadamente no mesmo ponto já marcado como ponto em que o FPBS se torna totalmente inferior ao Boost no quesito de geração de potência N (205 V), também é o ponto em que seu rendimento se torna inferior ao mesmo.

3.3.4 Comparação geral de resultados

Para que seja feita a comparação entre o projeto de referência e as modificações, na Tabela 5 mostram-se os resultados de cada proposta trabalhada, comparando os picos e valores médios de geração de potência ativa e não-ativa para cada uma delas.

Tabela 5 – Comparação geral de resultados das propostas

Proposta	Potência ativa (W)		Potência não-ativa (var)	
	Média	Pico	Média	Pico
FBPS S-PPC Original	744,71	750,24	221,42	335,20
FBPS S-PPC/ Ligação direta	704,27	750,24	149,56	335,20
FBPS S-PPC/ Boost Integrado	746,60	750,24	217,03	351,08
FBPS S-PPC/ Boost Integrado V2	746,60	750,24	179,50	335,20

Fonte: Próprio autor

Como fica claro na Tabela 5, a proposta da ligação direta, enquanto apresenta a menor potência N média devido ao desligamento total do conversor, apresenta também uma queda brusca da potência ativa média de saída. Já a proposta do “FBPS S-PPC/Boost Integrado V2” apresenta a maior média de potência ativa ao mesmo tempo em que tem uma redução considerável na média de potência N, podendo-se então, considerar esta como sendo a melhor opção.

3.3.5 Vantagens e desvantagens

Apesar de ter tido um resultado positivo, deve-se falar também das desvantagens de se aplicar um PPP, e a desvantagem desta topologia mista em relação à original isolada. Primeiramente, o PPP possui a desvantagem de perder o isolamento galvânico quando aplicado, e dependendo da aplicação, pode ser inaceitável (ANZOLA et al, 2020). Esta nova abordagem ao utilizar um Boost, não resolve este problema, visto que esta topologia também não apresenta isolamento galvânico (lembrando que este é o principal motivo para este ser um conversor utilizado para comparação ao testar se determinada topologia é aplicável como um PPP ou não). Segundo, é obviamente o custo de investimento extra num segundo conversor, e os posteriores custos adicionais de manutenção. Dito isto, assim como em qualquer aplicação de PPP, deve-se analisar a situação no momento do dimensionamento para saber se tal aplicação é ou não viável.

Um fator que não é necessariamente uma vantagem ou desvantagem, é o dimensionamento do PPP, pois ele depende da climatologia do local em que ele foi instalado. Até este ponto do trabalho, a proposta de otimização foi embasada nos dados já obtidos de projetos anteriores para propósitos de comparação. No tópico 4 deste trabalho, será analisada a viabilidade da aplicação para a localidade de Vitória, ES.

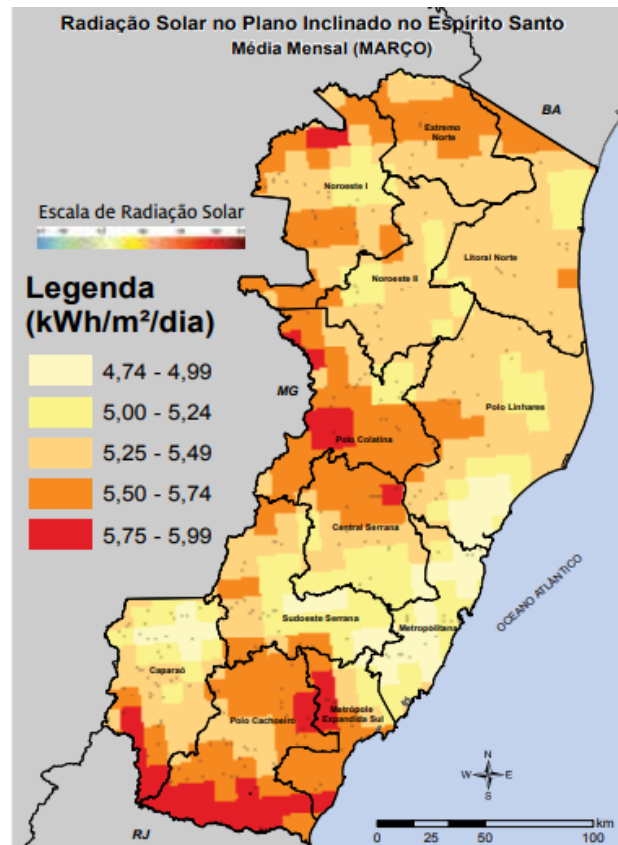
3.4 Comentários finais do capítulo

Este capítulo demonstrou os resultados obtidos nas simulações feitas para este trabalho. Ao simular o circuito FBPS S-PPC, salvar e compilar graficamente os dados, notou-se que estes apresentaram valores bastante precisos em relação aos trabalhos de referência, confirmando a validade da simulação. Com o circuito operando corretamente, pôde-se testar as modificações propostas. A primeira proposta foi pensada de forma a entender o que aconteceria com as potências P e N ao desligar o conversor numa determinada faixa. Ao perceber a falha da abordagem, um boost foi acoplado de forma a corrigir o problema, e embora a geração de potência P tenha melhorado, a de potência N não teve o resultado esperado. Por fim, uma modificação no boost foi feita, obtendo um resultado mais aceitável. Assim sendo, mesmo que as duas primeiras abordagens tenham “falhado” em suas propostas, elas serviram como base para a configuração final, sendo portanto, partes importantes deste projeto.

4 PROCESSAMENTO PARCIAL NA REGIÃO METROPOLITANA DE VITÓRIA-ES

Para que seja possível obter os parâmetros que possam delimitar a faixa de tensão de operação do painel, são necessários alguns dados climatológicos como a temperatura da região durante o período de dia e a irradiância da mesma. Os dados de irradiância foram extraídos de um atlas de 2013 (A ENERGIA SOLAR NO ESPÍRITO SANTO; TECNOLOGIAS, APLICADAS E OPORTUNIDADES), por falta de um documento mais recente. Havia uma previsão de lançamento de um atlas solar para o estado do ES mais recente, que estava programado para ser lançado ainda em 2021 (TN Petróleo, 2021), mas até a data deste trabalho, o mesmo ainda não havia sido publicado e/ou liberado na internet. Os dados foram extraídos nos mapas que exibem a irradiação ($\text{kWh/m}^2/\text{dia}$) mínima e máxima de cada mês, como pode ser visto no exemplo da Figura 30. Tais valores foram convertidos para irradiância (W/m^2) pois é a unidade utilizada para trabalhar nas medições do painel. O método aplicado foi de dividir o valor em $\text{kWh/m}^2/\text{dia}$ pela quantidade de horas de sol que existem no mês. Sabendo que devido ao plano inclinado do planeta, tem-se quantidades de luz solar que diferem durante o ano, foi-se estabelecido uma aproximação para ser possível obter um divisor.

Figura 30 – Média mensal da radiação no plano inclinado no ES em Março



Fonte: A ENERGIA SOLAR NO ESPÍRITO SANTO (2013)

4.1.1 Coleta de dados

Para que se tenha uma estimativa de horas de sol durante cada mês, foi feita uma aproximação baseando-se na variação que existe na duração do dia e da noite que ocorre devido ao plano inclinado do planeta, que é responsável pelas estações do ano.

Sabe-se que 23 de dezembro é a data do solstício de verão, em que se tem aproximadamente 13h de claridade e 11h de escuridão, sendo este, o dia do ano que possui o maior tempo de luz solar. Após essa data, os dias voltam a ficar menores (com o respectivo aumento da noite) até em que eles se igualam no dia 21 de março, no equinócio de outono, com 12h para cada um. Os dias e noite continuam diminuindo e aumentando, respectivamente, até o solstício de inverno no dia 21 de julho, com o menor dia do ano, com 11h e a maior noite com 13h (WIKIÉDIA, 2021). A partir daí os dias voltam a ficar maiores, até o equinócio de primavera dia 23 de setembro, chegando ao seu pico novamente no solstício de verão, reiniciando o ciclo.

Com estas informações, o que foi feito então foi que se pegou os meses de solstícios e equinócios, e aproximou-se as horas de dia para o mês inteiro e para os meses adjacentes. Por

exemplo, os meses de novembro, dezembro e janeiro, foram considerados meses com 13h de dia, por dezembro ser o mês do solstício. Agosto, setembro e outubro ficaram com 12h de dia, pois em setembro ocorre o equinócio, e assim por diante.

Tabela 6 – Horas de sol aproximadas para cada mês

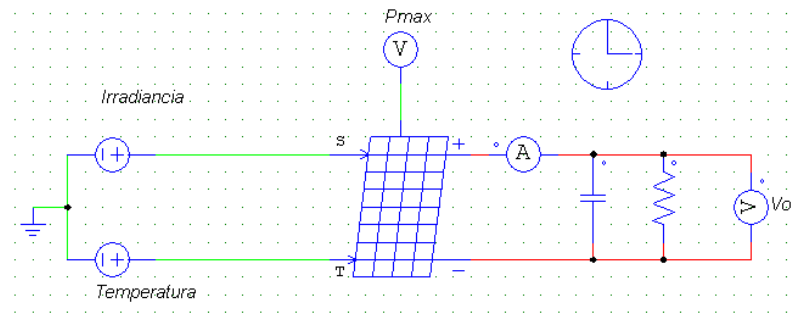
MÊS	HORAS DE SOL
Janeiro	13
Fevereiro	12
<u>Março</u>	12
Abril	12
Maio	11
<u>Junho</u>	11
Julho	11
Agosto	12
<u>Setembro</u>	12
Outubro	12
Novembro	13
<u>Dezembro</u>	13

Fonte: Próprio autor

Outro dado necessário é a temperatura, que foram retiradas no site do Incaper (Gráficos da Série Histórica - Vitória/ES, 2021). Lá foi possível extrair a temperatura mínima e máxima de cada mês de uma média histórica de 2007 até 2016 para a localização de Goiabeiras, Vitória-Es.

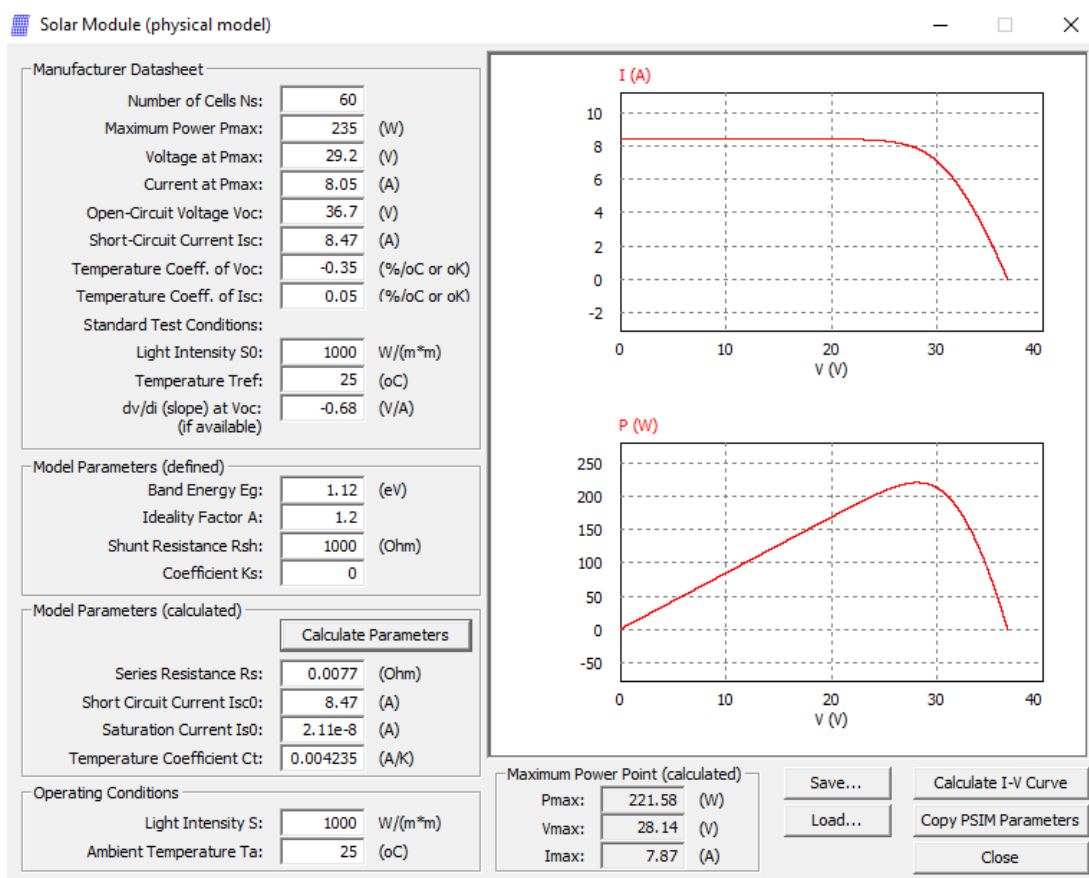
Com os dados de irradiância e temperatura, é possível obter a tensão do painel solar e a potência gerada. O modelo do painel utilizado nos trabalhos de referência foi o SunEarth TPB 156x156-60-P 235W, e para efeitos de comparação, será utilizado o mesmo. Com os dados contido no datasheet do painel, que se encontra no anexo 1, é possível dimensionar o mesmo no PSIM, para que seja feita a simulação.

Figura 31 – Simulação do painel solar



Fonte: Próprio autor

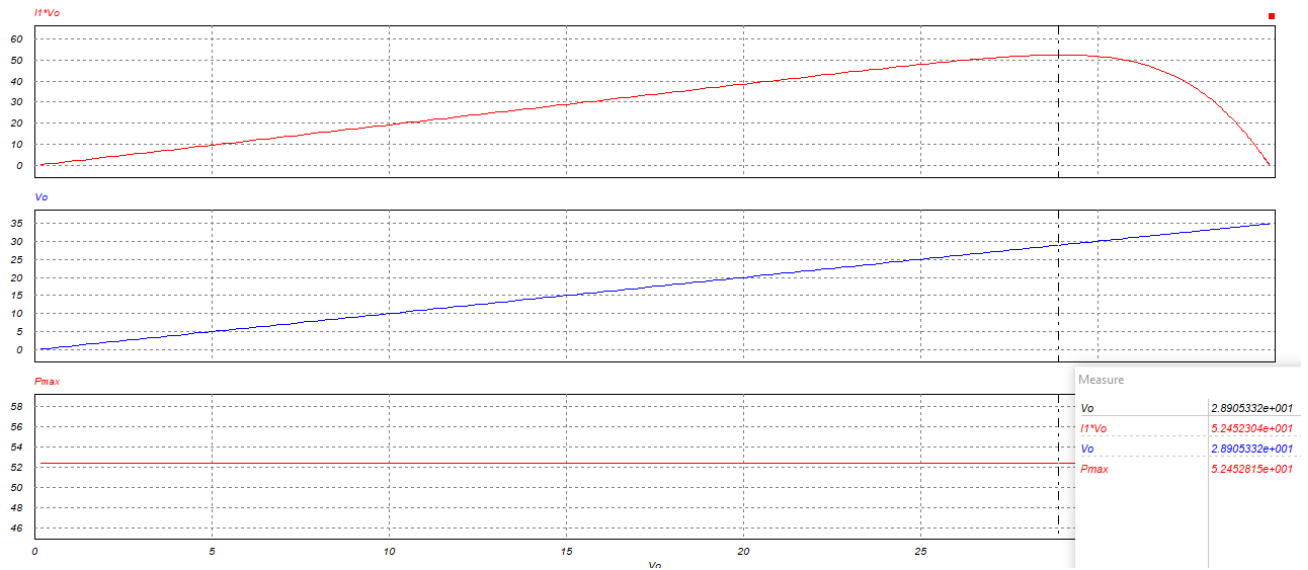
Figura 32 – Parâmetros dimensionados de acordo com o datasheet



Fonte: Próprio autor

Com isso, bastou inserir as temperaturas mínima/máxima e a irradiância correspondentes a cada mês para obter as saídas desejadas.

Figura 33 – Gráficos de tensão e potência do painel solar



Fonte: Próprio autor

Para obter estes gráficos, altera-se o eixo-X para o valor de tensão, e então, medindo o MPPT da curva de potência ($I_1 V_o$), é possível encontrar a tensão correspondente a este MPPT.

Fazendo isso para cada mês, tem-se os resultados da tabela abaixo

Tabela 7a – Dados Climatológicos para cada mês

MÊS	TEMPERATURA (°C)			IRRADIÇÃO (kWh/m ² /dia)		IRRADIÂNCIA (W/m ²)		IRRADIÂNCIA MÉDIA (W/m ²)
	MIN	MAX	MÉDIA	MIN	MAX	MIN	MAX	
Janeiro	23,1	31,6	27,35	5,72	5,99	440,00	460,77	450,38
Fevereiro	23	32,4	27,70	5,7	6,03	475,00	502,50	488,75
Março	22,8	31,7	27,25	5	5,24	416,67	436,67	426,67
Abril	21,7	30,4	26,05	5,23	5,46	435,83	455,00	445,42
Mai	19,35	28,2	23,78	4,6	4,8	418,18	436,36	427,27
Junho	18,5	27,15	22,83	4,15	4,38	377,27	398,18	387,73
Julho	18,15	27,1	22,63	4,99	5,35	453,64	486,36	470,00
Agosto	18,05	27,5	22,78	5,55	5,74	462,50	478,33	470,42
Setembro	19,4	28,15	23,78	4,75	5,05	395,83	420,83	408,33
Outubro	20,7	28,85	24,78	5,62	5,83	468,33	485,83	477,08
Novembro	22,6	29,4	26,00	5,16	5,36	396,92	412,31	404,62
Dezembro	22,75	31,3	27,03	5,63	5,96	433,08	458,46	445,77

Fonte: Próprio autor

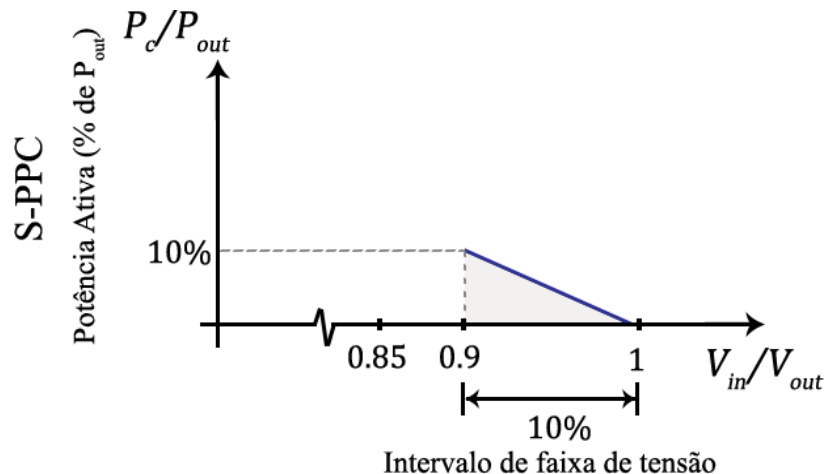
Tabela 7b – Resultados do painel solar para cada mês

MÊS	RESULTADOS P/ TEMP. MIN		RESULTADOS P/ TEMP. MAX	
	Potência MPPT (W)	Tensão no MPPT (V)	Potência MPPT (W)	Tensão no MPPT (V)
Janeiro	102,41918	28,74753	99,00890	27,48887
Fevereiro	111,24690	28,74176	107,07866	27,74379
Março	97,07345	28,65889	93,75530	27,49762
Abril	101,80546	28,77036	98,40912	27,89059
Maió	98,48071	29,29092	95,21007	28,13887
Junho	89,47029	29,13156	86,66864	28,13024
Julho	108,95812	29,45734	109,10901	28,34813
Agosto	109,09601	29,48025	105,17177	28,18066
Setembro	94,01129	29,02226	90,96564	27,93937
Outubro	109,53496	29,17868	106,05158	28,20033
Novembro	92,05903	28,85041	89,68331	27,72948
Dezembro	101,49628	28,81413	98,12591	27,57500

Fonte: Próprio autor

Os resultados mostram que o intervalo de tensão de operação do painel tem uma variação de aproximadamente 2V (entre 29,48025 e 27,48887 V), sendo que o pico (v') de geração de potência ocorre em 28,17176 V, que é aproximadamente o ponto médio entre o valor mínimo e o máximo. Aplicando os mesmos cálculos para gerar a faixa de tensão, tem-se que o valor do intervalo corresponde a $\pm 3,46\%$ de v' . Logo, a faixa de tensão de operação (Δv) precisa ser maior do que 6,93%. Um $\Delta v = 10\%$ é uma boa aproximação. Contudo, como é possível visualizar com a Figura 34, que uma faixa de tensão de 10% implicaria num intervalo de tensão de entrada do PPP entre 198 e 220V, o que neste caso, dispensaria a aplicação de um processamento parcial, pelo menos com a configuração adotada neste trabalho.

Figura 34 – Potência ativa num S-PPC com uma faixa de tensão mais estreita



Fonte: Próprio autor

Tal inviabilidade se comprova se for utilizada a mesma relação de espiras que o projeto de $\Delta v = 30\%$ ($n=0,5$). Entretanto, sabe-se que quanto menor for o valor de Δv , menor pode ser o valor de n , o que resulta na redução do processamento de potência N e nas perdas do circuito (ZIENTARSKI, 2017). Considerando a razão cíclica máxima $d_{\max}=1$, e o valor de tensão mínima sendo 198 V, aplicando a Equação 18, obtém-se uma nova relação de espiras $n = 0,112$, que foi ajustada para $n = 0,13$ para que fosse possível obter uma folga no desvio de fase caso sejam necessários alguns ajustes de perdas e/ou tempo morto, assim como no projeto original.

4.1.2 Aplicação das propostas nos dados de Vitória-ES

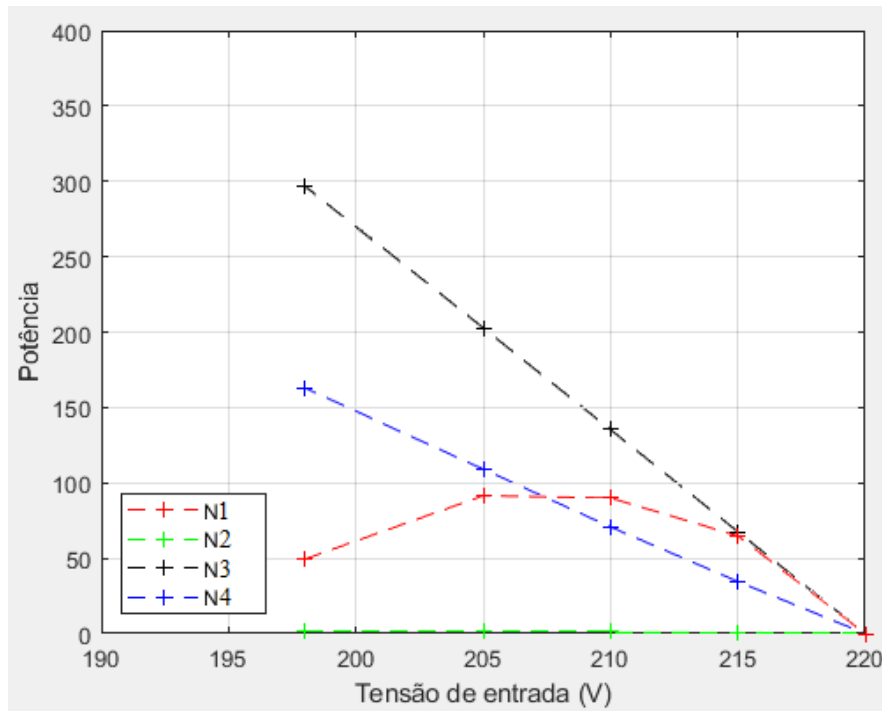
Após obter-se os resultados e ter sido feita a análise do funcionamento de todos os circuitos propostos neste trabalho, a próxima etapa é replicar este projeto, agora com a faixa de tensão delimitada pelos dados obtidos para o caso da região de Vitória-ES. Sabendo que a faixa de tensão, calculada como $\Delta v = 10\%$, irá definir o intervalo entre 198 e 220V, e por consequência, diminuir o valor de n , é possível esperar os seguintes cenários:

- 1) FBPS S-PPC —Com a faixa de tensão mais estreita e um menor n , espera-se uma redução considerável na potência N do circuito. As medições necessárias para comprovar esta hipótese se encontram nesta mesma sessão do trabalho;
- 2) FBPS S-PPC/Ligação Direta – O circuito irá operar o tempo todo no modo ligação direta, como se não existisse um conversor, pois o mesmo nunca será acionado;
- 3) FBPS S-PPC/Boost Integrado – O circuito irá operar sempre no modo boost, de forma em que o FBPS S-PPC ficaria sempre inativo, perdendo sua função. Isso se mantém independente da relação de espiras, visto que o cálculo da razão cíclica do boost independe de n .
- 4) FBPS S-PPC/Boost Integrado V2 – Mesma situação do anterior, com a diferença que o Boost é uma versão modificada, relativamente integrada com o FBPS S-PPC, mas isso não altera as medições da parte “boost” do circuito.

Note que estas afirmações levam em consideração que o clima segue exatamente os dados medidos. Mas sabendo que situações climáticas atípicas podem gerar pontos fora da curva, em

algumas dessas situações pode ser que o conversor acabe atuando numa faixa que faça o FBPS S-PPC operar. Entretanto, pela impossibilidade de prever tais acontecimentos, os gráficos das próximas figuras irão seguir apenas a faixa delimitada.

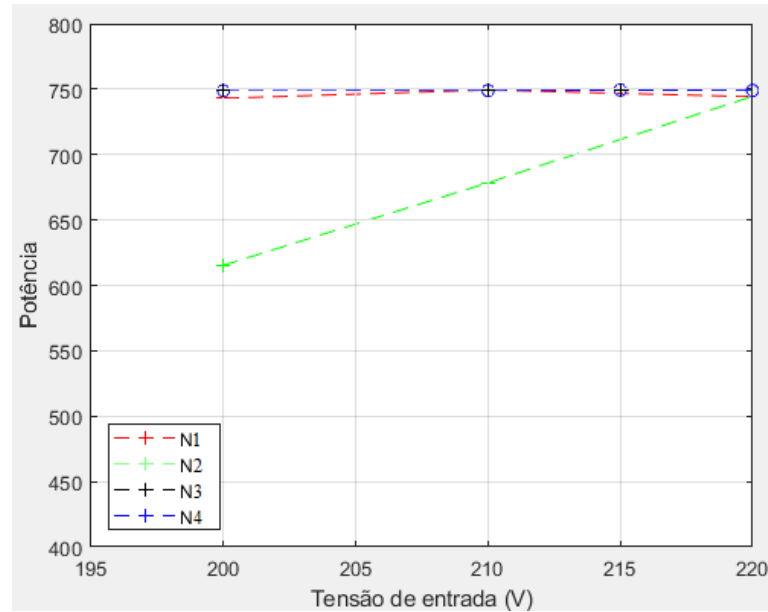
Figura 35 – Comparação das potências N totais de cada circuito trabalhado



Fonte: Próprio autor

Na legenda da Figura 35, são mostrados os projetos enumerados em ordem de apresentação (N1 para o FBSP original até o Boost integrado V2 como N4). É notável a queda de potência N para o FBPS S-PPC original, visto que este é o único que sofreu mudanças devido à diminuição da relação de espiras. Já os gráficos que correspondem à potência ativa de cada caso são muito semelhantes, com exceção do caso ligação direta, que apresenta uma queda brusca já apresentada anteriormente.

Figura 36 – Comparação das potências ativas totais de cada circuito trabalhado



Fonte: Próprio autor

Reiterando os comentários do começo deste tópico, devido à faixa de tensão delimitada pelas condições climáticas da região de Vitória-Es, tem-se uma relação de espiras menor do que o projeto base, o que permite um maior aproveitamento do FBPS S-PPC original em relação às propostas de modificação. Quanto ao FBPS S-PPC/Boost Integrado V2, está é a modificação que se sai melhor se comparado com o original, entretanto, seria necessário avaliar o custo-benefício de se adicionar mais componentes, e fazer uma comparação da performance das aplicações, para saber qual é a mais viável.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho de conclusão de curso apresentou uma proposta de modificação de um circuito FBPS S-PPC com o intuito de melhorar sua eficiência no intervalo de tensão em que a operação em modo PPP não é vantajoso. As propostas de modificação não se aproveitaram bem do fato de que a relação de espiras do FBPS S-PPC pode diminuir com o estreitamento da faixa de tensão, fazendo com que o projeto original, para este caso trabalhado (região, modelo do painel, etc) tenha demonstrado melhor resultado na redução da potência N . Com estes resultados, é possível concluir que a proposta do FBPS S-PPC/Boost Integrado V2 teria maior relevância em regiões com uma faixa de tensão mais ampla, acarretando em uma maior relação de espiras. Note que, quando este trabalho utiliza termos como “melhor” ou “mais relevante”, está se referindo principalmente à redução de potência N (e a não perda de potência ativa) do circuito como parâmetro de otimização, não tendo sido realizada uma análise de custo/benefício. Tal análise é uma proposta de projeto futuro a se considerar.

É importante destacar que estas conclusões poderiam ter sido diferentes se a mesma metodologia de coleta de dados das referências tivesse sido adotada, lembrando que estes trabalhos utilizaram um histograma com material coletado durante dez anos, e por não ter sido possível replicar tal experimento, tampouco encontrar um trabalho semelhante para a região de Vitória-ES, uma metodologia diferente teve de ser pensada. Logo, reconhece-se que um mesmo estudo, com dados mais detalhados, poderia acarretar em resultados diferentes. Algo interessante de se propor seria a medição da irradiância em um certo ponto de Vitória por um ou dois anos (menos tempo do que os 10 anos do projeto SONDA, mas inegavelmente mais preciso e atual do que os dados disponíveis até o momento), ao mesmo tempo em que se cataloga a temperatura do ambiente e a tensão no painel solar. Com isso, um histograma de metodologia mais próxima à original e por consequência, uma faixa de tensão mais correta seria obtida. O modelo e a quantidade de painéis também deve ser levado em consideração, visto que fatores como nuvens e sombreamento de edifícios podem prejudicar a medição de maneira mais expressiva se poucos painéis estiverem em operação. Um modelo diferente, por sua vez, poderia gerar valores diferentes de tensão de pico e intervalo de tensão mínima/máxima, o que alteraria a faixa de tensão. Portanto, um estudo avaliando diferentes modelos também é uma proposta a se pensar para um futuro projeto.

Outro fator que também deve ser considerado é o de que este trabalho apresenta resultados considerando vários componentes ideais. Embora o PSIM tenha em sua biblioteca diversos outros componentes (como transformadores) com uma série de parâmetros internos com o intuito de simular componentes reais, é de se imaginar que um circuito físico apresentaria algumas diferenças. Este trabalho, portanto, pode servir de referência a um estudo futuro de uma aplicação prática deste mesmo projeto.

Outras sugestões de propostas para trabalhos futuros que podem usar este como base:

- Realizar um estudo de perdas das topologias propostas;
- Identificar outras topologias isoladas que tenham capacidade de realizar o PPP e comparar com as deste trabalho;
- Realizar uma simulação e/ou experimentação das topologias propostas em malha fechada e com processo de *start/stop* dos conversores;

6 REFERÊNCIAS

- [1] J. R. R. Zientarski, M. L. da S. Martins, J. R. Pinheiro, and H. L. Hey. “Evaluation of Power Processing in Series-Connected Partial-Power Converters,” *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 7, no. 1, pp. 343-351, March 2019.
- [2] J. R. R. Zientarski, M. L. da S. Martins, J. R. Pinheiro, and H. L. Hey. “Series-Connected Partial-Power Converters Applied to PV Systems: A Design Approach Based on Step-Up/Down Voltage Regulation Range,” *IEEE Transactions of Power Electronics*, vol. 33, n° 9, September 2018.
- [3] J. R. R. Zientarski, M. L. da S. Martins, J. R. Pinheiro, and H. L. Hey. “Processamento Parcial de Energia em Conversores CC-CC Conectados na Configuração de Reguladores Série” *Eletrôn. Potên., Campo Grande*, v. 22, n. 2, p. 196-205, abr./jun. 2017.
- [4] Phase-Shifted Full Bridge DC/DC Power Converter Design Guide 2014. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/ug/tidu248/tidu248.pdf?ts=1645132399507&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F> Acesso em 15/11/2021.
- [5] CASARO, M. M; MARTINS, D. C. Processamento eletrônico da energia solar fotovoltaica em sistemas conectados à rede elétrica. *Controle e Automação*, v. 21, n. 2, p. 159-172, mar./abr. 2010.
- [6] T. Suntio and A. Kuperman, “Comments on ‘an efficient partial power processing dc/dc converter for distributed PV architectures,’” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 4, pp. 2372–2372, Apr. 2015.
- [7] J. R. R. Zientarski, J. R. Pinheiro, M. L. d. S. Martins, and H. L. Hey, “Understanding the partial power processing concept: A case-study of buck-boost dc/dc series regulator,” in *Proc. 2015 IEEE 13th Brazilian Power Electron. Conf. 1st Southern Power Electron. Conf.*, Nov. 2015, pp. 1–6.

- [8] M. S. Agamy *et al.*, “An efficient partial power processing DC/DC converter for distributed PV architectures,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 2, pp. 674–686, Feb. 2014.
- [9] J. Zhao, K. Yeates, and Y. Han, “Analysis of high efficiency dc/dc converter processing partial input/output power,” in *Proc. IEEE 14th Workshop Control Modeling Power Electron.*, Jun. 2013, pp. 1–8.
- [10] M. Kasper, D. Bortis, J. W. Kolar, “Classification and Comparative Evaluation of PV Panel-Integrated DC–DC Converter Concepts”, in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.29, n^o5, May 2014
- [11] J. Anzola *et al.*, "Review of Architectures Based on Partial Power Processing for DC-DC Applications," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 103405-103418, 2020
- [12] A ENERGIA SOLAR NO ESPÍRITO SANTO; TECNOLOGIAS, APLICADAS E OPORTUNIDADES. Espírito Santo: ASPE, 2013.
- [13] INCAPER. **Gráficos da Série Histórica - Vitória/ES**. Espírito Santo, 2021. Disponível em: <<https://meteorologia.incaper.es.gov.br/graficos-da-serie-historica-vitoria>>. Acesso em 10/11/2021
- [14] Espírito Santo vai ter novos mapas solar e eólico até meados de 2022. **TN Petróleo**. Espírito Santo, 12 nov. de 2021. Disponível em: <<https://tnpetroleo.com.br/noticia/espírito-santo-vai-ter-novos-mapas-solar-e-eolico-ate-meados-de-2022>> Acesso em 19/11/2021.
- [15] F. H. Dupont, C. Rech, and J. R. Pinheiro, “A methodology to obtain the equations for the calculation of the weighted average efficiency applied to photovoltaic systems” in *Proc. 2012 10th IEEE/IAS Int. Conf. Ind. Appl.*, Nov. 2012, pp. 1–8.
- [16] J. R. R. Zientarski. “**CONTRIBUIÇÕES AO ESTUDO DE CONVERSORES CC-CC COM PROCESSAMENTO PARCIAL DE ENERGIA APLICADOS A SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**”. 2017. Tese (Doutorado) – Curso de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2017.

- [17] J. H. R. Enslin and D. B. Snyman, "**Combined low-cost, high-efficient inverter, peak power tracker and regulator for PV applications**," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 6, no. 1, pp. 73-82, Jan. 1991
- [18] SINGH, Mandvi and GUPTA, Amal. IEA projects rapid increase in installed solar capacity by 2040. **DownToEarth**. 18 nov. de 2019. Disponível em: <<https://www.downtoearth.org.in/news/energy/iea-projects-rapid-increase-in-installed-solar-capacity-by-2040-67797>>
- [19] CASARIN, Ricardo. Capacidade de geração solar global poderá superar 2 TW em 2025. **Portal Solar**. 22 jun. de 2021. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/noticias/mercado/internacional/capacidade-de-geracao-solar-global-podera-superar-2-tw-em-2025>>
- [20] INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. Renewable Energy Prospects: Germany. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2015/Nov/Renewable-Energy-Prospects-Germany>. Acesso em 07 jul. 2019.
- [21] PEREIRA, E. B; MARTINS, F. R.; DE ABREU, S. L.; RÜTHER, R. Atlas Brasileiro de energia solar (Brazilian atlas of solar energy). 1. ed. São José dos Campos: INPE. 2006.
- [22] Quanto Custa a Energia Solar Residencial?. **PORTAL SOLAR**. 2021. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/quanto-custa-a-energia-solar-fotovoltaica.html>>. Acesso em: 23 ago 2021.
- [23] Matriz Energética e Elétrica. **EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE**. 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em 11 jan. 2022.
- [24] M. Kasper, D. Bortis and J. W. Kolar, "Classification and Comparative Evaluation of PV Panel-Integrated DC–DC Converter Concepts," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 5, pp. 2511-2526, May 2014.

[25] "IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions," in IEEE Std 1459-2010 (Revision of IEEE Std 1459-2000), vol., no., pp.1-50, 19 March 2010.

[26] ESTAÇÃO DO ANO. In: WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre. Flórida: Wikimedia Foundation, 2021. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Esta%C3%A7%C3%A3o_do_ano&oldid=61081887. Acesso em: 5 mai. 2021.

7 APÊNDICE

7.1 Código Matlab FBPS S-PPC original

```

% Cálculo da potência não-ativa
d = [0.8571,0.75,0.4444,0.2,0.0952,0] ;
f = 70000;
L = 198e-6;
C = 352e-9;
Ts = 1/f;
V_in = [154,160,170,180,190,200,210,220];
V_out = 220;

%valores de iC, iL e vC, vL RMS para Vin =
[154,160,170,180,190,200,210,220];
i_L =
[3.408788,3.4081237,3.4167601,3.4203904,3.4142357,3.4061449,3.4039669,3.385
7117];
v_L =
[26.81499,36.202692,44.486863,47.544708,46.533988,41.742783,32.641852,2.714
0062];
i_C =
[0.22610866,0.34704429,0.46877943,0.50216613,0.46223047,0.36569518,0.233403
76,0.11446541];
v_C =
[67.015787,60.336042,50.009950,39.999461,30.017576,20.305665,11.044719,2.71
57754];

%valores de iL e vC MÉDIOS para Vin =
[154,160,170,180,190,200,210,220];
i_L_med =
[3.4011950,3.3902198,3.3840916,3.3828956,3.3824032,3.3861410,3.3957037,3.38
35185];
v_C_med =
[66.920737,60.222315,49.850491,39.799531,29.793240,20.059267,10.700758,-
0.071306097];

%Ripple
Delta_i_L = [0.6444285, 1.1200401,1.5758813, 1.7003834,1.5556184,
1.2050249, 0.7124623, 0];
Delta_v_C = [3.390155, 5.8143, 8.096992, 8.730266, 8.255985, 6.284315,
3.7625218, 0];

%Potência aparente e ativa de entrada do conversor (Vp*I_in_conv)
S_in = [246.56061, 240.39998, 224.88004, 213.28042, 182.25546,
153.33399, 115.24868, 0];
P_int = [230.71904, 209.89406, 175.46114, 142.57144, 109.29793,
76.489414, 49.544526, 0];

%Potência ativa de entrada do sistema V_in*I_in
P_in = [757.66950, 754.58051, 753.40313, 753.74507, 754.82056,
756.94044, 757.20127, 744.44044];

%Potência ativa na saída do conversor Vc_out*Iout

```

```

Pc_out = [227.64491, 204.24628, 168.85505, 134.82880, 100.95031,
68.064204, 36.448385, 0];

%Potência ativa na carga Vout*Iout
P_out = [750.23894, 746.33193, 742.16693, 740.96548, 741.23603,
743.05914, 749.40485, 744.24613];

%Cálculos gerais
for i = 1:8

Delta_E_L(i) = L*i_L_med(i)*Delta_i_L(i); %Energia não-ativa
Delta_E_C(i) = C*v_C_med(i)*Delta_v_C(i);
N_in(i) = sqrt(S_in(i)^2-P_int(i)^2); %Potência não-ativa de entrada
rendimento(i) = P_out(i)/P_in(i) %Rendimento global
nreg(i) = Pc_out(i)/P_int(i); %Rendimento do regulador
a(i) = Pc_out(i)/P_out(i); %Fórmula auxiliar 1
rendimento2(i) = 1-(a(i)*(1-nreg(i))) %Cálculo de rendimento global com
outra fórmula para comparação
c(i) = 1 - V_in(i)/V_out; %Fórmula auxiliar 2
end

N_L = 2*Delta_E_L/Ts; %Potência não-ativa no indutor
N_C = 2*Delta_E_C/Ts; %Potência não-ativa no capacitor

for j = 1:8
N_t(j)=N_L(j)+N_C(j)+N_in(j); %Potência não-ativa total
end

figure(1)
plot(V_in,N_L, 'b--o'); hold on;
plot(V_in,N_C, 'r--*'); hold on;
plot(V_in,N_in, 'g--+'); hold on;
plot(V_in,N_t, 'k--+'); hold on;
axis([150 220 0 400]);
legend('NL','NC','Nin','Ntotal');
xlabel('Tensão de entrada (V)');
ylabel('Potência Não-ativa (var)');
grid on;

figure(2)
plot(V_in,N_t, 'r--+'); hold on;
plot(V_in,P_out, 'b--+'); hold on;
axis([150 220 0 800]);
legend('Ntotal','Pcarga','Location','southwest');
xlabel('Tensão de entrada (V)');
ylabel('Potência');
title('comparação entre potência não-ativa e ativa na saída do
conversor');
grid on;

figure(3)
plot(V_in,rendimento2*100, 'b--+'); hold on;
plot(V_in,nreg*100, 'g--*'); hold on;
axis([150 220 50 110]);
legend('Rendimento global','Rendimento do S-
PPC','Location','southwest');
xlabel('Tensão de entrada (V)');
ylabel('Rendimento global (%)');
title('Rendimento total do circuito FBPS S-PPC');

```

```
grid on;
```

7.2 Código Matlab FBPS S-PPC/Ligação Direta

```

%% Cálculo da potência não-ativa
d = [0.8571,0.75,0.4444,0.2,0.0952,0] ;
f = 70000;
L = 198e-6;
C = 352e-9;
Ts = 1/f;
V_in = [154,160,170,180,190,194,200,210,220];
V_out = 220;

%valores de iC, iL e vC, vL RMS para Vin =
[154,160,170,180,190,194,200,210,220];
i_L = [3.408788,3.4081237,3.4167601,3.4203904,3.4142357,0,0,0,0];
v_L = [26.81499,36.202692,44.486863,47.544708,46.533988,0,0,0,0];
i_C = [0.22610866,0.32962307,0.46877943,0.50216613,0.46223047,0,0,0,0];
v_C = [67.015787,60.336042,50.009950,39.999461,30.017576,0,0,0,0];

%valores de iL e vC MÉDIOS para Vin =
[154,160,170,180,190,200,210,220];
i_L_med = [3.4011950,3.3902198,3.3840916,3.3828956,3.3824032,0,0,0,0];
v_C_med = [66.920737,60.222315,49.850491,39.799531,29.793240,0,0,0,0];

%Ripple
Delta_i_L = [0.6444285, 1.1200401,1.5758813,
1.7003834,1.5556184,0.000001,0.000001,0.000001,0.000001];
Delta_v_C = [3.390155, 5.8143, 8.096992, 8.730266,
8.255985,0.000001,0.000001,0.000001,0.000001];

%Potência aparente e ativa de entrada do conversor (Vp*I_in_conv)
S_in = [246.56061, 240.39998, 224.88004, 213.28042,
182.25546,0.000001,0.000001,0.000001,0.000001];
P_int = [230.71904, 209.89406, 175.46114, 142.57144,
109.29793,0.000001,0.000001,0.000001,0.000001];

%Potência ativa de entrada do sistema V_in*I_in
P_in = [757.66950, 754.58051, 753.40313, 753.74507, 754.82056,
579.018123, 615.38754, 678.464703, 744.6152323077];

%Potência ativa na saída do conversor Vc_out*Iout
Pc_out = [227.64491, 204.24628, 168.85505, 134.82880, 100.95031, 0, 0,
0, 0];

%Potência ativa na carga Vout*Iout
P_out = [750.23894, 746.33193, 742.16693, 740.96548, 741.23603,
579.01527, 615.3845, 678.4614, 744.618864];

%Cálculos gerais
for i = 1:9
Delta_E_L(i) = L*i_L_med(i)*Delta_i_L(i); %Energia não-ativa
Delta_E_C(i) = C*v_C_med(i)*Delta_v_C(i);
N_in(i) = sqrt(S_in(i)^2-P_int(i)^2); %Potência não-ativa de entrada
rendimento(i) = P_out(i)/P_in(i) %Rendimento global

```

```

nreg(i) = Pc_out(i)/P_int(i); %Rendimento do regulador
a(i) = Pc_out(i)/P_out(i); %Fórmula auxiliar 1
rendimento2(i) = 1-(a(i)*(1-nreg(i))) %Cálculo de rendimento global com
outra fórmula para comparação
c(i) = 1 - V_in(i)/V_out; %Fórmula auxiliar 2
end

N_L = 2*Delta_E_L/Ts; %Potência não-ativa no indutor
N_C = 2*Delta_E_C/Ts; %Potência não-ativa no capacitor

for j = 1:9
N_t(j)=N_L(j)+N_C(j)+N_in(j); %Potência não-ativa total
end

figure(1)
plot(V_in,N_L, 'b--o'); hold on;
plot(V_in,N_C, 'r--*'); hold on;
plot(V_in,N_in, 'g--+'); hold on;
plot(V_in,N_t, 'k--+'); hold on;
axis([150 220 0 400]);
legend('NL', 'NC', 'Nin', 'Ntotal');
xlabel('Tensão de entrada (V)');
ylabel('Potência Não-ativa (var)');
grid on;

figure(2)
plot(V_in,N_t, 'k--+'); hold on;
plot(V_in,P_out, 'b--+'); hold on;
axis([150 220 0 800]);
legend('Ntotal', 'Pcarga', 'Location', 'southwest');
xlabel('Tensão de entrada (V)');
ylabel('Potência');
title('comparação entre potência não-ativa e ativa na saída do
conversor');
grid on;

figure(3)
plot(V_in,rendimento2*100, 'b--+'); hold on;
plot(V_in,nreg*100, 'g--*'); hold on;
axis([150 220 50 110]);
legend('Rendimento global', 'Rendimento do S-
PPC', 'Location', 'southwest');
xlabel('Tensão de entrada (V)');
ylabel('Rendimento global (%)');
title('Rendimento total do circuito FBPS S-PPC');
grid on;

```

7.3 Código Matlab FBPS S-PPC/Boost Integrado

```

%% Cálculo da potência não-ativa

```

```

d = [0.8571,0.75,0.4444,0.2,0.0952,0] ;
f = 70000;
L = 198e-6;
C = 352e-9;
Ts = 1/f;
V_in = [154,160,170,180,190];
V2_in = [194,200,210,215,220];
V_out = 220;

%valores de iC, iL e vC, vL RMS do FBPS para Vin =
[154,160,170,180,190]
i_L = [3.408788,3.4081237,3.4167601,3.4203904,3.4142357];
v_L = [26.81499,36.202692,44.486863,47.544708,46.533988];
i_C = [0.22610866,0.34704429,0.46877943,0.50216613,0.46223047];
v_C = [67.015787,60.336042,50.009950,39.999461,30.017576];

%valores de iL e vC MÉDIOS do FBPS para Vin = [154,160,170,180,190]
i_L_med = [3.4011950,3.3902198,3.3840916,3.3828956,3.3824032];
v_C_med = [66.920737,60.222315,49.850491,39.799531,29.793240];

%Ripple do FBPS
Delta_i_L = [0.6444285, 1.1200401,1.5758813, 1.7003834,1.5556184];
Delta_v_C = [3.390155, 5.8143, 8.096992, 8.730266, 8.255985];

%Potência aparente e ativa de entrada do conversor FBPS (Vp*I_in_conv)
S_in = [246.56061, 240.39998, 224.88004, 213.28042, 182.25546];
P_int = [230.71904, 209.89406, 175.46114, 142.57144, 109.29793];

%Potência ativa de entrada do sistema V_in*I_in
P_in = [757.66950, 754.58051, 753.40313, 753.74507, 754.82056];

%Potência ativa na saída do conversor FBPS Vc_out*Iout
Pc_out = [227.64491, 204.24628, 168.85505, 134.82880, 100.95031];

%Potência ativa na carga Vout*Iout
P_out = [764.381178, 746.33193, 742.16693, 740.96548, 741.23603];

%Potência de entrada do conversor boost
P_in_B = [745.0709098 761.42339, 761.56, 761.88245, 762.00727];

%Potência não-ativa do capacitor e do indutor do boost (são iguais)
NB_L = [175.5414102, 135.147952, 67.660802, 33.79676034687, 0];
NB_C = [175.5414102, 135.147952, 67.660802, 33.79676034687, 0];
NT_B = NB_L+NB_C;

%Corrente de saída do boost
Ib_out = [3.4033808, 3.4522455, 3.4175446, 3.4007180, 3.4049271];

%Potência de saída do boost
Pb_out = Ib_out*220;

%Cálculos gerais
for i = 1:5
Delta_E_L(i) = L*i_L_med(i)*Delta_i_L(i); %Energia não-ativa
Delta_E_C(i) = C*v_C_med(i)*Delta_v_C(i);
N_in(i) = sqrt(S_in(i)^2-P_int(i)^2); %Potência não-ativa de entrada
rendimento(i) = P_out(i)/P_in(i) %Rendimento global

```



```

nreg(i) = Pc_out(i)/P_int(i); %Rendimento do regulador
a(i) = Pc_out(i)/P_out(i); %Fórmula auxiliar 1
rendimento2(i) = 1-(a(i)*(1-nreg(i))) %Cálculo de rendimento global com
outra fórmula para comparação
c(i) = 1 - V_in(i)/V_out; %Fórmula auxiliar 2
rendimento_boost = Pb_out/P_in_B;
end

N_L = 2*Delta_E_L/Ts; %Potência não-ativa no indutor
N_C = 2*Delta_E_C/Ts; %Potência não-ativa no capacitor

for j = 1:5
N_t(j)=N_L(j)+N_C(j)+N_in(j); %Potência não-ativa total
end

figure(1)
plot(V_in,N_L, 'b--o'); hold on;
plot(V2_in,NB_L, 'b--o'); hold on;
plot(V_in,N_C, 'r--*'); hold on;
plot(V2_in,NB_C, 'r--*'); hold on;
plot(V_in,N_in, 'g--+'); hold on;
plot(V_in,N_t, 'k--+'); hold on;
plot(V2_in,NT_B, 'k--+'); hold on;
axis([150 220 0 400]);
legend('NL1', 'NL2', 'NC1', 'NC2', 'Nin', 'Ntotal1', 'Ntotal2');
xlabel('Tensão de entrada (V)');
ylabel('Potência Não-ativa (var)');
grid on;

figure(2)
plot(V_in,N_t, 'k--+'); hold on;
plot(V2_in,NT_B, 'k--+'); hold on;
plot(V_in,P_out, 'm--+'); hold on;
plot(V2_in,Pb_out, 'm--+'); hold on;
axis([150 220 0 800]);

legend('Ntotal_1', 'Ntotal_2', 'Pcarga_1', 'Pcarga_2', 'Location', 'southwest');
xlabel('Tensão de entrada (V)');
ylabel('Potência');
title('comparação entre potência não-ativa e ativa na saída do
conversor');
grid on;

figure(3)
plot(V_in,rendimento2*100, 'b--+'); hold on;
plot(V_in,nreg*100, 'g--*'); hold on;
plot(V2_in,rendimento_boost*100, 'r--o'); hold on;
axis([150 220 50 110]);
legend('Rendimento global', 'Rendimento do S-PPC', 'Rendimento do
Boost', 'Location', 'southwest');
xlabel('Tensão de entrada (V)');
ylabel('Rendimento global (%)');
title('Rendimento total do circuito FBPS S-PPC');
grid on;

```

7.4 Código Matlab FBPS S-PPC/Boost Integrado V2

```
% Cálculo da potência não-ativa
```

```

d = [0.8571,0.75,0.4444,0.2,0.0952,0] ;
f = 70000;
L = 198e-6;
C = 352e-9;
Ts = 1/f;
V_in = [154,160,170,180,190];
V2_in = [194,200,210,215,220];
V_out = 220;

%valores de iC, iL e vC, vL RMS do FBPS para Vin =
[154,160,170,180,190]
i_L = [3.408788,3.4081237,3.4167601,3.4203904,3.4142357];
v_L = [26.81499,36.202692,44.486863,47.544708,46.533988];
i_C = [0.22610866,0.34704429,0.46877943,0.50216613,0.46223047];
v_C = [67.015787,60.336042,50.009950,39.999461,30.017576];

%valores de iL e vC MÉDIOS do FBPS para Vin = [154,160,170,180,190]
i_L_med = [3.4011950,3.3902198,3.3840916,3.3828956,3.3824032];
v_C_med = [66.920737,60.222315,49.850491,39.799531,29.793240];

%Ripple do FBPS
Delta_i_L = [0.6444285, 1.1200401,1.5758813, 1.7003834,1.5556184];
Delta_v_C = [3.390155, 5.8143, 8.096992, 8.730266, 8.255985];

%Potência aparente e ativa de entrada do conversor FBPS (Vp*I_in_conv)
S_in = [246.56061, 240.39998, 224.88004, 213.28042, 182.25546];
P_int = [230.71904, 209.89406, 175.46114, 142.57144, 109.29793];

%Potência ativa de entrada do sistema V_in*I_in
P_in = [757.66950, 754.58051, 753.40313, 753.74507, 754.82056];

%Potência ativa na saída do conversor FBPS Vc_out*Iout
Pc_out = [227.64491, 204.24628, 168.85505, 134.82880, 100.95031];

%Potência ativa na carga Vout*Iout
P_out = [750.23894, 746.33193, 742.16693, 740.96548, 741.23603];

%Potência de entrada do conversor boost
P_in_B = [780.05049 773.11536, 760.295991, 752.6653565, 748.621306];

%Potência não-ativa do capacitor e do indutor do boost (são iguais)
NB_L = [175.5414102, 135.147952, 67.660802, 33.79676034687, 0];
NB_C = [20.722380815256, 12.277674918254, 3.1026787787058,
0.77694721715614, 0];
NT_B = NB_L+NB_C;

%Corrente de saída do boost
Ib_out = [3.4744599, 3.4477532, 3.4245699, 3.39628898, 3.3829271];

%Potência de saída do boost
Pb_out = Ib_out*220;

%Cálculos gerais
for i = 1:5
Delta_E_L(i) = L*i_L_med(i)*Delta_i_L(i); %Energia não-ativa
Delta_E_C(i) = C*v_C_med(i)*Delta_v_C(i);
N_in(i) = sqrt(S_in(i)^2-P_int(i)^2); %Potência não-ativa de entrada

```

```

rendimento(i) = P_out(i)/P_in(i) %Rendimento global
nreg(i) = Pc_out(i)/P_int(i); %Rendimento do regulador
a(i) = Pc_out(i)/P_out(i); %Fórmula auxiliar 1
rendimento2(i) = 1-(a(i)*(1-nreg(i))) %Cálculo de rendimento global com
outra fórmula para comparação
c(i) = 1 - V_in(i)/V_out; %Fórmula auxiliar 2
rendimento_boost(i) = Pb_out(i)/P_in_B(i);
end

N_L = 2*Delta_E_L/Ts; %Potência não-ativa no indutor
N_C = 2*Delta_E_C/Ts; %Potência não-ativa no capacitor

for j = 1:5
N_t(j)=N_L(j)+N_C(j)+N_in(j); %Potência não-ativa total
end

figure(1)
plot(V_in,N_L, 'b--o'); hold on;
plot(V2_in,NB_L, 'b--o'); hold on;
plot(V_in,N_C, 'r--*'); hold on;
plot(V2_in,NB_C, 'r--*'); hold on;
plot(V_in,N_in, 'g--+'); hold on;
plot(V_in,N_t, 'k--+'); hold on;
plot(V2_in,NT_B, 'k--+'); hold on;
axis([150 220 0 400]);
legend('NL1', 'NL2', 'NC1', 'NC2', 'Nin', 'Ntotal1', 'Ntotal2');
xlabel('Tensão de entrada (V)');
ylabel('Potência Não-ativa (var)');
grid on;

figure(2)
plot(V_in,N_t, 'k--+'); hold on;
plot(V2_in,NT_B, 'k--+'); hold on;
plot(V_in,P_out, 'm--+'); hold on;
plot(V2_in,Pb_out, 'm--+'); hold on;
axis([150 220 0 800]);

legend('Ntotal_1', 'Ntotal_2', 'Pcarga_1', 'Pcarga_2', 'Location', 'southwest');
xlabel('Tensão de entrada (V)');
ylabel('Potência');
title('comparação entre potência não-ativa e ativa na saída do
conversor');
grid on;

figure(3)
plot(V_in,rendimento2*100, 'b--+'); hold on;
plot(V_in,nreg*100, 'g--*'); hold on;
plot(V2_in,rendimento_boost*100, 'r--o'); hold on;
axis([150 220 50 110]);
legend('Rendimento global', 'Rendimento do S-PPC', 'Rendimento do
Boost', 'Location', 'southwest');
xlabel('Tensão de entrada (V)');
ylabel('Rendimento global (%)');
title('Rendimento total do circuito FBPS S-PPC');
grid on;

```

8 ANEXO

Datasheet dos painel solar utilizado nas simulações deste trabalho



nbsolar

Poly-Crystalline

TPB156×156-60-P 230W 235W 240W 245W

Electrical Characteristics at Standard Test Conditions (STC):

	230W	235W	240W	245W
Maximum Power (Pmax):	230W	235W	240W	245W
Power Tolerance:	0~+5W	0~+5W	0~+5W	0~+5W
Rated Voltage at Pmax (Vmp):	29.1V	29.2V	29.3V	29.4V
Rated Current at Pmax (Imp):	7.91A	8.05A	8.19A	8.34A
Open-circuit Voltage (Voc):	36.6V	36.7V	36.8V	36.9V
Short-circuit Current (Isc):	8.37A	8.47A	8.58A	8.68A
Module Efficiency (ηm):	14.1%	14.4%	14.7%	15.0%

• STC: Irradiance 1000W/m²; Cell temperature 25°C, Air mass AM1.5 according to EN60904-3.

Electrical Characteristics at Nominal Operating Cell Temperature (NOTC):

	230W	235W	240W	245W
Maximum Power (Pmax):	167.7W	171.3W	174.6W	178.2W
Rated Voltage at Pmax (Vmp):	26.5V	26.6V	26.7V	26.8V
Rated Current at Pmax (Imp):	6.33A	6.44A	6.54A	6.65A
Open-circuit Voltage (Voc):	33.9V	34.0V	34.1V	34.2V
Short-circuit Current (Isc):	6.78A	6.86A	6.95A	7.03A

• NOTC: Irradiance 800W/m²; Ambient temperature 20°C/s, wind Speed 1m/s.
• Average efficiency reduction of 4.5% at 200W/m² according to EN60904-1.

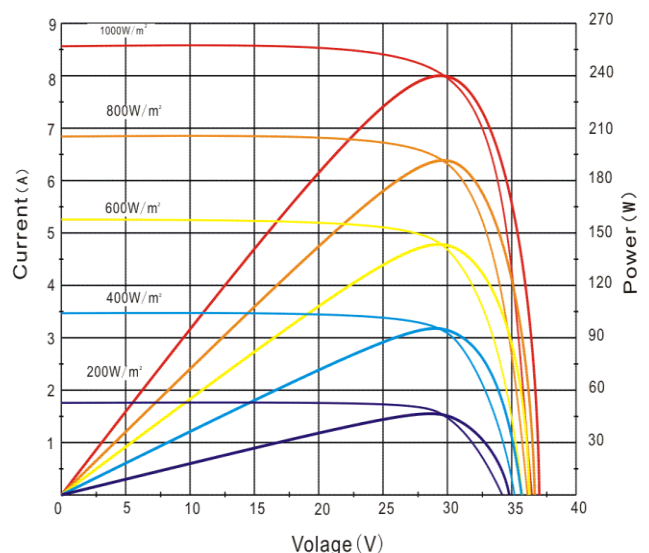
Thermal Characteristics:

Nominal Operating Cell Temperature (NOCT):	46°C
Temperature Coefficient of Pmax (γ Pmp):	-0.45%/°C
Temperature Coefficient of Voc (β Voc):	-0.32%/°C
Temperature Coefficient of Isc (α Isc):	+0.05%/°C

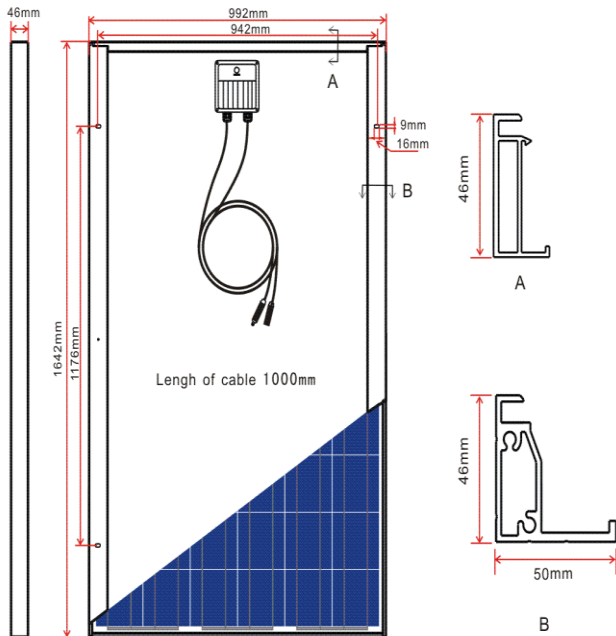
Construction Characteristics:

Front Cover :	low-iron tempered glass/3.2mm
Cell:	60 pcs poly-crystalline 156×156mm
Frame :	anodized aluminum alloy/silver
Junction Box (protection degree):	IP65
Cable (length/cross-sectional area):	1000mm/4mm ²
Connector (protection degree):	IP65
Module Dimension (L×W×H):	1642×992×46mm
Weight:	20.0kg

I-V (240W)



Dimensions (tolerance $\pm 2\text{mm}$)



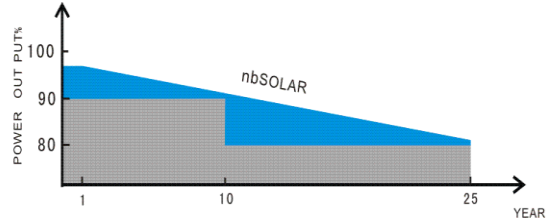
Rating Characteristics:

Maximum System Voltage:	1000VDC (IEC), 600VDC (UL)
Application Class:	Class A
Fire Resistance Class:	Class C (UL)
Maximum Over-Current Rating:	16A (IEC), 15A (UL)
Operating Temperature:	85% Rh, $-40^{\circ}\text{C} \sim +85^{\circ}\text{C}$ (IEC), $-40^{\circ}\text{C} \sim +90^{\circ}\text{C}$ (UL)
Maximum Snow Loads (front):	5400Pa
Maximum Wind Loads (front & back):	2400Pa
Maximum Hailstone Impact (diameter @ 23m/s):	25mm

Packing Characteristics:

Number of Modules Per Pallet:	20 pcs
Number of Pallets Per 40' Container:	28 pallets
Gross Weight Per Pallet:	420kg

Warranty:



Please refer to nbSolar Power Product Warranty for details.

TEL: +86-574-87121761 FAX: +86-574-87131333 Http: www.nbsolar.com