

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



**DJALMA GOMES DE MENDONÇA FILHO**

**ANÁLISE DE CONVERSORES RESSONANTES LLC  
APLICADOS A TRANSFORMADORES DE ESTADO  
SÓLIDO EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

VITÓRIA  
2021

DJALMA GOMES DE MENDONÇA FILHO

**ANÁLISE DE CONVERSORES RESSONANTES LLC APLICADOS A  
TRANSFORMADORES DE ESTADO SÓLIDO EM SISTEMAS  
FOTOVOLTAICOS**

Parte manuscrita da Proposta de Projeto de Graduação do aluno **Djalma Gomes de Mendonça Filho**, apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para aprovação na disciplina ELE08552 – Projeto de Graduação I.

---

Profa. Dra. Carla C.M. Cunha  
Coordenadora de Projeto de Graduação

---

Prof. Dr. Walbermark Marques dos Santos  
Orientador

---

Djalma Gomes de Mendonça Filho  
Aluno

VITÓRIA  
2021

## **RESUMO**

Transformadores de estado sólido possuem inúmeras vantagens quando comparados a transformadores de potência usuais, como tamanho e peso reduzido, mas pecam particularmente no quesito eficiência. Conversores ressonantes do tipo LLC possuem características atrativas para esse tipo de aplicação, como comutação suave em toda a sua faixa de operação, reduzindo em grande parte perdas por chaveamento. Este trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade de se utilizar esses tipos de conversores em transformadores de estado sólido para uso em sistemas fotovoltaicos, a fim de minimizar perdas de chaveamento. O sistema proposto consiste em um conjunto de painéis fotovoltaicos conectados a conversores CC-CC com processamento parcial de energia, que alimentam um conversor ressonante LLC chaveando um transformador de alta frequência seguido de um estágio inversor. Também será contemplado o uso de controle preditivo nas malhas de controle. Para avaliar a performance do sistema serão utilizadas simulações computacionais levando em consideração várias condições de operação, com o objetivo de constatar se existem benefícios em utilizar esse tipo de configuração nessa aplicação.

**Palavras-chave:** Conversor ressonante. Conversor LLC. Transformador de estado sólido. SST. Energia solar.

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 – Característica de operação de painéis fotovoltaicos em função da irradiação solar e temperatura .....	11
Figura 2 – a) Processamento total de energia; b) Processamento parcial de energia .....	12
Figura 3 – Arquitetura multi-string utilizando conversores CC-CC com regulação série .....	12
Figura 4 –Topologias de transformadores de estado sólido – a) Estágio único; b) Dois estágios com barramento CC em baixa tensão; c) Dois estágios com barramento CC em alta tensão; d) Três estágios.....	13
Figura 5 – Conversor ressonante LLC em ponte completa .....	14

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Cronograma de execução das atividades ..... 16

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

CA	Corrente alternada
CC	Corrente Contínua
DAB	<i>Dual Active Bridge</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
PPP	<i>Partial Power Processing</i>
PSFB	<i>Phase Shifted Full Bridge</i>
SST	<i>Solid State Transformer</i>
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
ZCS	<i>Zero Current Switching</i>
ZVS	<i>Zero Voltage Switching</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>JUSTIFICATIVAS.....</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS .....</b>	<b>10</b>
<b>3.1</b>	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>10</b>
<b>3.2</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>10</b>
<b>4</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>11</b>
<b>4.1</b>	<b>Painéis fotovoltaicos .....</b>	<b>11</b>
<b>4.2</b>	<b>Transformadores de estado sólido .....</b>	<b>13</b>
<b>4.3</b>	<b>Conversores ressonantes LLC .....</b>	<b>13</b>
<b>4.4</b>	<b>Malha de controle .....</b>	<b>14</b>
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA E ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>15</b>
<b>6</b>	<b>CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>6.1</b>	<b>Lista e Descrição das Atividades Previstas.....</b>	<b>16</b>
<b>6.2</b>	<b>Cronograma de Execução .....</b>	<b>16</b>
<b>7</b>	<b>ALOCAÇÃO DE RECURSOS .....</b>	<b>17</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>18</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento e diversificação da matriz energética global, destacando-se o uso de fontes renováveis de energia, os constantes avanços tecnológicos nas áreas de dispositivos semicondutores tornam o uso da eletrônica de potência em sistemas de distribuição algo bem atrativo, principalmente em vista da necessidade de se adequar os níveis de tensão de algumas dessas fontes ao sistema elétrico atual (GEORGE, 2016).

Transformadores de potência exercem um papel essencial no sistema elétrico, possibilitando transmissão de energia em grandes distâncias e com alta eficiência. Os transformadores convencionais, no entanto, apresentam desvantagens como volume e peso elevados, e o fato deles serem dispositivos passivos torna difícil a sua integração a sistemas que contém várias fontes de energia, como é o caso das *smart grids*. Nas últimas décadas, os transformadores de estado sólido (SSTs, do inglês *solid state transformers*) tem sido objetos de estudo para a sua aplicação no sistema elétrico, a fim de possivelmente substituir os transformadores convencionais nesses contextos (SHE; HUANG, 2013).

A principal diferença entre os SSTs e os transformadores convencionais é o emprego da eletrônica de potência nos seus estágios, possibilitando que a conversão CA-CA seja feita em dezenas, ou até mesmo centenas de kHz, através do chaveamento de um transformador de alta frequência. Esse aumento de frequência permite reduzir o tamanho dos elementos magnéticos do dispositivo, fazendo com que os SSTs tenham tamanho e peso bem inferiores aos transformadores convencionais. Além disso, a eletrônica nos vários estágios de conversão possibilita monitoramento e controle do fluxo de potência, regulação de tensão e corrente, controle ativo de fator de potência, limitação de correntes de falha, dentre várias outras funcionalidades não alcançáveis com transformadores convencionais, mas que são atraentes no ponto de vista de *smart grids* (RASHIDI et al, 2020).

No entanto, apesar de todas essas vantagens que os transformadores de estado sólido oferecem, a redução de eficiência em função das perdas que acompanham o chaveamento em alta frequência se mostram como um dos desafios na implantação dessa tecnologia.

Para mitigar parte dessas perdas por comutação, conversores ressonantes podem ser empregados. Esses conversores possuem redes indutivas-capacitivas ressonantes que permitem operação com chaveamento suave com tensão nula (ZVS, do inglês *zero voltage switching*) e corrente nula (ZCS, do inglês *zero current switching*). A rede ressonante também faz com que a corrente circulante no conversor tenha característica predominantemente senoidal, o que reduz tanto o estresse nos componentes quanto a geração de interferência eletromagnética (BHUVANESWARI; BABU, 2016).

## 2 JUSTIFICATIVAS

No contexto de energia solar em particular, o fato dos painéis fotovoltaicos serem fontes de energia em corrente contínua (CC) com saída variante em função do grau de irradiação e da temperatura torna difícil sua interface com transformadores convencionais, o que abre espaço para a implantação de transformadores de estado sólido.

A topologia mais usual de transformadores de estado sólido usa conversores de ponte ativa dupla (DAB, do inglês *dual active bridge*) ou conversores de ponte completa com deslocamento de fase (PSFB, do inglês *phase-shifted full bridge*), que apesar de conseguirem realizar comutação suave, reduzindo consideravelmente as perdas por chaveamento, têm essa característica limitada a uma faixa muito pequena de operação (LIU et al, 2017).

Em contrapartida, uma das principais vantagens oferecidas pela topologia LLC de conversores ressonantes é a possibilidade de se alcançar comutação suave (ZVS) para qualquer condição de carga (ARAIZI et al, 2018), garantindo maior eficiência.

Assim, esse trabalho tem como principal justificativa a busca de melhorias na tecnologia de transformadores de estado sólido através do uso de conversores ressonantes, tornando mais praticável a sua implantação no sistema elétrico, em particular na área de energia solar.

### **3 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS**

#### **3.1 Objetivo geral**

O objetivo geral desse trabalho é verificar a viabilidade de se aplicar conversores ressonantes LLC em transformadores de estado sólido para uso com painéis fotovoltaicos.

#### **3.2 Objetivos específicos**

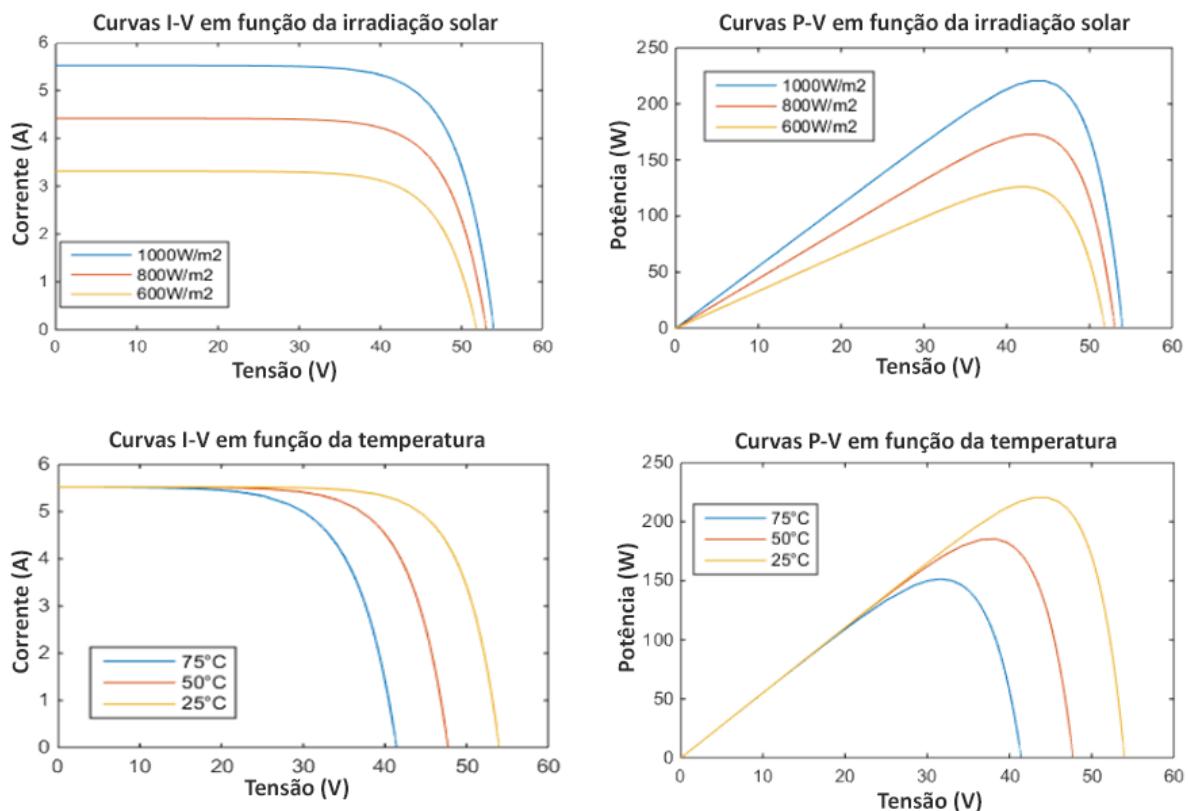
- Estabelecer as vantagens e desvantagens da topologia proposta em relação às topologias mais comumente usadas;
- Avaliar como o sistema se comporta quando submetido a diferentes condições de operação, como variação de carga e irradiações.

## 4 REFERENCIAL TEÓRICO

### 4.1 Painéis fotovoltaicos e processamento parcial de energia

Painéis fotovoltaicos são dispositivos projetados para converter energia proveniente da luz do sol em energia elétrica através do efeito fotoelétrico. As características de operação de um painel fotovoltaico são afetadas por parâmetros como a temperatura do painel e o nível de irradiação solar, como ilustra a Figura 1 abaixo.

Figura 1 – Característica de operação de painéis fotovoltaicos em função da irradiação solar e temperatura



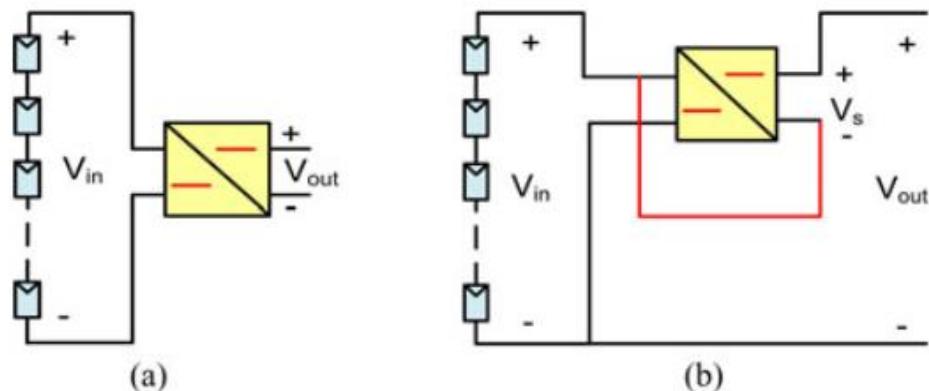
Fonte: Ibrahim e outros (2015).

Nota: Adaptado e traduzido pelo autor.

Das curvas de potência, pode-se perceber que o ponto de máxima transferência de potência pode variar consideravelmente dependendo das condições as quais o painel é submetido. Para obter a maior eficiência possível em sistemas fotovoltaicos, técnicas de rastreamento de ponto de potência máxima (MPPT, do inglês *maximum power point tracking*) podem ser empregadas. Um sistema de MPPT consiste basicamente em um conversor CC-CC em conjunto com um

controlador que “busca” o ponto de operação que oferece a máxima transferência de potência e ajusta a tensão de saída do sistema. De maneira geral, esses conversores podem ser empregados em duas configurações, conforme a Figura 2:

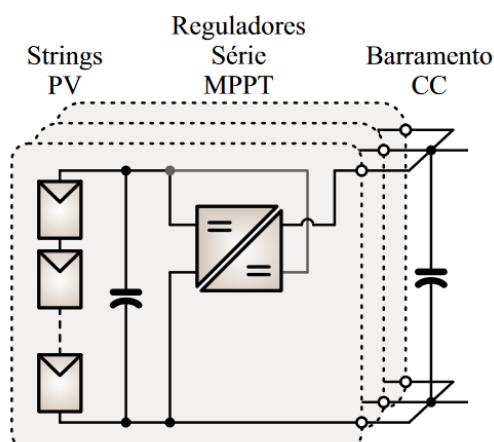
Figura 2 – (a) Processamento total de energia; (b) Processamento parcial de energia



Fonte: Agamy e outros (2014).

A configuração que será usada no projeto é a (b), com processamento parcial de energia (PPP, do inglês *partial power processing*), pois ela tende a apresentar eficiência global maior que a configuração a) visto que nela os conversores não regulam toda a faixa da tensão de saída (AGAMY et al, 2014). Essa configuração também permite integrar vários painéis fotovoltaicos em uma arquitetura chamada de *multi-string* (Figura 3), onde todos eles compartilham um barramento CC de saída comum.

Figura 3 – Arquitetura multi-string utilizando conversores CC-CC com regulação série



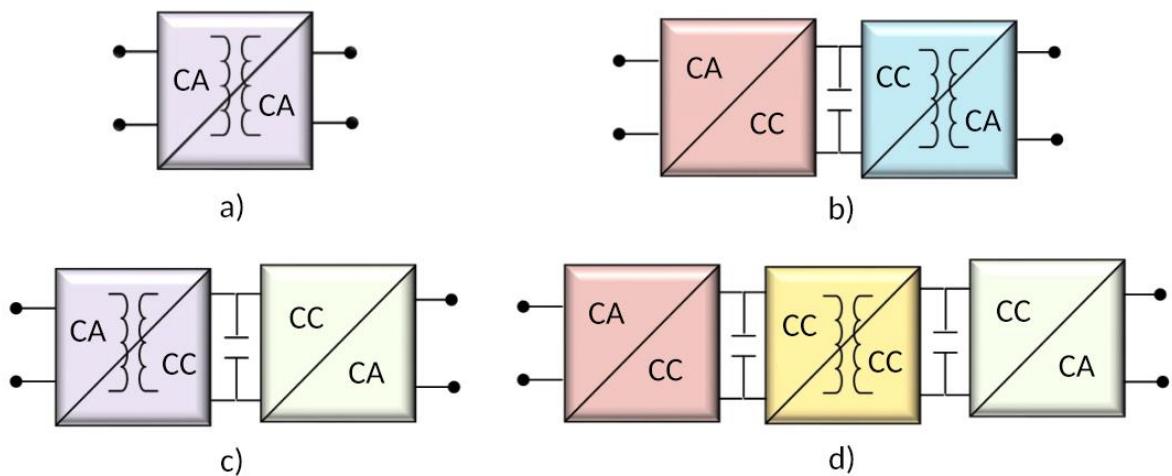
Fonte: Zientarski e outros (2017).

Nota: Adaptado pelo autor.

## 4.2 Transformadores de estado sólido

Diferentes topologias de transformadores de estado sólidos existem, podendo variar o número de estágios e suas respectivas funções. A Figura 4 mostra as topologias mais comuns.

Figura 4–Topologias de transformadores de estado sólido – (a) Estágio único; (b) Dois estágios com barramento CC em baixa tensão; (c) Dois estágios com barramento CC em alta tensão; (d) Três estágios



Fonte: Falcones e outros (2019).

Nota: Adaptado e traduzido pelo autor.

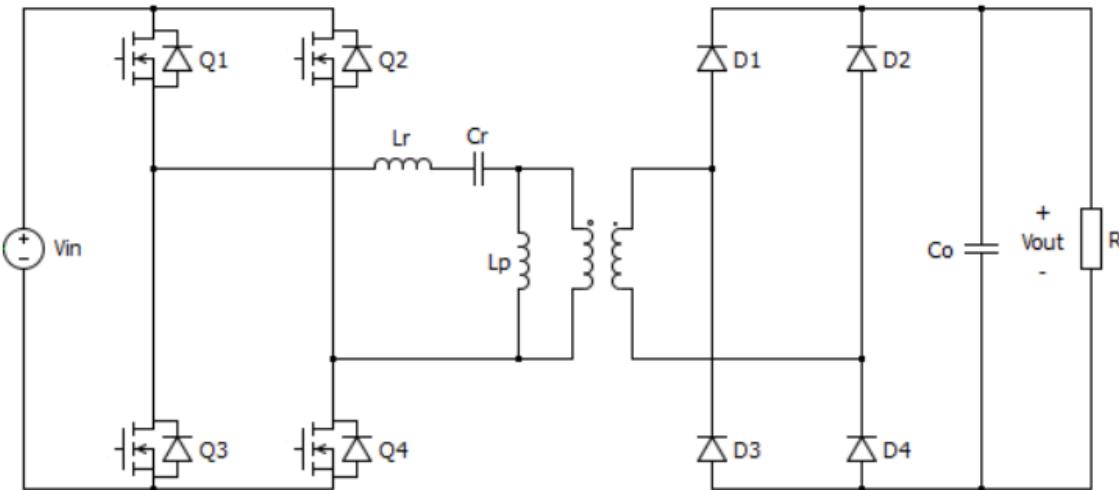
A proposta desse projeto é uma adaptação da topologia (d), substituindo o estágio CA-CC de entrada pelo barramento CC da arquitetura *multi-string* de painéis fotovoltaicos citada anteriormente, e aplicando um conversor ressonante LLC no segundo estágio (CC-CC) com o intuito de minimizar perdas por chaveamento.

A topologia resultante acaba sendo unidirecional em relação ao fluxo de potência, o que não ocorre, por exemplo, em topologias que usam conversores DAB no estágio de conversão CC-CC (GEORGE, 2016), mas a bidirecionalidade a princípio não é um requisito para se trabalhar com painéis fotovoltaicos.

## 4.3 Conversores ressonantes LLC

A Figura 5 mostra o circuito de um conversor ressonante LLC em ponte completa.

Figura 5 – Conversor ressonante LLC em ponte completa



Fonte: Arazi e outros (2018).

O nome da topologia (LLC) se deve ao fato de que a rede ressonante desse tipo de conversor é composta de dois indutores,  $L_r$  e  $L_p$ , e um capacitor,  $C_r$ , como ilustrado na Figura 5.

Além das características de ZVS citadas anteriormente, chaveamento com ZCS também é alcançável no secundário do transformador, de forma que o retificador com diodos na Figura 3 pode ser substituído por um retificador chaveado síncrono para aumentar ainda mais a eficiência do conversor (BHUVANESWARI, 2016; YU, 2016).

#### 4.4 Malha de controle

O método de controle que o projeto se propõe a utilizar é o do controle de preditivo baseado em modelo (MPC, do inglês *model predictive control*). Como seu nome implica, esse método usa um modelo matemático da planta a ser controlada para prever seu comportamento futuro através de simulações em um horizonte de tempo pré-definido. Através dessas simulações, é possível obter uma lista de possíveis estratégias de controle e compará-las através de uma função de custo para achar a que produz o melhor resultado dado um certo ponto de operação.

Apesar desse método apresentar um custo computacional maior que os métodos clássicos (como o PID, por exemplo), algumas de suas principais vantagens é que ele permite trabalhar com sistemas não lineares (usando técnicas de linearização ou não), e introduzir “limites” de atuação para controlar estresses na malha de controle.

## 5 METODOLOGIA E ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO

Tomando como base as classificações dos aspectos metodológicos de pesquisa descritos por Prodanov e Freitas (2013), esse trabalho constitui uma pesquisa de natureza aplicada, na área de transformadores de estado sólido, e de cunho exploratório, quanto aos objetivos do trabalho, e experimental, no que diz respeito aos procedimentos a serem adotados, já que busca alcançar melhorias no contexto de um objeto de estudo específico através de manipulação de variáveis. Do ponto de vista da abordagem, constitui uma pesquisa quantitativa, por tratar dados quantificáveis (em particular, valores de eficiência).

Antes de se iniciar as etapas de simulação, existe a necessidade de se realizar um estudo mais detalhado da literatura e de artigos científicos recentes acerca dos temas do projeto para a obtenção de uma boa base teórica. Depois disso, será necessário projetar e elaborar os modelos matemáticos de cada parte do sistema, em particular do painel fotovoltaico, do conversor com PPP e do conversor LLC, para realizar as simulações e construir as malhas de controle.

De início, cada parte do sistema será simulada e testada separadamente, mas ao final do projeto o sistema será avaliado como um todo.

## 6 CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO

### 6.1 Lista e Descrição das Atividades Previstas

- a) **Atividade A:** Revisão e expansão do referencial teórico;
- b) **Atividade B:** Projeto e modelagem do conjunto PV;
- c) **Atividade C:** Simulação e testes do conjunto PV;
- d) **Atividade D:** Projeto e modelagem do conversor LLC;
- e) **Atividade E:** Simulação e testes do conversor LLC;
- f) **Atividade F:** Integração dos estágios e testes globais;
- g) **Atividade G:** Produção do relatório final;
- h) **Atividade H:** Defesa do Projeto de Graduação;

### 6.2 Cronograma de Execução

O projeto será realizado durante o período letivo 2021/1, que acontecerá entre as datas de 14 de Junho de 2021 e 9 de Outubro de 2021. O cronograma de execução se encontra no Quadro 1.

Quadro 1 – Cronograma de execução das atividades

Meses	Junho 2021				Julho 2021				Agosto 2021				Setembro 2021				Outubro 2021			
Semanas	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Revisão e expansão do referencial teórico																				
Projeto e modelagem do conjunto PV																				
Simulação e testes do conjunto PV																				
Projeto e modelagem do conversor LLC																				
Simulação e testes do conversor LLC																				
Integração dos estágios e testes globais																				
Produção do relatório final																				
Defesa do Projeto de Graduação																				

Fonte: Produção do próprio autor.

## 7 ALOCAÇÃO DE RECURSOS

O projeto será desenvolvido utilizando um computador com sistema operacional Windows 10, processador Intel Core i3-7100 3,4 GHz e 16 GB de memória RAM, propriedade do autor.

Para fins de simulação, existem vários programas de uso livre que poderão ser usados, em particular os baseados no *software* SPICE, como o LTSpice e PSpice. A UFES possui licença do *software* Simulink da Mathworks que também será usado tanto para simulações quanto para o desenvolvimento da malha de controle preditivo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGAMY, M. S.; HARFMAN-TODOROVIC, M.; ELASSER, A.; CHI, S.; STEIGERWALD, R. L.; SABATE, J. A.; MCCANN, A. J.; ZHANG L.; MUELLER F.J. An Efficient Partial Power Processing DC/DC Converter for Distributed PV Architectures. **IEEE Transactions on Power Electronics**, [s.l.], v. 29, n. 2, p. 674-686, feb. 2014. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6490064>. Acesso em: 16 abr. 2021.
- ARAZI, M.; PAYMAN A.; CAMARA M. B.; DAKYO B. Study of different topologies of DC-DC resonant converters for renewable energy applications. In: Thirteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies, Monte Carlo, 2018. **Proceedings** [...]. Monte Carlo: IEEE, 2018. p. 1-6. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8362398>. Acesso em: 16 abr. 2021.
- BHUVANESWARI, C.; BABU R. S. R. A review on LLC Resonant Converter. In: International Conference on Computation of Power, Energy Information and Commuincation, Melmaruvathur, 2016. **Proceedings** [...]. Melmaruvathur: IEEE, 2016. p. 620-623. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7557268>. Acesso em: 16 abr. 2021.
- FALCONES, S.; MAO, X.; AYYANAR, R. Topology comparison for Solid State Transformer implementation. In: **IEEE PES General Meeting**, Minneapolis, 2010. p. 1-8. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5590086>. Acesso em: 16 abr. 2021.
- GEORGE, K. **Solid-State Transformers for Interfacing Solar Panels to the Power Grid: An Optimum Design Methodology of a High Frequency Transformer for dc-dc Converter Applications**. Inquiry: The University of Arkansas Undergraduate Research Journal. v. 20, 2016. Disponível em: <http://scholarworks.uark.edu/inquiry/vol20/iss1/5>. Acesso em: 16 abr. 2021.
- IBRAHIM, O.; YAHAYA, N. Z.; SAAD, N.; UMAR, M. W. Matlab/Simulink model of solar PV array with perturb and observe MPPT for maximising PV array efficiency. In: IEEE Conference on Energy Conversion, Johor Bahru, 2015. **Proceedings** [...]. Johor Bahru: IEEE, 2015. p. 254-258. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7409549>. Acesso em: 16 abr. 2021.
- LIU, C.; LIU, H.; CAI, G.; CUI, S.; LIU H.; YAO, H. Novel Hybrid LLC Resonant and DAB Linear DC-DC Converter: Average Model and Experimental Verification. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, [s.l.], v. 64, ed. 9, p. 6970-6978, sep. 2017. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7879268>. Acesso em: 16 abr. 2021.
- PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. de. **Metodologia do trabalho científico**: métodos e técnicas de pesquisa e do trabalho acadêmico. 2 ed. Novo Hamburgo: Freevale, 2013.

RASHIDI, M.; ALTIN, N.; OZDEMIR, S.; BANI-AHMED, A.; SABBAH, M.; BALALI F.; NASIRI, A. Design and Implementation of a LLC Resonant Solid State Transformer. **IEEE Transactions on Industry Applications**, [s.l.], v. 56, ed. 4, p. 3855 – 3864, jul. 2020. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9044724>. Acesso em: 16 abr. 2021.

SHE, X.; HUANG, A. Solid state transformer in the future smart electrical system. In: IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2013, Vancouver. **Proceedings** [...]. Vancouver: IEEE, 2013. p. 1-5. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6672768>. Acesso em: 16 abr. 2021.

YU, S. A new compact and high efficiency resonant converter. In: IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Long Beach, 2016. **Proceedings** [...]. Long Beach: IEEE, 2016. p. 2511-2517. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7468218>. Acesso em: 16 abr. 2021.

ZIENTARSKI, J. R. R.; MARTINS, M. L. S.; PINHEIRO, J. R.; HEY, H. L. Processamento parcial de energia em conversores cc-cc conectados na configuração de reguladores série. **Eletrônica de Potência**, Campo Grande, v. 22, n. 2, p. 196-205, abr./jun. 2017. Disponível em: <https://sobraep.org.br/site/uploads/2018/06/rvol22no2p19.pdf>. Acesso em: 16 abr. 2021.