



**GERENCIAMENTO DE MICRORREDES ELÉTRICAS EM
CONDIÇÕES CRÍTICAS DE OPERAÇÃO**

ALEXANDRE RODOVALHO DE MOURA

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

**Gerenciamento de Microrredes Elétricas em Condições Críticas
de Operação**

Alexandre Rodovalho de Moura

Trabalho final de graduação submetido ao Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

APROVADO POR:

Prof. Francis Arody Moreno Vásquez, D.Sc. (ENE-UnB)
(Orientador)

Prof. Rafael Amaral Shayani, D.Sc. (ENE-UnB)
(Examinador Interno)

Prof. Ivan Marques De Toledo Camargo, D.Sc. (ENE-UnB)
(Examinador Interno)

Brasília/DF, 17 de fevereiro de 2025.

FICHA CATALOGRÁFICA

MOURA, ALEXANDRE RODOVALHO DE

Gerenciamento de Microrredes Elétricas em Condições Críticas de Operação. [Distrito Federal] 2025.

xiii, XXp., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Engenheiro Eletricista, Engenharia Elétrica, 2025).

Trabalho de Graduação – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica

- | | |
|---------------------------|------------------------------|
| 1. Fontes renováveis | 2. Modo ilhado |
| 3. MPPT | 4. Gerenciamento Microrredes |
| 5. Sistemas Fotovoltaicos | |
| I. ENE/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MOURA, A.R.M (2025). Gerenciamento de Microrredes Elétricas em Condições Críticas de Operação, Trabalho de Graduação, Publicação 2025, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, XX p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Alexandre Rodovalho de Moura

TÍTULO: Gerenciamento de Microrredes Elétricas em Condições Críticas de Operação

GRAU: Engenheiro Eletricista ANO: 2025

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desse trabalho de graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Alexandre Rodovalho de Moura

Departamento de Eng. Elétrica (ENE) - FT

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, fonte de toda sabedoria e força, e a Nossa Senhora por me guiar em cada etapa desta caminhada.

Agradeço aos meus pais e familiares, por todo o carinho e por estarem sempre ao meu lado, me apoiando nos momentos difíceis.

Agradeço aos os professores do Departamento de Engenharia Elétrica da UnB, principalmente ao meu orientador, professor Francis Arody, que proporcionou todo suporte indispensável para a boa realização deste trabalho.

Aos meus amigos, pelo companheirismo e pelas palavras de encorajamento nos momentos de cansaço.

RESUMO

Esse trabalho aborda o gerenciamento e a modelagem de uma microrrede de corrente contínua (CC) operando de forma isolada, com o objetivo de avaliar estratégias de gerenciamento em condições críticas de operação. A modelagem foi realizada no ambiente Simulink do MATLAB, considerando uma topologia em anel composta por quatro geradores fotovoltaicos distribuídos e quatro cargas conectadas. Foi implementada uma forma de gerenciamento para o balanço de carga e geração, de forma a garantir a sua estabilidade. E para a implementação das fontes foi implementada a técnica de rastreamento do ponto de máxima potência (*Maximum Power Point Tracking* – MPPT), enquanto para o controle de tensão de saída no barramento por meio de um conversor boost CC/CC. Os resultados obtidos demonstram a eficácia do desempenho do gerenciamento, especialmente na topologia anelar, que melhor demonstrou eficiência na configuração anelar. Por outro lado, a operação na configuração radial apresentou desafios significativos, incluindo variações excessivas de tensão. Com base nos estudos, é evidente o aprimoramento de técnicas de gerenciamento para garantir a estabilidade de uma rede isolada.

Palavras-chave: Fontes Renováveis; Modo ilhado; *MPPT*; Gerenciamento de Energia; Sistemas Fotovoltaicos.

ABSTRACT

This work addresses the management and modeling of an isolated direct current (DC) microgrid, aiming to evaluate management strategies under critical operating conditions. The modeling was carried out in the MATLAB Simulink environment, considering a ring topology composed of four distributed photovoltaic generators and four connected loads. A management approach was implemented to balance load and generation, ensuring system stability. For the implementation of the power sources, the *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) technique was applied, while a DC/DC boost converter was used to regulate the output voltage on the bus.

The results obtained demonstrate the effectiveness of the management system's performance, particularly in the ring topology, which proved to be the most efficient configuration. On the other hand, operation in the radial configuration presented significant challenges, including excessive voltage variations. Based on the studies, it is evident that improving management techniques is crucial to ensuring the stability of an isolated network.

Keywords: Renewable Energy Sources; Islanded Mode; *MPPT*; Energy Management; Photovoltaic Systems.

SUMÁRIO

Sumário	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	vi
Lista de Símbolos	vii
Glossário	ix
Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 Contextualização do tema	1
1.2 Objetivos do Trabalho	4
1.3 Organização do Trabalho	4
Capítulo 2 – Fundamentação Teórica	5
2.1 Sistema Fotovoltaico	6
2.2 Conversores CC-CC: BOOST	8
2.3 Rastreamento do ponto de máxima de potência (MPPT)	12
2.4 CONTROLE DE POTÊNCIA	13
Capítulo 3 – Modelagem Computacional	15
3.1 Descrição da Microrrede	15
3.2 Sistema Fotovoltaico	16
3.3 Rastreamento do ponto de máxima de potência (MPPT)	20
3.4 Controle de potência	21
3.5 Gerenciamento da Microrrede	23
Capítulo 4 – Resultados	24
4.1 Microrrede	24

4.1.1	Caso 1	25
4.2	Caso 2	27
4.3	Caso 3	29
4.4	Caso 4	31
4.5	Caso 5	33
4.6	Caso 6	35
4.7	Caso 7	36
Capítulo 5 – Conclusões		39
Referências Bibliográficas		41

LISTA DE FIGURAS

2.1	Microrrede de Corrente Contínua (CC)	5
2.2	Círculo equivalente Conversor Boost. Adaptado de (RASHID, 1999) . .	8
2.3	Círculo equivalente Conversor Boost com a chave fechada. Adaptado de (RASHID, 1999)	9
2.4	Círculo equivalente Conversor Boost com a chave aberta. Adaptado de (RASHID, 1999)	10
2.5	Curva característica P- V de potência e tensão de um módulo fotovoltaico (VILLALVA; GAZOLI, 2012)	12
2.6	Fluxograma MPPT baseado P&O.	13
2.7	Fluxograma Controle limitação de potência.	14
3.1	Simulação Microrrede SIMULINK.	16
3.2	Curva característica <i>I-V</i> do Painel Solar.	17
3.3	Curva característica <i>P-V</i> do Painel Solar.	17
3.4	Curva característica <i>P-V</i> e <i>I-V</i> do Painel Solar de 30 kW.	18
3.5	Curva característica <i>P-V</i> e <i>I-V</i> do Painel Solar de 24 kW.	19
3.6	Curva característica <i>P-V</i> e <i>I-V</i> do Painel Solar de 20 kW.	19
3.7	Curva característica <i>P-V</i> e <i>I-V</i> do Painel Solar de 17 kW.	19
3.8	Simulação Sistema Fotovoltaico.	20
3.9	Fluxograma MPPT baseado P&O.	21
3.10	Fluxograma controle de potência baseado P&O.	22

3.11 Fluxograma algorítimo do gerenciamento balanço de carga.	23
4.1 Gráfico das Tensões dos Geradores do Caso 1.	25
4.2 Gráfico das Potências dos Geradores do Caso 1.	26
4.3 Gráfico das Tensões das Cargas do Caso 1.	26
4.4 Gráfico das Potências das Cargas do Caso 1.	26
4.5 Gráfico das Tensões dos Geradores do Caso 2.	27
4.6 Gráfico das Potências dos Geradores do Caso 2.	28
4.7 Gráfico das Tensões das Cargas do Caso 2.	28
4.8 Gráfico das Potências das Cargas do Caso 2.	28
4.9 Gráfico das Tensões dos Geradores do Caso 3.	29
4.10 Gráfico das Potências dos Geradores do Caso 3.	30
4.11 Gráfico das Tensões das Cargas do Caso 3.	30
4.12 Gráfico das Potências das Cargas do Caso 3.	30
4.13 Gráfico das Tensões dos Geradores do Caso 4.	31
4.14 Gráfico das Potências dos Geradores do Caso 4.	32
4.15 Gráfico das Tensões das Cargas do Caso 4.	32
4.16 Gráfico das Potências das Cargas do Caso 4.	32
4.17 Gráfico das Tensões dos Geradores do Caso 5.	33
4.18 Gráfico das Potências dos Geradores do Caso 5.	34
4.19 Gráfico das Tensões das Cargas do Caso 5.	34
4.20 Gráfico das Potências das Cargas do Caso 5.	34
4.21 Gráfico das Tensões dos Geradores do Caso 6.	35
4.22 Gráfico das Potências dos Geradores do Caso 6.	35
4.23 Gráfico das Tensões das Cargas do Caso 6.	36
4.24 Gráfico das Potências das Cargas do Caso 6.	36

4.25 Gráfico das Tensões dos Geradores do Caso 7.	37
4.26 Gráfico das Potências dos Geradores do Caso 7.	37
4.27 Gráfico das Tensões das Cargas do Caso 7.	38
4.28 Gráfico das Potências das Cargas do Caso 7.	38

LISTA DE TABELAS

3.1	Dados painel Fotovoltaico	17
3.2	Configuração dos Geradores Fotovoltaicos	18
4.1	Potências Nominais	24
4.2	Potências e Tensões das Cargas e Geradores.	25

LISTA DE SÍMBOLOS

G	Irradiância solar incidente no painel fotovoltaico
P	Potência elétrica
P_{out}	Potência total gerada pelo sistema fotovoltaico
I	Corrente elétrica
I_{pv}	Corrente do painel fotovoltaico
I_{cc}	Corrente de curto-circuito do módulo fotovoltaico
V	Tensão elétrica
V_{pv}	Tensão do painel fotovoltaico
V_{out}	Tensão de saída do sistema fotovoltaico
N_{strings}	Número de strings conectadas em série
N_{arrays}	Número de arrays conectados em paralelo
m	Fator de idealidade do diodo
U_t	Tensão térmica do diodo
k	Constante de Boltzmann
q	Carga do elétron
C	Capacitância
L	Indutância
D	Ciclo de trabalho do conversor
f	Frequência de chaveamento do conversor

V_s	Tensão de entrada do conversor Boost
V_o	Tensão de saída do conversor Boost
Δi_L	Variação da corrente no indutor
ΔV_0	Variação da tensão de saída

GLOSSÁRIO

CC	Corrente Continua
CA	Corrente Alternada
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PV	Photovoltaic
P&O	Perturba e Observa
CC-CC	Conversor de Corrente Contínua para Corrente Contínua
CC-CA	Conversor de Corrente Contínua para Corrente Alternada
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

A energia elétrica está cada vez mais presente em nosso cotidiano, acompanhando o crescimento exponencial da demanda. Embora a matriz energética global ainda dependa fortemente de combustíveis fósseis, o que é bastante prejudicial ao meio ambiente, há esforços governamentais e avanços tecnológicos voltados para a transição para fontes renováveis. O Brasil se destaca na liderança desse movimento, tendo sua matriz energética composta principalmente por hidrelétricas, além de fontes renováveis como a energia eólica e solar (IRMAK *et al.*, 2014).

No contexto das energias renováveis, a microrrede tem se mostrado promissora na geração e distribuição de energia, principalmente em áreas de difícil acesso à rede convencional. Microrredes são sistemas de distribuição de energia elétrica descentralizados, podendo ser compostas por cargas, baterias, fontes de geração distribuídas, operando de forma coordenada, garantindo a estabilidade da microrrede. Elas também podem operar de forma isolada ou conectadas à rede elétrica convencional. A principal característica da microrrede, é a possibilidade do gerenciamento do fluxo local, tornando possível a operação de fontes renováveis de forma otimizada (MAHMOUD, 2017).

A microrrede pode ser classificada em dois tipos principais, dependendo da natureza do barramento de distribuição. As microrredes de corrente alternada (CA) seguem o padrão do sistema de distribuição convencional, dispensando o uso de inversores para a integração com a rede elétrica. No entanto, são necessários conversores e inversores para a integração de fontes intermitentes. As microrredes de corrente contínua (CC) operam diretamente com corrente contínua, eliminando a necessidade de inversores CC-CA para geração e cargas de corrente contínua. Além disso, há as microrredes

de topologia híbrida, que combinam os dois sistemas, utilizando barramentos distintos para corrente contínua e corrente alternada dentro da mesma microrrede (MAHMOUD, 2017)

Devido às características da microrrede, principalmente a possibilidade de operação ilhada, ela se torna uma solução bastante viável em casos onde o fornecimento de energia é instável e há cargas críticas, especialmente no Brasil, onde é possível encontrar locais com bons índices de irradiação solar ou perfis de vento adequados para a geração de energia (MARTINS *et al.*, 2005; SILVA, 2019).

Dois exemplos notáveis de implementação bem-sucedida são a microrrede instalada na Comunidade Xique-Xique, Remanso, Bahia. Inaugurada em 2023, o sistema utiliza geração fotovoltaica combinada com baterias, garantindo um consumo médio de 80 kWh mensal (IBERDROLA, 2023). Outro exemplo é a microrrede implementada na Universidade Federal do Ceará (UFC), com um sistema fotovoltaico de 6 kWp associado a baterias, podendo operar tanto em modo ilhado quanto conectado à rede (CARNEIRO, 2017).

A viabilização das microrredes se deve ao avanço das tecnologias dos equipamentos na área de eletrônica de potência, os quais são essenciais para o funcionamento de uma microrrede, como os conversores CC-CA (inversores) e CC-CC (Boost, Buck, Buck-Boost unidirecional e Buck-Boost bidirecional). Esses conversores são utilizados para ajustar os níveis de tensão entre os componentes da microrrede, além de serem empregados no controle do fluxo de potência e no rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT), garantindo que a geração entregue a potência máxima possível (MAHMOUD, 2017; HART, 2011).

Nas microrredes de corrente contínua (CC), que são o foco deste trabalho, um dos principais desafios é a falta de padronização dos níveis de operação da tensão, tornando necessária a utilização de conversores. Além disso, a ausência de normas específicas de segurança e proteção representa uma limitação adicional.

Por outro lado, as microrredes CC apresentam grandes vantagens, como a dispensa do uso de inversores para a conexão de fontes de geração intermitente. Além disso,

como a microrrede opera no modo ilhado, também não há necessidade de inversores para sincronização com a rede elétrica convencional (APONTE-ROA *et al.*, 2020).

A topologia da rede influencia bastante na dinâmica do fluxo de potência, podendo causar instabilidade na microrrede. Existem dois tipos principais de topologias: radial e anelar. Na topologia radial, a carga é alimentada por um único caminho, possuindo um fluxo unidirecional. Já na rede anelar, os componentes estão interligados em um circuito fechado, formando um anel e permitindo o fluxo de potência em ambas as direções (MAHMOUD, 2017).

Outro fator importante para a microrrede é o uso de baterias. Elas auxiliam no balanço entre carga e geração, permitindo o funcionamento da microrrede em momentos de baixa ou nenhuma geração. No entanto, as baterias ainda possuem um alto custo de investimento, além da imprevisibilidade na necessidade de substituição, o que pode comprometer a viabilidade da instalação (MAHMOUD, 2017).

Para o gerenciamento de uma microrrede anelar, devido ao fluxo bidirecional, é necessário um controle sofisticado para estabilizar a tensão de operação em função da demanda de potência. Caso não utilize baterias, o gerenciamento deve ser capaz de balancear o fluxo de carga com a potência gerada (MAHMOUD, 2017).

Neste trabalho, é analisada uma microrrede de corrente contínua (CC) com topologia anelar, operando em modo ilhado e sem o auxílio de baterias. Esse tipo de configuração exige um controle robusto da tensão e da potência, realizado por meio dos conversores, pois a ausência de um sistema de armazenamento impõe desafios instantâneos no balanceamento entre a potência gerada e a potência consumida. Além disso, é necessário lidar com o fluxo bidirecional característico da topologia anelar da microrrede, garantindo a estabilidade e o fornecimento contínuo de energia.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho é desenvolver e analisar estratégias de controle para garantir a estabilidade e o balanceamento do fluxo de potência em uma microrrede de corrente contínua com topologia anelar, operando em modo ilhado, com geração distribuída de fontes fotovoltaicas e sem o auxílio de baterias. Para cumprir esse objetivo, serão realizados os seguintes passos neste trabalho:

- Explicar o funcionamento dos componentes da microrrede;
- Dimensionar e modelar uma microrrede de corrente contínua com topologia anelar no Matlab;
- Desenvolver uma estratégia de gerenciamento da microrrede;
- Simular diferentes cenários de geração e de carga, e avaliar o comportamento da microrrede.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado nos seguintes capítulos:

- No capítulo 2, serão abordados os conceitos teóricos do funcionamento e operação dos sistemas fotovoltaicos e dos conversores necessários para a operação da microrrede;
- No capítulo 3, será abordada a implementação computacional, mostrando os principais componentes e blocos utilizados no Simulink do MATLAB;
- No capítulo 4, serão expostos os resultados obtidos através das simulações e análises dos casos simulados;
- No capítulo 5, serão apresentadas as conclusões do trabalho e sugestões e propostas para trabalhos futuros envolvendo o tema.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será apresentada a fundamentação teórica dos componentes que integram a microrrede de corrente contínua (CC), foco deste trabalho (Figura 2.1). Esta microrrede opera de modo isolado da rede elétrica e é alimentada por quatro sistemas fotovoltaicos, possuindo quatro cargas, ambas distribuídas pela microrrede. Todos os componentes são conectados na microrrede de modo a formar um anel com tensão nominal de 400 Vcc.

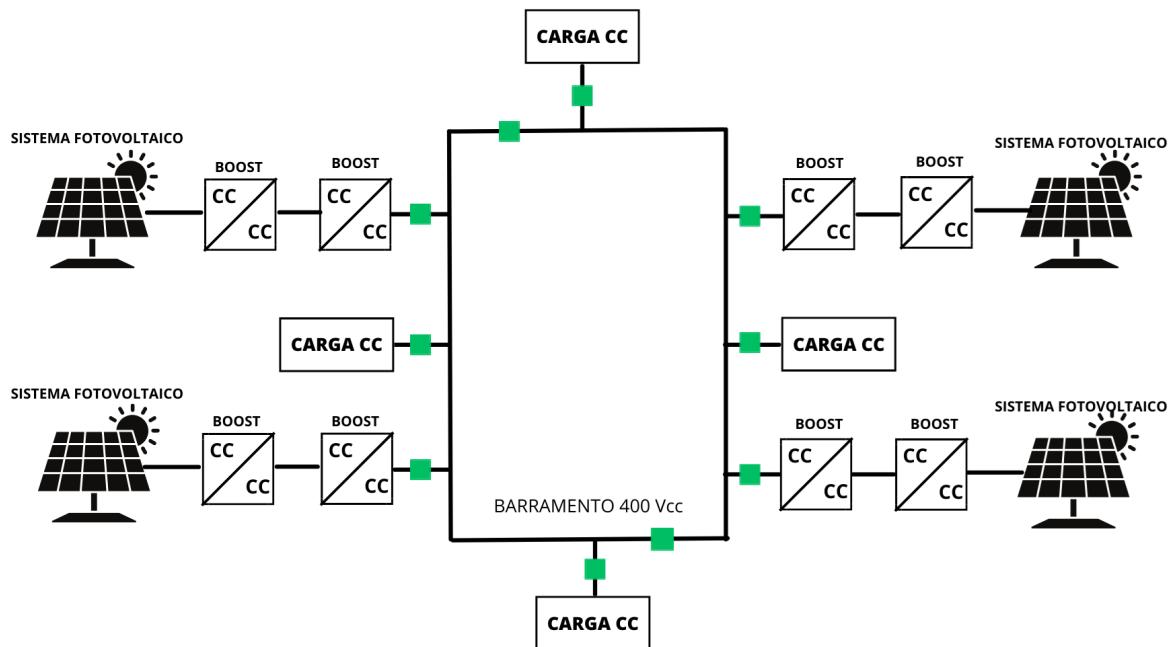


Figura 2.1. Microrrede de Corrente Continua (CC).

2.1 SISTEMA FOTOVOLTAICO

O sistema fotovoltaico é responsável pela conversão de energia solar para energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico, utilizando painéis solares compostos por células fotovoltaicas. Em sistemas fotovoltaicos, os módulos podem ser organizados de diferentes formas dependendo da potência e tensão do sistema. Dois conceitos fundamentais são strings e arrays.

Um string fotovoltaico é um conjunto de módulos conectados em série. Cada módulo possui uma tensão de saída, ao conectar vários em série, a tensão total do sistema aumenta, enquanto a corrente continua a mesma.

Um array fotovoltaico é formado por várias strings conectadas em paralelo. Dimensionando um array, conseguimos alterar a potência total sem mudar a tensão do sistema, alterando somente a corrente em função da quantidade de strings conectadas (VILLALVA; GAZOLI, 2012). Podendo assim a tensão e potência do sistema ser calculada pelas equações 2.1, 2.2 e 2.3.

$$V_{out} = V \times N_{strings} \quad (2.1)$$

$$I_{out} = I \times N_{arrays} \quad (2.2)$$

$$P_{out} = I_{out} \times V_{out} \quad (2.3)$$

Onde:

- V_{out} : Tensão de saída do sistema fotovoltaico.
- V : Tensão de uma única string fotovoltaica.
- $N_{strings}$: Número de strings conectadas em série no sistema.
- I_{out} : Corrente de saída do sistema fotovoltaico.
- I : Corrente de um único array fotovoltaico.

- N_{arrays} : Número de arrays conectados em paralelo no sistema.
- P_{out} : Potência total gerada pelo sistema fotovoltaico.

As células fotoelétricas são responsáveis pela geração de energia elétrica, quando a luz solar incide em uma célula acontece o efeito fotoelétrico. Há dois fatores importantes para a geração, como a intensidade e a área irradiada. A corrente de um sistema fotovoltaico é dada pela seguinte equação 2.4.

$$I_{pv} = I_{cc} \left(\frac{G_{irra}}{1000} \right) - I_g \left(e^{\frac{V_{pv}}{mU_t}} - 1 \right) \quad (2.4)$$

onde:

- I_{pv} → Corrente do painel fotovoltaico;
- I_{cc} → Corrente de curto-circuito do módulo fotovoltaico;
- G_{irra} → Irradiância solar incidente no painel fotovoltaico (W/m^2);
- I_g → Corrente de saturação inversa do diodo do modelo do painel;
- V_{pv} → Tensão do painel fotovoltaico;
- m → Fator de idealidade do diodo;
- U_t → Tensão térmica do diodo, dada por:

$$U_t = \frac{kT}{q} \quad (2.5)$$

onde:

- k é a constante de Boltzmann;
- T é a temperatura absoluta (K);
- q é a carga do elétron.

2.2 CONVERSORES CC-CC: BOOST

Os conversores CC-CC são circuitos eletrônicos que transformam tensão CC de um nível para outro, podendo aumentar (boost), reduzir (buck) ou combinar ambas as funções (buck-boost), fornecendo assim sempre uma saída regulada. Esses dispositivos são uma combinação de componentes como indutores, capacitores, diodos e transistores de potência para realizar a conversão.

O conversor Boost é um tipo de conversor CC-CC em que a tensão de saída é superior à tensão de entrada, por isso ele também é chamado de conversor elevador. O conversor boost opera com um transistor MOSFET ou IGBT, usado para chavear o circuito, um diodo, um indutor e um capacitor, como podemos ver na figura 2.2. O modo 1 inicia quando a chave está fechada no instante $t = 0$. Nesse momento a corrente de entrada carrega o indutor (L). O modo 2 quando a chave é aberta em $t = t_1$. A corrente flui pelo diodo e carrega o capacitor (C), enquanto o indutor (L) descarrega. O diodo (Dm) não permite que o capacitor carregue o indutor. Esse processo se repete a cada ciclo de operação, recarregando o indutor sempre que a chave for fechada novamente (RASHID, 1999; HART, 2011).

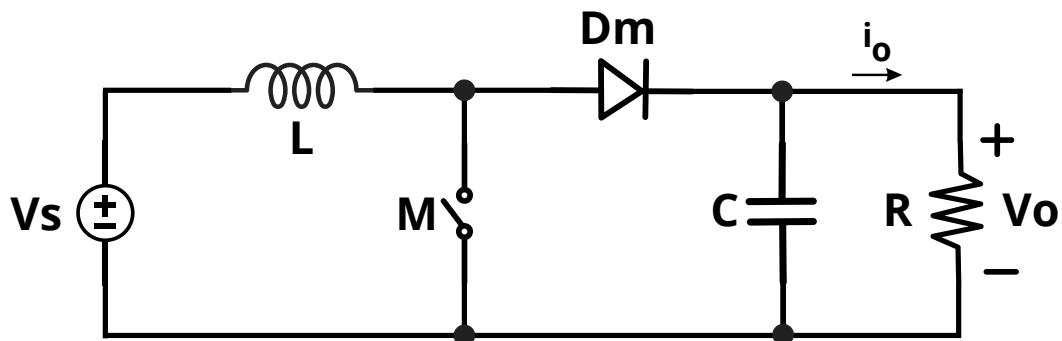


Figura 2.2. Circuito equivalente Conversor Boost. Adaptado de (RASHID, 1999).

É possível realizar o dimensionamento dos componentes, capacitor (C) e indutor (L), pelas expressões 2.6 e 2.7, que se encontram no livro (HART, 2011), sendo f a frequência de chaveamento, e D o ciclo de trabalho.

$$C = \frac{I_0 D}{\Delta V_0 f} \quad (2.6)$$

$$L = \frac{V_s D T}{\Delta i_L} = \frac{V_s D}{\Delta i_L f} \quad (2.7)$$

No instante $t = 0$, quando a chave (M) está fechada, o diodo (Dm) fica reversamente polarizado, e o circuito pode ser representado pela figura 2.3. A tensão no indutor é dada pela equação 2.8.

2.3.

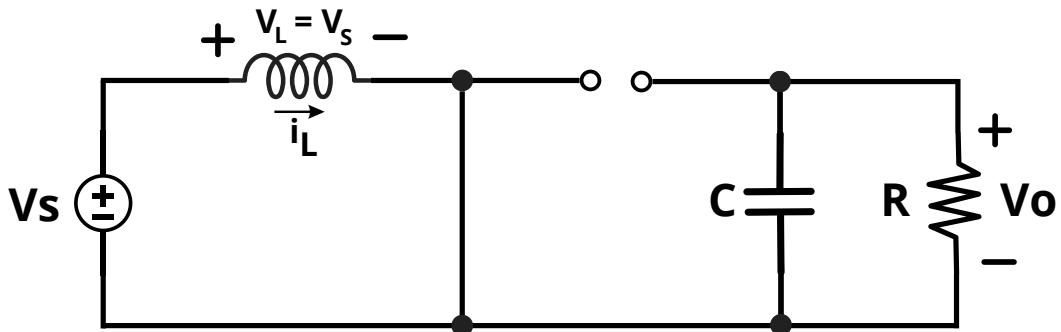


Figura 2.3. Circuito equivalente Conversor Boost com a chave fechada. Adaptado de (RASHID, 1999).

$$V_L = V_s = L \frac{di_L}{dt} \quad \text{ou} \quad \frac{di_L}{dt} = \frac{V_s}{L} \quad (2.8)$$

Quando a chave está fechada, a corrente aumenta linearmente. Portanto, podemos considerar a variação de corrente como constante, permitindo assim calcular a variação de corrente pela equação 2.9.

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_s}{L} \quad (2.9)$$

$$(\Delta i_L)_{\text{fechada}} = \frac{V_s DT}{L} \quad (2.10)$$

Como o indutor não pode mudar a corrente instantaneamente, no instante $t = 0$ quando a chave é aberta o indutor fica diretamente polarizado, ilustrado pela figura 2.4. A tensão do indutor pode ser descrita pela equação 2.11.

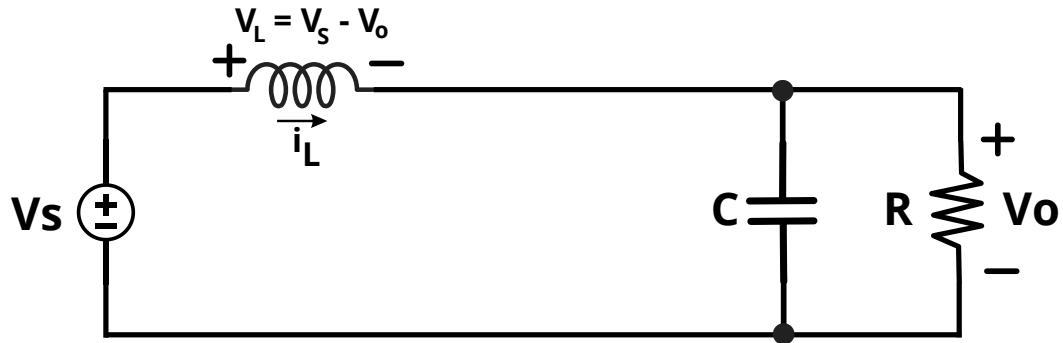


Figura 2.4. Circuito equivalente Conversor Boost com a chave aberta. Adaptado de (RASHID, 1999).

$$V_L = V_s - V_o = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.11)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L} \quad (2.12)$$

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1 - D)T} = \frac{V_s - V_o}{L} \quad (2.13)$$

$$(\Delta i_L)_{\text{aberta}} = \frac{(V_s - V_o)(1 - D)T}{L} \quad (2.14)$$

Usando as equações 2.10 e 2.14, temos

$$(\Delta i_L)_{\text{fechada}} + (\Delta i_L)_{\text{aberta}} = 0 \quad (2.15)$$

$$\frac{V_s DT}{L} + \frac{(V_s - V_o)(1 - D)T}{L} = 0 \quad (2.16)$$

$$V_s(D + 1 - D) - V_o(1 - D) = 0 \quad (2.17)$$

Agora, resolvendo para V_0 temos a relação de ganho de tensão em função do ciclo de trabalho D .

$$V_o = \frac{V_s}{1 - D} \quad (2.18)$$

A equação 2.18 mostra que quando o $D = 0$, a tensão de saída e entrada serão as mesmas. Como a equação 2.18 se baseia em componentes ideais, quando D se aproxima de 1 a tensão de saída tende a infinito. Componentes reais trazem limitações físicas, o que previne esses acontecimentos.

A equação 2.18 mostra que, quando $D = 0$, a tensão de saída é igual à tensão de entrada. Como a equação 2.18 se baseia em componentes ideais, quando D , se aproxima de 1, a tensão de saída tende ao infinito. No entanto, componentes reais impõem limitações físicas que evitam esse comportamento.

2.3 RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA DE POTÊNCIA (MPPT)

Os conversores são amplamente utilizados para o Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (Maximum Power Point Tracking – MPPT), sendo muito comuns em sistemas fotovoltaicos. Como a potência gerada por um painel solar depende da tensão e da corrente de operação, o MPPT rastreia o ponto ideal onde é possível extrair a máxima potência. Como o ponto de operação ideal varia em função da irradiação, esse processo se faz essencial.

Um dos algoritmos mais utilizados é o Perturba e Observa (P&O). Ele consiste em fazer pequenas variações na tensão de entrada do conversor conectado ao painel. Em seguida, a potência é medida novamente. Se houver um aumento, a tensão continua sendo ajustada na mesma direção; caso a potência tenha diminuído, a direção da variação é invertida (VILLALVA; GAZOLI, 2012). Como é possível ver na figura 2.5. Para melhor compreensão o algoritmo do MPPT P&O está exemplificado em um fluxograma na figura 2.6.

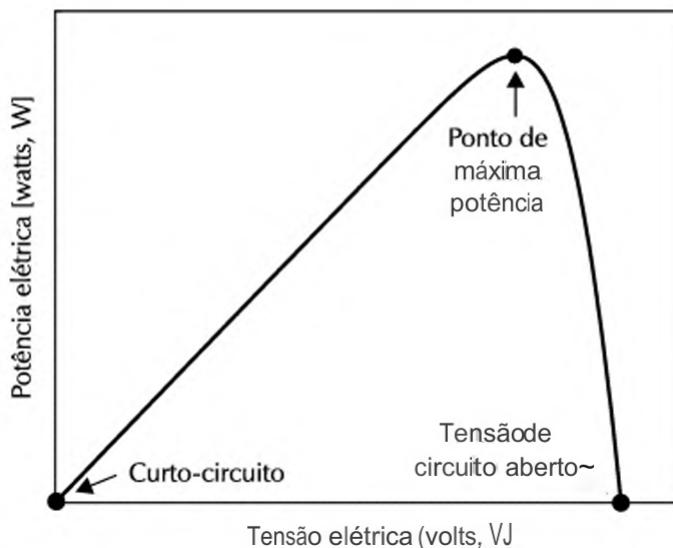


Figura 2.5. Curva característica P- V de potência e tensão de um módulo fotovoltaico (VILLALVA; GAZOLI, 2012)

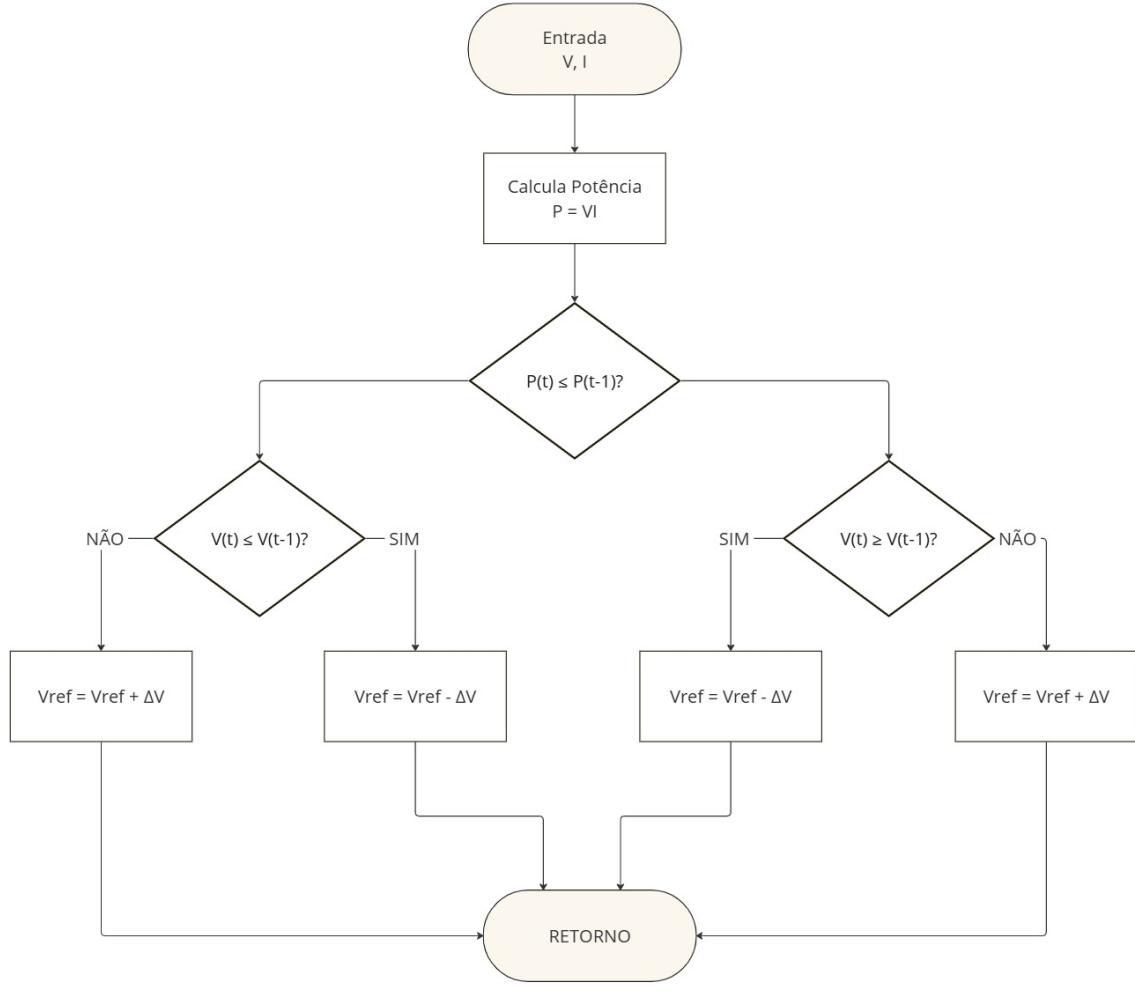


Figura 2.6. Fluxograma MPPT baseado P&O.

2.4 CONTROLE DE POTÊNCIA

Além do MPPT os conversores também possibilitam controlar a potência que está sendo gerada. Seguindo o mesmo princípio usado do algoritmo do MPPT, é possível ajustar dinamicamente a potência em função da tensão do sistema, garantindo o balanço entre geração e carga. Como já visto na figura 2.5 baseado na relação de potência e tensão, é possível realizar o controle da potência gerada (VILLALVA; GAZOLI, 2012; HART, 2011).

O algoritmo utilizado para a implementação também é baseado no P&O, com uma pequena diferença. Além de receber a tensão e a corrente da iteração anterior, também é recebida a potência desejada (P_{ref}), comparando-a com a potência atual. Se $P <$

P_{ref} , a tensão é incrementada em uma unidade; caso contrário, é decrementada. Se a potência for igual à atual, o valor da tensão é mantido, como mostrado no fluxograma 2.7.

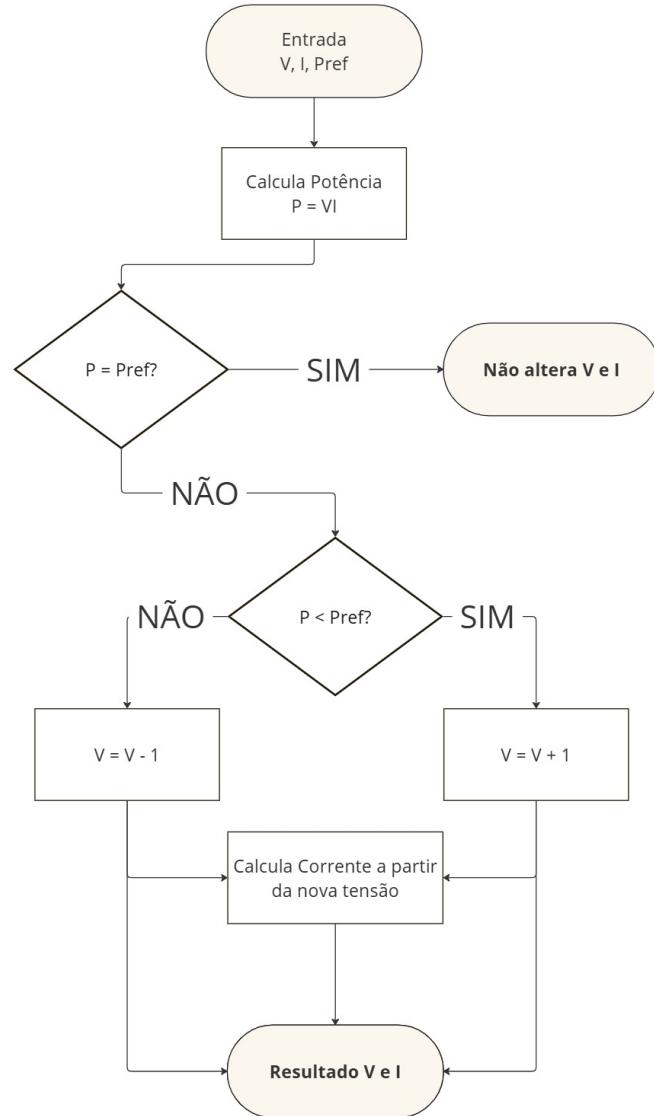


Figura 2.7. Fluxograma Controle limitação de potência.

CAPÍTULO 3

MODELAGEM COMPUTACIONAL

3.1 DESCRIÇÃO DA MICRORREDE

Para o estudo do impacto da geração distribuída em uma microrrede isolada com topologia em anel, foi modelada uma microrrede no ambiente Simulink do MATLAB, como é possível ver na figura 3.1. Nesse sistema, foram modelados quatro geradores fotovoltaicos para a alimentação de quatro cargas distribuídas.

No sistema de distribuição da microrrede, para simular perdas nos condutores, foi utilizada em cada polo uma resistência, interligando cada sistema fotovoltaico a uma carga até formar um anel, tendo a possibilidade da operação em radial através da abertura da chave que conecta a carga 3 ao Sistema Fotovoltaico 3 (PV 3). Por ser uma linha de baixa tensão, foi considerada uma resistência de $0,321 \Omega$ para representar uma distância de 500 metros entre a carga e a geração (BLAABJERG, 2018).

Foi utilizado um conjunto de resistências para as cargas com os seguintes valores: $5,33 \Omega$, $6,66 \Omega$, 8Ω e $9,412 \Omega$, de modo que, ao serem alimentadas por uma tensão de 400 V, resultem, respectivamente, em potências nominais de 30 kW , 24 kW , 20 kW e 17 kW .

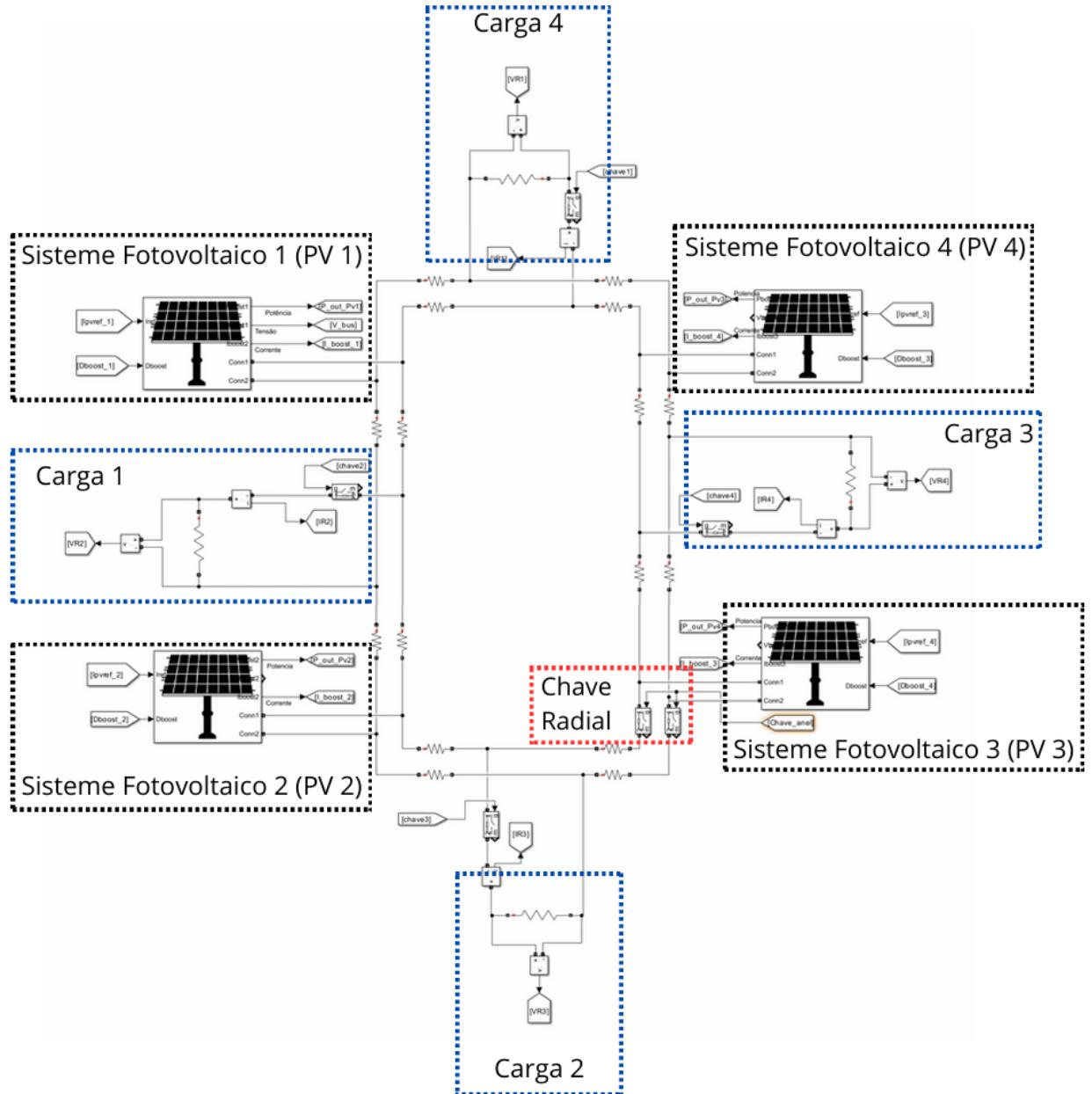


Figura 3.1. Simulação Microrrede SIMULINK.

3.2 SISTEMA FOTOVOLTAICO

Para a simulação dos sistemas fotovoltaicos foram utilizados os dados da tabela 3.1. Através deles foram obtidas as curvas de corrente em função da tensão e de potência em função da tensão para cada painel fotovoltaico, considerando uma temperatura de 25°C e uma irradiância variando de 200 a 1000 W/m², como mostrado nas figuras 3.2 e 3.3

Tabela 3.1. Dados painel Fotovoltaico

I_{cc}	9,64 A	Corrente de curto-circuito
V_{ca}	38,3 V	Tensão de circuito aberto
I_{max}	9,06 A	Corrente no ponto de máxima potência
V_{max}	31,4 V	Tensão no ponto de máxima potência
P	284,5 W	Potência máxima

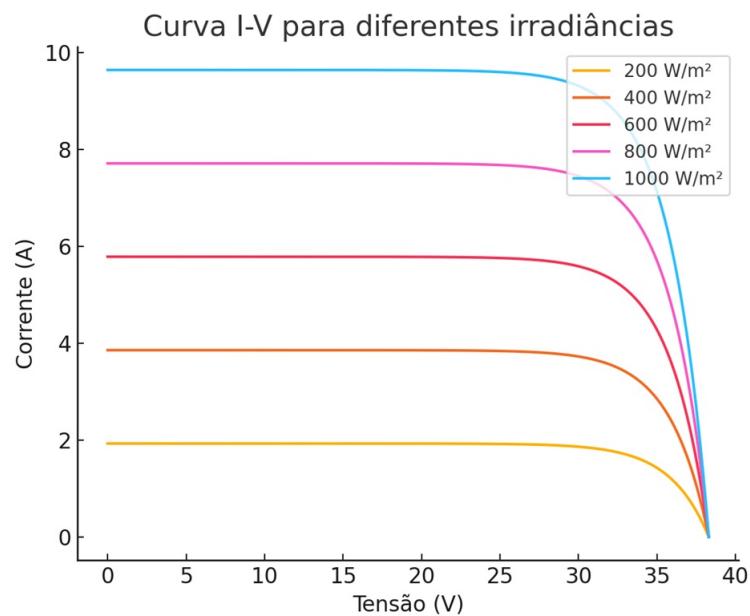


Figura 3.2. Curva característica $I-V$ do Painel Solar.

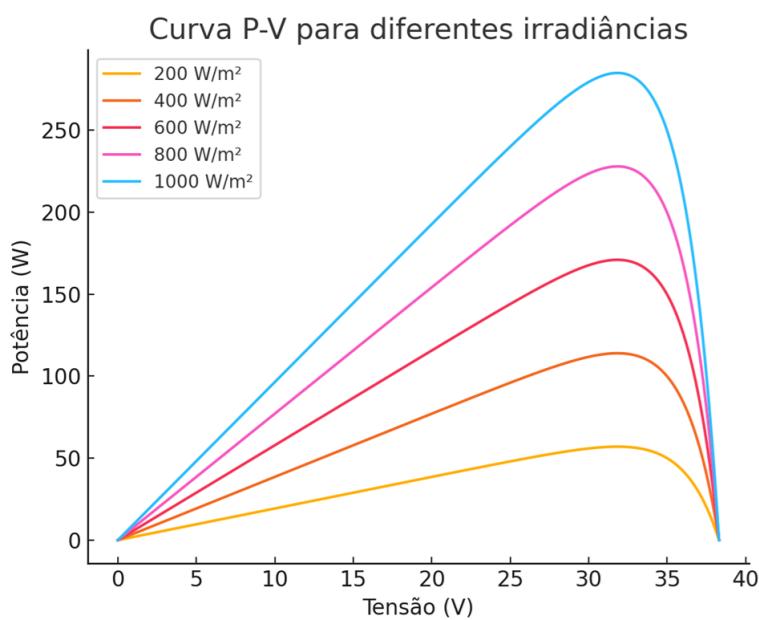


Figura 3.3. Curva característica $P-V$ do Painel Solar.

Realizaram-se combinações de strings e arranjos de módulos fotovoltaicos para atender às tensões e potências nominais de cada gerador. Na simulação, foram consideradas as potências nominais descritas na tabela 3.2.

Tabela 3.2. Configuração dos Geradores Fotovoltaicos

Gerador	Potência (kW)	Strings	Arrays
Gerador 1	30	9	12
Gerador 2	24	9	9
Gerador 3	20	9	8
Gerador 4	17	9	7

De acordo com as configurações dos sistemas fotovoltaicos, estabelecidas com base em suas potências nominais, as curvas características variam conforme a potência do sistema. Para cada sistema, obtém-se uma resposta distinta em relação à tensão e à corrente, influenciando diretamente a potência em função da tensão. Apresentadas nas Figuras 3.4, 3.5, 3.6, 3.7.

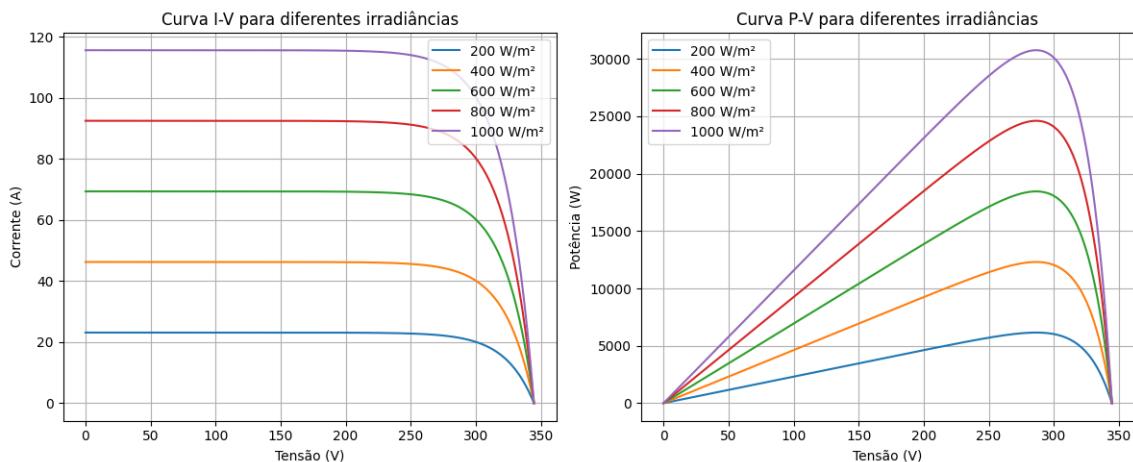


Figura 3.4. Curva característica P - V e I - V do Painel Solar de 30 kW.

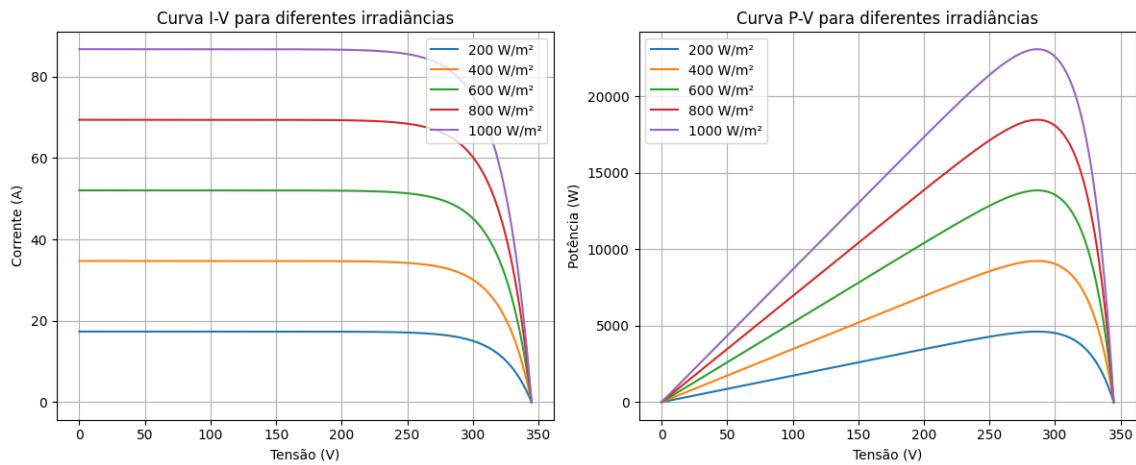


Figura 3.5. Curva característica P - V e I - V do Painel Solar de 24 kW.

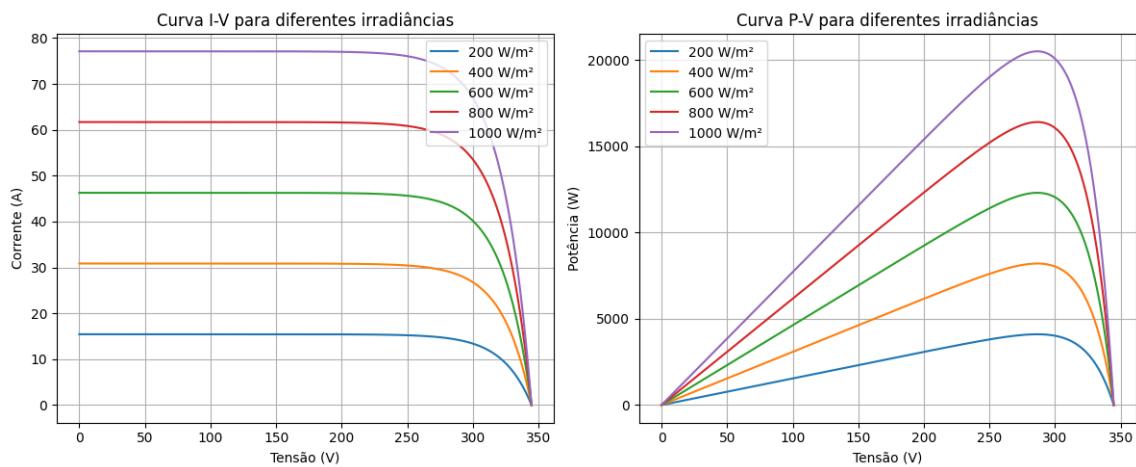


Figura 3.6. Curva característica P - V e I - V do Painel Solar de 20 kW.

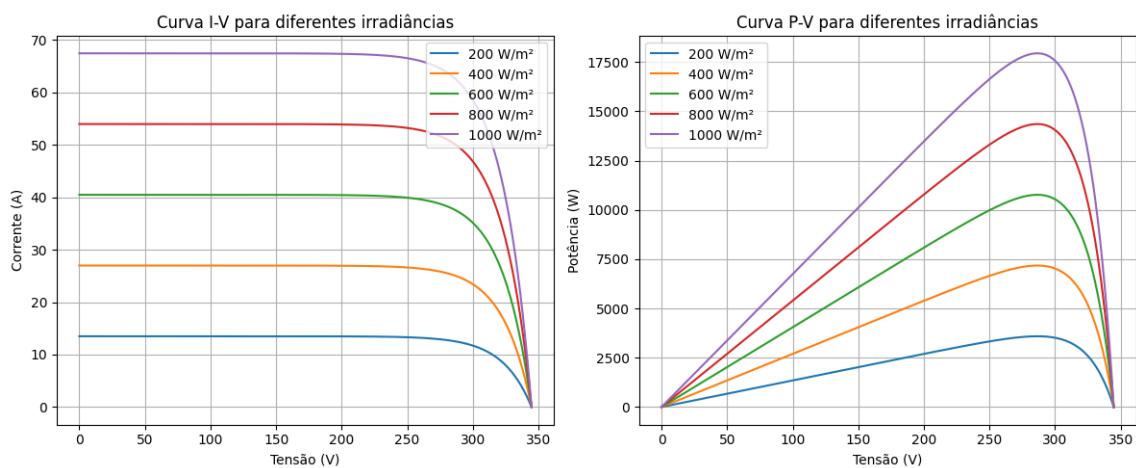


Figura 3.7. Curva característica P - V e I - V do Painel Solar de 17 kW.

Por meio de algoritmos parametrizados pelas curvas de geração já mostradas, foi

possível estabelecer correntes de referência para a simulação dos sistemas fotovoltaicos. Dentro de cada bloco, que simula um sistema fotovoltaico, há uma fonte de corrente conectada a um conversor boost. A corrente e a tensão de referência são obtidas pelo algoritmo do MPPT ou pelo controle de potência e usadas na fonte de corrente. O cálculo do ciclo de trabalho também é feito com base na tensão de referência e na tensão desejada na saída do conversor, que, neste caso, é de 400 V.

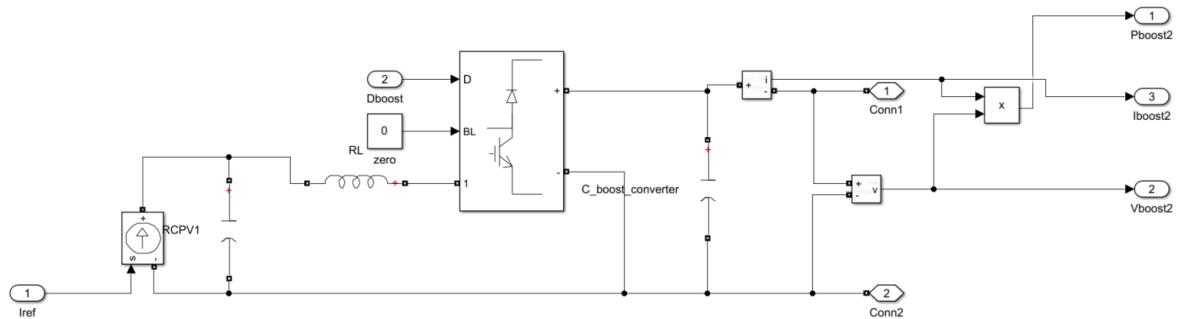


Figura 3.8. Simulação Sistema Fotovoltaico.

3.3 RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA DE POTÊNCIA (MPPT)

O algoritmo efetivamente utilizado para o MPPT se assemelha ao P&O. Ele se inicia com a tensão igual a zero e, a cada iteração, a nova potência é comparada com o valor da iteração anterior. Se a potência for maior, a tensão é incrementada em uma unidade, e a corrente correspondente é calculada. Com os novos valores de tensão e corrente, a potência é recalculada. Caso a nova potência seja menor que a anterior, a tensão anterior é mantida, conforme ilustrado no Fluxograma 3.9.

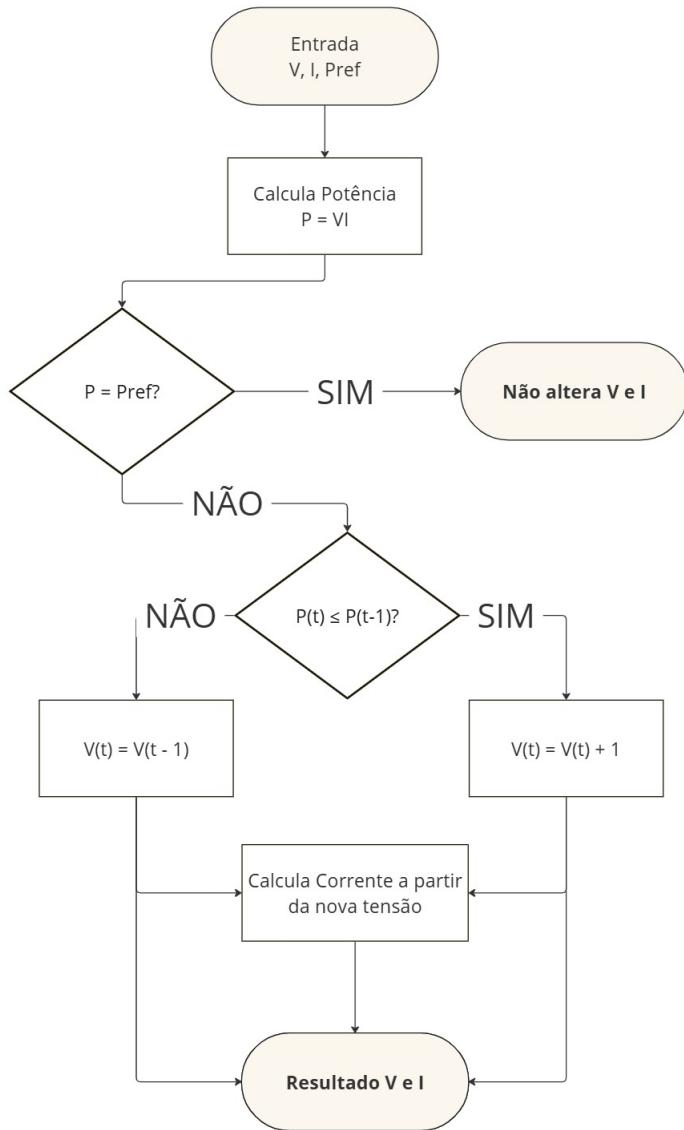


Figura 3.9. Fluxograma MPPT baseado P&O.

3.4 CONTROLE DE POTÊNCIA

O algoritmo de controle de potência implementado também foi baseado no P&O. Ele realiza um rastreamento semelhante ao MPPT, porém, em vez de buscar a máxima potência do sistema, opera em torno de uma potência de referência. Na simulação, foi necessário alimentar o algoritmo de controle de potência com a tensão de referência do MPPT para garantir que o ponto de operação não ultrapassasse o ponto de máxima potência, evitando o colapso do sistema. Como é possível ver na Figura 3.10.

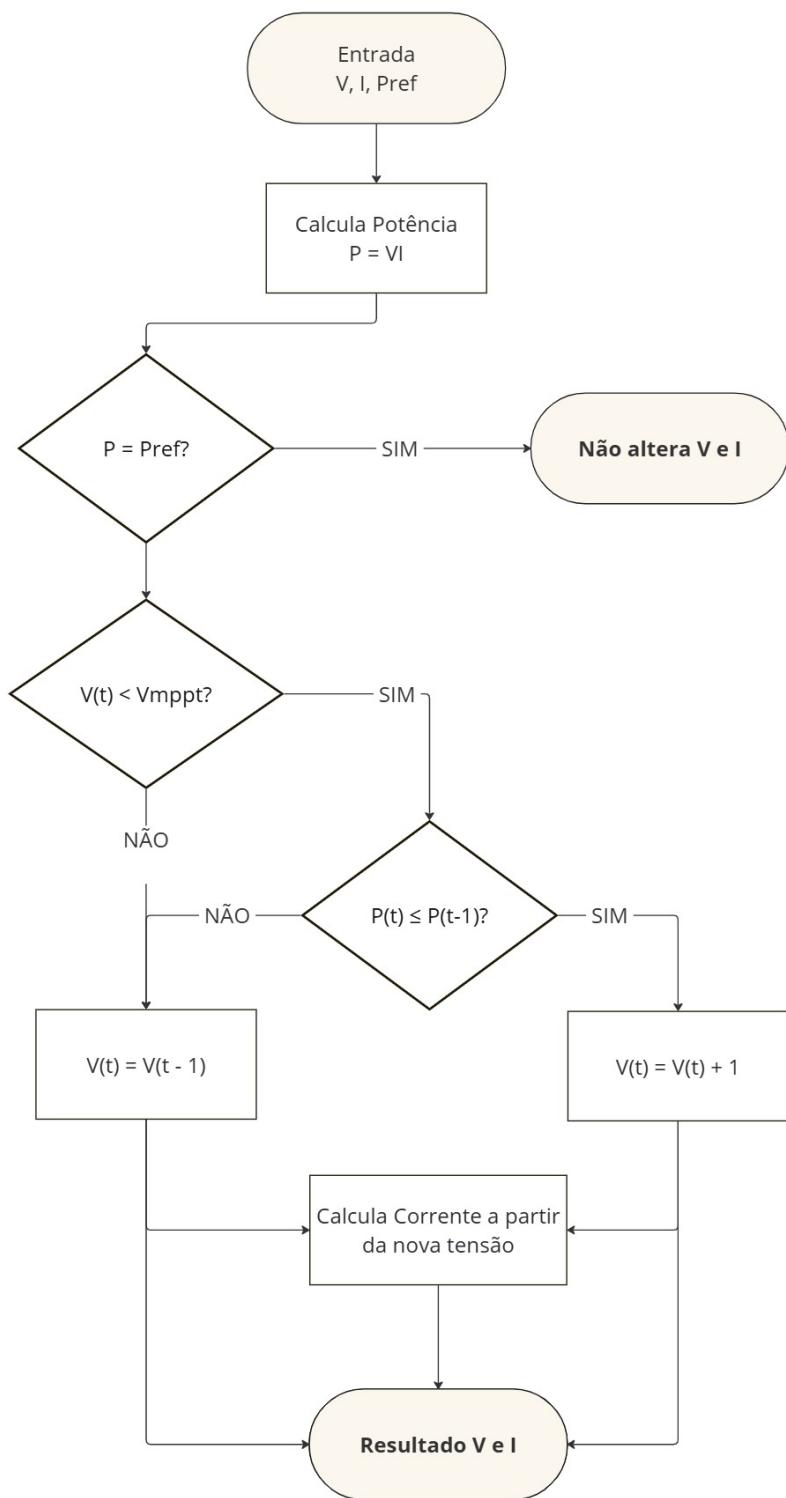


Figura 3.10. Fluxograma controle de potência baseado P&O.

3.5 GERENCIAMENTO DA MICRORREDE

Para gerenciar a distribuição de potência da microrrede, foram consideradas a quantidade de cargas conectadas, a média da tensão nos pontos de conexão das cargas e a potência gerada pelos geradores fotovoltaicos. O algoritmo compara a potência gerada com a potência nominal das cargas. Se a potência gerada for insuficiente, a potência dos geradores é aumentada gradativamente até que todos operem no MPPT. Se, mesmo assim, a geração não for suficiente para suprir a demanda, as cargas são desconectadas sequencialmente, conforme estabelecido. Caso a geração seja maior que a demanda, os MPPTs dos geradores são desligados, e a potência é redistribuída proporcionalmente entre eles. Assim como é mostrado no fluxograma 3.11.

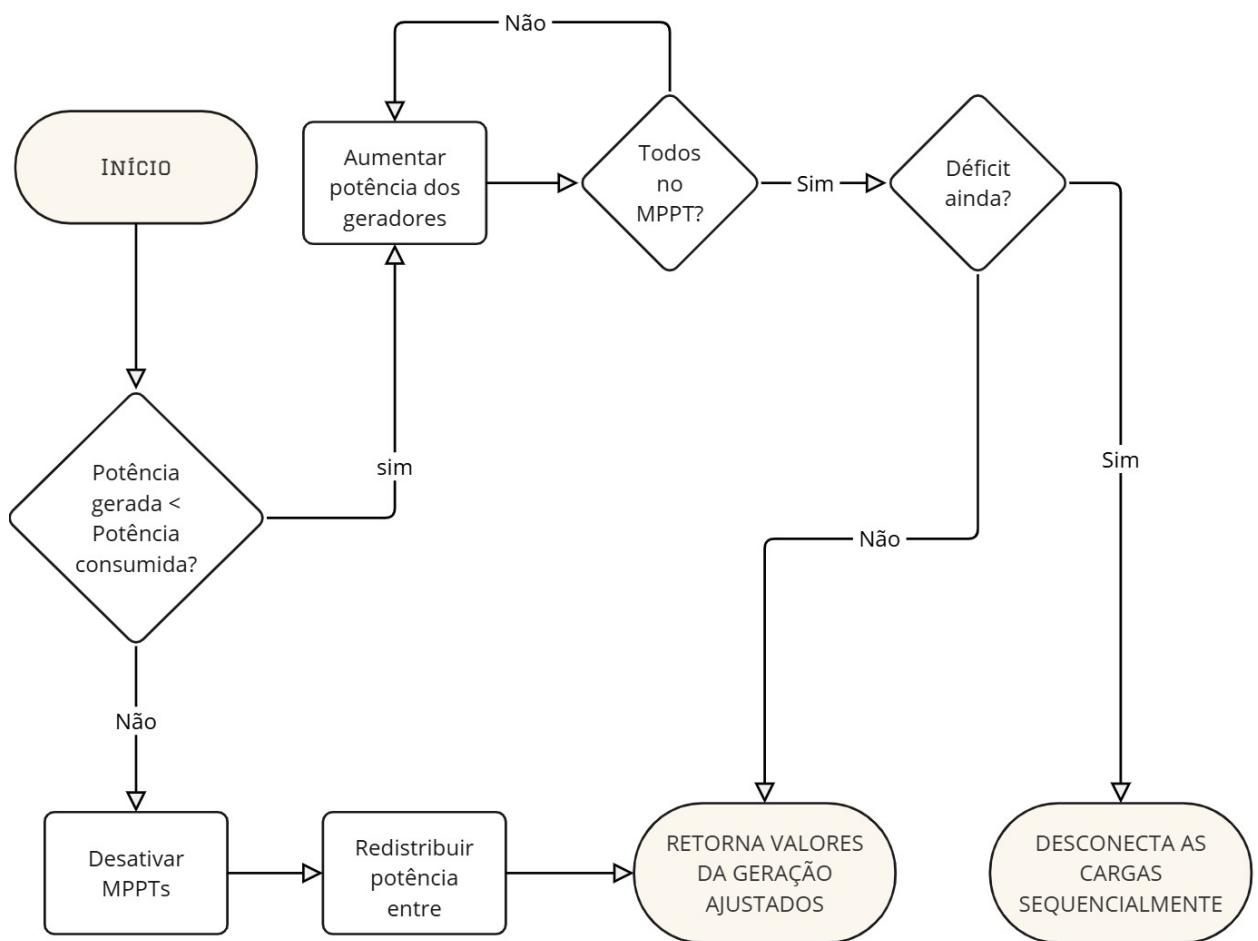


Figura 3.11. Fluxograma algorítmico do gerenciamento balanço de carga.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

Neste capítulo, a microrrede descrita no Capítulo 3 será submetida a variações na geração dos sistemas fotovoltaicos e variação nas cargas conectadas, permitindo a observação do comportamento da tensão nas cargas. Além disso, será possível analisar a atuação do gerenciamento no equilíbrio entre geração e demanda de carga, por meio da abertura das chaves correspondentes às cargas e do ajuste do ponto de operação dos sistemas fotovoltaicos, de forma a controlar a potência injetada na rede pela geração.

4.1 MICRORREDE

Utilizando as potências nominais, dos sistemas fotovoltaicos e das cargas descritas no capítulo 3, foi possível realizar diversos casos em que a potência da geração variava em função da irradiação. Considerando as perdas da linha, utilizando na simulação uma resistência de $0,321 \Omega$ para representar 500 metros de distância. Os valores nominai de carga e geração estão presentes na tabela 4.1.

Componentes	Potências Nominais
Carga 1	30 kW
Carga 2	24 kW
Carga 3	20 kW
Carga 4	17 kW
Gerador PV 1	30 kW
Gerador PV 2	24 kW
Gerador PV 3	20 kW
Gerador PV 4	17 kW

Tabela 4.1. Potências Nominais

4.1.1 Caso 1

Neste primeiro caso, foi simulada a microrrede operando com seus valores nominais, sem variações na geração e com todas as chaves fechadas, garantindo a operação com carga máxima. Percebe-se que, nos sinais de tensão e potência apresentados nas Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4, após 230 ms, tempo necessário para o carregamento dos componentes dos conversores, a tensão e a potência se mantêm estáveis. Além disso, é possível observar o comportamento das tensões nas cargas; há uma queda de tensão na carga de maior potência, aumentando a solicitação dos sistemas e resultando em sobretensão nas demais cargas, aumentando as potências nas cargas 2, 3 e 4 em aproximadamente 2%.

Componentes da Microrrede	Potências obtidas	Tensões nos terminais
Carga 1	28,5 kW	390 V
Carga 2	24,5 kW	404 V
Carga 3	20,3 kW	403 V
Carga 4	17,2 kW	402 V
Gerador PV 1	33,8 kW	446 V
Gerador PV 2	25,4 kW	440 V
Gerador PV 3	21,7 kW	430 V
Gerador PV 4	18,5 kW	428 V

Tabela 4.2. Potências e Tensões das Cargas e Geradores.

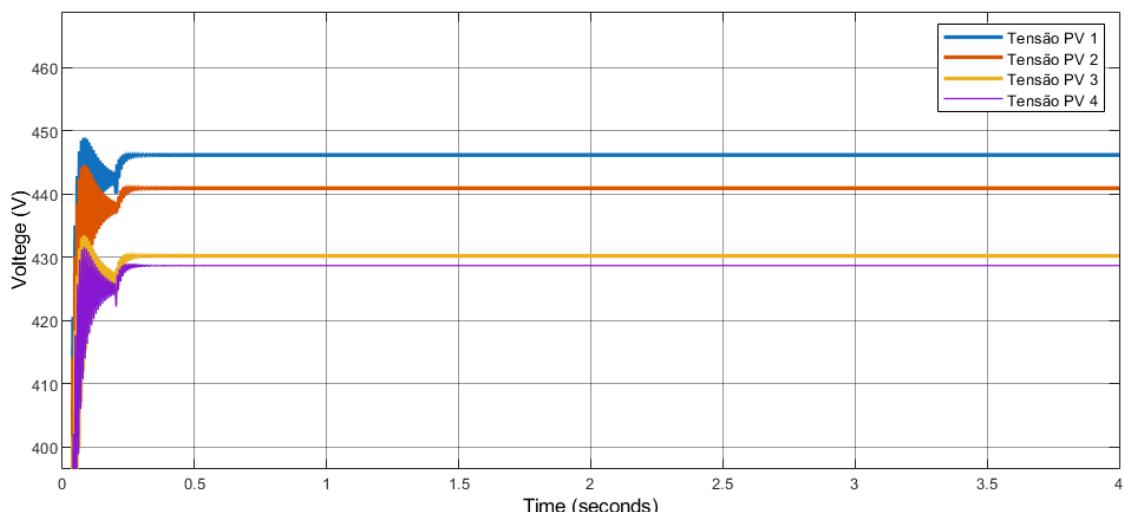


Figura 4.1. Gráfico das Tensões dos Geradores do Caso 1.

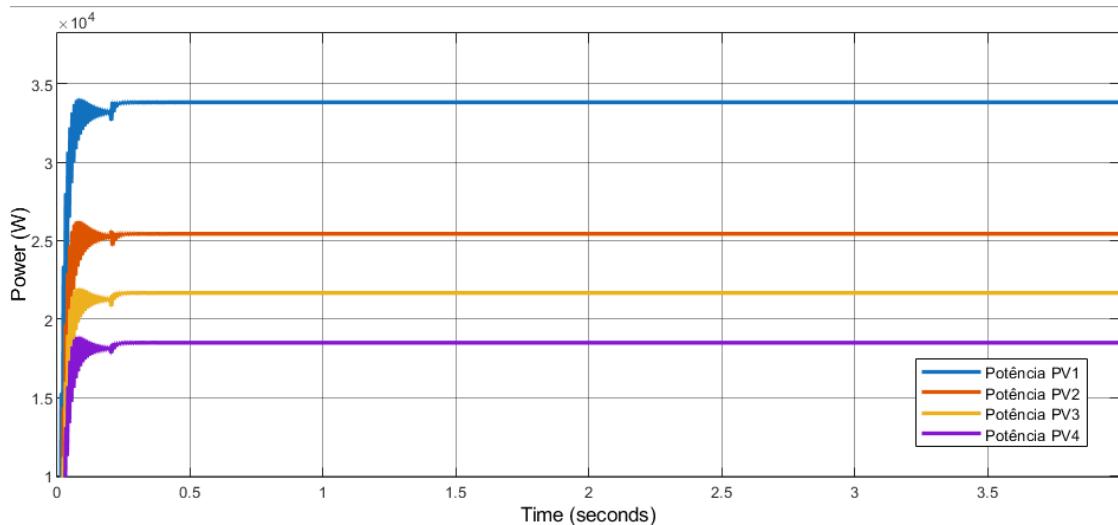


Figura 4.2. Gráfico das Potências dos Geradores do Caso 1.

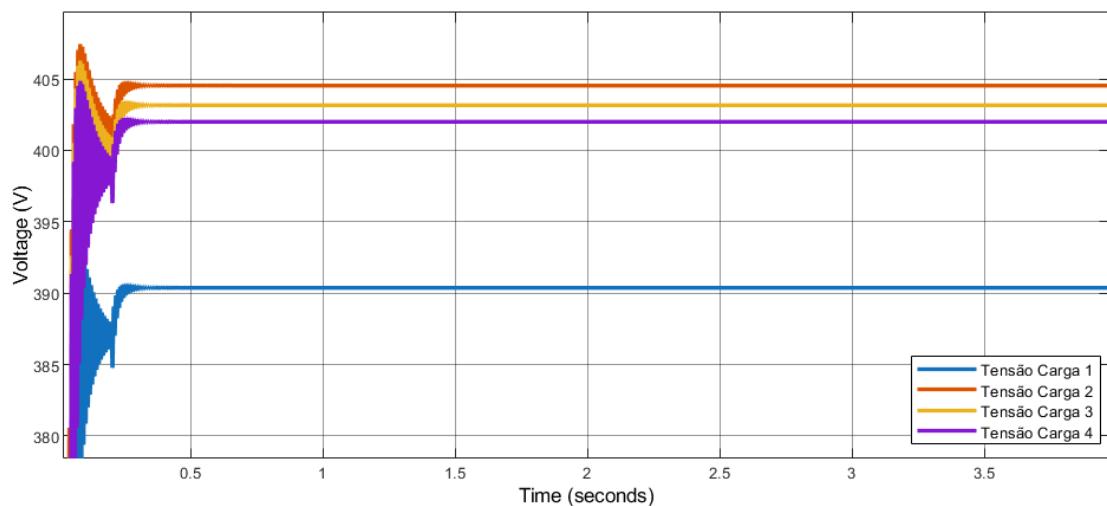


Figura 4.3. Gráfico das Tensões das Cargas do Caso 1.

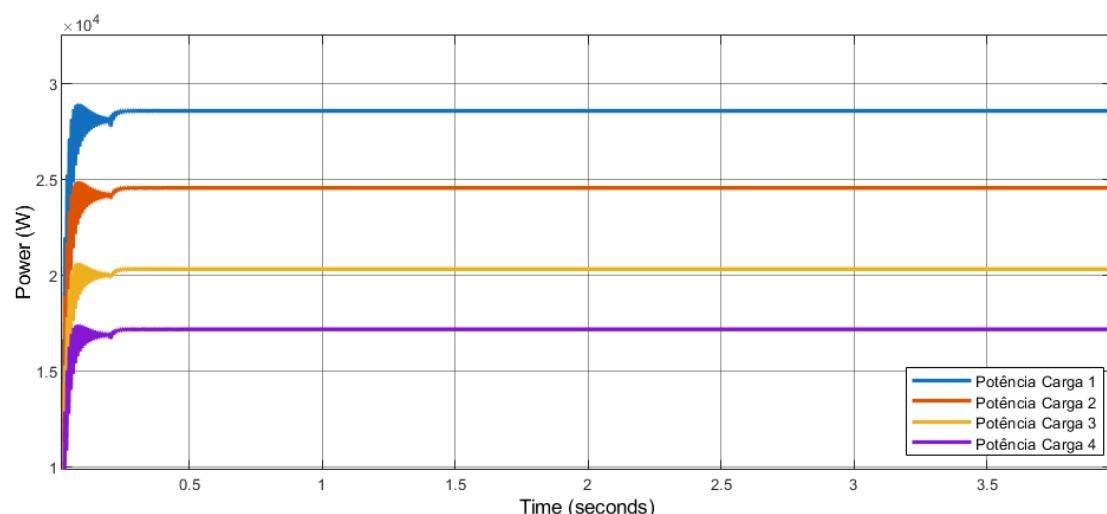


Figura 4.4. Gráfico das Potências das Cargas do Caso 1.

4.2 CASO 2

No segundo caso, a microrrede foi simulada operando inicialmente com seus valores nominais. No entanto, no instante de 1 segundo, foi aplicada uma variação na irradiação do sistema fotovoltaico 4 (PV 4), de 1000 para 600 W/m². Em seguida, no instante de 3 segundos, foi aplicada outra variação na irradiação do sistema fotovoltaico 2 (PV 2), de 1000 para 800 W/m², permitindo observar a atuação do sistema de gerenciamento da rede no equilíbrio entre carga e geração. Através da leitura dos gráficos apresentados nas Figuras 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8. Foi possível observar a abertura da chave referente a Carga 4, 30 ms após a queda da geração no sistema fotovoltaico 4 (PV 4), com o objetivo de diminuir a potência demandada da microrrede. Com a Carga 4 desconectada, há agora mais geração do que carga, e o sistema de gerenciamento reduz a potência gerada proporcionalmente, restabelecendo o equilíbrio na microrrede. O gerenciamento da microrrede entra em ação novamente no instante de 3 segundos, quando ocorre a queda na geração do sistema fotovoltaico 2 (PV 2), aumentando a potência gerada nos outros geradores. Também foi possível observar um aumento na queda de tensão nas cargas, uma vez que há maior contribuição de potência proveniente dos geradores mais distantes. Isso acarreta um aumento nas perdas da rede, resultando em uma queda de tensão ainda mais acentuada.

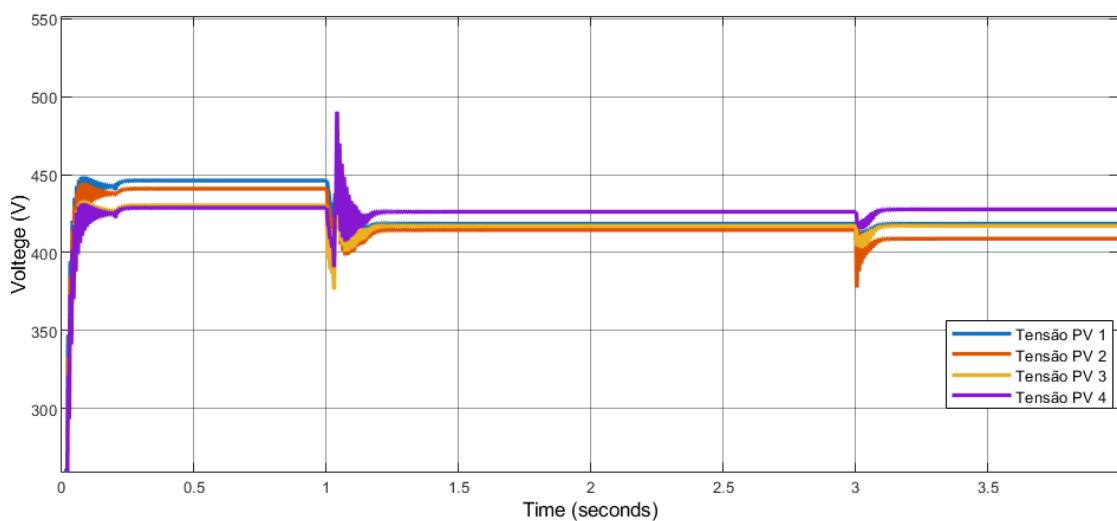


Figura 4.5. Gráfico das Tensões dos Geradores do Caso 2.

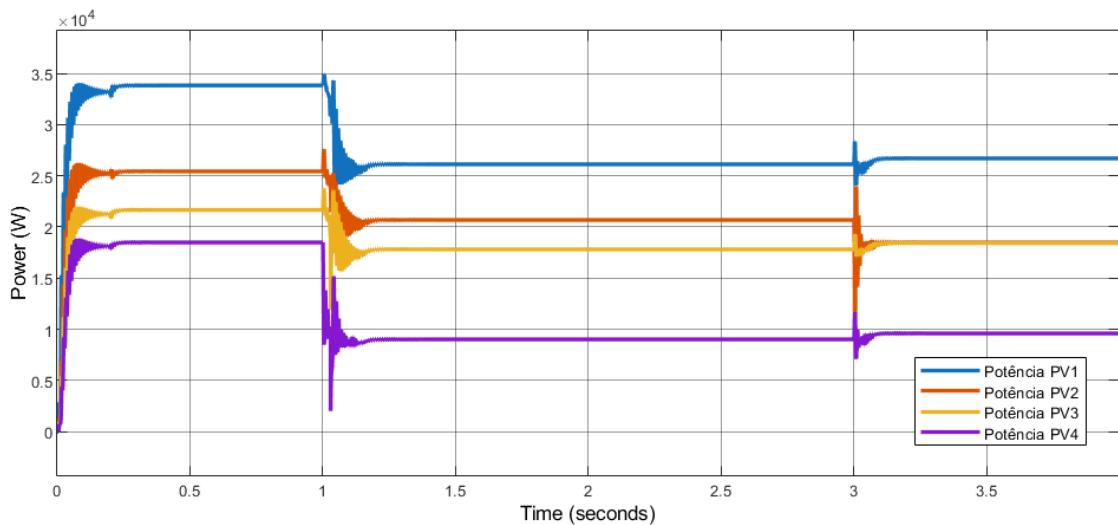


Figura 4.6. Gráfico das Potências dos Geradores do Caso 2.

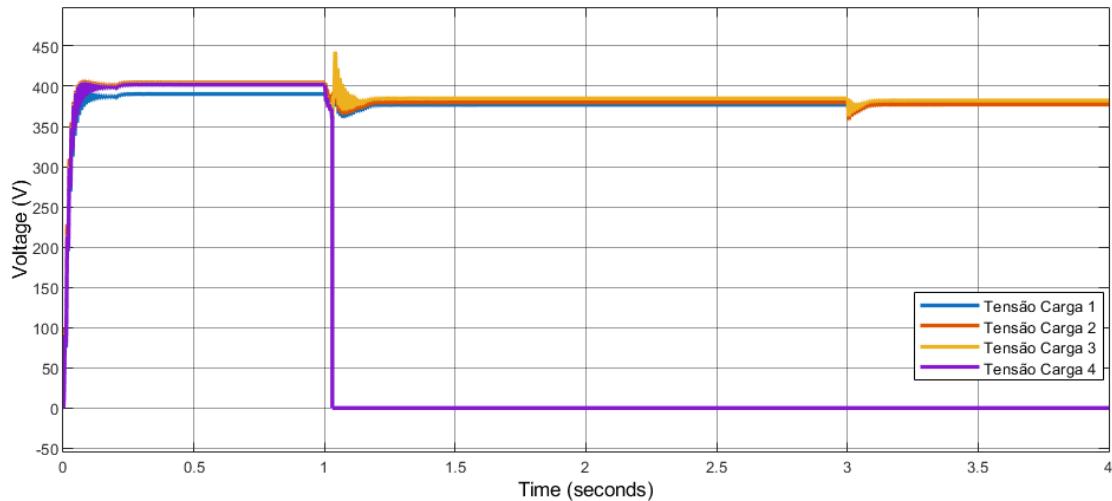


Figura 4.7. Gráfico das Tensões das Cargas do Caso 2.

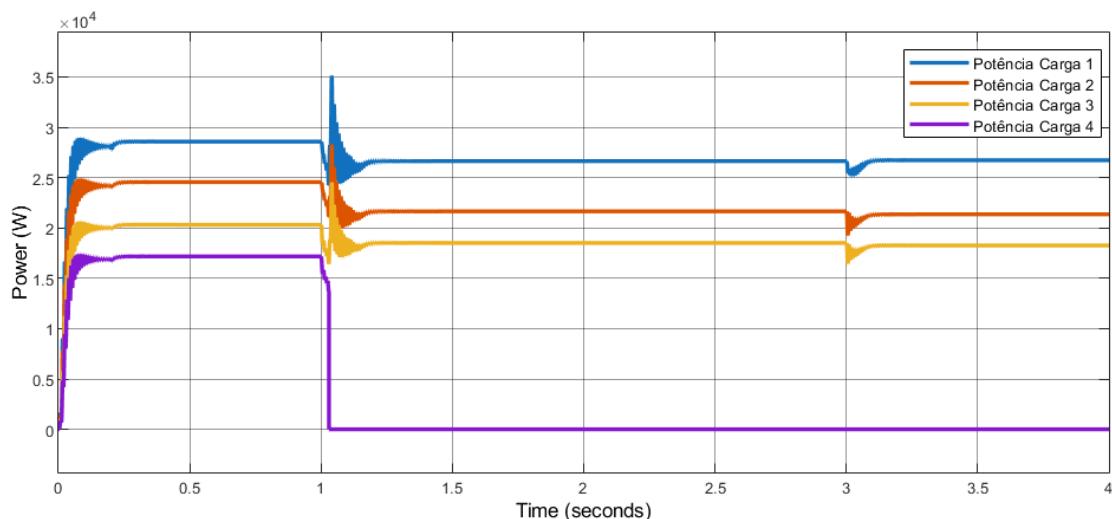


Figura 4.8. Gráfico das Potências das Cargas do Caso 2.

4.3 CASO 3

Nesse terceiro caso, a microrrede foi novamente simulada operando inicialmente com seus valores nominais. No instante de 1 segundo, foi aplicada uma variação na irradiância do sistema fotovoltaico 1 (PV 1), de 1000 para 800 W/m². Em seguida, no instante de 2 segundos, foi aplicada outra variação na irradiância do sistema fotovoltaico 4 (PV 4), de 1000 para 100 W/m². A análise dos gráficos apresentados nas Figuras 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12 confirma o esperado comportamento da microrrede, com abertura de chaves nos instantes de queda na geração. A chave referente à Carga 4 foi aberta 35 ms após a queda na geração do sistema fotovoltaico 1 (PV 1), enquanto a chave referente à Carga 3 foi aberta 380 ms após a queda na geração do sistema fotovoltaico 4 (PV 4).

Nos instantes em que ocorreram quedas de tensão, foi possível observar sobretensões nos terminais das cargas, próximas a 450 V, resultantes da abertura das chaves para a redução de carga. Como a microrrede tentava suprir a demanda de potência antes de abrir as chaves das cargas, a liberação repentina de carga gerou um grande desbalanço de potências, resultando em um pico de tensão nas cargas.

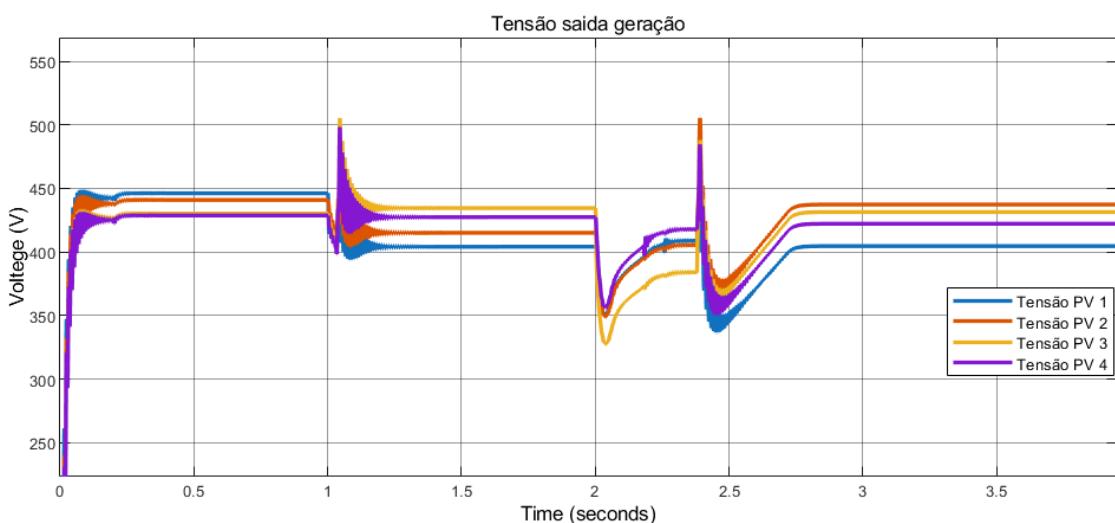


Figura 4.9. Gráfico das Tensões dos Geradores do Caso 3.

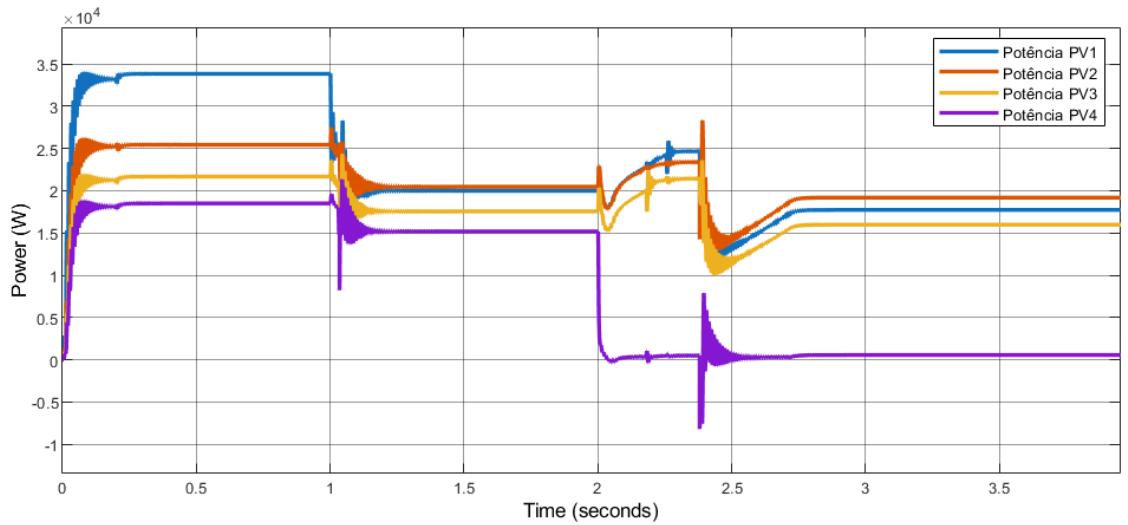


Figura 4.10. Gráfico das Potências dos Geradores do Caso 3.

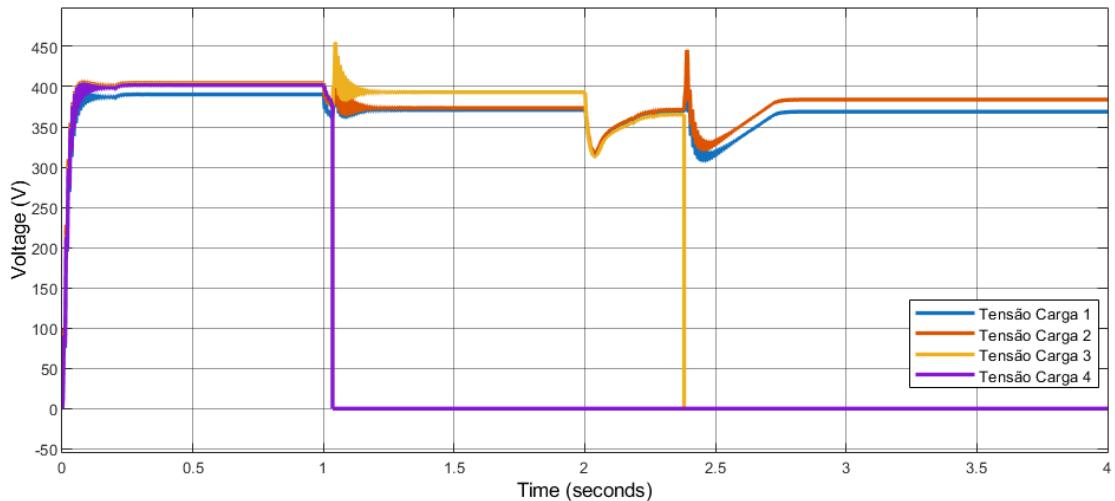


Figura 4.11. Gráfico das Tensões das Cargas do Caso 3.

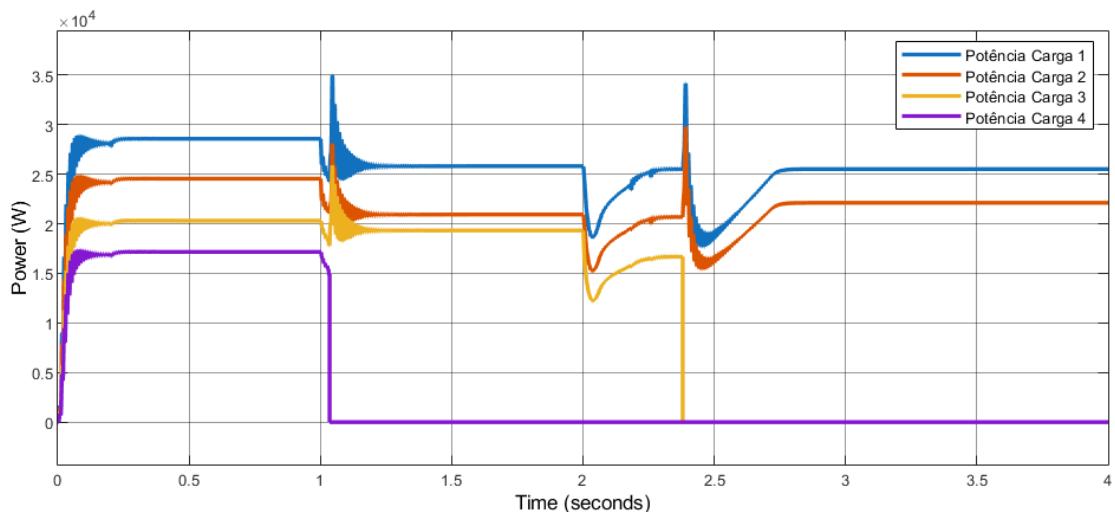


Figura 4.12. Gráfico das Potências das Cargas do Caso 3.

4.4 CASO 4

Nesse quarto caso, a microrrede foi novamente simulada operando inicialmente com seus valores nominais. No instante de 2 segundos, foi aplicada uma variação na irradiação do sistema fotovoltaico 1 (PV 1), de 1000 para 400 W/m², e no sistema fotovoltaico 2 (PV 2), de 1000 para 100 W/m². Em seguida, no instante de 3 segundos, foi aplicada outra variação na irradiação do sistema fotovoltaico 4 (PV 4), de 1000 para 100 W/m².

A análise dos gráficos apresentados nas Figuras 4.13, 4.14, 4.15 e 4.16 mostra que, devido à grande queda na geração no instante de 2 segundos, duas cargas foram desconectadas. A chave da Carga 1 abriu após 10 ms, e a chave da Carga 2 abriu após 135 ms. Após a nova queda na geração, no instante de 3 segundos, houve mais liberação de carga, e a chave referente à Carga 3 foi aberta após 80 ms. Nesse caso, foi possível observar afundamentos severos na tensão e uma lenta recuperação da rede, causada principalmente pela variação abrupta na geração.

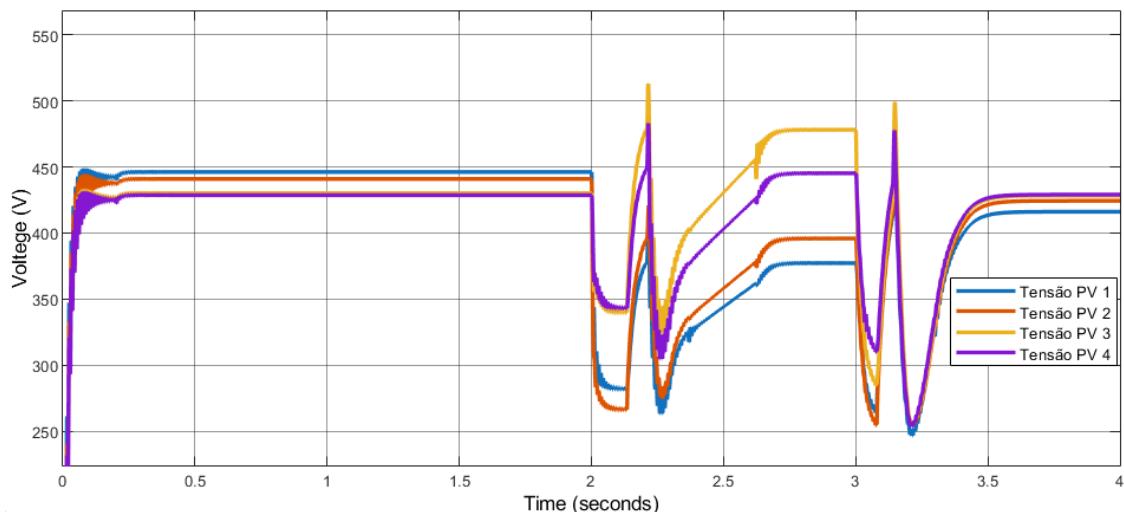


Figura 4.13. Gráfico das Tensões dos Geradores do Caso 4.

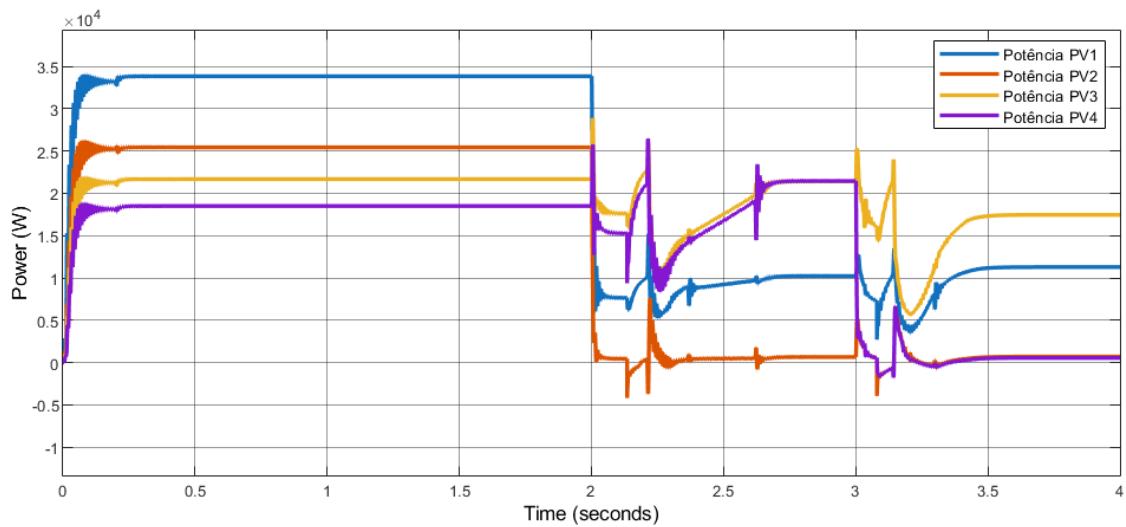


Figura 4.14. Gráfico das Potências dos Geradores do Caso 4.

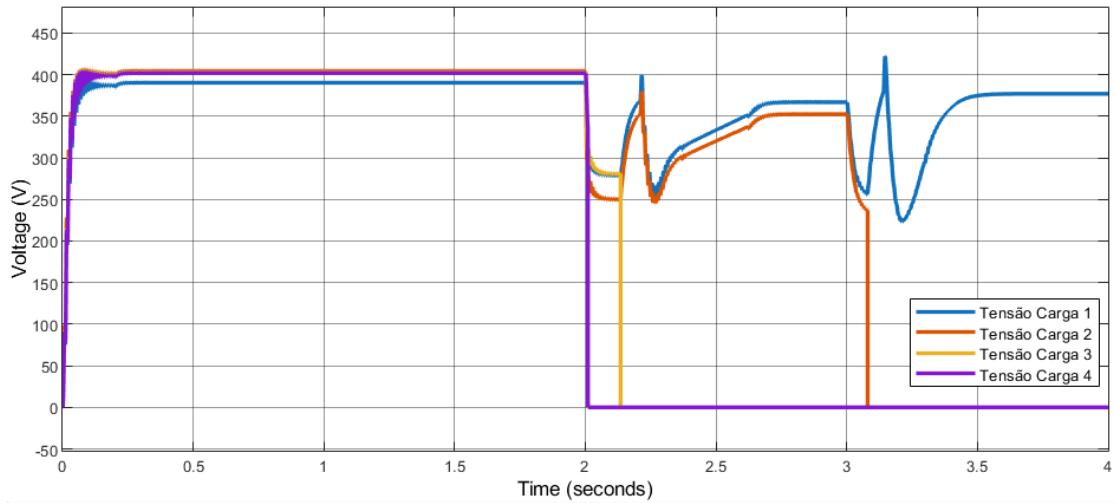


Figura 4.15. Gráfico das Tensões das Cargas do Caso 4.

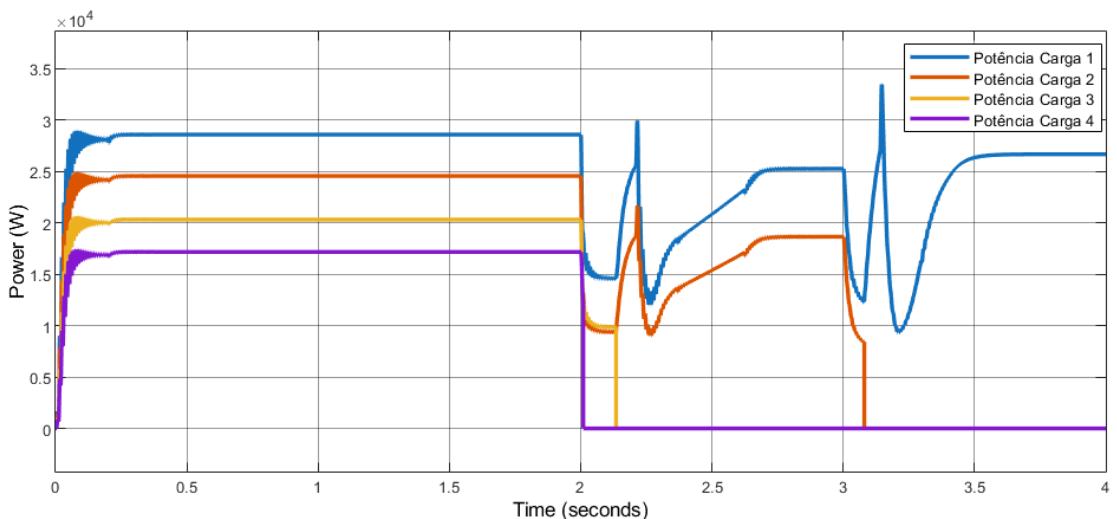


Figura 4.16. Gráfico das Potências das Cargas do Caso 4.

4.5 CASO 5

Nesse quinto caso, a simulação da microrrede foi iniciada com uma potência inferior a nominal, tanto em carga quanto em geração. As potências iniciais da geração foram:

- Sistema Fotovoltaico 1 (PV1): 15 kW;
- Sistema Fotovoltaico 2 (PV2): 14 kW;
- Sistema Fotovoltaico 3 (PV3): 15 kW;
- Sistema Fotovoltaico 4 (PV4): 17 kW;

Além da redução nas potências da geração, a simulação inicio-se com apenas as Cargas 2, 3 e 4 conectadas à microrrede, reduzindo assim 30 kW da carga nominal. Após 2 segundos de simulação, a Carga 1 foi conectada à microrrede. Através da análise dos gráficos apresentados nas Figuras 4.17, 4.18, 4.19 e 4.20, é possível observar um afundamento nas tensões logo após a conexão da carga, com valores de aproximadamente 300 V, e estabilizando-se em aproximadamente em 400 V após 200 ms. Após a estabilização o sistema apresentou somente as quedas de tensões esperadas como já foi simulada no Caso 1.

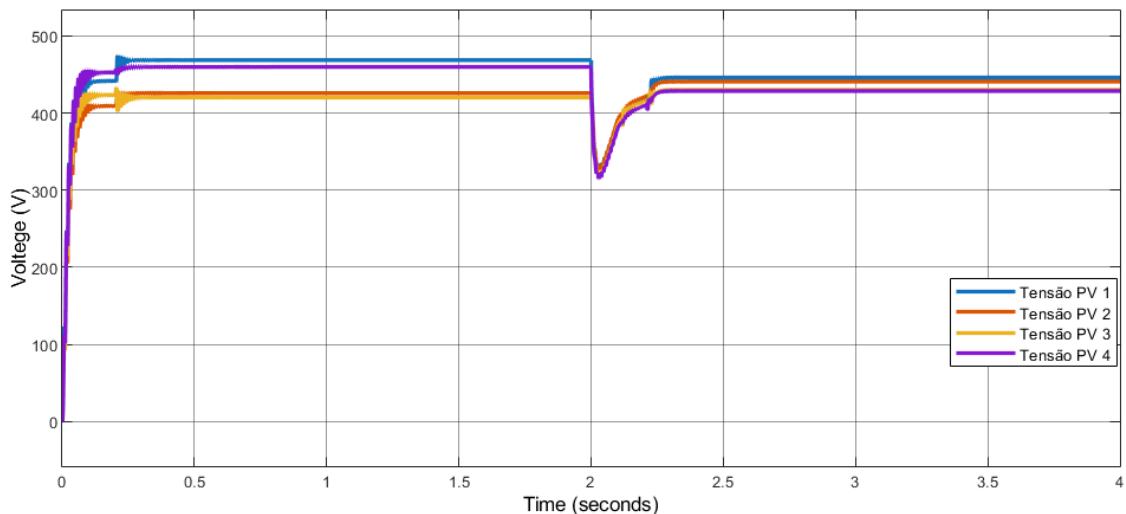


Figura 4.17. Gráfico das Tensões dos Geradores do Caso 5.

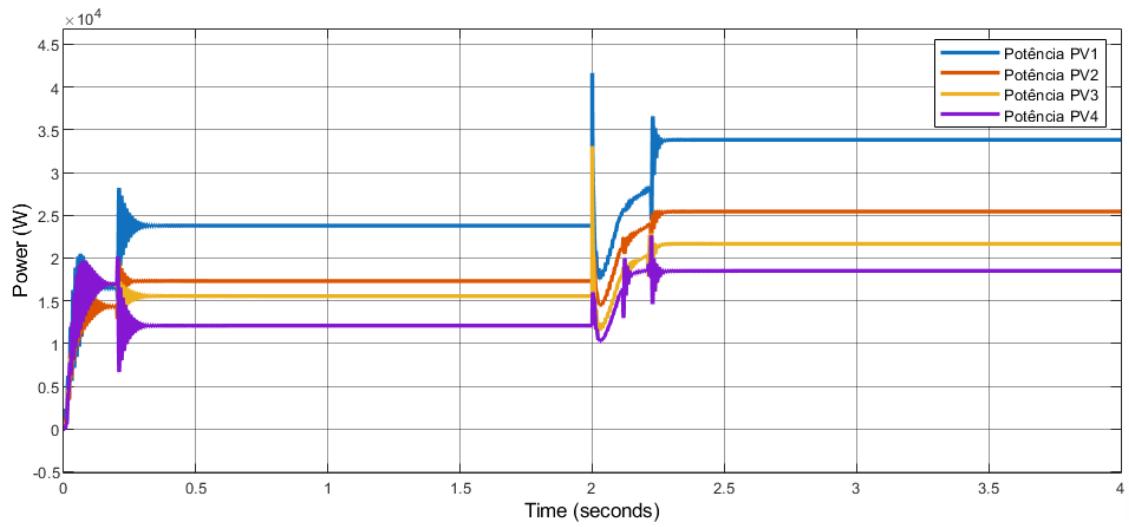


Figura 4.18. Gráfico das Potências dos Geradores do Caso 5.

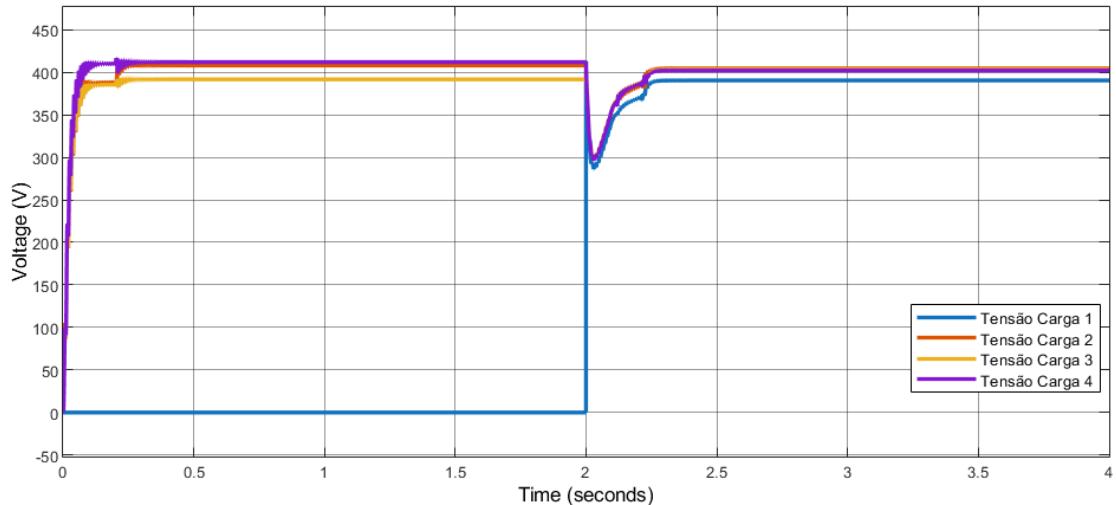


Figura 4.19. Gráfico das Tensões das Cargas do Caso 5.

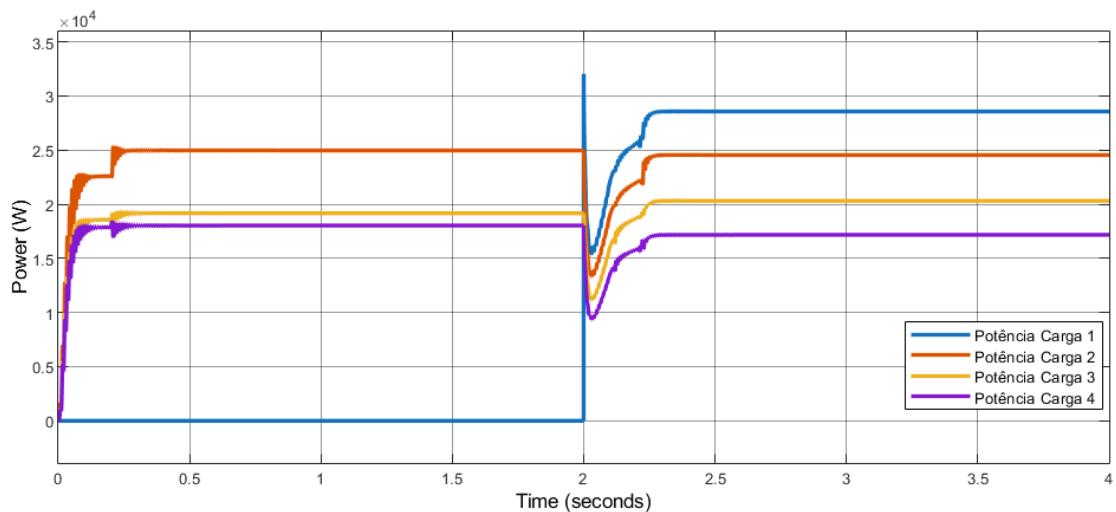


Figura 4.20. Gráfico das Potências das Cargas do Caso 5.

4.6 CASO 6

No sexto caso a microrrede foi simulada com os valores nominais de potências, e com todas as cargas conectadas. Após 2 segundos de funcionamento, foi aberta a chave que interliga a Carga 2 ao sistema fotovoltaico 3 (PV 3), fazendo com que a microrrede operasse na topologia radial em vez de anelar. Através da análise dos gráficos apresentados nas Figuras 4.21, 4.22, 4.23 e 4.24, é possível notar no momento da abertura da chave uma grande diferença na distribuição de potência, tendo um aumento considerável nas perdas na linha de distribuição, resultando em quedas de tensão e sobretensões ao longo da microrrede.

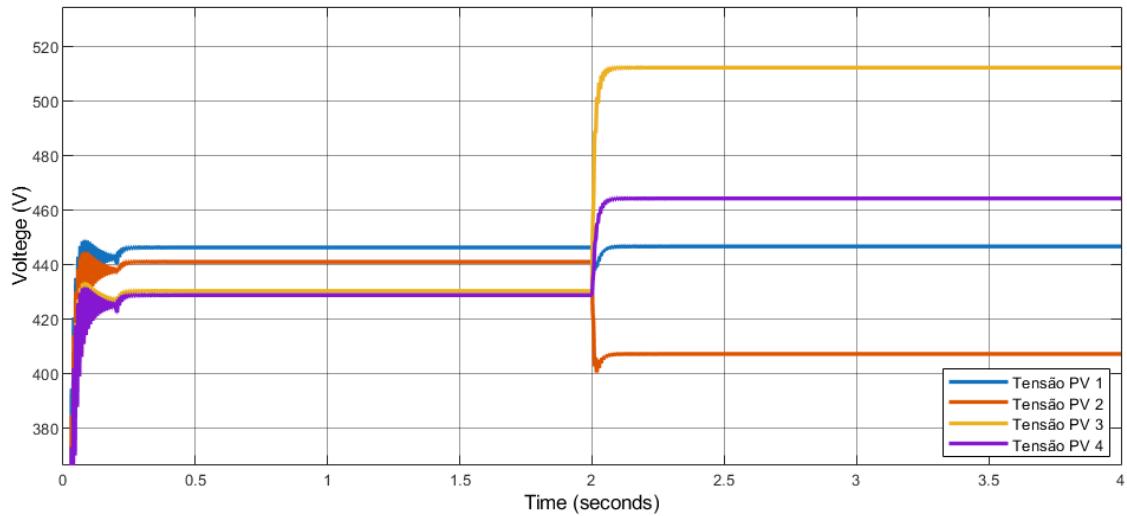


Figura 4.21. Gráfico das Tensões dos Geradores do Caso 6.

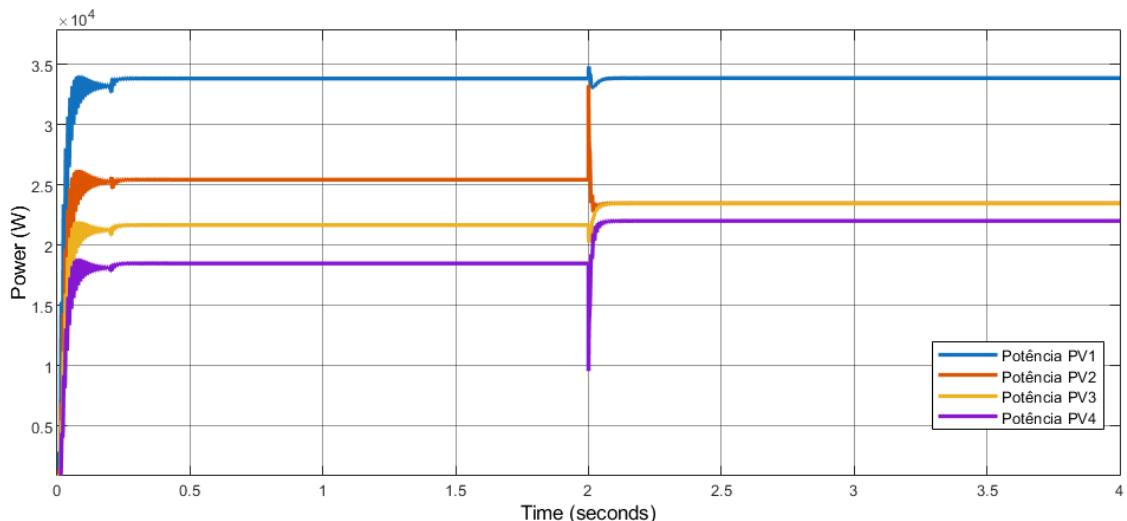


Figura 4.22. Gráfico das Potências dos Geradores do Caso 6.

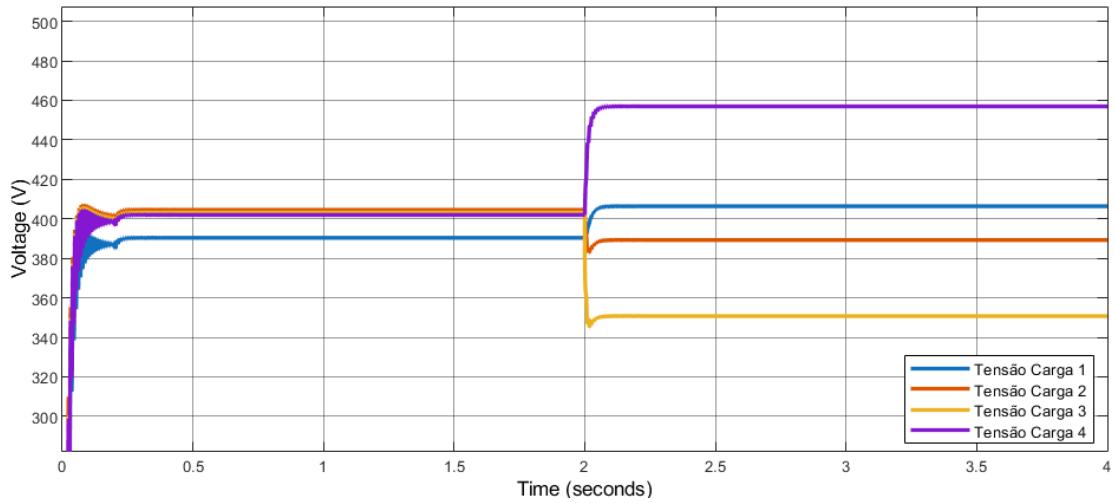


Figura 4.23. Gráfico das Tensões das Cargas do Caso 6.

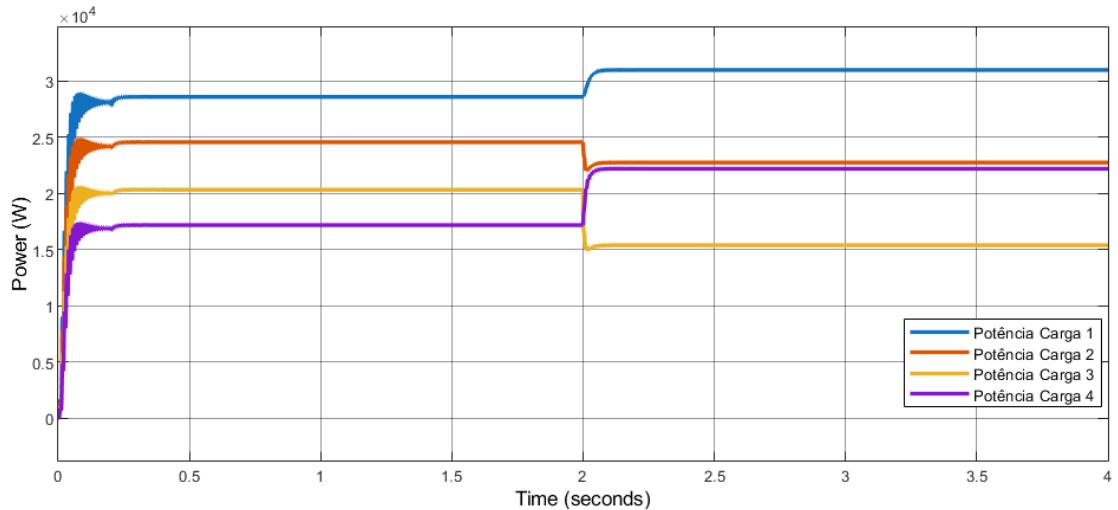


Figura 4.24. Gráfico das Potências das Cargas do Caso 6.

4.7 CASO 7

No sétimo caso, a microrrede foi simulada com os valores nominais de potência, e com todas as cargas conectadas. A chave que liga a Carga 2 ao sistema fotovoltaico 3 (PV 3) está aberta, tornando a operação da microrrede em radial. E no instante de 2 segundos, aplicou-se uma variação na irradiância do sistema fotovoltaico 2 (PV 2), de 1000 para 600 W/m². Através da análise dos gráficos apresentados nas Figuras 4.21, 4.22, 4.23 e 4.24, como esperado, observou-se a abertura da chave refente a Carga 4 no instante em que houve queda na geração. Após a abertura da chave houve um

aumento das perdas, resultando em diferentes níveis de tensão ao longo da microrrede. Nos terminais da Carga 4 apresentou maior queda de tensão, atingindo valores inferiores a 300 V.

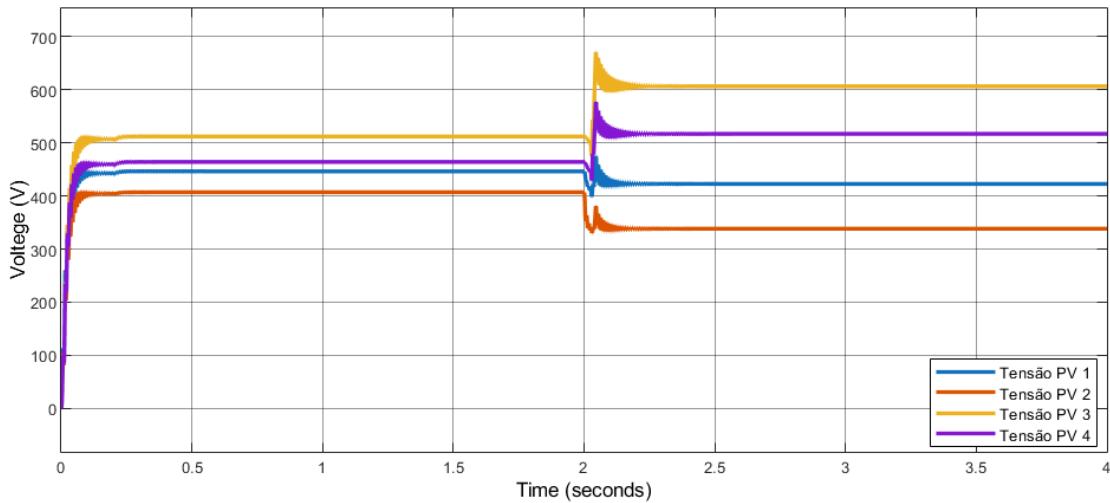


Figura 4.25. Gráfico das Tensões dos Geradores do Caso 7.

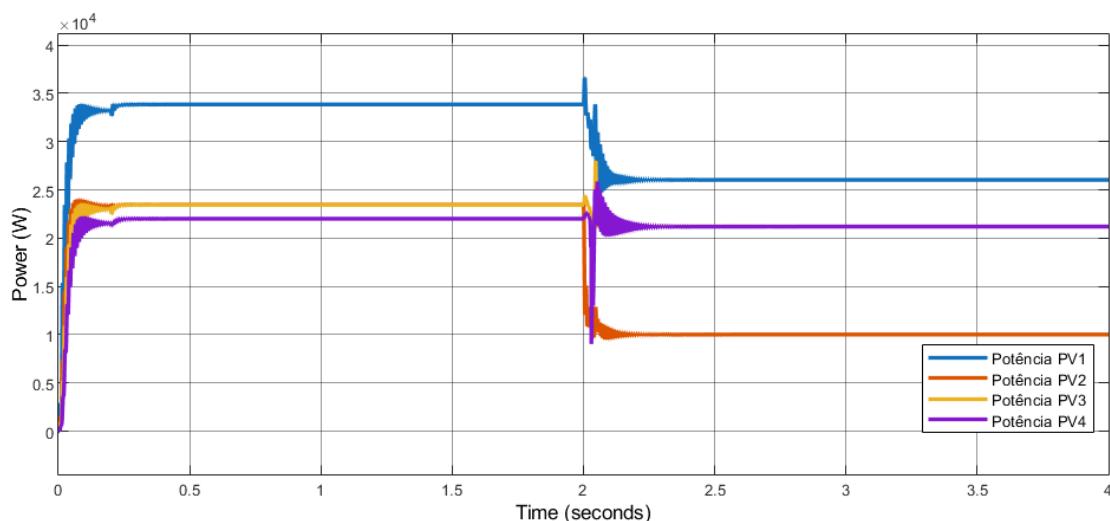


Figura 4.26. Gráfico das Potências dos Geradores do Caso 7.

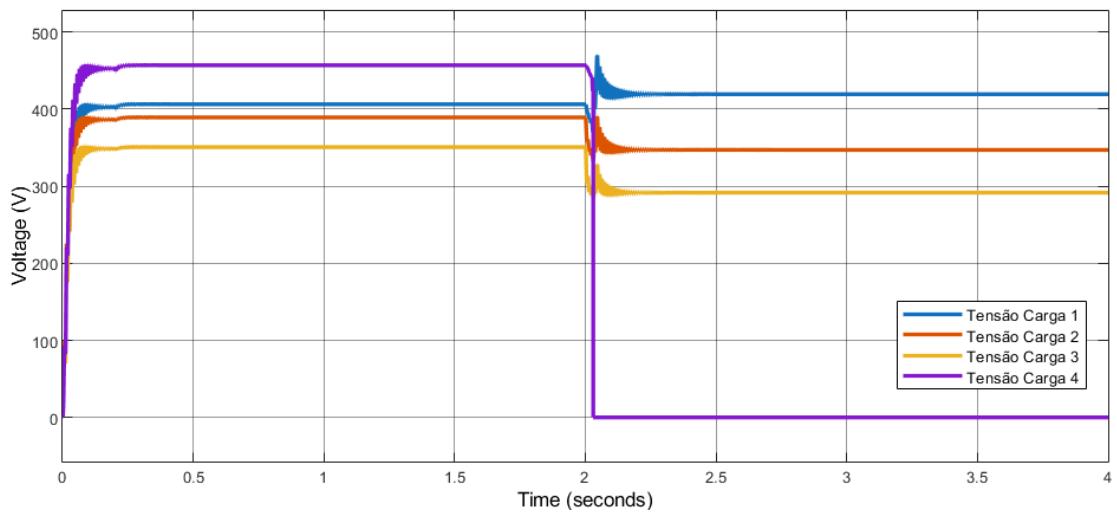


Figura 4.27. Gráfico das Tensões das Cargas do Caso 7.

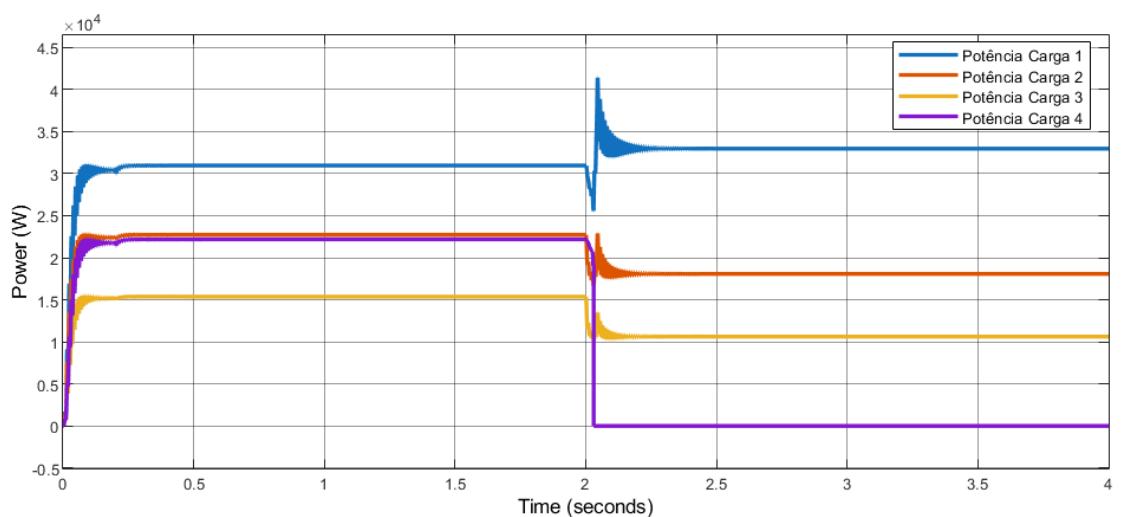


Figura 4.28. Gráfico das Potências das Cargas do Caso 7.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Neste trabalho, desenvolveu-se um estudo sobre o gerenciamento de microrredes de corrente contínua operando de forma isolada. A modelagem da microrrede foi implementada no ambiente virtual Simulink do MATLAB, considerando a geração e a carga distribuídas em uma microrrede com topologia anelar.

Primeiramente foram apresentados conceitos fundamentais sobre a geração fotovoltaica e dos componentes necessários para a integração da geração à microrrede. Além dos algoritmos apresentados que auxiliam no controle de potência gerado pelos sistemas fotovoltaicos.

Logo após, foi implementado computacionalmente, no Simulink do MATLAB, um modelo que simula uma microrrede de corrente contínua para analisar seu comportamento em condições operacionais críticas, onde a ausência de baterias impôs desafios adicionais ao gerenciamento. Os resultados da simulação mostraram-se promissores quanto ao gerenciamento no caso da topologia anelar, ajustando dinamicamente o fornecimento de energia para atender às demandas das cargas conectadas. Nos casos em que a microrrede operou na topologia radial, diferentemente da anelar, observou-se um comportamento inoperável devido às altas variações nos níveis de tensão das cargas.

Com base nos estudos realizados e nos resultados obtidos, é evidente a importância de pesquisas na área de microrredes, principalmente no desenvolvimento de estratégias de gerenciamento mais sofisticadas, a fim de reduzir as perdas.

Dado a realização desse trabalho, os seguintes assuntos podem ser foco de trabalhos futuros:

- Explorar a inclusão de armazenamento de energia.
- Estudar a possibilidade de aplicação de Inteligência Artificial para aprimorar o

gerenciamento da microrrede.

- Explorar o comportamento da microrrede conectada a outras fontes renováveis.
- Explorar a operação da microrrede no modo conectado à rede elétrica, avaliando estratégias para controle de fluxo de potência e estabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APONTE-ROA, D. A.; CABARCAS, G. D. G.; WEAVER, W. W. Ac vs dc power efficiency comparison of a hybrid wind/solar microgrid. In: *2020 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech)*. [S.l.]: IEEE, 2020. p. 1–7. Citado na página 3.
- BLAABJERG, F. (Ed.). *Control of Power Electronic Converters and Systems: Volume 1*. Cambridge, MA: Academic Press, 2018. ISBN 978-0-12-805245-7. Citado na página 15.
- CARNEIRO, A. V. *Projeto, Desenvolvimento e Implementação de Microrrede em Campus Universitário com Tecnologia Solar Fotovoltaica e de Armazenamento*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, 2017. Citado na página 2.
- HART, D. W. *Eletrônica de Potência*. 1. ed. Porto Alegre, Brasil: Bookman, 2011. ISBN 9788577808218. Citado 4 vezes nas páginas 2, 8, 9, and 13.
- IBERDROLA. *Microrredes Inteligentes*. 2023. Acesso em: 04 fev. 2025. Disponível em: <<https://www.iberdrola.com/quem-somos/nossa-atividade/smart-grids/microrredes>>. Citado na página 2.
- IRMAK, E.; AYAZ, M. S.; GOK, S. G.; SAHIN, A. B. A survey on public awareness towards renewable energy in turkey. In: *2014 International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 932–937. Citado na página 1.
- MAHMOUD, M. S. *Microgrid: Advanced Control Methods and Renewable Energy System Integration*. Oxford, United Kingdom: Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2017. ISBN 978-0-08-101753-1. Citado 3 vezes nas páginas 1, 2, and 3.
- MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; ABREU, S. L. de; COLLE, S. Mapas de irradiação solar para o brasil – resultados do projeto swera. In: *Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Goiânia, Brasil: INPE, 2005. p. 3137–3145. Citado na página 2.
- RASHID, M. *Eletrônica de potência: circuitos, dispositivos e aplicações*. S.l.: Makron, 1999. ISBN 9788534605984. Citado 4 vezes nas páginas iii, 8, 9, and 10.
- SILVA, A. J. V. de C. *Potencial Eólico Offshore no Brasil: Localização de Áreas Nobres através de Análise Multicritério*. 1–90 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético, Rio de Janeiro, Brasil, Fevereiro 2019. Citado na página 2.
- VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. *Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações*. 1. ed. São Paulo, Brasil: Érica, 2012. ISBN 978-85-365-0978-5. Citado 4 vezes nas páginas iii, 6, 12, and 13.