

**Universidade Federal da Paraíba
Centro de Energias Alternativas e Renováveis
Departamento de Engenharia Elétrica**

Victor de Medeiros Barreto

**Estudo do Comportamento Dinâmico de um Sistema Híbrido
Fotovoltaico/Eólico Conectado à Rede Elétrica de Baixa Tensão**

**João Pessoa - PB
Maio 2017**

VICTOR DE MEDEIROS BARRETO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE
UM SISTEMA HÍBRIDO FOTOVOLTAICO/EÓLICO
CONECTADO À REDE ELÉTRICA DE BAIXA TENSÃO**

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Departamento de Engenharia Elétrica
como um dos pré-requisitos para a obtenção
do título em Bacharel em Engenharia Elétrica
sob orientação do Prof. Rogério Gaspar de
Almeida.**

**João Pessoa - PB
Maio 2017**

BARRETO, Victor de Medeiros

Estudo do Comportamento Dinâmico de um Sistema Híbrido
Fotovoltaico/Eólico conectado à Rede Elétrica de Baixa Tensão

76f. il.

Orientador: Prof. Dr. Rogério Gaspar de Almeida

Trabalho de Conclusão de Curso, 2017

1. Sistema Híbrido Conectado à Rede Elétrica. 2. Arranjo
Fotovoltaico. 3. Arranjo Eólico.

Victor de Medeiros Barreto

**Estudo do Comportamento Dinâmico de um Sistema
Híbrido Fotovoltaico/Eólico Conectado à Rede Elétrica de Baixa
Tensão**

**Trabalho de Conclusão de Curso Submetido ao Departamento de
Engenharia Elétrica como parte dos requisitos necessários para à
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.**

Data de Aprovação: ____/____/____

Nota: _____

Aprovado por:

Prof. Dr. Rogério Gaspar de Almeida (Orientador)
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Darlan Alexandria (Avaliador)
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Yuri Molina (Avaliador)
Universidade Federal da Paraíba

João Pessoa – PB

Maio 2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado força, sabedoria e tranquilidade durante toda minha vida acadêmica e pessoal.

Depois, agradeço a toda minha família, em especial meus pais Adriano de Oliveira e Ivonete Gomes por todo apoio e incentivo ao longo de todos estes anos, e por sempre acreditarem em mim.

Agradeço a todas minhas tias, em especial, Maria da Guia, Antônia e Iolanda, por estarem sempre do meu lado desde o começo, e pelo acolhimento desde sempre.

A todos os meus tios, em especial, José Barreto, por todos os conselhos e incentivos dados ao longo da minha vida, e por sempre estar comigo para tudo.

As minhas primas Iris e Isis, por todo o incentivo em relação aos estudos, e por sempre terem me dado suporte em todos os momentos.

Aos meus primos Inakã e Itapuan, por terem me ajudado desde sempre com os estudos e por todo apoio concedido durante minha vida.

A minha namorada Raissa por sempre me incentivar em todos os momentos, e por estar sempre do meu lado para tudo.

Agradeço ao professor Rogério pela orientação dada para o desenvolvimento deste trabalho, e por todos os conselhos dados durante minha graduação.

Por fim, queria agradecer todos meus amigos, em especial meus irmãos de curso Maxsuel, Rodolfo, Rodrigo, Wisley entre outros, que sempre proporcionaram momentos de descontração mesmo quando a situação não era das melhores.

RESUMO

Este Trabalho de Conclusão de Curso tem como principal objetivo a realização da modelagem de um sistema híbrido com arranjos fotovoltaico e eólico compartilhando o mesmo barramento CC. Serão mostrados neste documento o desenvolvimento dos arranjos fotovoltaico e eólico, e também os testes realizados para comprovação do funcionamento destes arranjos. Para o modelo híbrido a ser desenvolvido, serão realizadas simulações que irão mostrar o comportamento dinâmico do sistema para diferentes situações de simulação. Todas as simulações desenvolvidas neste trabalho foram realizadas no software SIMULINK[®] do MATLAB[®].

Palavras-Chaves: Sistema Híbrido, Arranjo Fotovoltaico, Arranjo Eólico, Turbina Eólica, Retificador, Conversor CC/CC, Inversor, Rede Elétrica, Carga.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Painel fotovoltaico com conversor CC/CC <i>Buck</i> .	17
Figura 2.2 – Aerogerador com conversor CC/CC <i>Buck</i> .	18
Figura 2.3- Sistema híbrido conectado à rede elétrica.	18
Figura 2.4 – Conexão do inversor à rede elétrica.	19
Figura 2.5 – Sistema híbrido simples.	21
Figura 2.6 – Configurações para sistemas híbridos.	22
Figura 2.7 – Conversor <i>Cuk-Sepic</i> .	24
Figura 2.8 – Funcionamento do <i>Cuk-Sepic</i> apenas com aerogerador.	25
Figura 2.9 - Funcionamento do <i>Cuk-Sepic</i> com as duas fontes atuando.	25
Figura 3.1- Sistema completo.	27
Figura 3.2– Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica.	29
Figura 3.3 – Arranjo fotovoltaico equivalente.	32
Figura 3.4 – Modelo computacional do circuito equivalente do arranjo fotovoltaico.	34
Figura 3.5 – Modelo da corrente fotogerada.	35
Figura 3.6 – Modelo inicial da corrente de saturação do diodo.	35
Figura 3.7 – Modelo da corrente de saturação com influência da temperatura.	36
Figura 3.8 – Modelo da corrente do diodo.	36
Figura 3.9 – Bloco do arranjo fotovoltaico.	37
Figura 3.10 – Curvas IxV do painel à 25°C.	39
Figura 3.11 – Curvas PxV do painel à 25°C.	40
Figura 3.12 – Curvas IxV do painel à 40°C.	41
Figura 3.13 – Curvas PxV do painel à 40°C.	42
Figura 3.14 – Modelo fotovoltaico do MATLAB [®] .	43
Figura 3.15 – Curvas IxV e PxV do modelo do próprio MATLAB [®] .	43
Figura 3.16 – Arranjo eólico completo.	45
Figura 3.17 – Variação de C_p em função de λ e β .	47
Figura 3.18 – Modelagem do coeficiente de potência.	48

Figura 3.19 – Modelagem da potência mecânica da turbina.	49
Figura 3.20 – Modelagem do torque mecânico da turbina.	49
Figura 3.21 – Bloco equivalente da turbina eólica.	50
Figura 3.22 – Curvas $P_{m \times W_m}$	51
Figura 3.23 – Circuito interno do retificador trifásico.	52
Figura 3.24 – Conversor CC/CC Boost.	53
Figura 3.25 – Inversor ponte completa.	55
Figura 3.26 – Filtro R-L-C.	55
Figura 3.27 – Rede elétrica.	56
Figura 3.28 – Carga R-L.	56
Figura 4.1 – Rede elétrica recebendo potência.	59
Figura 4.2 – Rede elétrica fornecendo potência.	60
Figura 4.3 – Curva da tensão no barramento CC.	61
Figura 4.4 – Curva de tensão na saída do inversor.	61
Figura 4.5- Potências do sistema híbrido na primeira situação.	62
Figura 4.6 – Correntes do sistema híbrido na primeira situação.	63
Figura 4.7 – Detalhe das correntes do sistema na primeira situação.	63
Figura 4.8 – Correntes do sistema para variação de 9200 W para 4600 W.	64
Figura 4.9 - Correntes do sistema para variação de 4600 W para 2300 W.	65
Figura 4.10 – Potências do sistema híbrido, na segunda situação.	65
Figura 4.11 - Correntes do sistema híbrido na segunda situação.	66
Figura 4.12 - Detalhe das correntes do sistema na segunda situação.	66
Figura 4.13 - Potências do sistema híbrido na terceira situação.	67
Figura 4.14 - Correntes do sistema híbrido na terceira situação.	68
Figura 4.15 - Detalhe das correntes do sistema na terceira situação.	68
Figura 4.16 - Potências do sistema híbrido na quarta situação.	69
Figura 4.17 - Correntes do sistema híbrido na quarta situação.	70
Figura 4.18 - Detalhe das correntes do sistema na quarta situação.	70
Figura 4.19 – Velocidade angular de cada turbina.	71
Figura 4.20 - Potências do sistema híbrido na quinta situação.	72
Figura 4.21 - Potências do sistema híbrido na sexta situação.	73
Figura 4.22 – Potências do sistema híbrido na sétima situação.	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Parâmetros do painel Kyocera KD 320 GX – LPB.....	38
Tabela 3.2 – Resultados à 25°C.....	40
Tabela 3.3 – Resultado à 40°C.....	42
Tabela 3.4 – Resultados para análise comparativa (1000 W/m ²).....	44
Tabela 3.5 – Parâmetros de entrada da turbina eólica.....	51
Tabela 3.6 – Parâmetros do conversor CC/CC Boost.....	54
Tabela 3.7 – Parâmetros da caga.....	58

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Motivação.....	12
1.2 Objetivos	13
1.2.1 Objetivos específicos.....	13
1.3 Organização do trabalho.....	14
2 EMBASAMENTO TEÓRICO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 Sistema híbrido fotovoltaico-eólico conectado à rede elétrica.....	15
2.2 Revisão bibliográfica.....	20
2.2.1 Sistema híbrido fotovoltaico-eólico usando conversor <i>Cuk-Sepic</i>	23
3 O SISTEMA HÍBRIDO SOLAR FOTOVOLTAICO/EÓLICO.....	27
3.1 Componentes do sistema híbrido	27
3.2 Arranjo fotovoltaico	28
3.2.1 Modelagem Matemática do Arranjo Fotovoltaico	28
3.2.2 Desenvolvimento do arranjo de painéis fotovoltaico no SIMULINK®	34
3.2.3 Curva característica do painel modelado	37
3.3 Arranjo Eólico	44
3.3.1 Turbina eólica.....	45
3.3.1.1 Desenvolvimento da turbina eólica no SIMULINK®	48
3.3.1.2 Curva característica da turbina modelada	50
3.3.2 Gerador elétrico.....	51
3.3.3 Retificador.....	52
3.4 Demais componentes do Sistema de geração.....	52
3.4.1 Conversor CC/CC tipo Boost.....	53
3.4.2 Inversor CC/CA.....	54
3.4.3 Filtro R-L-C para conexão com a rede.....	55

3.4.4 Rede elétrica e carga	56
4 ANÁLISE DE RESULTADOS	59
4.1 Considerações Preliminares	59
4.2 Curvas da tensão no barramento CC e da rede elétrica.....	60
4.3 Irradiância 1000 (W/m ²) e velocidade do vento 8 (m/s)	61
4.4 Irradiância 500 (W/m ²) e velocidade do vento 7 (m/s)	65
4.5 Sem irradiância e velocidade do vento 8 (m/s)	67
4.6 Irradiância 1000 (w/m ²) e velocidade do vento 3 (m/s)	69
4.7 Análise da sensibilidade dos arranjos fotovoltaico e eólico.....	71
4.7.1 Irradiância 1000-400 (W/m ²) e velocidade do vento 8 (m/s).....	71
4.7.2 Irradiância 1000 (W/m ²) e velocidade do vento 8-3 (m/s).....	72
4.7.3 Irradiância 1000-0 (W/m ²) e velocidade do vento 3-8 (m/s).....	73
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	75
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento da demanda de energia elétrica e tendo em vista que a matriz elétrica mundial é baseada em combustíveis fósseis que são finitos, e poluem o meio ambiente emitindo dióxido de carbono quando queimados, a utilização de fontes alternativas de energia para geração de eletricidade se torna imprescindível. Em especial podem-se destacar a energia solar fotovoltaica e a eólica, onde ambas vem sendo bastante utilizadas por serem importantes fontes renováveis para geração de eletricidade e por não poluírem o meio ambiente.

Com intuito de melhorar a continuidade de geração de energia dos sistemas, muito tem se estudado a respeito dos sistemas híbridos, que são sistemas que mixam diferentes tipos de geração. No caso deste Trabalho de Conclusão de Curso, o sistema híbrido a ser estudado e desenvolvido, é um, contendo arranjos fotovoltaico e eólico compartilhando o mesmo barramento CC, e conectado à rede elétrica. Esta proposta é muito interessante pois, ambas as fontes de geração podem gerar energia ao mesmo tempo e também gerar individualmente mesmo que a outra não esteja gerando, fazendo com que assim o sistema híbrido praticamente não seja intermitente, ou seja, consiga gerar energia quase o dia todo.

Os modelos computacionais se apresentam como ferramentas muito importantes no que se diz respeito a testes de como o sistema a ser instalado se comporta antes mesmo de ser propriamente instalado. Estes testes são responsáveis por evitar por exemplo que sistemas sejam instalados e não deem o retorno de energia gerada esperada, fazendo assim com que se tenha prejuízo na instalação destes. Modelos computacionais também permitem que novos tipos de tecnologias sejam implementados e testados para um melhoramento e otimização, não só de sistemas de geração de energia, como também muitos outros diferentes.

Neste Trabalho, será mostrado como é desenvolvido um sistema híbrido, com enfoque principal no desenvolvimento dos arranjos fotovoltaico e eólicos. Também serão realizadas simulações, levando em conta diferentes cenários para comprovação e entendimento da dinâmica do sistema que aqui será desenvolvido.

1.1 Motivação

Tendo em vista que a ANEEL está com programas de incentivo voltados para os sistemas distribuídos, que visam o uso de sistemas de geração de pequeno porte, geralmente a partir de

fontes renováveis conectados à rede, o estudo e desenvolvimento de sistemas híbridos de geração com arranjos fotovoltaico e eólico se torna bastante atrativo no momento.

Um destes incentivos da ANEEL foi criado desde abril de 2012 (Resolução Normativa nº 482/2012), que é o *Sistema de Compensação de Energia Elétrica*, este permite que o consumidor não só gere sua própria energia a partir de fontes renováveis, como também possa fornecer excedentes de energia à rede elétrica. Neste caso o consumidor acumula créditos para descontar em sua conta de energia em períodos em que sua geração for menor que o seu consumo. É importante destacar que no Brasil, ainda não se pode vender a energia gerada por estes tipos de sistemas. No momento só é válido o sistema de créditos.

1.2 Objetivos

Este trabalho visa implementar, a partir de modelagem e simulação computacional, um sistema híbrido de geração de energia elétrica, com arranjos fotovoltaico e eólico compartilhando o mesmo barramento CC, e conectados à rede elétrica. Assim, se torna necessário o desenvolvimento não só dos dois arranjos em questão, mas também dos outros componentes que fazem a conexão dos arranjos, e também são responsáveis pelo bom funcionamento do sistema como um todo.

1.2.1 Objetivos específicos

Neste trabalho pretende-se desenvolver especificamente:

- Modelagem do arranjo fotovoltaico e testes para comprovação de seu funcionamento, a partir de simulações no MATLAB/Simulink®.
- Conexão do arranjo fotovoltaico a rede, contendo conversor CC/CC, inversor, rede elétrica e carga.
- Testes para comprovação do bom funcionamento do arranjo fotovoltaico conectado à rede elétrica, a partir de simulações no MATLAB/Simulink®.
- Modelagem da turbina eólica e conexão desta com gerador síncrono de ímã permanente, e retificador trifásico.
- Conexão dos arranjos fotovoltaico e eólico em paralelo no mesmo barramento CC, do sistema híbrido completo.
- Avaliação do desempenho do sistema proposto a partir de distintos cenários de simulação.

1.3 Organização do trabalho

O trabalho organiza-se em 4 capítulos, que são descritos conforme a ordem a seguir:

- No Capítulo 2 serão apresentadas a Fundamentação teórica e a revisão bibliográfica. Serão apresentados os principais trabalhos da especialidade que fundamentaram o assunto desenvolvido neste Trabalho de Conclusão de Curso.
- O Capítulo 3 trata dos elementos que compõem o sistema híbrido a ser desenvolvido neste trabalho, com enfoque maior no desenvolvimento dos arranjos fotovoltaico e eólico.
- No Capítulo 4 são apresentadas as discussões dos resultados obtidos para diferentes cenários de atuação, com a finalidade de validar o sistema proposto.
- Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões referentes aos resultados obtidos com este trabalho e algumas sugestões para outros futuros a serem desenvolvidos, a partir deste.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, serão mostrados os principais trabalhos que tratam de sistemas híbridos contendo arranjos fotovoltaico e eólico compartilhando o mesmo barramento CC. Também irão ser apresentados os trabalhos literários que serviram como base para o desenvolvimento do sistema modelado neste documento. Estas literaturas abordam os diferentes modos de conexão de sistemas híbridos e os mais variados tipos de componentes que são usados para isto.

2.1 Sistema híbrido fotovoltaico-eólico conectado à rede elétrica

Com a preocupação em relação ao aquecimento global causado pela inserção de gases de efeito estufa na atmosfera, hoje em dia muito tem se falado a respeito do uso das fontes renováveis e não poluentes para geração de energia elétrica, em substituição aos antigos combustíveis fósseis. Dentre as fontes renováveis, a eólica e a fotovoltaica tem sido muito difundidas e estudadas no mundo todo.

Um arranjo fotovoltaico, converte a energia luminosa do sol diretamente em elétrica. Este tipo de geração é muito usado em locais remotos (lugares onde o custo para transmissão de energia é muito alto), zonas rurais, e residências urbanas. Já um arranjo eólico, aproveita a energia cinética dos ventos para geração de potência elétrica. Este tipo de fonte renovável, não é muito usada para gerar eletricidade em residências urbanas, pois em cidades a velocidade do vento é muito baixa, e assim, fica inviável o uso de aerogeradores nestes locais. Porém o uso da eólica pode ser eficiente em zonas rurais onde os índices de velocidade do vento são bem maiores.

Para níveis baixos de geração de energia elétrica, as fontes podem produzir energias das seguintes formas:

- Isolada – Usada mais para atender cargas que não tem rede elétrica em suas proximidades, sendo assim, é necessário o uso de baterias para fazer o armazenamento da potência que será utilizada em períodos que não se tenha geração de energia.
- Distribuída – A fonte é conectada a carga e a rede elétrica. Assim quando a geração for maior que a demanda da carga, potência é injetada na rede. Por outro lado, se a geração não for maior que a potência necessitada pela carga, a rede elétrica irá fornecer a energia faltante para alimentar a demanda elétrica.

Hoje em dia a geração distribuída vem sendo muito incentivada pela ANEEL no Brasil, através da Resolução Normativa nº 482/2012, que trata do *Sistema de Compensação de Energia Elétrica*. Esta resolução propõe que proprietários podem instalar fontes renováveis de geração em suas residências e conectá-las a rede elétrica. Assim, o usuário pode injetar potência na rede elétrica e pagar pela diferença entre a energia consumida e a gerada. Caso a geração seja maior que seu consumo, o proprietário tem sua energia convertida em créditos, que poderão ser descontados na conta a ser paga em períodos posteriores.

Em países da Europa como, por exemplo, Alemanha e Portugal, a geração distribuída é bastante comum, lá os consumidores podem gerar sua energia a partir de fontes renováveis e vender os excedentes de energia as concessionárias locais. Levando em consideração todos benefícios citados a respeito da geração a partir de fontes renováveis, um sistema muito conveniente para o cenário atual é o híbrido.

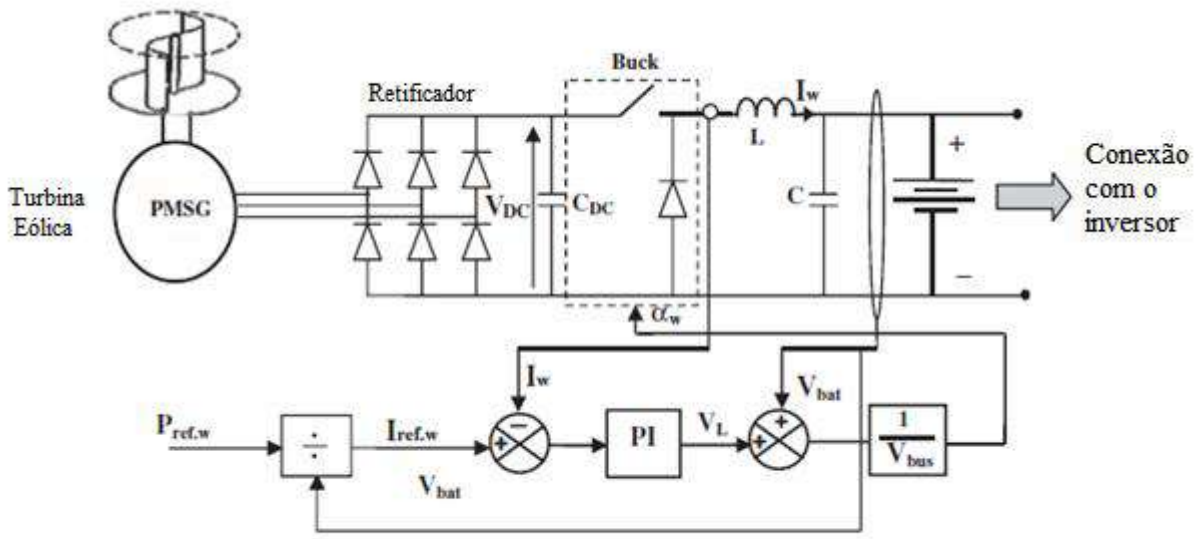
Os sistemas híbridos de geração, tem como seu principal objetivo, promover uma combinação de diferentes tipos de fontes de geração de energia elétrica, possibilitando uma maior flexibilidade em relação a produção de eletricidade, pois cada fonte usada no sistema híbrido gera energia independentemente da outra. Um tipo de sistema híbrido que vem sendo bastante difundido na atualidade é o formado por fontes eólica e fotovoltaica, pois estas apresentam um comportamento bastante peculiar ao atuar em conjunto.

As energias fotovoltaica e eólica são consideradas complementares, pois em períodos em que a velocidade do vento é baixa, a irradiância solar pode ser alta ou vice-versa. O comportamento destas ao longo do dia, também é interessante, pois a noite não se tem irradiância, assim apenas o sistema eólico é capaz de gerar eletricidade neste período. Portanto, a combinação de geração tende a fazer com que sempre se esteja gerando energia, independentemente de as fontes renováveis serem intermitentes

A conexão destas fontes de geração a rede elétrica tem algumas particularidades, no caso de painéis fotovoltaicos é necessário o uso de inversores, pelo fato deste sistema gerar potência em nível contínuo, assim, como a rede elétrica é alternada, o inversor é o responsável por converter os parâmetros de saída do painel de contínuo para alternado. Além do inversor pode se usar conversores CC/CC que serão responsáveis por garantir a extração da máxima potência do arranjo fotovoltaico, e também baixar ou elevar a tensão de saída do painel dependendo da aplicação.

No âmbito deste contexto, os sistemas híbridos envolvendo sistemas solares fotovoltaicos e eólicos são detalhadamente abordados por DALI, M. et al (2010). No caso do sistema fotovoltaico, os autores propõem o uso de um conversor CC/CC tipo *Buck* para extração da

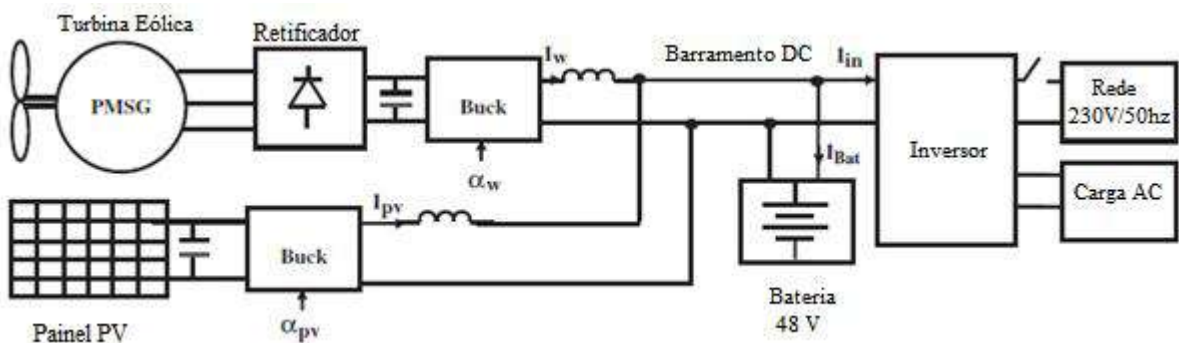
Figura 2.2 – Aerogerador com conversor CC/CCBuck.



Fonte: Adaptado de (DALI, M. et al, 2010).

Com base nessas características, DALI, M. et al (2010) apresentam uma proposta de conexão de um sistema híbrido à rede elétrica, com os arranjos fotovoltaico e eólico compartilhando o mesmo barramento CC, que é conectado a um inversor, para conexão do sistema a rede elétrica. Este esquema pode ser visto de acordo com a Figura 2.3. Neste sistema, também foi incluso o uso de baterias no barramento CC, apenas para estocar energia quando necessário.

Figura 2.3- Sistema híbrido conectado à rede elétrica.

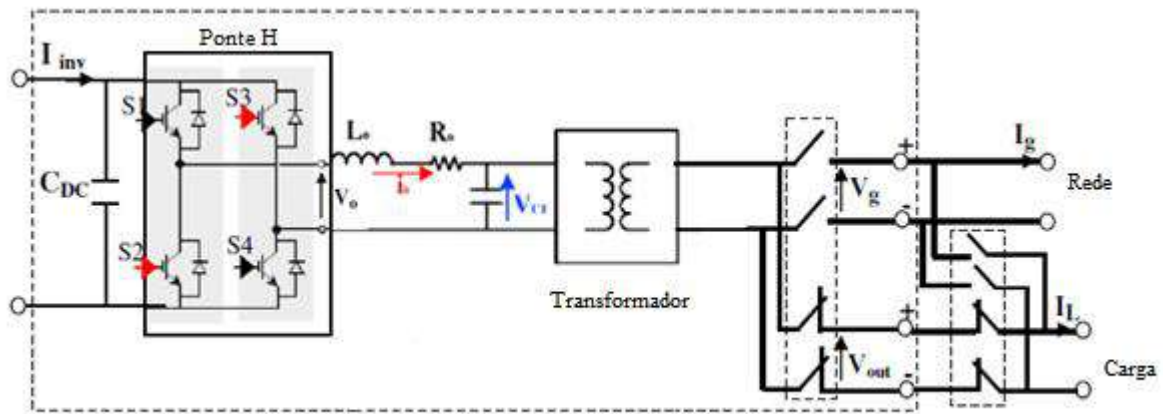


Fonte: Adaptado de (DALI, M. et al, 2010).

DALI, M. et al (2010) ainda mostram como é a conexão do inversor na rede elétrica. Primeiramente se conecta um filtro na saída do inversor, para excluir harmônicos indesejáveis

nas correntes a serem injetadas na rede. Após isto, há a ligação de um transformador elevador para fazer com que a tensão gerada pelo sistema seja compatível com a da rede. Também é proposto conexões de chaves que retiram o sistema conectado à rede, no caso de falta de energia por parte da concessionária, e também fazem o processo inverso no retorno da eletricidade. Este esquema é mostrado na Figura 2.4.

Figura 2.4 – Conexão do inversor à rede elétrica.



Fonte: Adaptado de (DALI, M. et al, 2010).

Em resumo DALI, M. et al (2010), propõem um sistema capaz de gerar energia elétrica para uma carga, e também injetar potências excedentes na rede elétrica. Outra característica importante deste sistema é que, com a rede elétrica sem energia, o sistema híbrido é desconectado da rede elétrica. Quando a alimentação por parte da rede elétrica é reestabelecida, o sistema volta a atuar normalmente de forma distribuída. Contudo, além da configuração proposta pelos autores, existem muitas outras, e algumas destas serão mostradas neste documento.

Nesta seção foi feito um levantamento à respeito do cenário atual em relação aos sistemas híbridos e como se dá o funcionamento destes. Também foi mostrado como se dão a conexão destes a rede elétrica da forma mais completa possível, porém não a única existente. Na próxima seção vão ser mostradas outras configurações para sistemas híbridos, assim como diferentes tipos de equipamentos responsáveis por fazer esta conexão.

2.2 Revisão bibliográfica

Atualmente existem diversas possibilidades para conexão e desenvolvimento de sistemas híbridos, em particular de sistemas fotovoltaicos e eólicos. As configurações de cada sistema, irão depender da finalidade para a qual se quer este, e de quem irá implementá-lo, pois quanto mais completo for o sistema, maior será o custo para sua implementação.

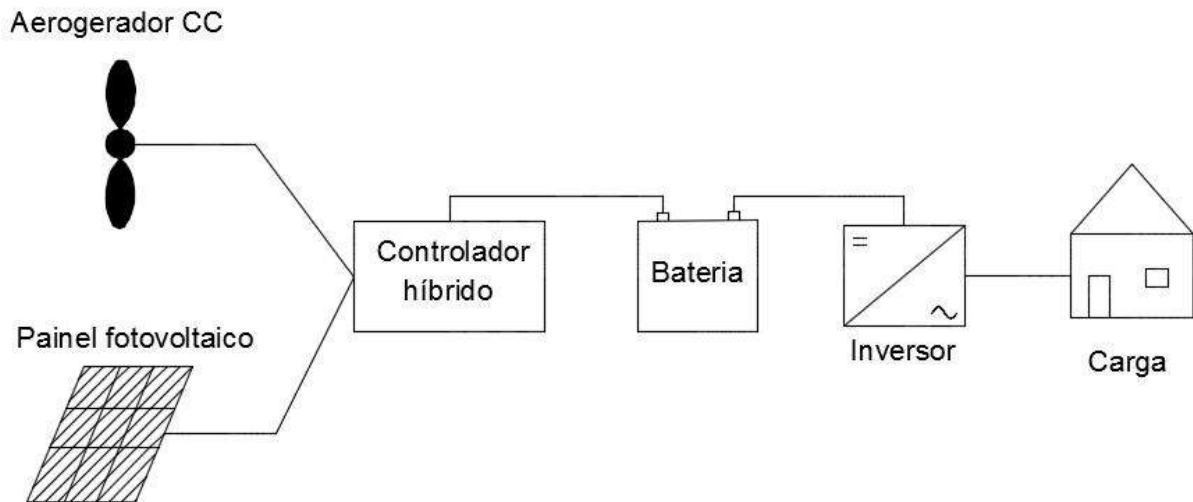
Uma das formas mais simples de projetar um sistema híbrido, é usando painéis fotovoltaicos, aerogeradores de corrente contínua, e baterias compartilhando mesmo barramento CC (sem qualquer controle que possa otimizar a produção de energia elétrica). Este conjunto é ligado diretamente a um inversor conectado a carga, que tem apenas a função de realizar a conversão dos parâmetros de saída (tensão e corrente) do conjunto de CC para CA.

Esta conexão requer um custo não muito elevado comparado às outras formas de ligação, pois não se usa conversores CC/CC. Porém neste esquema, nem toda potência gerada pelas fontes renováveis é fornecida a carga, pelo fato de não existir nenhum tipo de controlador para extração da máxima potência destas fontes.

De forma a desenvolver um sistema híbrido com melhor funcionamento, IOAN, L., e D. MIHAIL, A. (2013) propõem um sistema com painel fotovoltaico, aerogerador de corrente contínua, e bateria compartilhando o mesmo barramento CC, ambos gerenciados por um controlador híbrido, que controla o fluxo de potência vindo do painel fotovoltaico e do aerogerador, fazendo com que, dependendo da energia demandada pela carga, parte da potência gerada pelas fontes renováveis seja estocada na bateria, e a outra seja fornecida a um inversor que é conectado diretamente à carga. Este esquema pode ser observado na Figura 2.5.

Os autores ainda mostram como é dimensionado cada componente deste sistema híbrido, onde, inicialmente, tem-se que conhecer a demanda requerida pela carga no qual o sistema será instalado, para que com isso se dimensione a potência que as fontes de geração irão gerar. Partindo disto, escolhe-se o inversor, o controlador híbrido (capacidade de potência ligeiramente maior que a das fontes renováveis), e por fim é dimensionada a bateria que estocará a energia excedente do sistema.

Figura 2.5 – Sistema híbrido simples.

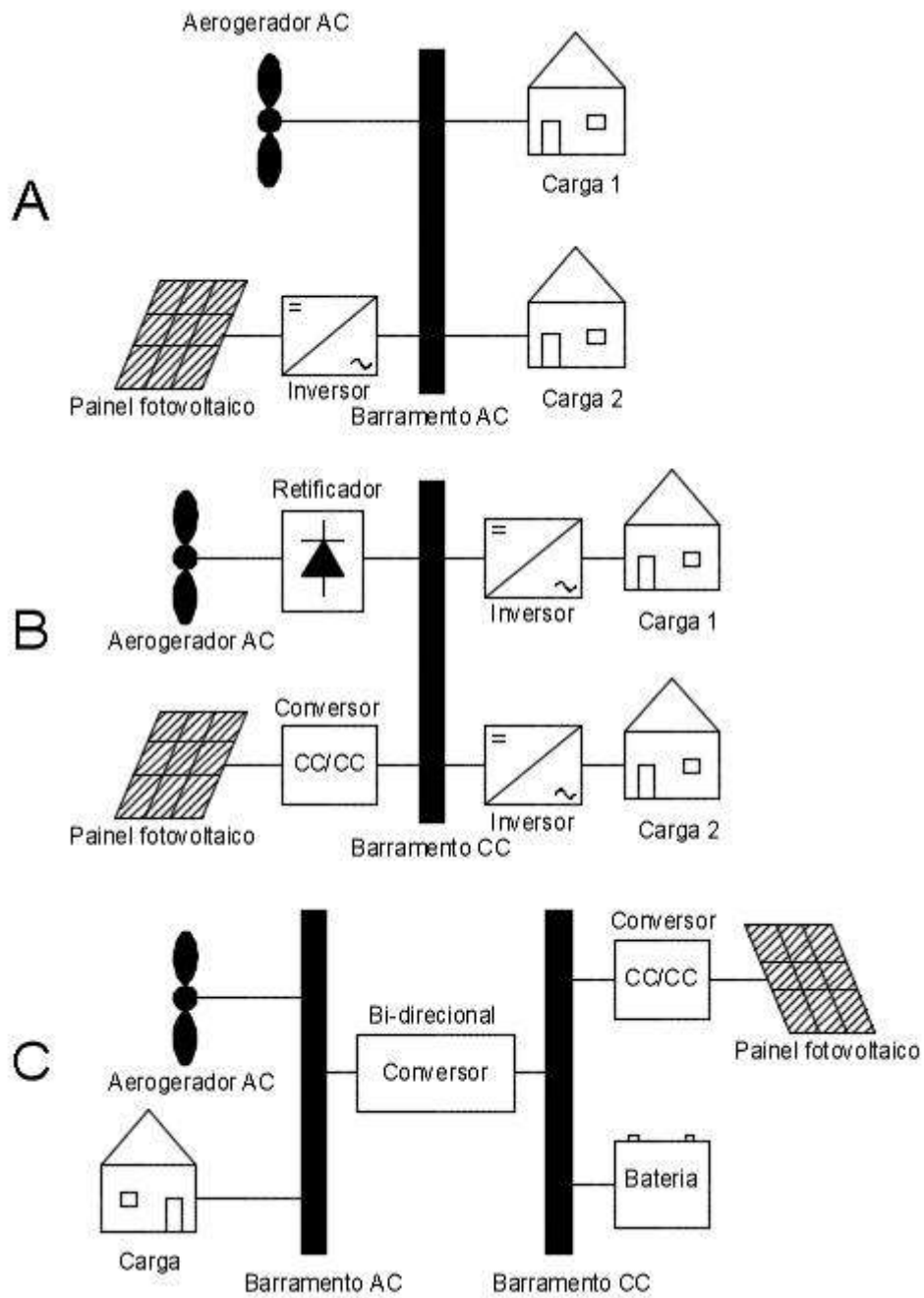


Fonte: Adaptado de (IOAN, L.e D. MIHAIL, A., 2013).

Além das configurações mostradas na Figura 2.5 e na seção 2.1, existem várias outras. Neste cenário se destaca o trabalho apresentado por SUMATHI, S. et al (2015). Os autores mostram distintas conexões possíveis para sistemas híbridos fotovoltaico-eólico conectados em barramentos CC e CA. Estes esquemas podem ser vistos conforme a Figura 2.6.

Sendo assim, cabe ao desenvolvedor do sistema híbrido escolher qual configuração necessita ser usada para suprir sua necessidade, e saber quais equipamentos devem ser utilizados para tal propósito.

Figura 2.6 – Configurações para sistemas híbridos.



Fonte: Adaptado de (SUMATHI, S. et al, 2015).

Na seção a seguir, será mostrada uma nova ideia estudada para o desenvolvimento de sistemas híbridos, onde esta tende a ter várias vantagens em relação as configurações mais tradicionais.

2.2.1 Sistema híbrido fotovoltaico-eólico usando conversor *Cuk-Sepic*

Vários tipos de componentes podem ser usados no desenvolvimento de um sistema híbrido solar/eólico, dentre estes componentes podem se destacar, conversor CC/CC, retificador e inversor. Existem vários tipos de conversores CC/CC como: *Buck*, *Boost*, *Buck-Boost*, *Push-Pull*, *Cuk*, *Sepic*. Já para os inversores e retificadores existem configurações monofásicas e trifásicas.

Os inversores eletrônicos de potência são os componentes chave para sistemas de conversão de energia e gerenciamento da potência nestes sistemas. Para suprir o crescimento de demanda que as redes elétricas necessitam, novos conceitos para inversores são necessários. Um novo conceito para orientação de futuros sistemas de potência é o inversor modular. Este é indicado para modernos sistemas de potência que tem como entrada tanto potência AC como CC de fontes renováveis. (SUMATHI, S. et al, 2015).

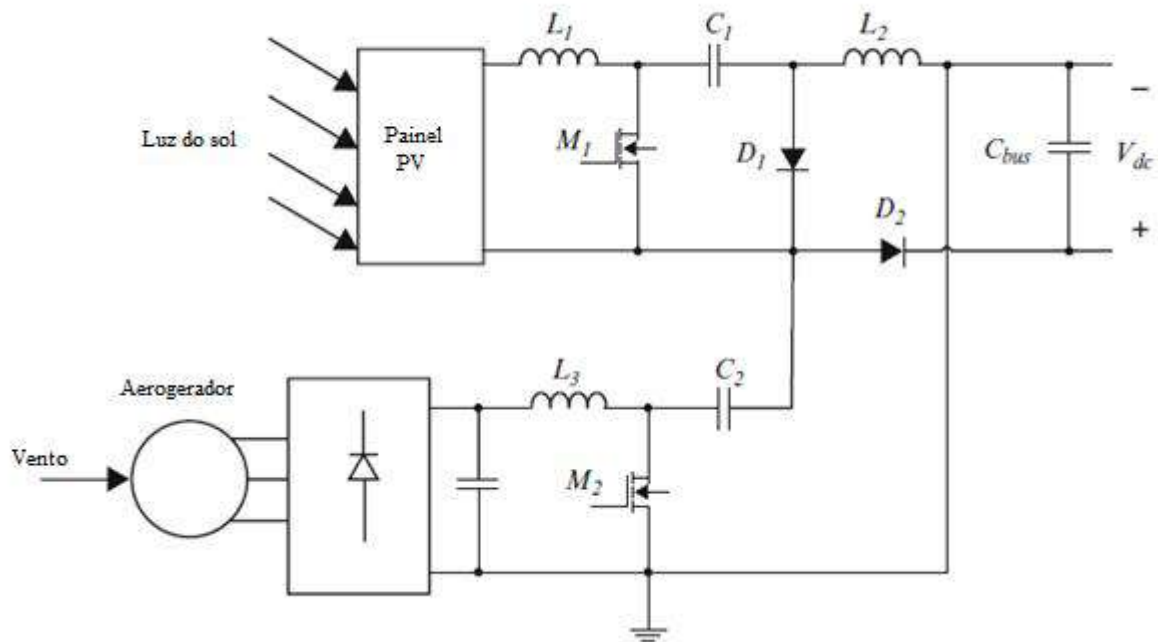
O inversor modular é a combinação de dois diferentes tipos de inversores, e suporta tanto carregamento simétrico como assimétrico. Este tem boa utilidade para sistemas que operam com mais de uma fonte renovável de geração ao mesmo tempo. Sua configuração pode ser de três braços ou três braços com ponto neutro.

Vários sistemas híbridos de potência fotovoltaico-eólico com controlador de máxima potência (MPPT), são usados como já foi dito neste trabalho. Na maioria dos casos, é usado separadamente um conversor CC/CC *Buck* ou *Boost* para cada fonte de geração diferente, porém, existe um conversor que vem sendo bastante estudado por conseguir operar para duas fontes de geração ao mesmo tempo, este é o conversor *Cuk-Sepic*.

O conversor *Cuk-Sepic*, é a combinação dos conversores *Cuk* e *Sepic*, sendo a entrada destes estabilizada (contínua). Este pode ser usado tanto para um painel fotovoltaico, como para um aerogerador ao mesmo tempo, pois possui duas entradas. O controlador para obtenção da máxima potência (MPPT) é implementado apenas no conversor *Cuk*, que assim retira toda energia proveniente das fontes.

SUMATHI, S. et al (2015) propõem o esquema de um conversor *Cuk-Sepic*, de acordo com a Figura 2.7. Pode se observar nesta figura a conexão das duas entradas como já havia sido mencionado. Outro fato a se destacar são os diodos *D1* e *D2* que são os responsáveis por fazer a união dos dois conversores *Cuk* e *Sepic*.

Figura 2.7 – Conversor *Cuk-Sepic*.



Fonte: Adaptado de (SUMATHI, S. et al, 2015).

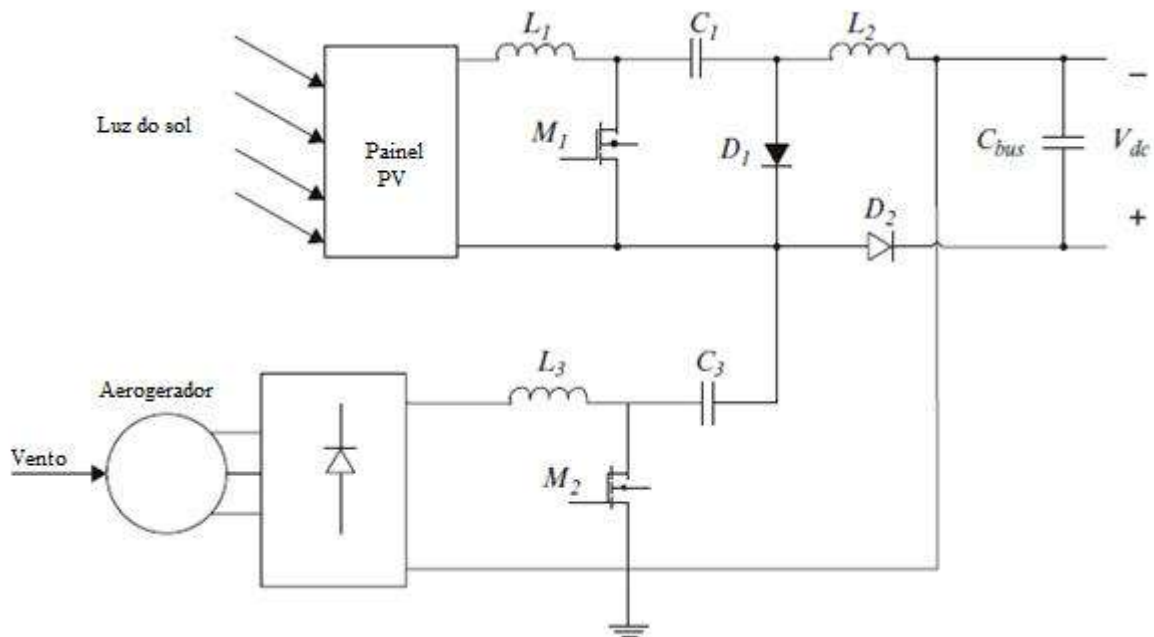
A união dos conversores *Cuk* e *Sepic*, fornece as seguintes vantagens:

- Elimina a alta frequência harmônica em correntes, eliminando assim a precisão do uso de filtro na conexão do inversor com a rede elétrica.
- Permite a operação individual e simultânea das fontes de geração.
- Pode ser usado por duas fontes de geração ao mesmo tempo.

Segundo SUMATHI, S. et al (2015), quando o conversor *Cuk-Sepic* opera apenas com a ação do aerogerador gerando energia, o diodo *D1* não conduz, já o diodo *D2* conduz, assim para este caso, o conversor opera como se fosse apenas um *Sepic*. Esta situação pode ser observada de acordo com a Figura 2.8.

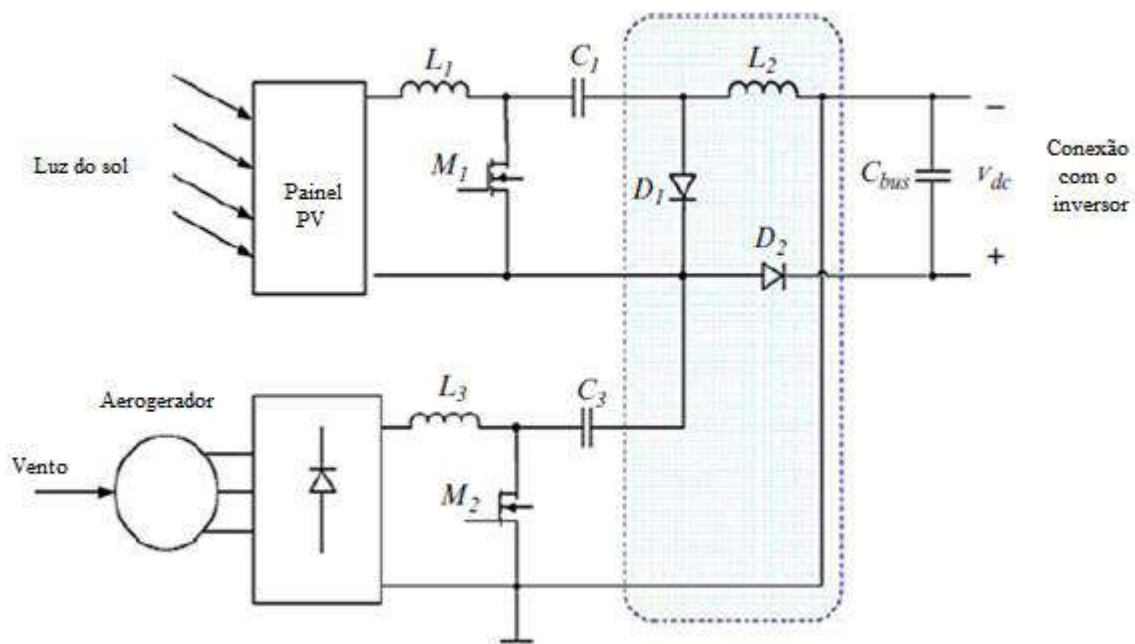
Já quando o conversor *Cuk-Sepic* opera apenas com o painel fotovoltaico gerando energia, o diodo *D1* conduz, e o *D2* não, assim o conversor atua como se fosse apenas um *Cuk*. Com isso, tendo em vista estas duas situações, fica claro perceber que quando as duas fontes geram energia os dois diodos estão conduzindo e o conversor atua de forma completa. Esta situação é mostrada de acordo com a Figura 2.9.

Figura 2.8 – Funcionamento do *Cuk-Sepic* apenas com aerogerador.



Fonte: Adaptado de (SUMATHI, S. et al, 2015).

Figura 2.9 - Funcionamento do *Cuk-Sepic* com as duas fontes atuando.



Fonte: Adaptado de (SUMATHI, S. et al, 2015)

A proposta principal deste trabalho, é desenvolver os arranjos fotovoltaico e eólico e conectá-los no mesmo barramento CC, para que assim possa ser feita uma análise do comportamento dinâmico do sistema para diferentes cenários de simulação. O próximo capítulo irá mostrar como os arranjos fotovoltaico e eólico são desenvolvidos, e como estes se comportam de forma individual.

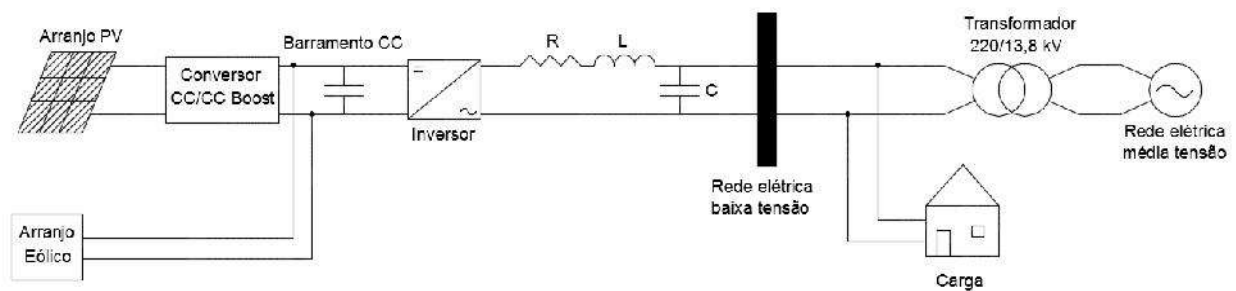
3 O SISTEMA HÍBRIDO SOLAR FOTOVOLTAICO/EÓLICO

Neste capítulo, serão apresentados os principais componentes de um sistema híbrido de geração de energia elétrica, constituído por um arranjo de painéis fotovoltaicos e geradores eólicos.

3.1 Componentes do sistema híbrido

O sistema proposto para estudo neste trabalho é mostrado na Figura 3.1.

Figura 3.1- Sistema completo.



Fonte: Do autor.

Como pode se observar na Figura 3.1 o sistema de estudo deste trabalho é composto por:

- Arranjos fotovoltaico e eólico compartilhando o mesmo barramento CC.
- Conversor CC/CC, onde é implementado o MPPT para extração e controle da máxima potência do arranjo fotovoltaico.
- Inversor, responsável por fazer o controle da tensão no barramento CC.
- Filtro RLC, que tem por função filtrar os harmônicos das tensões e correntes que serão injetadas na rede.
- Carga e rede elétrica.

Neste capítulo será feito um detalhamento de todos componentes citados anteriormente, porém o enfoque maior será no desenvolvimento dos arranjos fotovoltaico e eólico.

3.2 Arranjo fotovoltaico

O painel fotovoltaico é constituído, basicamente, por um arranjo adequado de células de silício, dopadas com fósforo e boro. Geralmente, em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica se tem a necessidade de usar painéis conectados em série e em paralelo para a obtenção de níveis de tensão, corrente e, conseqüentemente, potência, compatíveis com o projeto de geração desejado. Assim nos dois tópicos seguintes serão abordados, primeiramente, como o arranjo de painéis fotovoltaico é modelado matematicamente, e após isto, será mostrada a construção desse modelo para simulação computacional utilizando a ferramenta *Simpowersystems*[®] associado ao SIMULINK[®] que acompanha o software MATLAB[®].

3.2.1 Modelagem Matemática do Arranjo Fotovoltaico

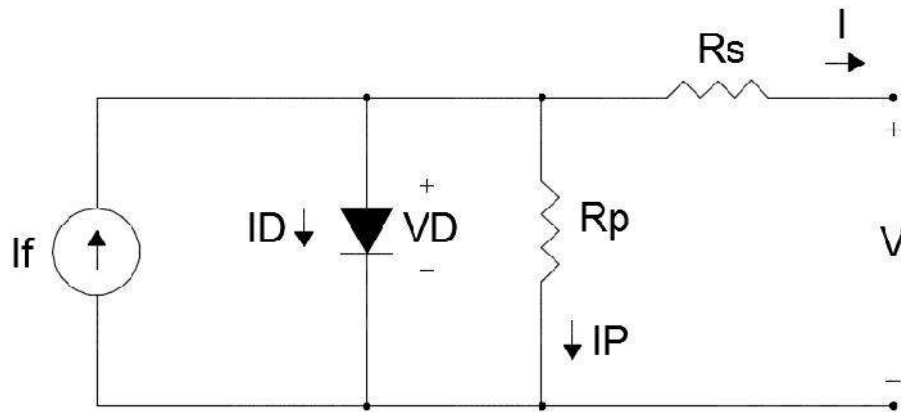
O circuito equivalente de um painel pode ser visto na Figura 3.2. A partir deste circuito são obtidas todas as equações que modelam o funcionamento elétrico da célula, e também, são por estas equações, que os modelos computacionais são desenvolvidos. Pode-se notar que a corrente fotogerada I_f é quem determina os níveis de tensão V e corrente I na saída da célula.

Se tratando de projetos elétricos reais, deve ser feito um estudo climático do local onde serão instalados os painéis, para que seja obtido de maneira mais fiel possível o nível de irradiância que incidirá no arranjo dos painéis fotovoltaicos no local onde eles forem instalados, pois a corrente fotogerada é diretamente proporcional à esta grandeza, e sendo assim, todos os parâmetros de saída do conjunto como tensão, corrente e, potência também são. Vale destacar que a corrente elétrica é muito mais sensível a variações de irradiância do que a tensão, ou seja, se a irradiância aumenta, o aumento de corrente é maior que o de tensão.

O estudo climático, também é importante para se fazer a análise da temperatura média do local, pois a corrente fotogerada é inversamente proporcional a esta grandeza, e conseqüentemente, todos os parâmetros de saída do arranjo como tensão, corrente e, potência também são. Para este caso a tensão é mais sensível à variação de temperatura do que a corrente, ou seja, se a temperatura aumenta, a tensão tende a ter uma queda maior que a corrente elétrica.

Assim, para os dois casos citados anteriormente, pode-se perceber que a potência gerada pelo painel fotovoltaico sempre mudará, no primeiro caso, proporcionalmente à corrente fotogerada e no segundo caso, inversamente a esta. Com isto, pode-se perceber a importância do conhecimento da irradiância local para definição dos limites de temperatura dos painéis, de acordo com o projeto a ser realizado.

Figura 3.2– Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica.¹



Fonte: Do autor.

Ao diodo do circuito da Figura 3.2 está associada a corrente de saturação I_0 do painel fotovoltaico. A fonte de corrente fotogerada e o diodo já seriam suficientes para modelagem da célula, porém para uma representação mais real desta, são adicionadas ao circuito resistências em série, R_s , e em paralelo, R_p , que representam as perdas referentes a correntes parasitas, geradas por inconformidades no processo de fabricação da célula ou impurezas em seu material, e as perdas nos contatos entre ligação da célula fotovoltaica e as cargas elétricas que serão conectadas, respectivamente.

Assim, observando o circuito equivalente da Figura 3.2 e aplicando a ele as leis de Kirchoff, pode-se obter a equação 3.1, que é a primeira equação do modelo, relacionando a tensão de saída V do painel, a corrente de saída I , a resistência série R_s , e a tensão no diodo V_D .

$$V = V_D - IR_s \quad (3.1)$$

Onde a tensão sobre o diodo é dada pela equação 3.2, a seguir:

$$V_D = m.V_T \cdot \ln \left(\frac{I_f + I_0 - I - I_p}{I_0} \right) \quad (3.2)$$

¹ Este circuito também é utilizado, para se verificar o desempenho de uma única célula fotovoltaica.

Com m sendo, o fator de idealidade nominal do diodo m^r fornecido pelo fabricante do painel, multiplicado pelo número de células N_{cel} do painel, conforme a equação 3.3; I_P a corrente que passa pelo resistor em paralelo; e V_T o potencial térmico, que é obtido através da equação 3.4, em função da temperatura T (°K), da constante de Boltzman k e a carga do elétron q .

$$m = m^r . N_{cel} \quad (3.3)$$

$$V_T = \frac{k.T}{q} \quad (3.4)$$

Realizando a combinação das equações 3.1 e 3.2, se obtém a equação 3.5, que é a tensão de saída do painel fotovoltaico.

$$V = m . \frac{kT}{q} . \ln \left(\frac{I_f + I_0 - I - I_P}{I_0} \right) \quad (3.5)$$

Todos os parâmetros de um painel fotovoltaico (tensão, corrente e potência), são calculados tomando como base os parâmetros nominais do painel fornecido por cada fabricante, onde estes parâmetros são a tensão de circuito aberto do painel V_{oc}^r , a corrente de curto-circuito I_{sc}^r , e a tensão e corrente no ponto de máxima potência do painel, que são respectivamente V_{pmax}^r e I_{pmax}^r . Também é levado em conta o potencial térmico nominal do painel V_T^r , que é obtido da forma como é mostrada na equação 3.5, porém considerando a temperatura nominal do painel T^r (°K).

Os coeficientes de temperatura de tensão K_V , e corrente K_I , do painel fotovoltaico, também são considerados para obtenção dos parâmetros deste. Estes coeficientes são de extrema importância para o estudo do desempenho do painel em situações de variação de temperatura, pois estes nas equações que serão mostradas a seguir, estão sempre associados a diferença de temperatura Δ_T , que é a diferença entre a temperatura do local onde está o painel fotovoltaico e a temperatura STC (*Standard Temperature Conditions*) do painel. Esta variação de temperatura é mostrada na equação 3.6.

$$\Delta_T = T - T^r \quad (3.6)$$

Assim, tomando como base todos os parâmetros mostrados anteriormente, a corrente fotogerada é calculada a partir dos parâmetros nominais já mencionados fornecidos pelo fabricante, tendo em conta também a irradiância G do local onde os painéis serão instalados e a irradiância STC do painel G^r . Desta forma a corrente fotogerada é obtida conforme a Figura 3.7 (SUMATHI, S.t al, 2015).

$$I_f = (I_{sc}^r + K_I \Delta T) \cdot \frac{G}{G^r} \quad (3.7)$$

Geralmente, a corrente de saturação do diodo de referência do painel I_0^r , não é fornecida pelo fabricante, porém, esta pode ser obtida pela equação 3.8 (SUMATHI, S.t al, 2015), que mostra como se obter está de forma indireta, levando em conta os parâmetros de referência fornecidos pelo fabricante do painel.

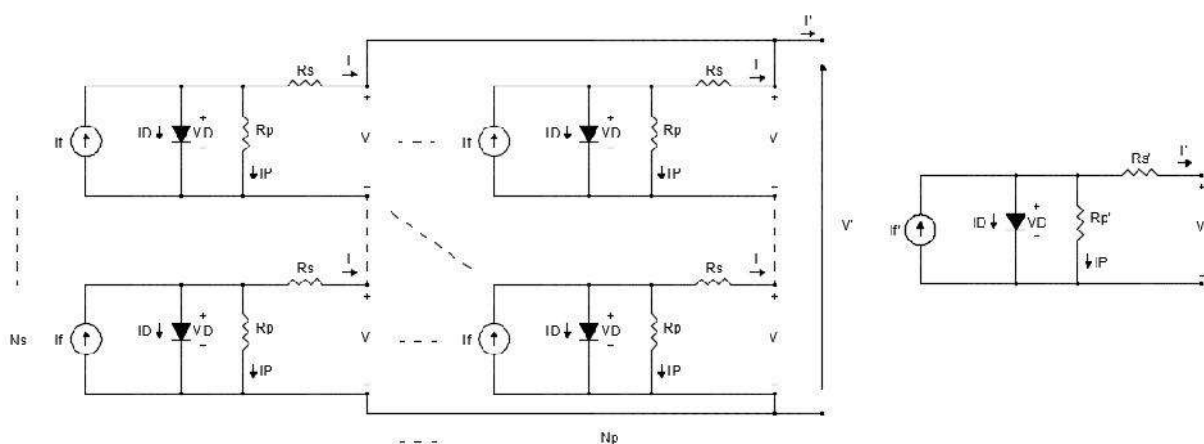
$$I_0^r = \frac{(I_{sc}^r + K_I \Delta T)}{\exp\left(\frac{V_{oc}^r + K_V \Delta T}{m V_T^r}\right) - 1} \quad (3.8)$$

Tendo a corrente de saturação nominal do diodo I_0^r , tem-se que modelar está considerando a influência da temperatura sobre o painel. Esta corrente é obtida conforme a equação 3.9 (SUMATHI, S.t al, 2015). Onde N_{cel} é o número de células contidas em cada painel, e E_g é a energia de *gap*, que nada mais é do que a energia capaz de fazer começar a se gerar eletricidade, esta energia tem valor igual à 1,12eV (elétron-Volt).

$$I_0 = I_0^r \left(\frac{T}{T^r}\right)^3 \cdot \exp\left(N_{cel} \cdot \frac{E_g}{m} \cdot \left(\frac{1}{V_T^r} - \frac{1}{V_T}\right)\right) \quad (3.9)$$

Estando com todos os parâmetros que modelam o comportamento individual de cada painel, pode-se utilizá-los como base para o modelo do arranjo fotovoltaico equivalente de vários painéis que serão ligados em série e em paralelo, de acordo com a funcionalidade do projeto a ser executado. Esta associação é claramente mostrada na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Arranjo fotovoltaico equivalente.



Fonte: Do autor.

Na Figura 3.3, pode-se observar o arranjo fotovoltaico equivalente, e nele seus parâmetros equivalentes que são a corrente fotogerada I'_f , as resistências série e paralelo respectivamente R'_s e R'_p , a corrente no diodo I_D , e os parâmetros de saída do painel, que são a corrente I' , e a tensão V' .

Para desenvolvimento do arranjo fotovoltaico equivalente, tem-se que levar em conta o número de painéis em série N_s e em paralelo N_p , para remodelar os parâmetros modelados anteriormente. Um ponto importante a se destacar é que quanto maior for o número de painéis em série, maior será a tensão gerada pelo arranjo, e quanto maior o número de painéis em paralelo maior vai ser a corrente gerada pelo arranjo.

Para remodelar as equações da corrente fotogerada I_f , e da corrente de saturação do diodo I_0 , basta multiplicar respectivamente as equações 3.7 e 3.9 pelo número de painéis em paralelo N_p . As equações que mostram está remodelagem são as equações 3.10 e 3.11 respectivamente.

$$I'_f = N_p \cdot I_f \quad (3.10)$$

$$I'_0 = N_p \cdot I_0 \quad (3.11)$$

O fator de idealidade do diodo m , também é remodelado de maneira muito simples, bastando apenas multiplicar o fator de idealidade considerado anteriormente pelo número de painéis em série N_s , do arranjo. A remodelagem é mostrada na equação 3.12.

$$m' = N_s . m \quad (3.12)$$

O número de painéis em série e paralelo, influenciam também nos valores das resistências série R_s , e paralelo R_p do painel, assim estas têm que ser remodeladas para obtenção do modelo equivalente do arranjo fotovoltaico. Os novos modelos das resistências são expressos conforme as equações 3.13 e 3.14.

$$R'_s = \frac{N_s}{N_p} R_s \quad (3.13)$$

$$R'_p = \frac{N_s}{N_p} R_p \quad (3.14)$$

Feitas todas modificações para representação do arranjo fotovoltaico equivalente, podem-se, então, obter a corrente que passa pelo diodo I_D , e a corrente equivalente do circuito I' , que para este trabalho será de extrema importância para realização da modelagem computacional do sistema fotovoltaico. Estas correntes são representadas, respectivamente, de acordo com as equações 3.15 e 3.16.

$$I_D = I'_0 \left(e^{\left(\frac{V_D}{mV_T} \right)} - 1 \right) \quad (3.15)$$

$$I' = I'_f - I_D - \frac{V_p + R'_s I}{R'_p} \quad (3.16)$$

Assim, todas as equações mostradas até aqui irão contribuir para modelagem computacional que será desenvolvida neste trabalho, e que terá como princípio básico, a reprodução do circuito equivalente da Figura 3.3, através de todas as equações mostradas anteriormente.

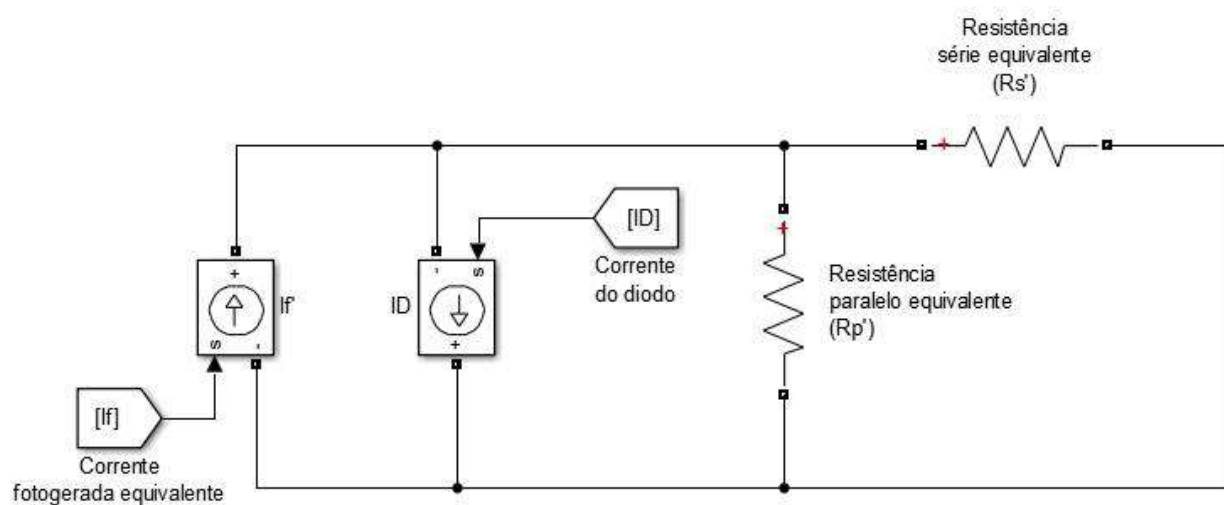
O próximo tópico mostrará como fazer a implementação computacional do arranjo fotovoltaico, a partir de todas as equações mostradas anteriormente.

3.2.2 Desenvolvimento do arranjo de painéis fotovoltaico no SIMULINK®

O modelo matemático do arranjo fotovoltaico descrito no tópico 3.2.1 foi implementado no ambiente SIMULINK® do software MATLAB®, tendo como base a *toolbox SimPowerSystems*¹.

Inicialmente foi modelado um circuito geral, que simula o circuito equivalente do arranjo fotovoltaico, conforme o circuito equivalente mostrado na Figura 3.4. Este primeiro passo pode ser visto na Figura 3.4.

Figura 3.4 – Modelo computacional do circuito equivalente do arranjo fotovoltaico.



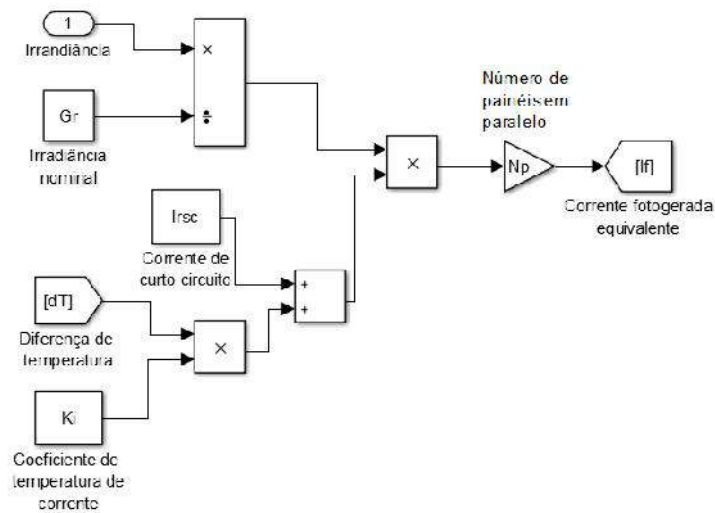
Fonte: Do autor.

As resistências série R_s' e paralelo R_p' foram modeladas conforme as equações 3.13 e 3.14. Para realização da modelagem completa do circuito da Figura 3.4, será feito a reprodução das correntes I_f' e I_D usando todas as equações vistas na seção anterior, e também as bibliotecas mencionadas no início desta seção, pois estas correntes serão os parâmetros de entrada que completam o circuito mostrado na figura.

Para modelagem da corrente fotogerada I_f' , as equações a serem reproduzidas são as equações 3.7 e 3.10 nesta sequência, onde na Figura 3.5, pode-se observar a reprodução desta corrente.

¹ A *toolbox SimPowerSystems* pode implementar diversos componentes elétricos, modelos equivalentes de fontes renováveis, e muitos outros blocos associados a circuitos elétricos e sistemas elétricos de potência.

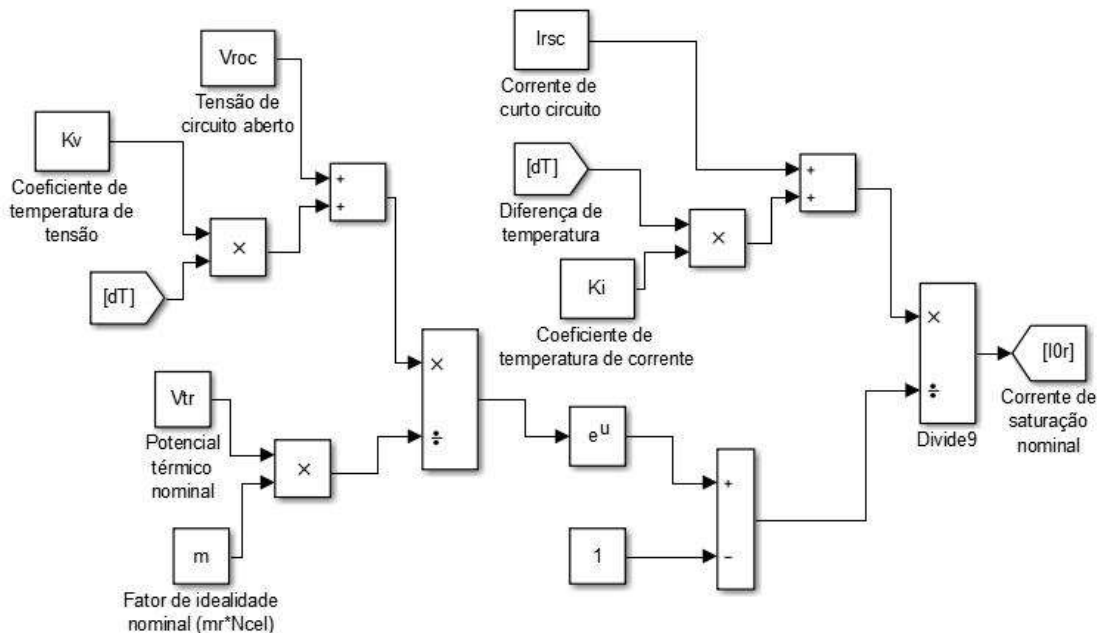
Figura 3.5 – Modelo da corrente fotogerada.



Fonte: Do autor.

Já a modelagem da corrente no diodo I_D , é dividida em algumas etapas, inicialmente se modela a corrente de saturação do diodo conforme a equação 3.8, que é equivalente a corrente de saturação de referência do painel em questão. Este modelo é mostrado na Figura 3.6.

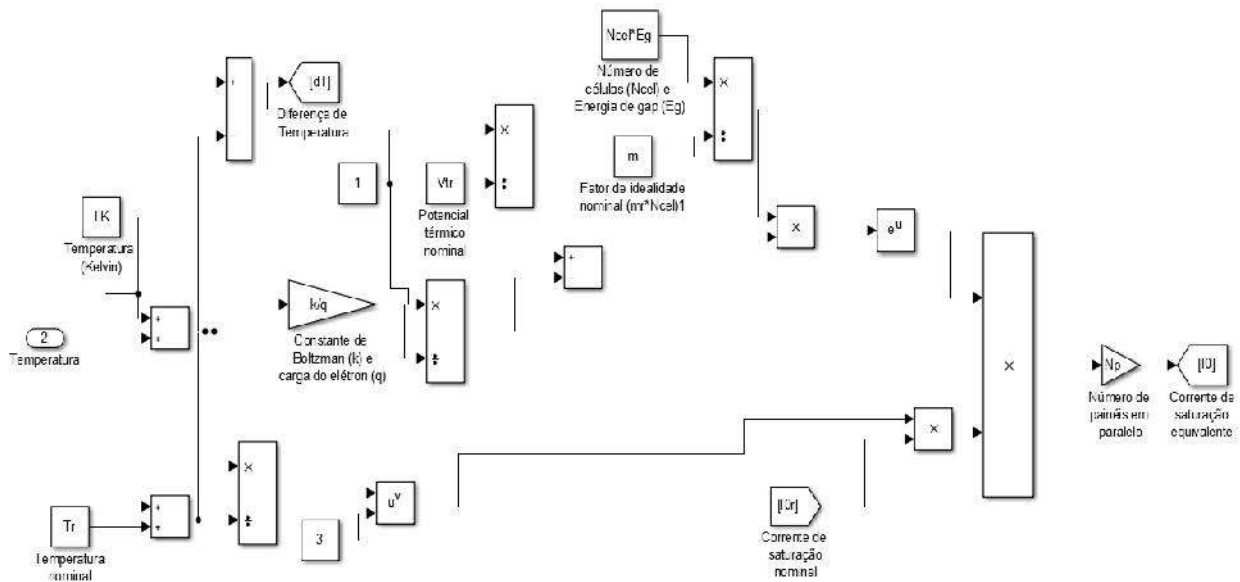
Figura 3.6 – Modelo inicial da corrente de saturação do diodo.



Fonte: Do autor.

Feito isto, modela-se a corrente de saturação do diodo levando em conta as influências de temperatura sobre o painel, para realização desta modelagem, tudo que tem que se fazer é reproduzir a equação 3.9 mostrada na seção anterior. A modelagem desta corrente pode ser vista na Figura 3.7.

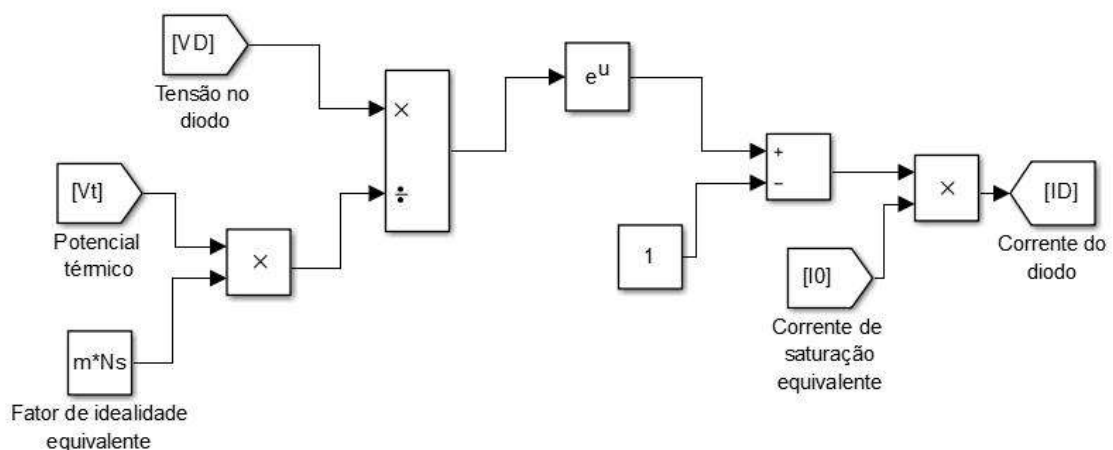
Figura 3.7 – Modelo da corrente de saturação com influência da temperatura.



Fonte: Do autor.

Realizados os dois modelos anteriores, pode-se fazer então a modelagem da corrente do diodo I_D de acordo com a equação 3.15. Esta modelagem é mostrada na Figura 3.8.

Figura 3.8 – Modelo da corrente do diodo.

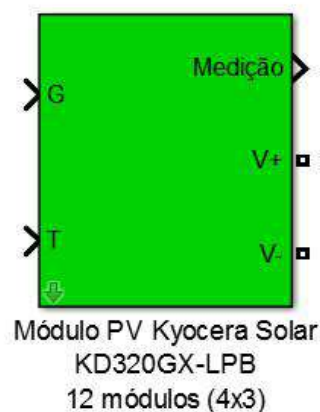


Fonte: Do autor.

As figuras anteriores mostram como cada parâmetro individual foi modelado, porém todos eles estão conectados de alguma forma, ao circuito equivalente da Figura 3.4. Assim, realizado todos os passos anteriores, pode-se criar um bloco equivalente para o arranjo fotovoltaico conforme está mostrado na Figura 3.9. A vantagem disto é se ter um modelo mais compacto e organizado, tanto para representação, quanto para manuseio do arranjo durante a simulação.

Pela Figura 3.9, pode-se observar que o bloco tem como parâmetros de entrada a irradiância G , temperatura T do local onde serão instalados o arranjo painel fotovoltaico e os parâmetros de referência do painel dado por cada fabricante como será mostrado a seguir. Na saída *Medição*, vão ser fornecidos os dados de potência, corrente, e tensão do arranjo fotovoltaico completo, e os outros dois terminais de tensão positivo V^+ e negativo V^- , servirão para simulação do arranjo ligado diretamente numa carga ou a uma rede elétrica.

Figura 3.9 – Bloco do arranjo fotovoltaico.



Fonte: Do autor.

3.2.3 Curva característica do painel modelado

O modelo de painel fotovoltaico escolhido para este trabalho se encontra na biblioteca *SimPowerSystems/SpecializedTechnology/Renewables/SolardoMATLAB*^{®2016a}, onde existem vários dados de painéis fotovoltaicos de diferentes fabricantes. Para este trabalho, o painel, cujas especificações de referência foram tomadas, foi o modelo *Kyocera* KD 320 GX – LPB, pois este painel possuía os parâmetros mais adequados para garantia de um funcionamento adequado do sistema em estudo.

Assim, a partir da escolha do painel, foi criada uma máscara para o bloco mostrado anteriormente na Figura 3.9, para que a partir desta possam ser colocados os parâmetros

nominais de qualquer tipo de painel fotovoltaico que se deseje simular. Os parâmetros nominais do painel referência escolhido para este trabalho, são os mostrados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Parâmetros do painel Kyocera KD 320 GX – LPB.

PARÂMETROS DO PAINEL KYOCERA KD 320 GX – LPB	
Tensão de circuito aberto (V_{roc})	49,5 V (volts)
Corrente de curto circuito (I_{rsc})	8,6148 A (amperes)
Tensão no ponto de máxima potência (V_{rpm})	40,1 V (volts)
Corrente no ponto de máxima potência (I_{rpm})	7,99 (amperes)
Potência máxima (P_{rmax})	320,4 (watts)
Temperatura padrão de operação (T_r)	25°C
Irradiação padrão de operação (G_r)	1000 W/m ²
Número de células (N_{cel})	80
Resistência série (R_s)	0,40954 (ohms)
Resistência paralelo (R_p)	238,5428 (ohms)
Número de painéis em série (N_s)	4
Número de painéis em paralelo (N_p)	3
Coefficiente de temperatura de tensão (K_V)	-0,37 (% V/°C)
Coefficiente de temperatura de corrente (K_I)	0.041 (% A/°C)

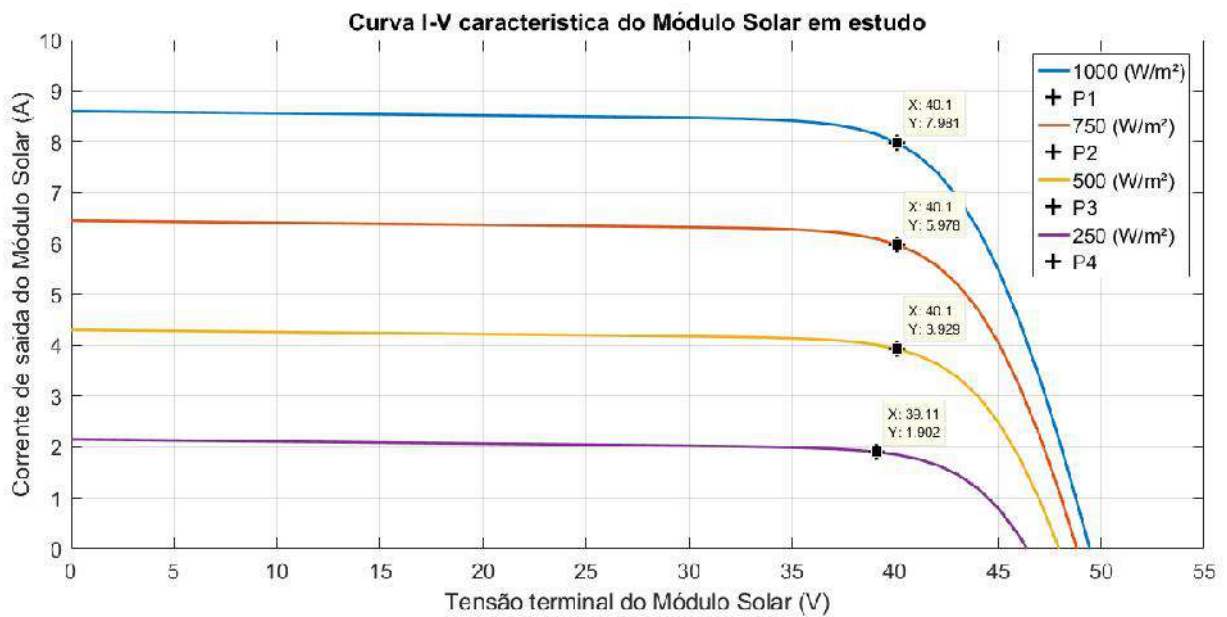
Fonte: Do autor

Tomando como base os parâmetros nominais do painel escolhido, é importante destacar que para garantir um funcionamento adequado da rede elétrica adotada neste trabalho, necessita-se ter um arranjo fotovoltaico de 4 painéis em série e 3 em paralelo, totalizando um total 12 módulos fotovoltaicos conforme as especificações acima.

Assim, para a correta adequação do arranjo de painéis, foram geradas inicialmente as curvas IXV e PXV de um único painel para uma temperatura de 25°C, considerando diferentes níveis de irradiância. Os resultados para esta primeira simulação são mostrados nas Figuras 3.10 e 3.11 respectivamente. Nestas curvas pode-se observar o comportamento da tensão, corrente e

potência do painel fotovoltaico em seus respectivos pontos de máxima potência para cada nível de irradiância.

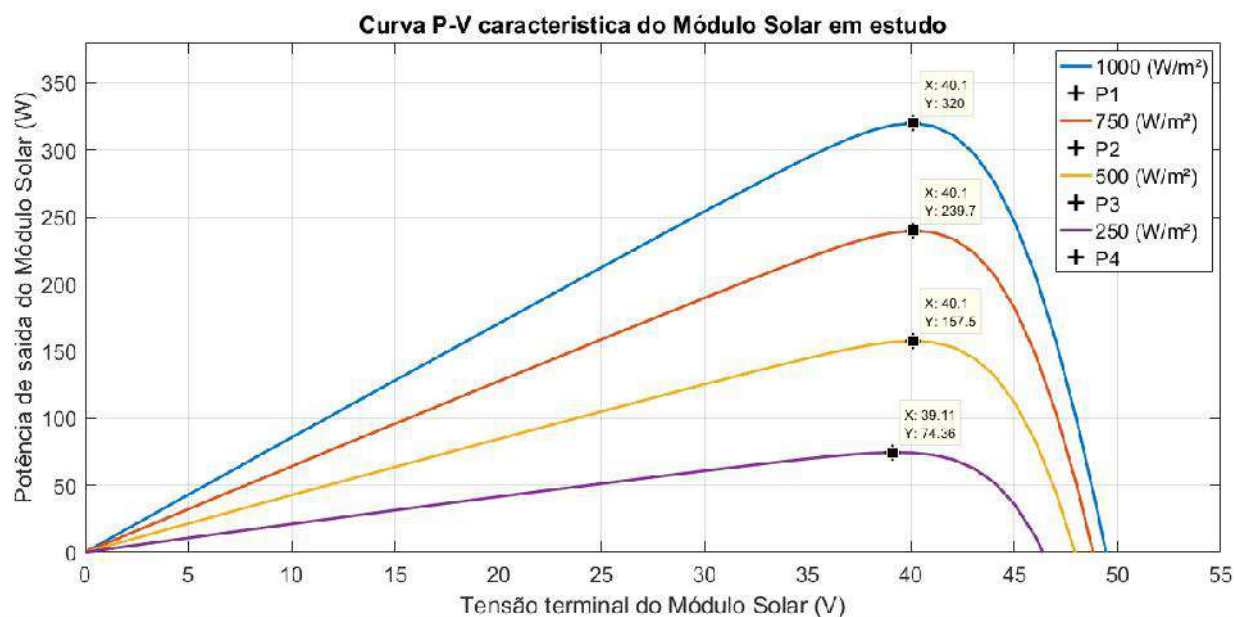
Figura 3.10 – Curvas IxV do painel à 25°C.



Fonte: Do autor.

Na figura 3.10, é possível observar o comportamento já descrito neste trabalho, onde os parâmetros de saída (tensão e corrente elétrica) são proporcionais ao nível de irradiância, ou seja, à medida que a irradiância cai, os níveis de corrente e tensão tendem a diminuir, e quando a irradiância sobe os mesmos parâmetros tendem a aumentar. Neste caso, como também já foi comentado, a corrente é muito mais sensível a mudança de irradiância que a tensão, ou seja, a corrente varia notavelmente com a mudança de irradiância, ao contrário da tensão que não varia muito, como se pode constatar na respectiva figura.

Figura 3.11 – Curvas PxV do painel à 25°C.



Fonte: Do autor.

Na Figura 3.11, pode-se observar que a potência cai consideravelmente com a diminuição de irradiância. Também é possível observar que a máxima potência do painel na sua irradiância nominal é atingida com precisão justamente nos seus valores de tensão e corrente nominais de máxima potência. Os resultados completos das Figuras 3.10 e 3.11, são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Resultados à 25°C.

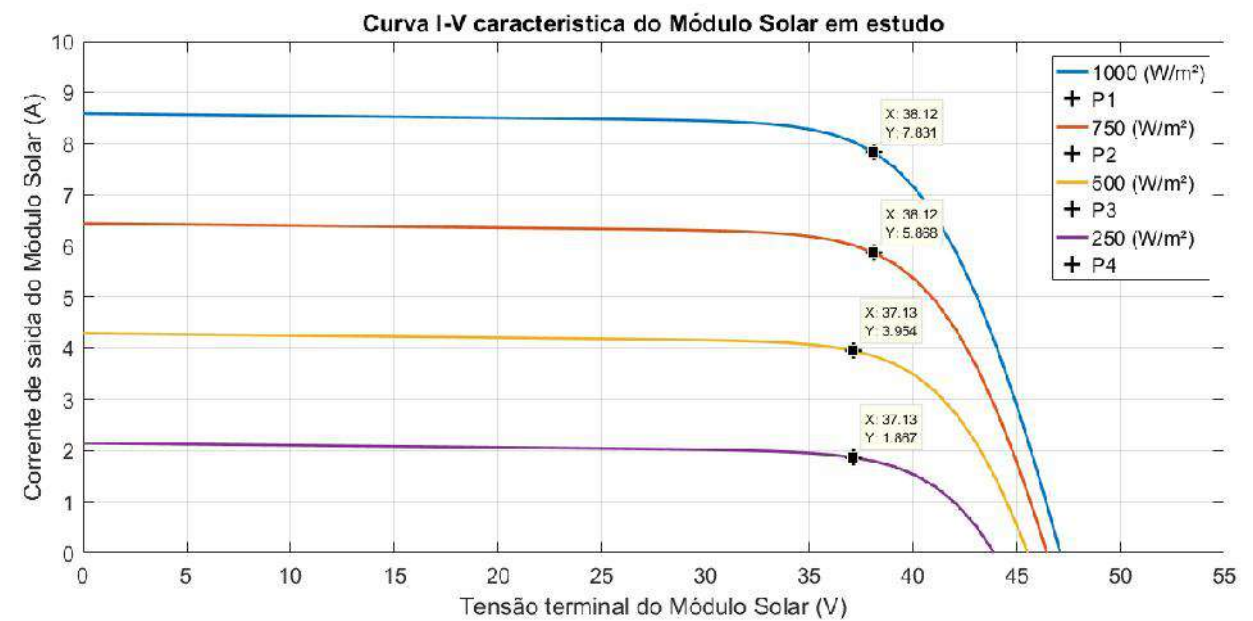
RESULTADOS À 25°C			
IRRADIÂNCIA (W/M²)	VMAX (V)	IMAX (A)	PMAX (W)
1000	40,1	7,981	320,038
750	40,1	5,978	239,718
500	40,1	3,929	157,553
250	39,11	1,902	74,387

Fonte: Do autor.

É importante também mostrar o comportamento do painel, não só para variações de irradiância, mas também para variação de temperatura, sendo assim, nas Figuras 3.12 e 3.13,

respectivamente, são mostradas as curvas IXV e PXV do painel, em questão, para uma temperatura de 40°C , e diferentes níveis de irradiância. Com isto, é possível se analisar todos os resultados obtidos em relação aos parâmetros de tensão, corrente e potência do painel em questão nos pontos de máxima potência deste.

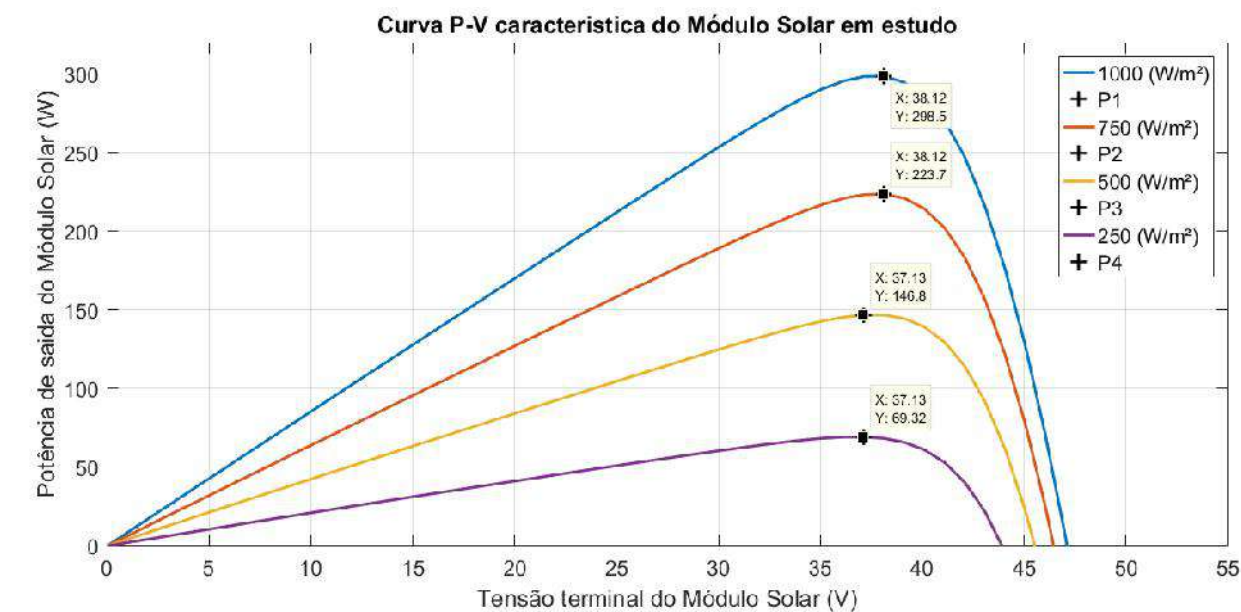
Figura 3.12 – Curvas $I \times V$ do painel à 40°C .



Fonte: Do Autor.

Fazendo uma comparação da figura 3.12 com a Figura 3.10, pode-se perceber que os parâmetros de tensão e corrente do painel são inversamente proporcionais a variação de temperatura, ou seja, quanto mais a temperatura sobe, os parâmetros de tensão e corrente tendem a diminuir, e quanto mais a temperatura desce, mais estes parâmetros tendem a aumentar, porém, para este caso, é a tensão que varia mais consideravelmente em relação a variação de temperatura, enquanto que a corrente varia menos. Também é possível observar o comportamento em relação a variação de irradiância já abordado anteriormente.

Figura 3.13 – Curvas PxV do painel à 40°C.



Na figura 3.13, pode-se observar uma diminuição considerável na potência do painel não só pela queda da irradiância, como, principalmente, pelo aumento de temperatura. Em relação às potências mostradas na Figura 3.11 se tem uma queda média de 20 W da potência gerada pelo painel para cada nível de irradiância mostrado. Uma melhor representação dos resultados obtidos nas Figuras 3.12 e 3.13 é mostrada detalhadamente na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Resultado à 40°C.

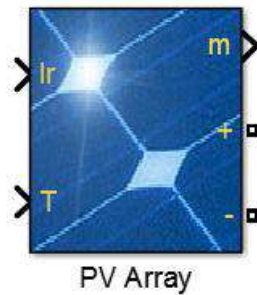
RESULTADOS À 40°C			
IRRADIÂNCIA (W/M ²)	VMAX (V)	IMAX (A)	PMAX (W)
1000	38,12	7,831	298,518
750	38,12	5,868	223,688
500	37,13	3,954	146,812
250	37,13	1,867	69,322

Fonte: Do autor.

Para comprovação dos resultados obtidos com o modelo fotovoltaico desenvolvido neste documento, pode-se fazer uma comparação destes com os gerados pelo modelo do próprio

MATLAB[®]. Assim, se os resultados de ambos modelos convergirem tem-se a comprovação de que o arranjo fotovoltaico desenvolvido neste trabalho funciona de forma correta. O bloco do modelo fotovoltaico do MATLAB[®], é mostrado na Figura 3.14.

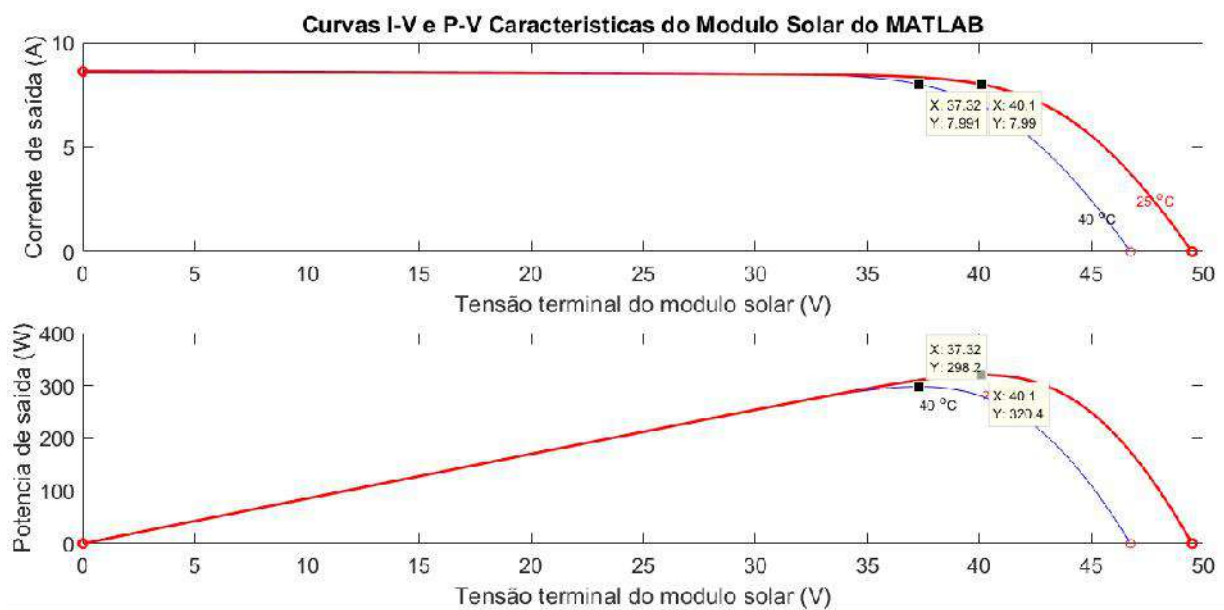
Figura 3.14 – Modelo fotovoltaico do MATLAB[®].



Fonte: Do autor.

Na Figura 3.15, são mostradas as curvas $I \times V$ e $P \times V$, do modelo fotovoltaico do próprio MATLAB[®], para temperaturas de 25°C e 40°C, considerando um nível de irradiância de 1000 W/m².

Figura 3.15 – Curvas $I \times V$ e $P \times V$ do modelo do próprio MATLAB[®].



Fonte: Do autor.

Para uma melhor representação e comparação, os resultados obtidos pelas curvas do próprio modelo do MATLAB®, assim como também os resultados das curvas do modelo desenvolvido neste trabalho, são mostradas conforme a Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Resultados para análise comparativa (1000 W/m²).

Modelo MATLAB®			
Temperatura (°C)	Vmax (V)	I_{max} (A)	P_{max} (W)
25°C	40,1	7,99	320,4
40°C	37,32	7,99	298,2
Modelo desenvolvido no trabalho			
Temperatura (°C)	Vmax (V)	I_{max} (A)	P_{max} (W)
25°C	40,1	7,981	320,038
40°C	38,12	7,831	298,518

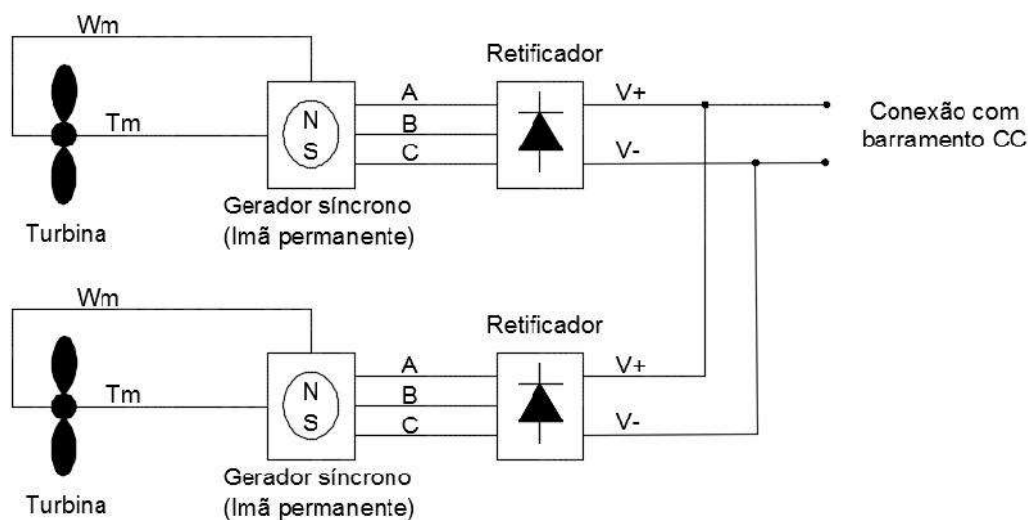
Fonte: Do autor.

A partir da tabela acima, pode-se comparar os resultados obtidos com os dois modelos, e perceber que estes estão funcionando de forma similar, com apenas uma pequena diferença em relação a variação de temperatura, pois o modelo do MATLAB® em alguns passos de desenvolvimento é diferente do modelo feito neste trabalho, mas isto não muda muito o fato que os resultados dos modelos são similares, e o desenvolvido neste trabalho está coerente. Na próxima seção, será mostrado como o arranjo eólico é modelado.

3.3 Arranjo Eólico

O bloco que representa o arranjo eólico mostrado na Figura 3.1 no início deste capítulo, é composto internamente por duas turbinas eólicas, dois geradores síncronos de ímã permanente, e dois retificadores conforme mostrado na Figura 3.16.

Figura 3.16 – Arranjo eólico completo.



Fonte: Do autor.

3.3.1 Turbina eólica

Para modelagem de uma turbina eólica, primeiramente tem-se que considerar a potência do vento (energia cinética) que incide na área formada pelas pás da turbina, esta potência é calculada conforme é mostrada na equação 3.17. Onde ρ é a densidade do ar em (kg/m^3), A é a área da turbina onde o vento está incidindo e V_w é a velocidade do vento, que como pode-se observar na fórmula está elevada ao cubo.

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A V_w^3 \quad (3.17)$$

Sabe-se que nem toda energia cinética que incide numa turbina pode ser convertida em energia mecânica, pois uma turbina eólica pode aproveitar no máximo cerca de 59,3% da energia que incide nela. Assim, para saber o quanto de potência mecânica é convertida por uma turbina eólica, basta multiplicar a equação 3.17, por um coeficiente chamado coeficiente de potência C_p . A equação 3.18 mostra a potência mecânica que pode ser convertida por uma turbina eólica.

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \rho A V_w^3 \quad (3.18)$$

O coeficiente de potência pode atingir no máximo a porcentagem dita anteriormente, ele varia em função da velocidade de extremidade da pá, λ , e do ângulo de *pitch* β . Inicialmente se encontra a velocidade de extremidade em função da velocidade angular da turbina \bar{W}_m , do raio da turbina R , e da velocidade do vento, conforme mostra a equação 3.19. Já a equação 3.20, é uma equação intermediária para se encontrar o coeficiente de potência, pois tem como função a velocidade de extremidade páe o ângulo de *pitch*. A partir destas duas equações anteriores, pode-se então encontrar o coeficiente de potência que é dado conforme a equação 3.21 (VOLTOLINI, H., 2007).

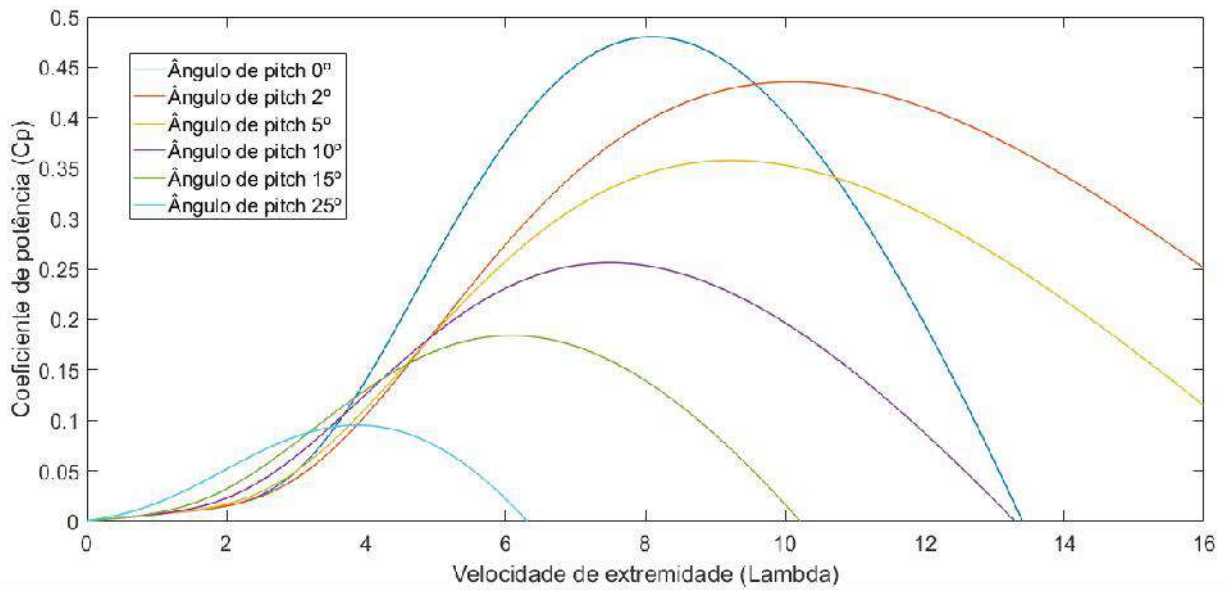
$$\lambda = \frac{R.W_m}{V_w} \quad (3.19)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda} + 0,08s - \frac{0,035}{s^3 + 1} \quad (3.20)$$

$$C_p = \left(0,51763 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0,4s - 5 \right) e^{\frac{-21}{\lambda_i}} \right) + 0,006795 \quad (3.21)$$

Com estas últimas três equações podem-se obter as curvas que mostram o comportamento do coeficiente de potência de uma turbina em função do ângulo de *pitch* e da velocidade de extremidade da pá. Estas curvas são mostradas na Figura 3.17.

Figura 3.17 – Variação de C_p em função de λ e β .



Fonte: Do autor.

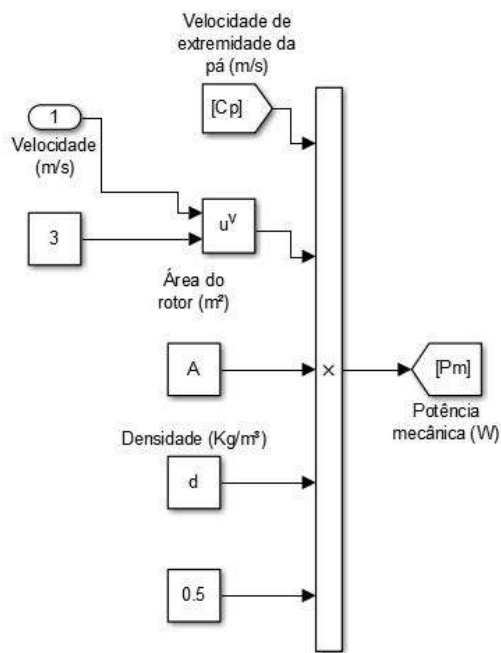
A partir da Figura 3.17, pode-se perceber que quanto menor for o ângulo de *pitch* adotado para a turbina, maior será a eficiência desta para gerar energia mecânica, e para um mesmo ângulo de *pitch* quanto maior for a velocidade de extremidade menor será esta eficiência ou coeficiente.

Para finalização do modelo matemático da turbina eólica, tem-se que obter o torque mecânico que é desenvolvido no eixo desta que é conectado ao eixo do gerador elétrico para geração de eletricidade. Este torque mecânico, T_m , é obtido dividindo-se a potência mecânica gerada, pela velocidade angular da turbina, conforme é mostrado na equação 3.22.

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_m} \quad (3.22)$$

Nesta seção, foram mostradas as principais características de uma turbina eólica, assim como também os procedimentos a serem seguidos para realização da modelagem matemática desta turbina, a próxima seção irá demonstrar como se desenvolve o modelo computacional da turbina, partindo do que foi visto neste tópico.

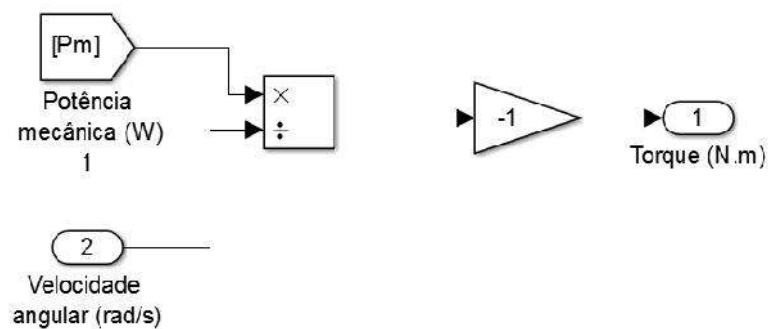
Figura 3.19 – Modelagem da potência mecânica da turbina.



Fonte: Do autor.

Assim, necessita-se por fim, fazer a modelagem do torque mecânico da turbina que é fornecida ao eixo do gerador elétrico, conforme a equação 3.22. Este desenvolvimento é mostrado na Figura 3.20.

Figura 3.20 – Modelagem do torque mecânico da turbina.

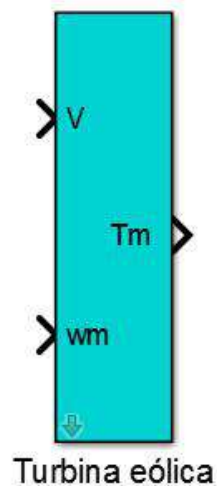


Fonte: Do autor.

É importante destacar que o torque é invertido, porque o gerador elétrico que será usado na simulação do sistema, trabalha com torque negativo para operar como tal. Realizado tudo isso, foi desenvolvido um bloco equivalente para a turbina, sendo este composto por todas as

modelagens anteriores mostradas nesta seção. Este bloco tem como parâmetros de entrada a velocidade do vento e velocidade angular, e como saída o torque mecânico, como já havia sido dito. O bloco equivalente é mostrado na Figura 3.21.

Figura 3.21 – Bloco equivalente da turbina eólica.



Fonte: Do autor.

É importante destacar que a velocidade angular aparece como entrada do bloco, apenas para que esta possa ter uma velocidade inicial de referência vinda do gerador elétrico, assim a turbina sempre inicia o seu processo com esta velocidade pré-estabelecida.

3.3.1.2 Curva característica da turbina modelada

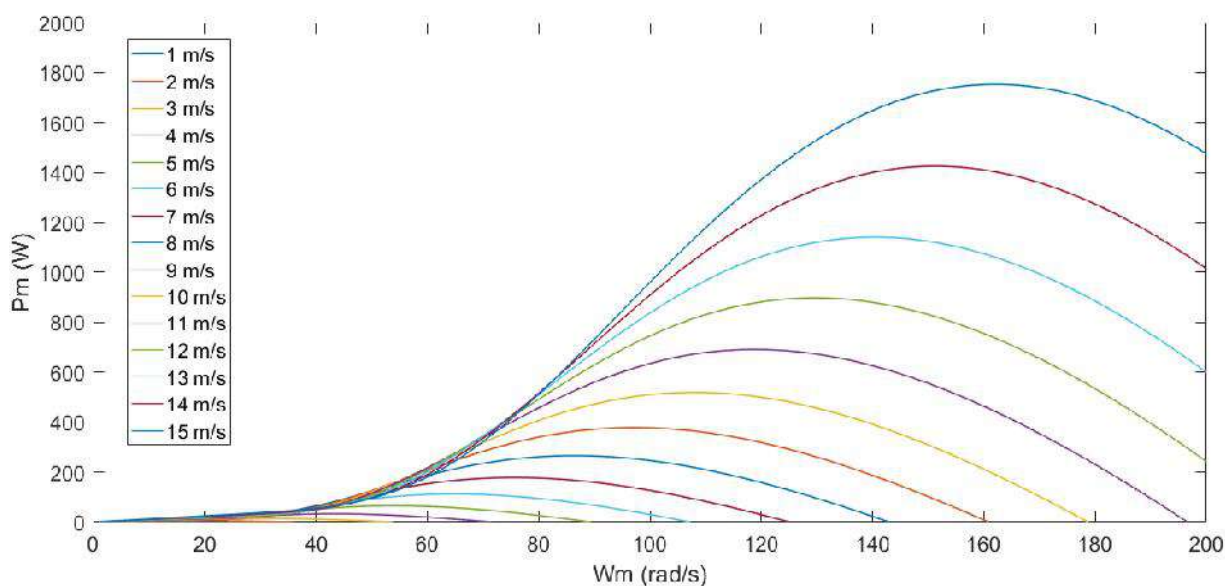
Partindo do bloco mostrado na Figura 3.21 da seção anterior, foi criada uma máscara para o bloco onde nesta são adicionados os parâmetros de entrada da turbina, como o diâmetro de seu rotor D e o ângulo de *pitch*. Assim, pode-se gerar as curvas características desta turbina, tomando como base várias velocidades diferentes, e mostrando também, o comportamento da potência mecânica por esta gerada e sua velocidade angular. Os parâmetros de entrada da turbina são mostrados de acordo com a Tabela 3.5, e as curvas características desta na Figura 3.22.

Tabela 3.5 – Parâmetros de entrada da turbina eólica.

Parâmetros do painel <i>Kyocera</i> KD 320 GX – LPB	
Ângulo de pitch (°)	0° (graus)
Diâmetros da turbina (m)	1,5 m (metros)

Fonte: Do autor.

Figura 3.22 – Curvas P_mxW_m.



Fonte: Do autor.

Assim, depois desta abordagem a respeito da turbina eólica realizada ao longo de toda seção 3.3.1, foi obtido um modelo bastante preciso, onde este será usado nas simulações que serão realizadas neste Trabalho de Conclusão de Curso. Nos próximos dois tópicos serão mostrados, de forma sucinta, os outros equipamentos que compõem o arranjo eólico já mostrado, onde estes são gerador eólico e retificador.

3.3.2 Gerador elétrico

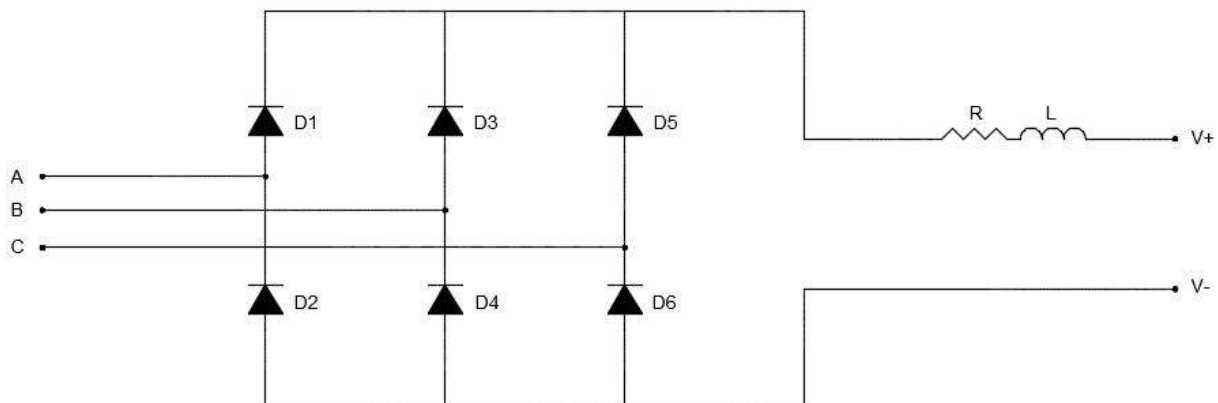
O gerador elétrico é o equipamento responsável por fazer a conversão de energia mecânica (turbina) em elétrica. Para este trabalho foi escolhido o gerador síncrono de ímã permanente, pelo fato da potência gerada por este não ser elevada. A ligação do gerador com a turbina eólica é realizada de acordo com a Figura 3.16, no início da seção 3.3. Dentre algumas das características deste tipo de gerador, pode-se citar as seguintes:

- Apresenta três fases, assim suas tensões e correntes de saída são trifásicas.
- Potência gerada até 1,5 kW aproximadamente.
- Custo relativamente alto.
- Exige menos manutenção.

3.3.3 Retificador

É o equipamento responsável por fazer a conversão de tensões e correntes alternadas em contínuas. Neste trabalho, foi escolhido o retificador trifásico para que este receba a alimentação trifásica e alternada do gerador, e forneça tensões e correntes contínuas ao barramento CC. A ligação do retificador com o gerador e com o barramento CC, pode ser vista na Figura 3.16, no início da seção 3.3, e o circuito interno deste pode ser observado conforme a Figura 3.23.

Figura 3.23 – Circuito interno do retificador trifásico.



Fonte: Do autor.

Um ponto importante a se destacar é que a presença da ponte de diodos, faz com que nunca exista fluxo de potência invertido no retificador, mesmo numa situação em que o arranjo eólico esteja diante de uma baixa velocidade, e conseqüentemente a sua tensão gerada seja menor que a tensão que é controlada no barramento CC.

3.4 Demais componentes do Sistema de geração

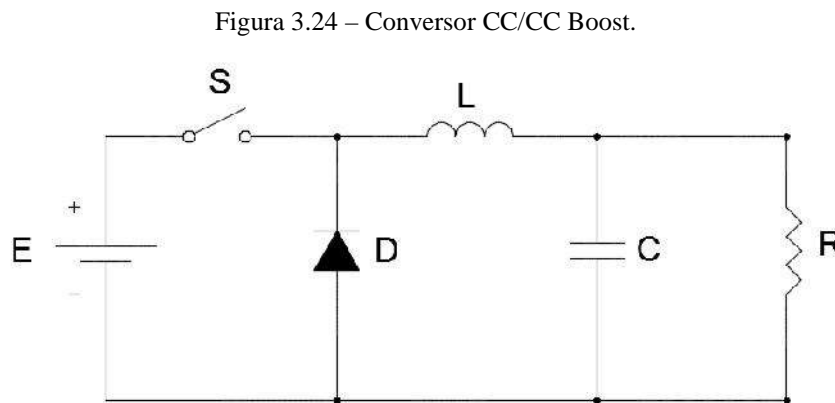
Neste tópico serão mostrados de forma sucinta, os demais componentes que constituem o sistema proposto, além dos arranjos fotovoltaico, e eólico. Estes componentes são conversor

CC/CC *Boost*, inversor de frequência, o filtro (R-L-C) usado para redução de harmônicos na conexão do sistema de geração a rede de elétrica, a rede elétrica propriamente dita, e a carga monofásica suprida pelo sistema.

3.4.1 Conversor CC/CC tipo Boost

O conversor CC/CC Boost, é um conversor elevador de tensão, que opera em duas etapas, na primeira a chave S permanece fechada e na segunda, a chave S fica aberta. No sistema proposto, ele tem por função realizar a máxima extração de potência do painel fotovoltaico, através da implementação de um algoritmo de seguimento do ponto de máxima potência (MPPT). Neste trabalho é utilizada a técnica de rastreamento Perturba e Observa (P&O).

Outra função deste conversor é o nivelamento da tensão no barramento CC para garantia de um bom funcionamento do inversor. O circuito básico deste tipo de conversor é mostrado na Figura 3.24.



Fonte: Do autor.

O conversor usado para o sistema neste trabalho, tem seus parâmetros nominais descritos na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Parâmetros do conversor CC/CC Boost.

Parâmetros do conversor CC/CC Boost.	
Frequência de Chaveamento (f_s)	10 kHz (Hertz)
Faixa de Tensão de Entrada (E)	198,8 (Volts)
Tensão de saída (V_o)	311 (Volts)
Duty Cicle (D)	0,56
Ondulação na tensão de saída (V_o)	25 mV (Volts)
Ondulação na corrente do indutor (I_L)	500 mA (Ampères)
Capacitor (C)	1000 μ F
Indutor (L)	200 μ H

Fonte: Do autor.

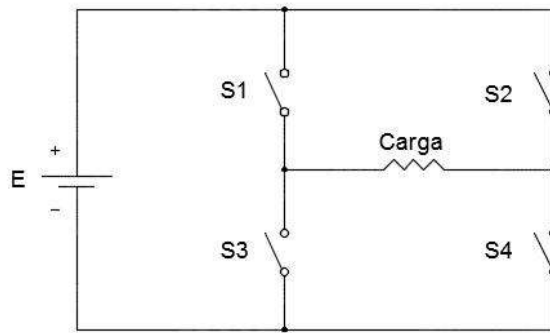
3.4.2 Inversor CC/CA

O Inversor é o responsável por fazer a conversão de tensão e corrente em níveis contínuos para alternados. Dentre as suas principais funções é importante se destacar as particularidades abaixo listadas.

- Controle de tensão no barramento CC.
- Controle de corrente na carga.
- Realização da extração de toda energia proveniente do barramento CC, e fornecimento desta para rede elétrica de baixa tensão.

O inversor usado no sistema proposto neste trabalho é o inversor monofásico ponte completa, e seu circuito equivalente está mostrado na Figura 3.25.

Figura 3.25 – Inversor ponte completa.



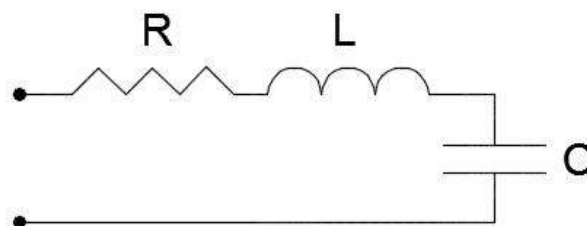
Fonte: Do autor.

3.4.3 Filtro R-L-C para conexão com a rede

Os filtros elétricos têm por função, eliminar os ruídos e harmônicos indesejáveis em relação a frequência fundamental da rede elétrica (no Brasil, 60 Hz), assim, o filtro é conectado entre o inversor e a rede elétrica, para desempenhar a função dita anteriormente, pois caso o inversor e a rede fossem conectados diretamente, provavelmente a corrente compartilhada por estes dois componentes apresentaria harmônicos indesejáveis.

Existem diferentes tipos de topologias para filtros elétricos, cada uma com suas vantagens e desvantagens. Especificamente neste trabalho, foi usado o filtro R-L-C mostrado na Figura 3.26, sendo este dotado, basicamente, de um ramo em série ao inversor, formado por uma resistência e um indutor, e outro em paralelo formado pelo capacitor.

Figura 3.26 – Filtro R-L-C.



Fonte: Do autor.

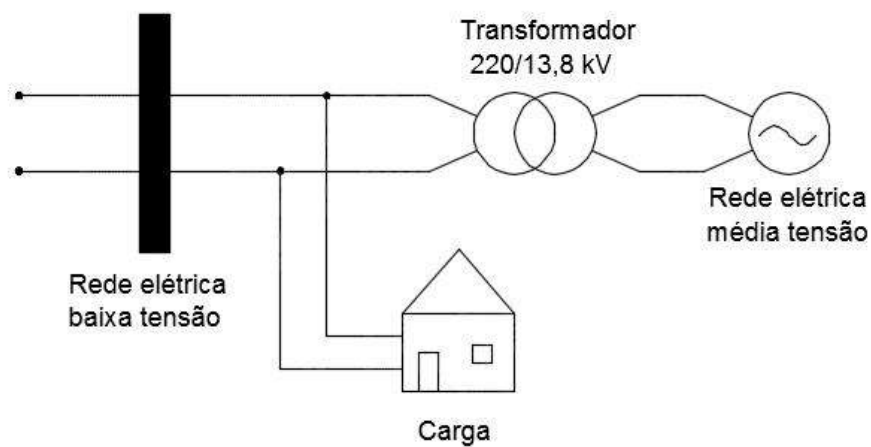
Os valores dos parâmetros deste filtro mencionados anteriormente, são respectivamente:

- Resistência: 0,18 Ω .
- Indutância: 10 mH.
- Capacitância: 10 μ F.

3.4.4 Rede elétrica e carga

A rede elétrica de baixa tensão (no Brasil 220 V, 60 Hz) é o componente onde será injetada a potência gerada pelos arranjos fotovoltaico e eólico, e também de onde a carga que será mostrada a seguir irá consumir potência. A rede é representada por um barramento conforme a Figura 3.27, onde está conectada a carga propriamente dita, e uma fonte de tensão de 13,8 kV e 60 Hz (rede elétrica de média tensão) conectada à um transformador abaixador monofásico (13,8 kV – 220V V de 25 kVA) para uma representação mais adequada do modelo carga-rede.

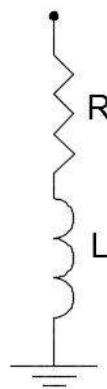
Figura 3.27 – Rede elétrica.



Fonte: Do autor.

Em relação ao modelo computacional desenvolvido para a carga, optou-se pela representação de uma simples carga R-L, conforme a Figura 3.28.

Figura 3.28 – Carga R-L.



Fonte: Do autor.

Assim os parâmetros de interesse da carga como tensão eficaz, frequência, potência ativa e reativa, fator de potência são apresentadas na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Parâmetros da carga.

Parâmetros da carga	
Tensão nominal RMS (V_{RMS})	220 V (Volts)
Frequência nominal (f_n)	60 Hz (Hertz)
Potência ativa (W)	4600 Watts
Potência reativa indutiva (VAr)	1960 VAr
Fator de potência (cos)	0,92 (indutivo)

Fonte: Do autor.

Este capítulo apresentou os modelos dos principais componentes do sistema elétrico proposto neste trabalho mostrado inicialmente na Figura 3.1. No próximo capítulo será mostrado como o sistema desenvolvido se comporta em diferentes situações de simulação, para que assim se possa avaliar o seu desempenho de funcionamento, tendo os arranjos eólico e fotovoltaico compartilhando o mesmo barramento CC.

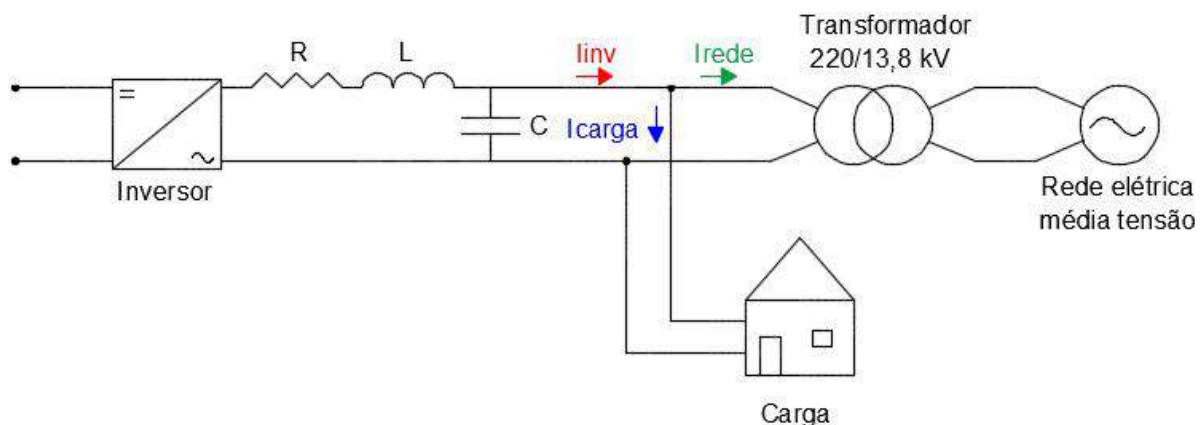
4 ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados através de simulações, os resultados mais importantes obtidos neste Trabalho de Conclusão de Curso. Para isto, serão mostrados vários cenários de simulação diferentes, pois assim se pode observar a dinâmica do sistema com barramento CC compartilhado.

4.1 Considerações Preliminares

Inicialmente será mostrada a curva da tensão controlada no barramento CC. Depois, serão mostrados resultados como: potências geradas pelo sistema, e as curvas de correntes (inversor, carga, e rede elétrica) para cada cenário diferente de simulação. Em alguns casos será mostrado o comportamento da velocidade da turbina para que se possa ter algumas conclusões claras a respeito de seu funcionamento.

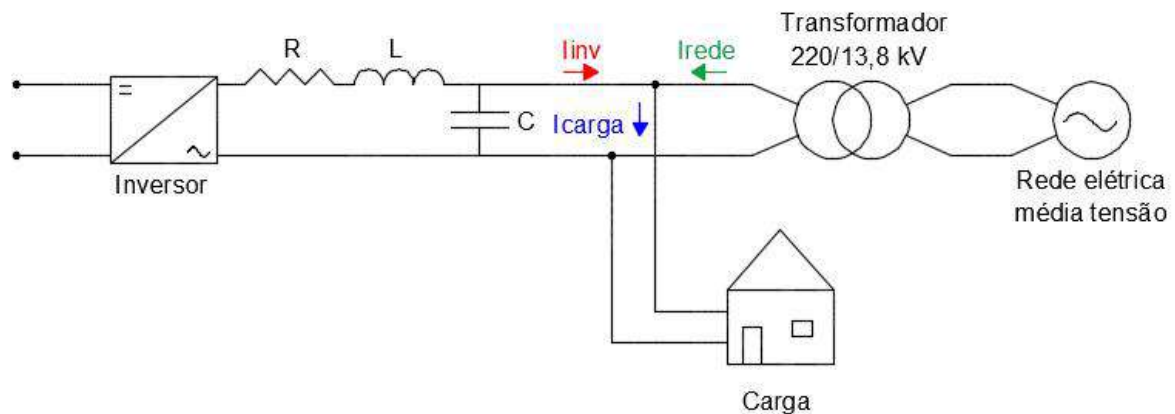
Os cenários de simulação apresentam níveis de irradiância diferentes, bem como a velocidade do vento ao qual o sistema é submetido. Em relação ao funcionamento do sistema podem existir dois estágios. No primeiro, o sistema híbrido gera mais potência do que a carga necessita, assim o excedente de potência é injetado na rede. A Figura 4.1 representa este tipo de funcionamento do sistema.



Fonte: Do autor.

No segundo estágio, o sistema híbrido gera menos potência do que requer a carga, assim, a rede elétrica fornece à carga a parcela de potência que falta ser suprida. A Figura 4.2 representa o funcionamento descrito anteriormente

Figura4.2 – Rede elétrica fornecendo potência.



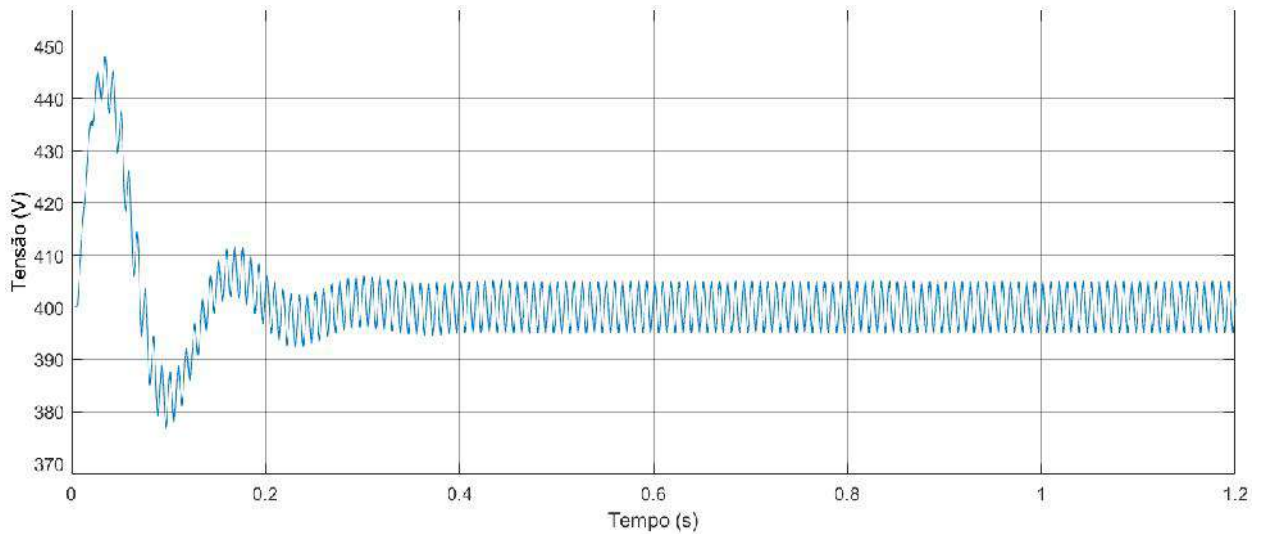
Fonte: Do autor.

4.2 Curvas da tensão no barramento CC e da rede elétrica

A Figura 4.3, mostra a tensão controlada no barramento CC que é compartilhado pelos arranjos fotovoltaico e eólico. Pode-se observar que existe um pequeno transitório no início, motivado pelas condições iniciais das equações diferenciais associadas aos modelos dos componentes do sistema proposto, mas logo se estabiliza no valor requerido que é de 400 V. O fato desta tensão estar sempre oscilando em torno do valor desejado (400V), é causado pela ação do MPPT levando o painel fotovoltaico sempre para o ponto de máxima potência.

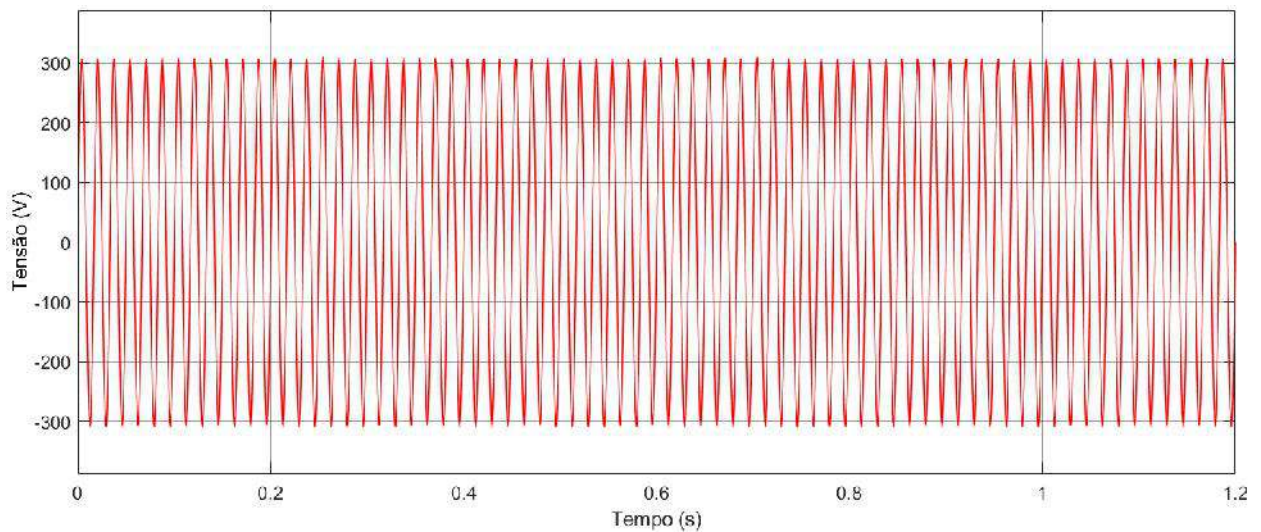
Já na Figura 4.4, é mostrada a curva da tensão na rede elétrica (saída do inversor). Pela figura pode-se observar que a tensão atinge o valor de pico requerido que é de (311 V). Isto é obtido pela ação do controlador de tensão implementado no inversor que faz com que o nível de tensão no barramento CC seja controlado, e consequentemente a tensão de saída do inversor seja constante.

Figura 4.3 – Curva da tensão no barramento CC.



Fonte: Do autor.

Figura 4.4 – Curva de tensão na saída do inversor.



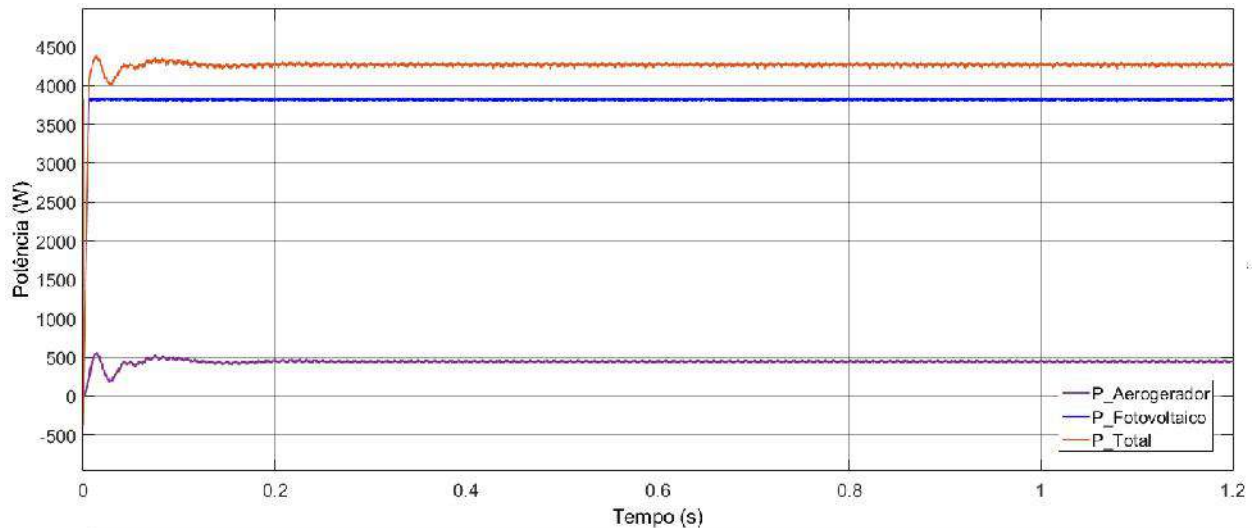
Fonte: Do autor.

4.3 Irradiância 1000 (W/m²) e velocidade do vento 8 (m/s)

Para este primeiro cenário de simulação, a potência gerada chega perto da requerida pela carga que é de 4600 W como pode ser visto na Figura 4.5, que mostra a potência gerada por cada arranjo e também a total. Pode-se observar pela figura, que o arranjo fotovoltaico gera uma potência maior que o eólico. Outro ponto que é importante ser destacado é que a potência do arranjo fotovoltaico praticamente não tem transitórios pelo fato da extração desta potência ser controlada, e por este arranjo não ser modelado por nenhuma equação diferencial.

Porém no arranjo eólico pelo fato de não existir nenhum controle para extração da potência deste, e também por este arranjo ser modelado por equações diferenciais, a potência extraída do arranjo sofre um pequeno transitório no início até se estabilizar.

Figura 4.5- Potências do sistema híbrido na primeira situação.

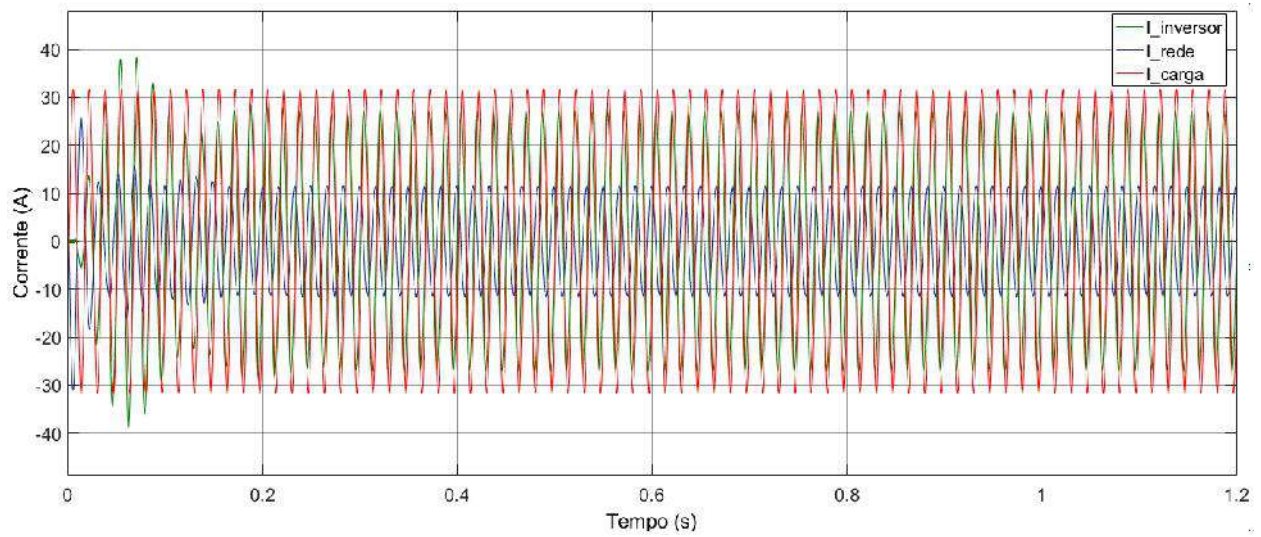


Fonte: Do autor.

O comportamento das correntes do sistema pode ser observado de acordo com a Figura 4.6, onde são mostradas as correntes do inversor, da carga e da rede elétrica. Pela figura pode-se perceber que a corrente da carga será sempre constante, já as correntes do inversor e da rede elétrica sofrem um pequeno transitório inicial, até se estabilizarem. É importante se destacar que as correntes do inversor e da rede tendem sempre a se completar para fazer com que a corrente da carga tenha sempre este comportamento fixo.

Outro ponto a ser destacado, é que como a potência fornecida pelo sistema de geração é quase o requerido pela carga, a corrente injetada pelo inversor é consideravelmente maior que a da rede elétrica, já que está fornece corrente para carga apenas para suprir a pequena parcela de potência que falta, por isto o seu nível de corrente não é alto.

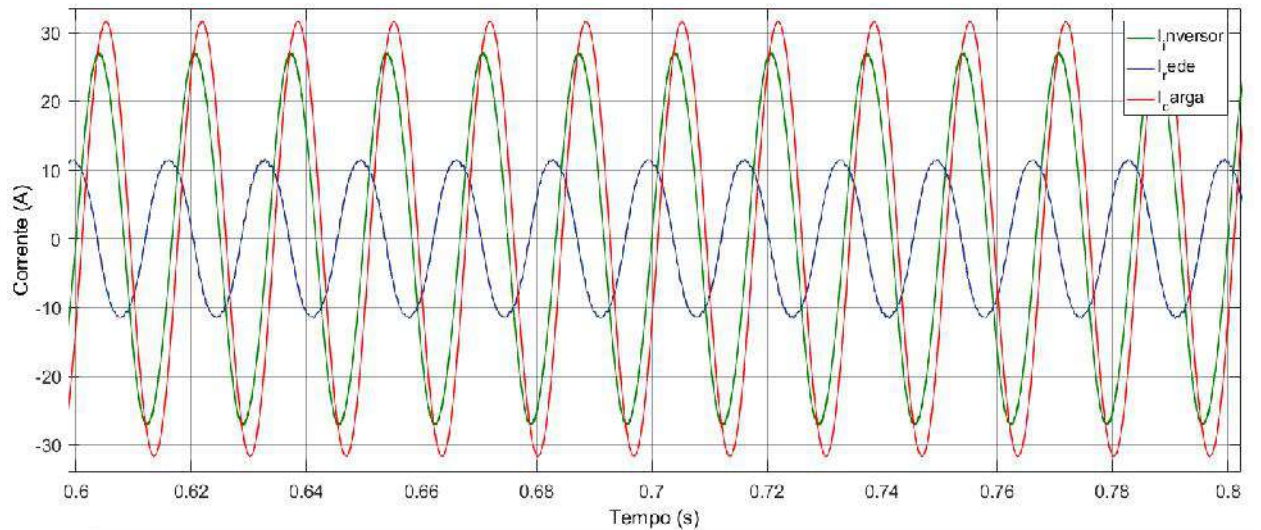
Figura 4.6 – Correntes do sistema híbrido na primeira situação.



Fonte: Do autor.

Uma visão mais detalhada do comportamento das correntes do sistema para este cenário, pode ser vista de acordo com a Figura 4.7.

Figura 4.7 – Detalhe das correntes do sistema na primeira situação.

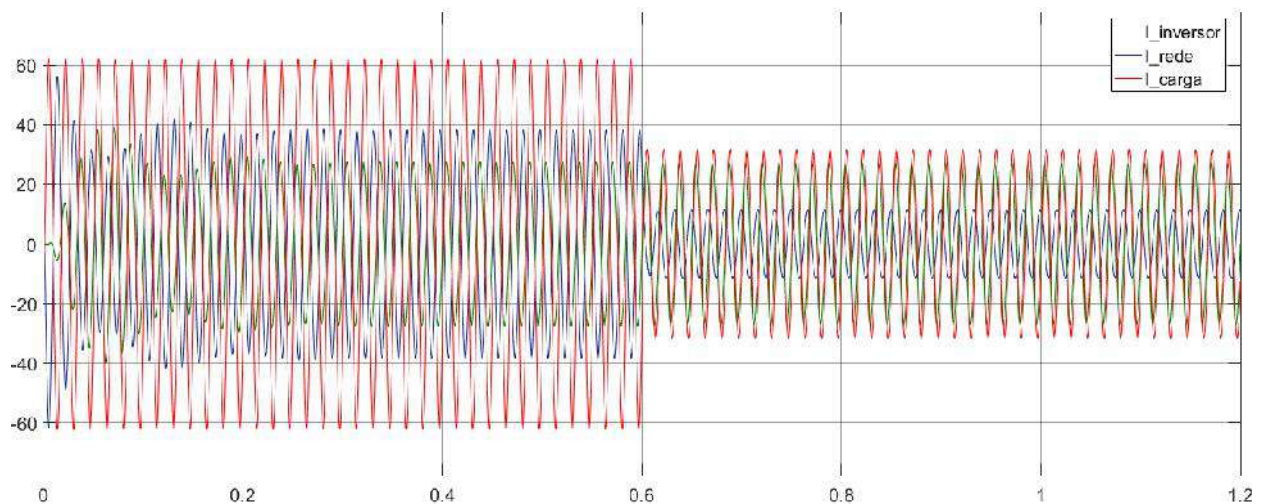


Fonte: Do autor.

Ainda para este cenário de simulação, foi variada a potência da carga para se analisar o comportamento do sistema. A Figura 4.8 mostra o comportamento das correntes do sistema considerando uma variação da potência da carga de 9200 W para 4600 W. Pela figura, pode-se observar que inicialmente como a potência requerida pela carga é maior que o dobro da gerada

pelo sistema híbrido, a corrente da rede é maior que a do inversor. Já quando a potência se normaliza em 4600 W as correntes passam a ter um comportamento conforme o que foi mostrado na Figura 4.6. É importante destacar também que a corrente da carga diminui com a queda da potência requerida por ela como mostra a Figura 4.8.

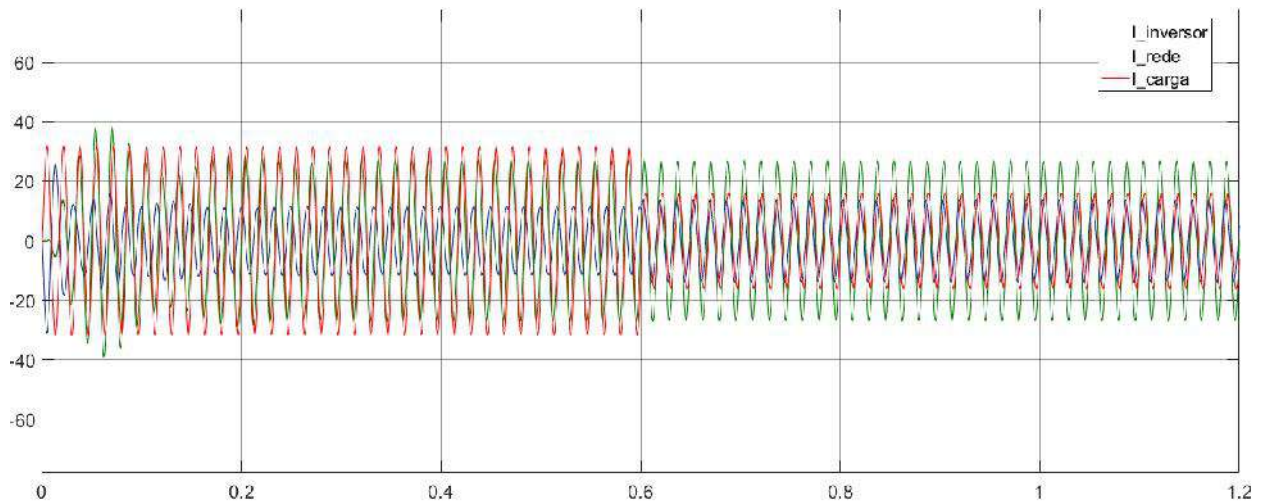
Figura 4.8 – Correntes do sistema para variação de 9200 W para 4600 W.



Fonte: Do autor.

Considerando agora uma variação da potência requerida pela carga de 4600 W para 2300 W, as correntes do sistema híbrido se comportam conforme é mostrado na Figura 4.9. Como pode-se observar na figura, inicialmente as correntes tem um comportamento igual ao que foi mostrado na Figura 4.6. Quando a potência requerida pela carga cai para 2300 W, a corrente do inversor é maior do que as correntes da carga e da rede, pois nesta situação o sistema híbrido gera mais potência do que a carga requer, assim potência é injetada na rede elétrica. É importante frisar também que para esta situação, a soma das correntes da rede e da carga é igual a corrente de saída do inversor.

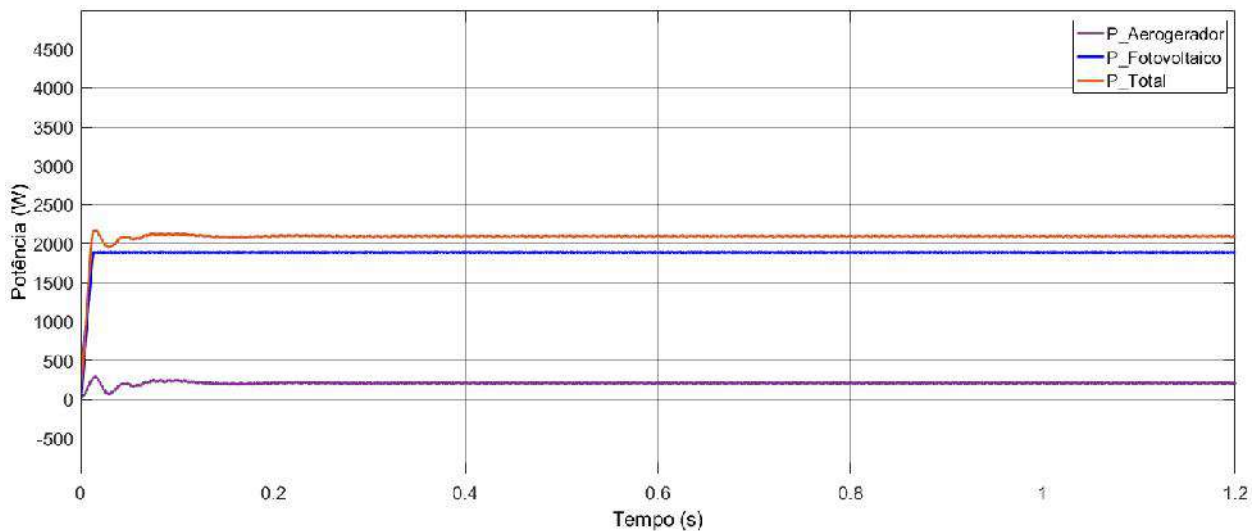
Figura 4.9 - Correntes do sistema para variação de 4600 W para 2300 W.



4.4 Irradiância 500 (W/m²) e velocidade do vento 7 (m/s)

Neste cenário, de acordo com a Figura 4.10, todas as potências do sistema têm uma significativa queda em relação ao caso mostrado no tópico anterior, e isto irá influenciar diretamente no comportamento das correntes do sistema como será visto a seguir.

Figura4.10 – Potências do sistema híbrido, na segunda situação.

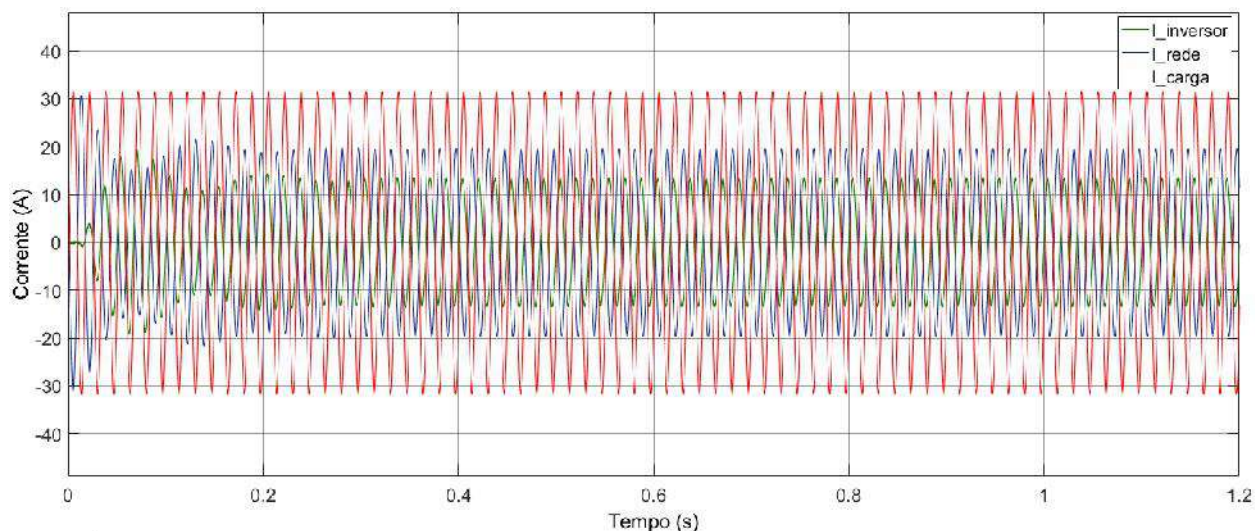


Fonte: Do autor.

As correntes do sistema têm um comportamento bem diferente do mostrado no cenário da seção anterior, como pode ser visto na Figura 4.11. Neste caso pode se observar que a corrente da rede elétrica é maior que a corrente do inversor, pois neste caso a potência que o sistema

híbrido fornece é muito menor que a requerida pela carga, assim a rede fornece uma potência faltante maior, e conseqüentemente injeta uma corrente maior para carga.

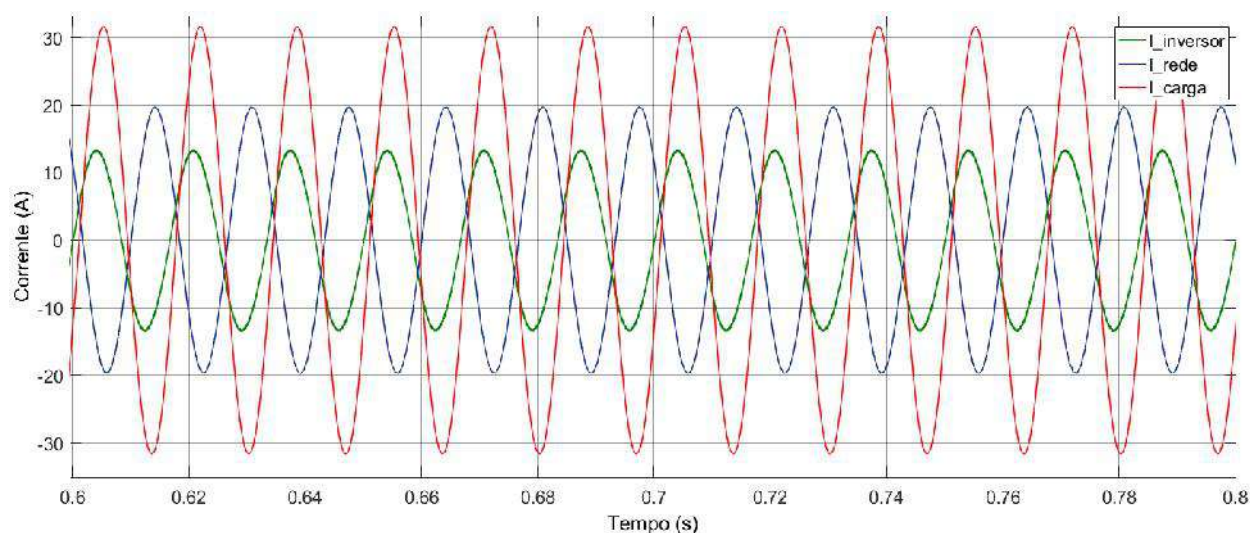
Figura 4.11 - Correntes do sistema híbrido na segunda situação.



Fonte: Do autor.

Uma visão mais detalhada do comportamento das correntes do sistema para este cenário, pode ser vista de acordo com a Figura 4.12.

Figura 4.12 - Detalhe das correntes do sistema na segunda situação.

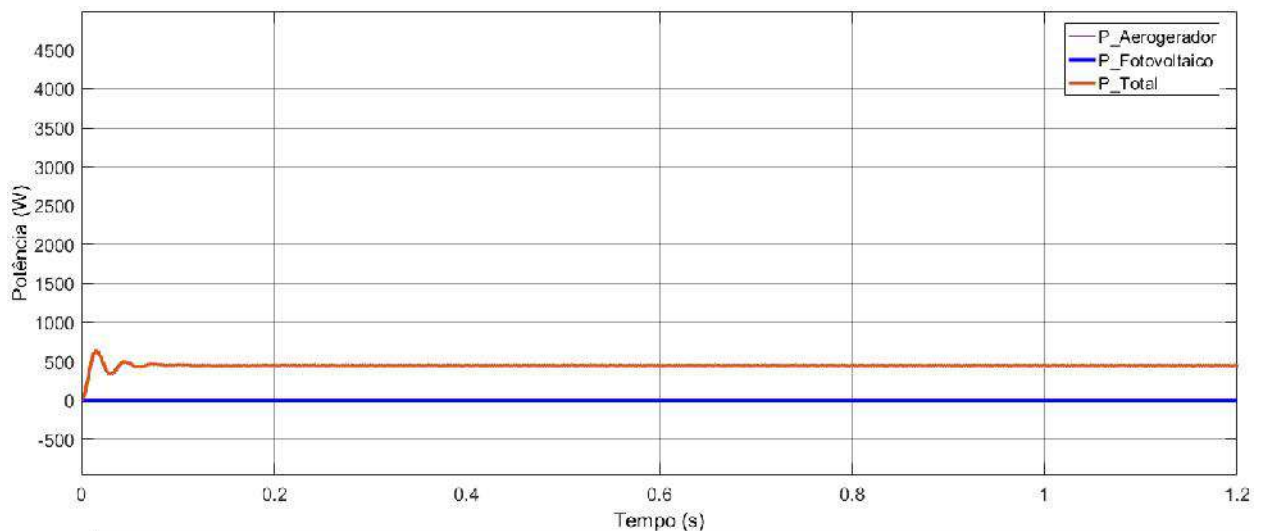


Fonte: Do autor.

4.5 Sem irradiância e velocidade do vento 8 (m/s)

Este cenário é similar a uma situação noturna onde a irradiância que chegam ao sistema é zero, a Figura 4.13 mostra o comportamento das potências deste para o presente caso. Como pode se observar a potência fornecida pelo arranjo fotovoltaico é zero, assim a potência total fornecida a carga é proporcional a potência gerada pelo arranjo eólico. Mais uma vez pelo fato da potência fornecida pelo sistema híbrido a carga ser muito menor do que a requerida por esta, irá influenciar diretamente na dinâmica das correntes do sistema.

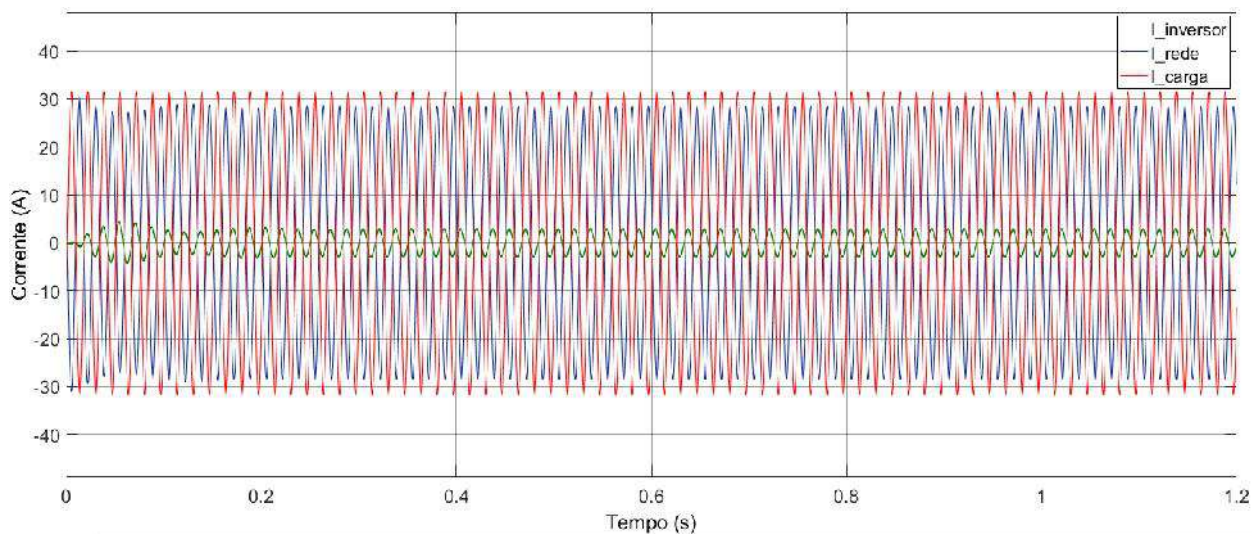
Figura 4.13 - Potências do sistema híbrido na terceira situação.



Fonte: Do autor.

Na Figura 4.14 pode-se observar um comportamento de corrente bastante diferente dos já visto até agora, onde a corrente do inversor é muito pequena pelo fato da potência gerada pelo sistema híbrido ser mínimo, pois apenas o arranjo eólico está gerando energia. Deste modo, a rede elétrica é quem fornece quase toda a potência requerida pela carga, fazendo com que a corrente injetada pela rede e a da carga sejam quase iguais.

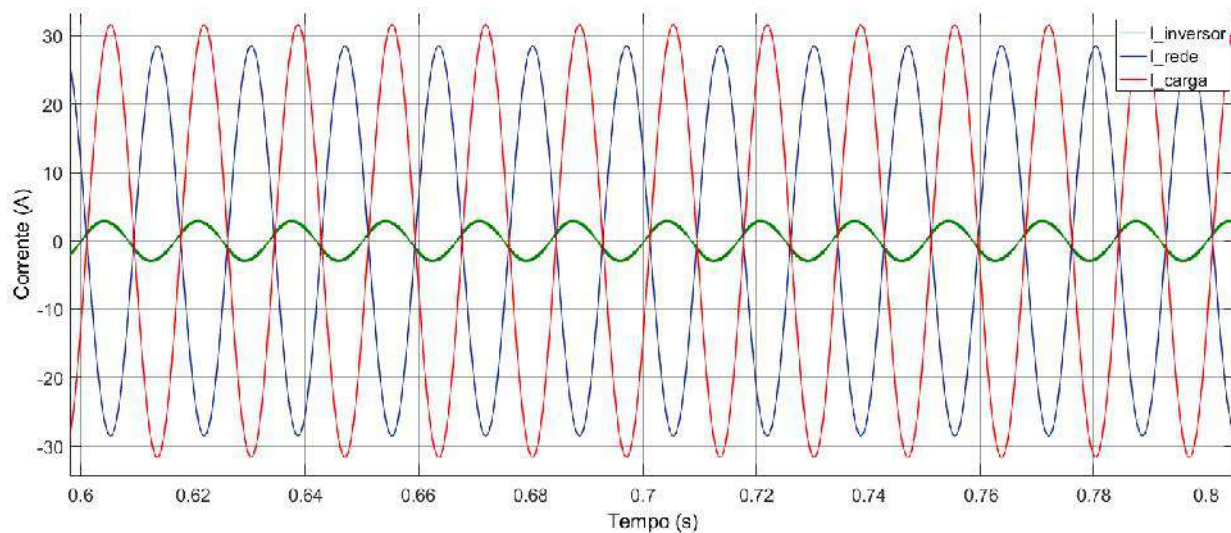
Figura4.14- Correntes do sistema híbrido na terceira situação.



Fonte: Do autor.

Uma visão mais detalhada do comportamento das correntes do sistema para este cenário, pode ser vista de acordo com a Figura 4.15.

Figura 4.15 - Detalhe das correntes do sistema na terceira situação.

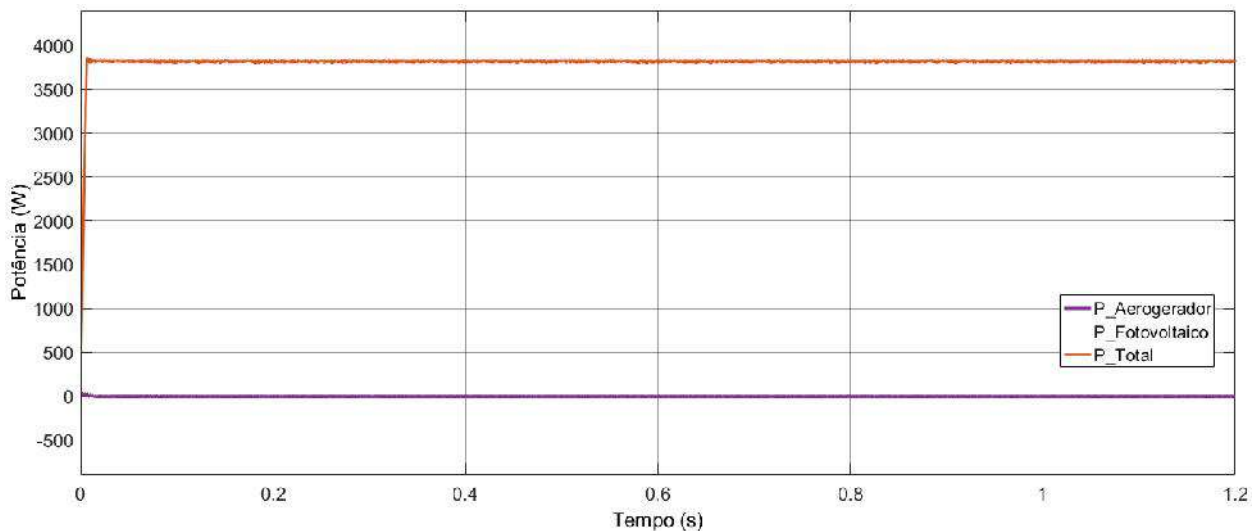


Fonte: Do autor.

4.6 Irradiância 1000 (w/m²) e velocidade do vento 3 (m/s)

Nesta situação a velocidade do vento é bem pequena, assim o arranjo eólico não é capaz de injetar potência na rede, pois a tensão gerada por este é menor do que a do barramento CC, fazendo com que assim, nenhuma corrente seja injetada pelo arranjo eólico. Deste modo, a potência gerada pelo sistema híbrido, será sempre igual a gerada pelo arranjo fotovoltaico, como pode ser visto na Figura 4.16.

Figura 4.16 - Potências do sistema híbrido na quarta situação.

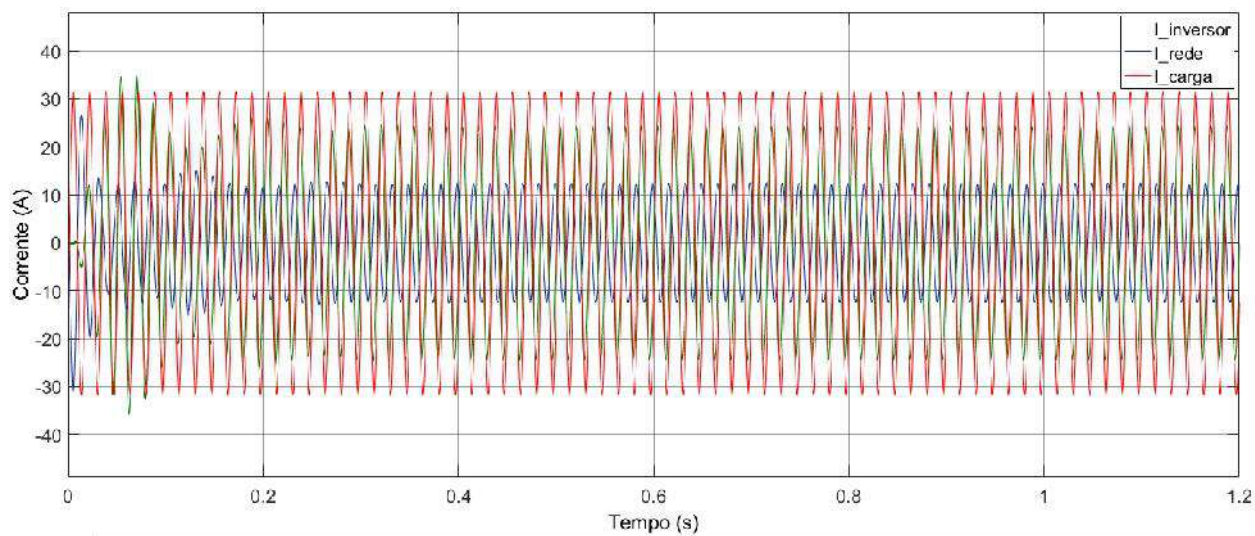


Fonte: Do autor.

O comportamento das correntes pode ser observado conforme a Figura 4.17, onde nesta pode se observar que a corrente do inversor é maior que a fornecida pela rede, pelo fato de a potência gerada pelo sistema híbrido ter um nível considerado próximo da requerida pela carga, e assim a rede não precisa injetar grande quantidade de potência para carga. Uma visão mais detalhada do comportamento das correntes do sistema para este cenário, pode ser vista de acordo com a Figura 4.18.

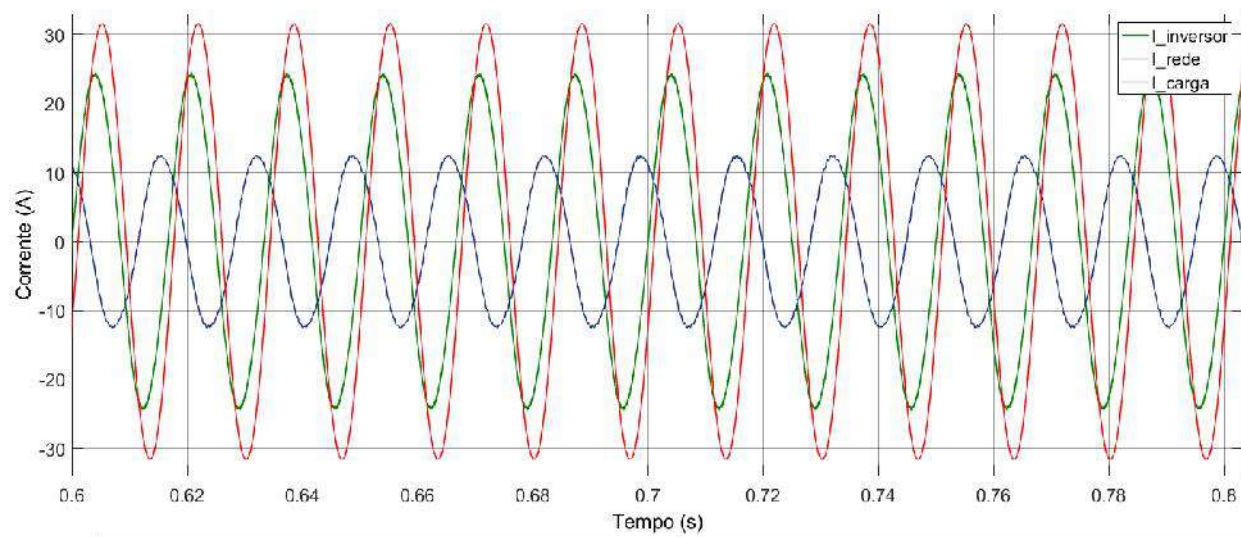
Outro ponto importante a se destacar é que mesmo para esta velocidade, as turbinas do arranjo eólico não estão paradas, porém, este não injeta potência nenhuma para carga, pelo fato que foi citado no começo desta seção. O comportamento da velocidade angular das turbinas para esta situação pode ser observado conforme a Figura 4.19.

Figura 4.17 - Correntes do sistema híbrido na quarta situação.



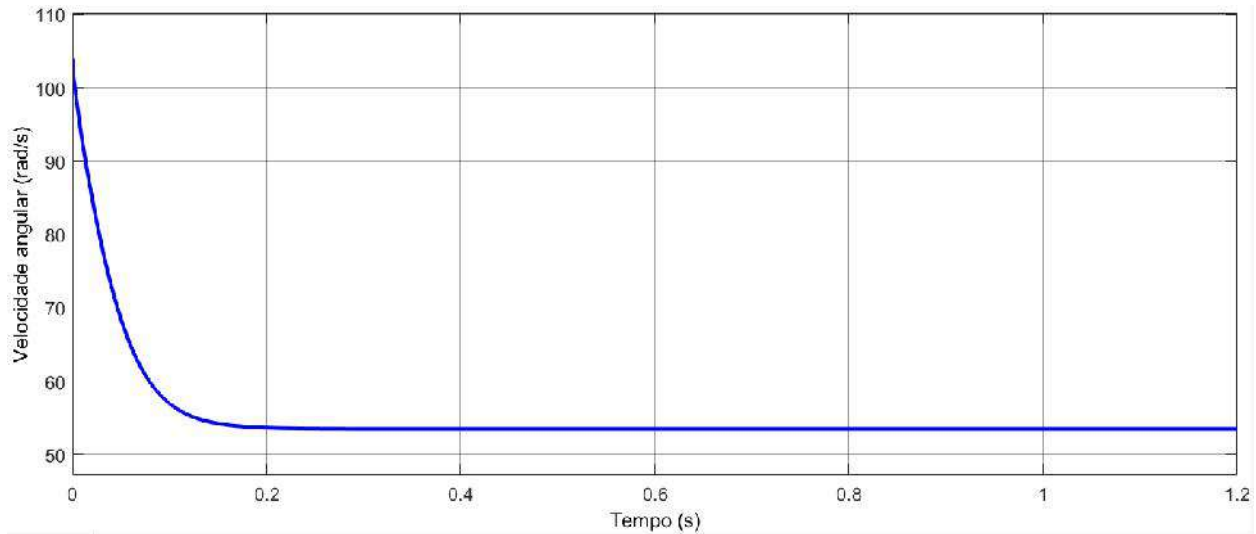
Fonte: Do autor.

Figura 4.18 - Detalhe das correntes do sistema na quarta situação.



Fonte: Do autor.

Figura 4.19 – Velocidade angular de cada turbina.



Fonte: Do autor.

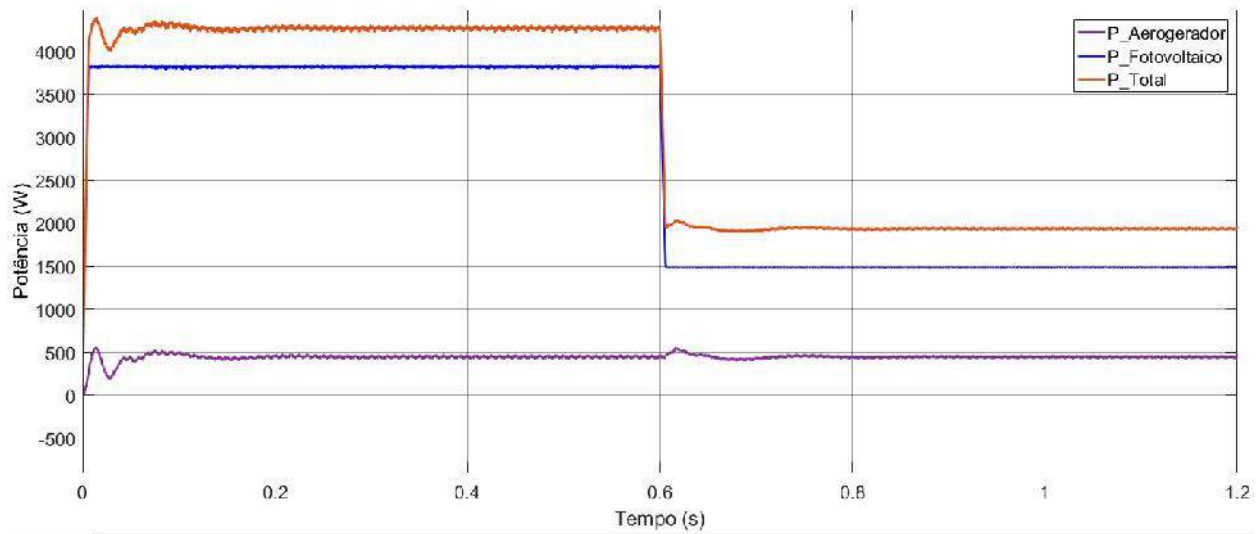
4.7 Análise da sensibilidade dos arranjos fotovoltaico e eólico

Neste tópico, serão mostradas simulações que diferem das mostradas até o momento, pelo fato de que serão variados os parâmetros (irradiância e velocidade) em uma mesma simulação. Isto permite observar com clareza a sensibilidade que cada tipo de arranjo tem a tais variações, pois como os dois arranjos estão compartilhando o mesmo barramento CC, dependendo do caso, a variação dos parâmetros de entrada de um arranjo pode influenciar diretamente no resultado gerado pelo outro como será visto a seguir.

4.7.1 Irradiância 1000-400 (W/m²) e velocidade do vento 8 (m/s)

Esta simulação foi realizada a variando-se o nível de irradiância de 1000 W/m² para 400 W/m², para que assim se possa observar o que isto gera no sistema. O comportamento das potências do sistema para esta situação é mostrado de acordo com a Figura 4.20. Nesta, podemos perceber que mesmo com a velocidade não variando, quando a irradiância varia gera um transitório na potência produzida pelo arranjo eólico e, conseqüentemente, na potência total gerada pelo sistema híbrido. Este transitório é criado pelo fato de que, quando a irradiância muda gera uma variação no barramento CC, fazendo assim com que as condições de operação da máquina presente no modelo do arranjo eólico sejam alteradas.

Figura 4.20 - Potências do sistema híbrido na quinta situação.

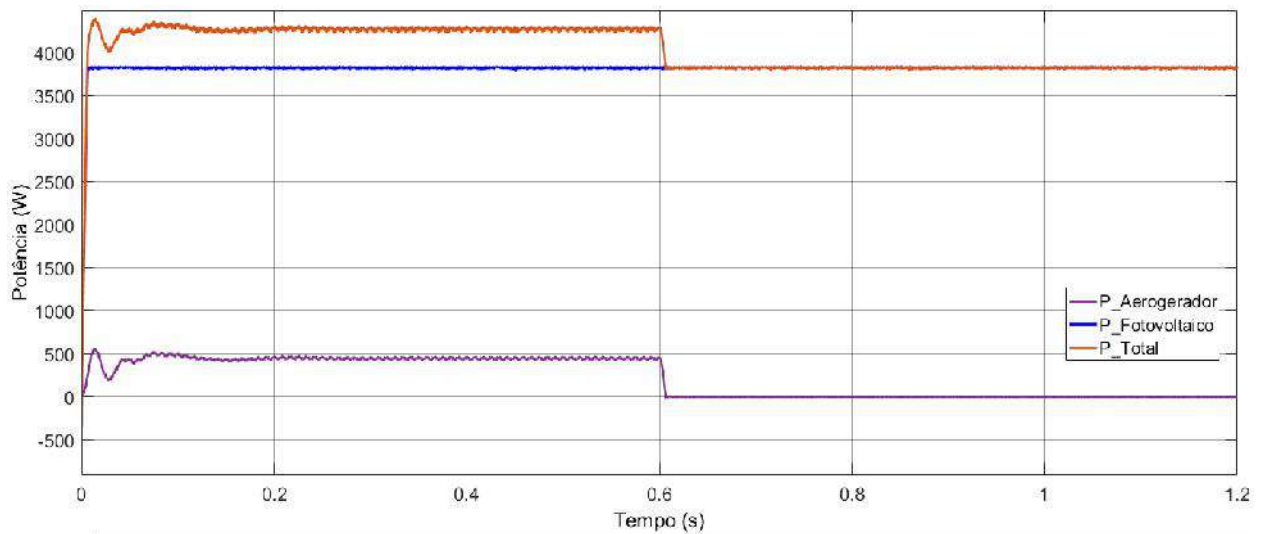


Fonte: Do autor.

4.7.2 Irradiância 1000 (W/m²) e velocidade do vento 8-3 (m/s)

Neste cenário, a velocidade do vento foi variada de 8 m/s para 3 m/s para que assim se pudesse observar o impacto que uma variação de velocidade causa no sistema. Os comportamentos das potências do sistema híbrido são mostrados de acordo com a Figura 4.21. Nesta figura pode se observar que pelo fato do arranjo fotovoltaico não ser modelado por nenhuma equação diferencial, a variação do vento não gera transitório na potência deste arranjo. Porém como já era de se esperar, a mudança de vento impacta diretamente na potência que é extraída do arranjo eólico.

Figura 4.21 - Potências do sistema híbrido na sexta situação.



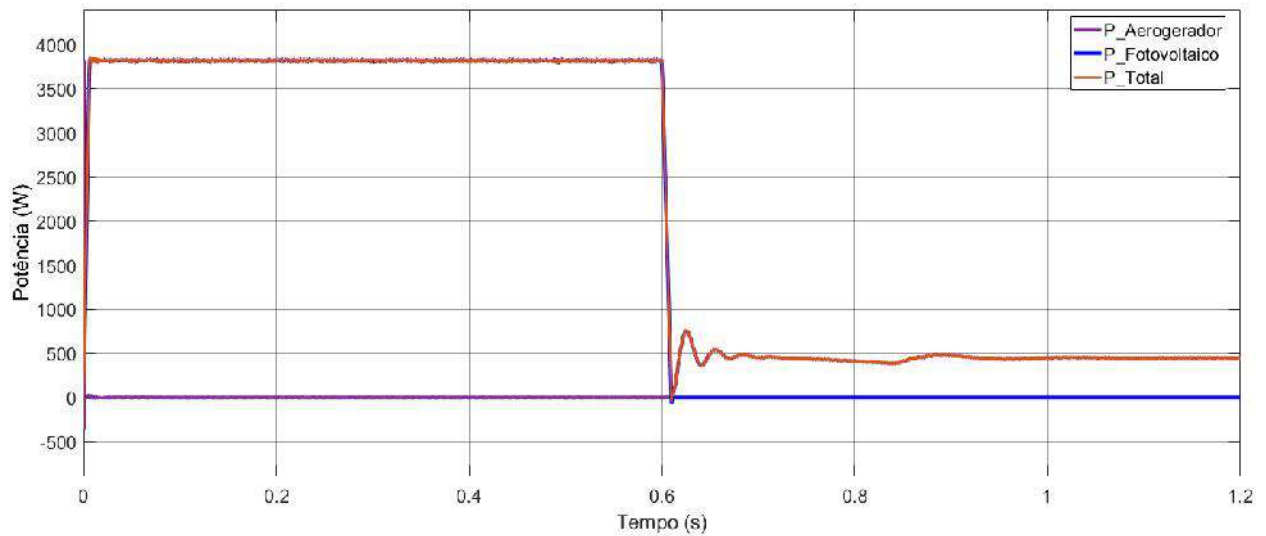
Fonte: Do autor.

4.7.3 Irradiância 1000-0 (W/m²) e velocidade do vento 3-8 (m/s)

Este caso propõe um cenário com variação tanto de irradiância quanto da velocidade do vento, onde inicialmente apenas o arranjo fotovoltaico gera energia, e depois apenas o eólico. Na Figura 4.22 pode-se observar o comportamento das potências do sistema híbrido nesta situação. Pela figura também pode-se perceber que o arranjo fotovoltaico continua com sua potência sendo extraída de forma constante, pois a potência gerada por este arranjo, não varia quando o vento muda.

Já a potência do arranjo eólico sofre um transitório ainda maior em relação ao que havia sido mostrado na seção 4.7.1 até se estabilizar, pelo fato da variação de irradiância ter sido de 1000 (W/m²) a 0 (W/m²).

Figura 4.22 – Potências do sistema híbrido na sétima situação.



Fonte: Do autor.

Como resultado da análise destes três últimos casos, conclui-se que a potência que é extraída do arranjo fotovoltaico será sempre constante sem nenhuma alteração, mesmo quando os parâmetros de entrada do sistema variam. Já a potência do arranjo eólico sempre varia para tal situações, pelo fato deste arranjo ser modelado por equações diferenciais que variam suas condições de operação quando existem transitórios no barramento CC.

Ao fim deste capítulo, se pôde entender claramente a dinâmica existente num sistema híbrido com barramento CC compartilhado por arranjos fotovoltaico e eólico em diferentes tipos de situação, comprovando assim o bom funcionamento do sistema desenvolvido neste Trabalho de Conclusão de Curso. Por fim, no próximo capítulo, serão mostradas as conclusões obtidas ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho, e também serão apontadas algumas propostas para futuros trabalhos partindo do estudo aqui desenvolvido.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi desenvolvida a modelagem em SIMULINK[®] de um sistema híbrido com arranjos fotovoltaico e eólico compartilhando o mesmo barramento CC, e conectados à rede elétrica. O sistema fotovoltaico, foi composto por quatro painéis em série e três em paralelo, totalizando 12 módulos. Sua saída foi conectada a um conversor CC/CC do tipo Boost controlado para rastreamento do ponto de máxima potência do arranjo através da técnica Perturba & Observa. Após isto foi conectado um inversor responsável por fazer o controle da tensão no barramento CC e, conseqüentemente, da tensão que é entregue a carga, que é o outro componente que compõe a rede elétrica do sistema.

Já o arranjo eólico foi composto de dois aerogeradores de ímã permanente em paralelo, onde estes eram constituídos de turbinas eólicas, geradores e retificadores trifásicos. Não foi implementado nenhum tipo de controlador para extração da máxima potência para o sistema eólico, porém o uso de algum tipo de controlador poderia otimizar o funcionamento do sistema híbrido em geral.

Com a conexão destes dois arranjos em paralelo e compartilhando o mesmo barramento CC, foi possível realizar simulações com diferentes cenários, para comprovação do funcionamento do sistema modelado. Estas simulações permitiram observar a dinâmica do sistema para situações noturnas (sem irradiância), com baixa velocidade de vento, e situações em que os níveis de irradiância e velocidade eram considerados normais.

Com as simulações, também foi possível se comprovar o funcionamento dos controles aplicados para extração da potência do arranjo fotovoltaico, assim como também do controle de tensão no barramento CC implementado no inversor. Também foi possível observar, a ação do ponto de diodos do retificador, que fez com que em situações de baixa velocidade não entrasse potência no arranjo eólico.

Assim depois de toda análise feita observando todos os casos de simulações possíveis, pode-se dizer que as técnicas de modelagem utilizadas durante a realização deste trabalho mostraram-se como sendo ótimas ferramentas no desenvolvimento de modelos que reproduzem o comportamento real dos componentes que formam o sistema híbrido proposto, assim como, uma alternativa para se obter uma melhor compreensão e aprendizado acerca do funcionamento deste tipo de sistema.

Como sugestão para futuros trabalhos a partir da plataforma desenvolvida, pode-se propor a melhoria do controle da tensão do barramento CC, implementação de um controlador da

defasem entre tensão e corrente injetados na rede, e também a conexão de um conversor CC/CC na saída do arranjo eólico para que se possa implementar um controlador para extração da potência deste. Sendo assim, o sistema aqui desenvolvido pode servir como base para futuros trabalhos que visem o aprimoramento do sistema híbrido em questão.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DALI, M., BELHADJ, J., ROBOAM, X. *Hybrid solar-wind system with battery storage operating in grid-connected and standalone mode: Control and energy management e Experimental investigation*. Energy, The International Journal (Elsevier), Vol. 35, pp 2587-2595, April, 2010.

IOAN, L. D. MIHAIL, A. *Hybrid Wind and Solar Power System*. Journal of Computer Science and Control Systems, Vol. 6, Number 1, May, 2013.

KEITIANNE, K. **Controle da tensão do barramento CC pelo inversor monofásico em um Sistema fotovoltaico conectado à Rede Elétrica**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal da Paraíba - UFPB. Abril, 2016.

LORRAINE, L. **Avaliação dinâmica de uma rede elétrica isolada com integração de geradores eólicos convencionais**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal da Paraíba - UFPB. Agosto, 2014.

SUMATHI, S. ASHOK KUMAR, L. SUREKHA, P. *Solar PV and Wind Energy Conversion Systems – An Introduction to Theory, Modelling, with MATLAB/SIMULINK, and the Role Computing Techniques*. Springer: 2015.

VOLTOLINI, H., **Modelagem e Controle de Geradores de Indução Duplamente Alimentados com Aplicação em Sistemas Eólicos**, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina - USFC. Florianópolis. Março, 2007