



**IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DE MICRORREDES
UTILIZANDO PLATAFORMA EM TEMPO REAL**

EMANUEL ROCHA BRANDÃO

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

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

IMPLEMENTATION OF REAL-TIME MICROGRID SIMULATION

**IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DE MICRORREDES
UTILIZANDO PLATAFORMA EM TEMPO REAL**

EMANUEL ROCHA BRANDÃO

ORIENTADOR: PROF. DR. FERNANDO CARDOSO MELO

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

BRASÍLIA/DF: JULHO - 2023

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DE MICRORREDES
UTILIZANDO PLATAFORMA EM TEMPO REAL**

EMANUEL ROCHA BRANDÃO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL.

APROVADA POR:

**Prof. Fernando Cardoso Melo – ENE/Universidade de Brasília
Orientador**

**Prof. Francis Arody Moreno Vásquez – ENE/Universidade de Brasília
Membro Interno**

**Prof. Lélío Ribeiro Soares Júnior – ENE/Universidade de Brasília
Membro Interno**

BRASÍLIA, 24 DE JULHO DE 2023.

FICHA CATALOGRÁFICA

BRANDÃO, EMANUEL ROCHA

IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DE MICRORREDES UTILIZANDO PLATAFORMA EM TEMPO REAL [Distrito Federal] 2023.

xv, 57p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Elétrica, 2023).

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica

1.

2.

3.

4.

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BRANDÃO, E.R. (2023). IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DE MICRORREDES UTILIZANDO PLATAFORMA EM TEMPO REAL . Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica, Publicação , Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 57p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Emanuel Rocha Brandão

TÍTULO: IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DE MICRORREDES UTILIZANDO PLATAFORMA EM TEMPO REAL .

GRAU: Bacharel ANO: 2023

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

Emanuel Rocha Brandão

Departamento de Engenharia Elétrica (ENE) - FT

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil

DEDICATÓRIA

*A minha família, e aos desafios que a engenharia me reserva,
dedico este trabalho.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, cuja graça me deu força, sabedoria e serenidade para persistir em minha jornada acadêmica.

Aos meus amados pais, Nilton e Abadia, e à minha irmã Amanda, expresso meu agradecimento. O apoio e o amor que vocês me deram foram a força motriz por trás de todas as minhas realizações. Vocês fizeram todos os esforços para me proporcionar as melhores condições de estudo, e por isso, serei eternamente grato.

Aos meus amigos e companheiros de jornada, especialmente, Emerson e Felipe, à turma 107 e agregados. Meus companheiros de moradia, Jonas, Maicon e Luan. Agradeço por cada momento compartilhado, cada riso e desafio que enfrentamos juntos. Vocês tornaram esta jornada menos árdua e mais alegre.

Agradeço a todos os professores da UnB que contribuíram para o meu crescimento e aprendizado ao longo do curso. Em particular, gostaria de expressar minha gratidão ao Professor Fernando Cardoso Melo.

Estendo meus agradecimentos aos meus colegas e líderes da Neoenergia Brasília e EcoSet Energia Automação, onde tive a oportunidade de estagiar. Agradeço a cada um de vocês pela paciência, pelas orientações e pela oportunidade de aprender e de contribuir. Vocês desempenharam um papel significativo na minha jornada, obrigado.

Por fim, a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha trajetória acadêmica e profissional, eu sou grato.

Emanuel Rocha Brandão

RESUMO

O sistema elétrico de potência clássico foi eficaz em fornecer energia confiável para cidades e países em crescimento. Contudo, esse modelo tradicional de sistema elétrico tem enfrentado desafios significativos no século XXI, devido a fatores como mudanças climáticas, crescente demanda por energia e a necessidade de maior integração de fontes de energia renováveis.

Nesse contexto, as microrredes estão ganhando destaque devido à sua capacidade de integrar eficientemente energias renováveis proporcionando maior resiliência e confiabilidade no fornecimento de energia, sendo capaz de operar de maneira independente, durante um certo tempo, em caso de falhas da rede principal.

A complexidade dos sistemas de microrredes, que abrangem múltiplas fontes de geração de energia, diferentes tipos de carga e inúmeras possibilidades de configuração, torna essencial a utilização de simulações para planejar, projetar e operar essas redes de forma eficaz. Uma ferramenta particularmente poderosa para este fim é a simulação em tempo real.

No campo das simulações em tempo real, temos dois conceitos importantes: *software-in-the-Loop* (SIL) e *hardware-in-the-Loop* (HIL). A simulação HIL utiliza a comunicação entre modelos projetados no computador e equipamentos reais, os chamados *hardware-under-test* (HuT), ou em português, equipamento sob teste. Por outro lado, nas etapas iniciais de projeto são feitas simulações totalmente digitais, ou seja, sem a utilização de equipamentos reais na malha de simulação, estas são as chamadas simulações SIL.

Diante deste contexto, este trabalho apresenta o desenvolvimento e a análise de uma microrrede elétrica simulada em uma plataforma de simulação em tempo real. A microrrede modelada contém geração de energia fotovoltaica e um banco de baterias, refletindo em um sistema sustentável de energia. A pesquisa concentrou-se na simulação de um dia típico de operação da microrrede, proporcionando uma análise do comportamento e desempenho do sistema em diferentes cenários.

Os resultados obtidos demonstraram a capacidade da microrrede em atender eficientemente às demandas energéticas por meio da combinação de fontes de energia renovável, como a geração solar, e o armazenamento em baterias. Durante os períodos em que a geração solar foi suficiente para suprir as cargas, a microrrede operou de forma autossuficiente, sem a necessidade de recorrer à rede principal.

Esses resultados evidenciam a viabilidade das microrredes elétricas como uma solução eficaz para enfrentar os desafios energéticos atuais, ao mesmo tempo em que impulsionam a transição para uma matriz energética mais sustentável e de baixo carbono.

Palavras-chave: microrredes; simulações em tempo real; *software-in-the-loop*; *power-hardware-in-the-loop*;

ABSTRACT

The classic power electrical system has been effective in providing reliable energy for growing cities and countries. However, this traditional model of the electrical system has faced significant challenges in the 21st century due to factors such as climate change, increasing energy demand, and the need for greater integration of renewable energy sources.

In this context, microgrids are gaining prominence due to their ability to efficiently integrate renewable energies providing greater resilience and reliability in energy supply, being able to operate independently for a certain time, in case of failures of the main grid.

The complexity of microgrid systems, which encompass multiple energy generation sources, different types of load, and numerous configuration possibilities, makes the use of simulations essential to plan, design, and operate these networks effectively. A particularly powerful tool for this purpose is real-time simulation.

In the field of real-time simulations, we have two important concepts: software-in-the-Loop (SIL) and hardware-in-the-Loop (HIL). The HIL simulation uses communication between models designed on the computer and real equipment, the so-called hardware-under-test (HuT). On the other hand, in the early stages of the project, fully digital simulations are made, that is, without the use of real equipment in the simulation loop, these are the so-called SIL simulations.

Given this context, this work presents the development and analysis of an electric microgrid simulated on a real-time simulation platform. The modeled microgrid contains photovoltaic energy generation and a battery bank, reflecting a sustainable energy system. The research focused on simulating a typical day of microgrid operation, providing an analysis of the behavior and performance of the system under different scenarios.

The results obtained demonstrated the ability of the microgrid to efficiently meet energy demands through the combination of renewable energy sources, such as solar generation, and battery storage. During periods when solar generation was sufficient to supply the loads, the microgrid operated self-sufficiently, without the need to resort to the main grid.

These results highlight the viability of electric microgrids as an effective solution to face current energy challenges, while driving the transition towards a more sustainable and low-carbon energy matrix.

Keywords: microgrids; real time simulation; software-in-the-loop; power-hardware-in the-loop;

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS	5
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	5
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	6
2.1	MICRORREDES ELÉTRICAS	6
2.1.1	DEFINIÇÃO	6
2.1.2	TOPOLOGIAS DE MICRORREDES	6
2.1.2.1	MICRORREDES CA	7
2.1.2.2	MICRORREDES CC	8
2.1.2.3	MICRORREDES HÍBRIDAS	9
2.1.3	COMPONENTES DE MICRORREDES	10
2.1.3.1	FONTES DE GERAÇÃO	10
2.1.3.2	SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO	10
2.1.3.3	CARGAS	11
2.1.4	MODOS DE OPERAÇÕES DE MICRORREDES	12
2.1.4.1	MODO CONECTADO	12
2.1.4.2	MODO ILHADO	12
2.1.5	CONTROLE DE MICRORREDES	13
2.1.5.1	CONTROLE HIERÁRQUICO	13
2.2	SIMULAÇÕES EM TEMPO REAL	15
2.2.1	SIMULAÇÕES <i>Hardware-in-the-Loop</i>	17
2.2.2	SIMULAÇÕES <i>Software-in-the-Loop</i>	18
2.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	19
3	MATERIAIS E MÉTODOS	20
3.1	MATERIAIS	20
3.1.1	ESTRUTURA COMPUTACIONAL	20
3.1.1.1	COMPUTADOR <i>Windows</i> ®	21
3.1.1.2	SIMULADOR EM TEMPO REAL	21
3.1.2	FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS	22
3.1.2.1	MATLAB/SIMULINK®	22
3.1.2.2	<i>Software</i> DE TEMPO REAL	23
3.2	MÉTODOS	24
3.2.1	MODELAGEM DO SISTEMA	24
3.2.2	IMPLEMENTAÇÃO	28

3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	31
4 RESULTADOS	32
4.1 DISCUSSÃO	34
4.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS	35
5 CONCLUSÃO	36
5.1 TRABALHOS FUTUROS	37
A CURVAS DE GERAÇÃO E DE CARGA	43
A.1 CURVA DE GERAÇÃO	43
A.2 CURVA DE CARGA	43
B TUTORIAL DE INSTALAÇÃO DO RT-LAB®	45
B.1 PRÉ-REQUISITOS MÍNIMOS	45
B.2 INSTALAÇÃO	46
B.2.1 VALIDAÇÃO DA INSTALAÇÃO	51
B.2.1.1 <i>Toolboxes</i> OPAL-RT®	51
B.2.1.2 CONEXÃO DO RT-LAB® COM MATLAB/SIMULINK®	51
B.3 CONEXÃO NA REDE	52
B.4 LICENÇA	55
B.4.1 LICENÇA DO <i>target</i>	55
B.4.2 LICENÇA DO <i>host</i>	55
B.4.2.1 INSTALAÇÃO DA LICENÇA DO <i>host</i>	56
B.5 ERROS COMUNS	56
B.5.1 RT-LAB® NÃO RECONHECE O MATLAB/SIMULINK®	57

LISTA DE FIGURAS

1.1	Sistema elétrico de potência clássico, composto de geração (longe da carga), transmissão e distribuição. Fonte: [MATTEDE, 2020]	1
1.2	Matriz elétrica brasileira de 2022, composta por 54% de fontes hidrelétricas. Fonte: [ABEEOLICA, 2022]	2
1.3	Evolução da expansão de energia eólica no Brasil. Fonte: [ABEEOLICA, 2022]	3
1.4	Evolução da expansão de energia solar no Brasil. Fonte: [ABSOLAR, 2023] ..	3
1.5	Ilustração de uma microrrede elétrica. Fonte: [MARQUES, 2020].....	4
2.1	Microrrede de topologia CA. Fonte: [PINTO, 2022]	7
2.2	Microrrede de topologia CC. Fonte: [PINTO, 2022]	8
2.3	Microrrede de topologia híbrida CA/CC. Fonte: [PINTO, 2022].....	9
2.4	Principais tecnologias de armazenamento de energia. Fonte: [BUENO; BRAN-DAO, 2016]	11
2.5	Funcionalidades do sistema de controle de uma microrrede. Fonte: Adap-tado de [BELLIDO, 2018]	14
2.6	Simulações <i>offline</i> e em tempo real. Fonte: Adaptado de [BELANGER; VENNE; PAQUIN, 2010]	17
2.7	Simulações <i>controller-hardware-in-the-loop</i> . Há apenas trocas de sinais de controle entre a rede simulada e o HuT. Fonte: Adaptado de [OPAL-RT, 2023b].....	18
2.8	Simulações <i>power-hardware-in-the-loop</i> . Além das comunicações de con-trole, também são transferidas informações de potência entre a rede simulada e o HuT. Fonte: Adaptado de [OPAL-RT, 2023d].....	18
2.9	Simulações <i>software-in-the-loop</i> . Este tipo de simulação é totalmente di-gital, sem utilização de equipamentos reais. Fonte: Fonte: Adaptado de [OPAL-RT, 2023e]	19
3.1	Infraestrutura laboratorial. A esquerda: computador utilizado para modela-gem do sistema; a direita: simulador em tempo real. Fonte: Adaptado de [MELO, 2021]	20
3.2	Simulador em tempo real OPAL 5700. Fonte: [SOUZA et al., 2021]	21
3.3	Arquitetura do simulador OPAL 5707. Fonte: [OPAL-RT, 2023a]	22
3.4	Características dos <i>softwares</i> OPAL-RT Technologies®. Fonte: Adapatado de [OPAL-RT, 2017]	23
3.5	Modelagem da microrrede. Fonte: Autoria própria.	25

3.6	Perfil de geração utilizado. Fonte: Autoria própria.....	26
3.7	Sistema de controle da bateria. Fonte: Autoria própria.	27
3.8	Perfil de carga utilizado. Fonte: Autoria própria.	27
3.9	Tela do RT-LAB® que ilustra a primeira etapa, simulação <i>offline</i> . Neste caso o projeto é simulado utilizando apenas o ambiente MATLAB/SIMULINK®. Fonte: Autoria própria.....	29
3.10	Conexão dos blocos SM (visualização) e SC (cálculos). Fonte: Autoria própria.	30
3.11	Tela do RT-LAB® que ilustra o passo a passo necessário para execução da simulação no STR. Fonte: Autoria própria.	30
4.1	Potência na geração fotovoltaica ao longo do dia. Fonte: Autoria própria.	32
4.2	Potência na rede ao longo do dia. Fonte: Autoria própria.	33
4.3	Demanda da carga ao longo do dia. Fonte: Autoria própria.	33
4.4	Potência na bateria ao longo do dia. Fonte: Autoria própria.	33
4.5	Estado de carga da bateria ao longo do dia. Fonte: Autoria própria.	34
A.1	Comparação da geração utilizada em [LUNDSTROM et al., 2016] e a proposta neste trabalho. Fonte: Autoria própria.	43
A.2	Comparação da carga utilizada em [LUNDSTROM et al., 2016] e a proposta neste trabalho. Fonte: Autoria própria.	44
B.1	Versões do MATLAB/Simulink®) compatíveis com cada versão do RT-Lab®. Fonte: [OPAL-RT, 2023c].....	46
B.2	Página de instalação 1: introdução. Fonte: Autoria própria.....	47
B.3	Página de instalação 2: aceite da licença RT-Lab®. Fonte: Autoria própria.	47
B.4	Página de instalação 3: tipo de instalação. Fonte: Autoria própria.....	48
B.5	Página de instalação 5: aceite da licença National Instruments®. Fonte: Autoria própria.	48
B.6	Página de instalação 5: aceite da licença Intel®. Fonte: Autoria própria.....	49
B.7	Página de instalação 6: diretório de instalação. Fonte: Autoria própria.....	49
B.8	Página de instalação 7: instalação do RT-Lab®. Fonte: Autoria própria.	50
B.9	Página de instalação 8: instalação do LabView®. Fonte: Autoria própria.	50
B.10	Toolboxes da OPAL-RT®. Fonte: Autoria própria.	51
B.11	Conexão do RT-Lab® com MATLAB/SIMULINK®. Fonte: Autoria própria..	52
B.12	Comunicação entre o <i>target</i> e a estação de comando <i>Windows</i> . Fonte: Autoria própria.....	52
B.13	Configurações de Rede e Internet. Fonte: Autoria própria.	53
B.14	Alterar opções de Adaptador. Fonte: Autoria própria.	54
B.15	Protocolo IP Versão 4 (TCP/IPv4). Fonte: Autoria própria.	54
B.16	Alteração do IP e da máscara de rede. Fonte: Autoria própria.	55

B.17 Solicitação de licença. Fonte: Autoria própria. 56

LISTA DE TABELAS

3.1	Especificações do Computador <i>Windows</i> ®. Fonte: Autoria própria.	21
-----	---	----

LISTA DE ACRÔNIMOS E ABREVIACÕES

ABEEOLICA	Associação Brasileira de Energia Eólica. 1
ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. 2
CA	corrente alternada. 6
CC	corrente contínua. 6
CHIL	<i>controller-in-the-loop</i> . 17
DERs	recursos energéticos distribuídos, ou do inglês <i>distributed energy resources</i> . 6
FPGA	arranjo de porta programável em campo, ou do inglês <i>field programmable gate array</i> . 21
HIL	<i>hardware-in-the-loop</i> . 17
HuT	equipamento sob teste, ou do inglês <i>hardware-under-test</i> . 17
MG	microrredes, ou do inglês <i>microgrids</i> . 4
MPPT	rastreamento do ponto de máxima potência. 8
ONS	Operador Nacional do Sistema. 25
PAC	ponto de acoplamento comum. 13
PHIL	<i>power-hardware-in-the-loop</i> . 17
PPH	Pesquisa de posse e hábitos de uso de equipamentos elétricos na classe residencial. 26
PROALCOOL	Programa Nacional do Álcool. 1
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica. 2
REI Lab	Laboratório de Redes Elétricas Inteligentes. 21
RTS	simulação em tempo real, ou do inglês <i>real time simulation</i> . 15
SIL	<i>software-in-the-loop</i> . 18
STR	simulador em tempo real. 5

UWM

University of Wisconsin–Madison. 6

1 INTRODUÇÃO

O sistema elétrico de potência clássico, ilustrado na Figura 1.1, consiste em geração centralizada de energia, transmissão de alta tensão e distribuição para os consumidores finais. Este sistema foi eficaz em fornecer energia confiável para cidades e países em crescimento. Contudo, esse modelo tradicional de sistema elétrico tem enfrentado desafios significativos no século XXI, devido a vários fatores incluindo mudanças climáticas, crescente demanda por energia e a necessidade de maior integração de fontes de energias renováveis. [IEA, 2023]

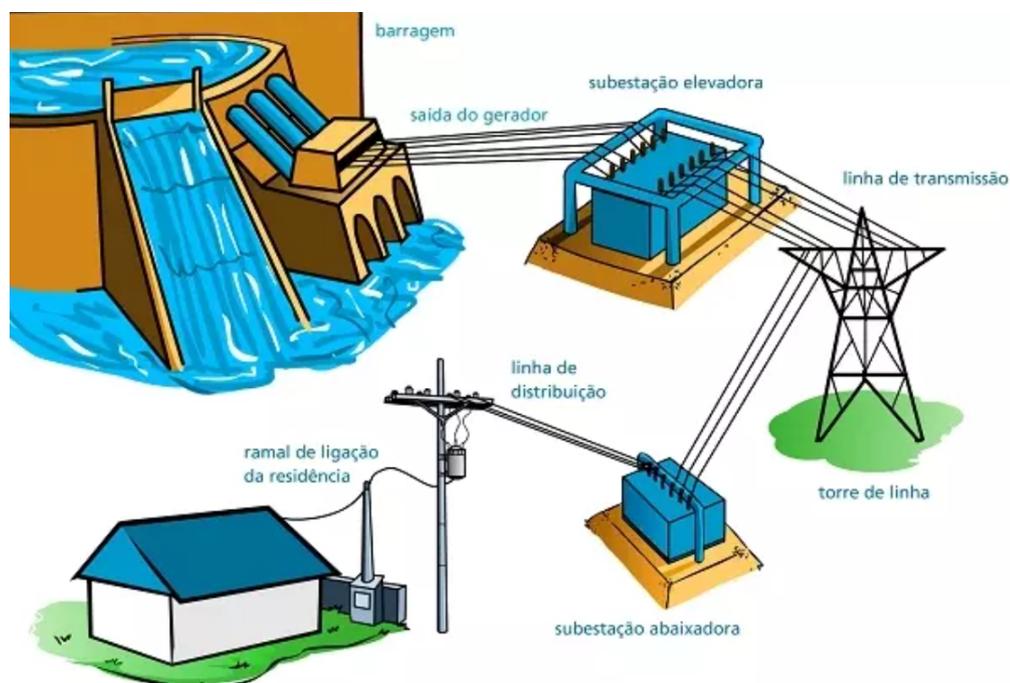


Figura 1.1 – Sistema elétrico de potência clássico, composto de geração (longe da carga), transmissão e distribuição. Fonte: [MATTEDE, 2020]

Historicamente, as hidrelétricas têm predominado na matriz energética brasileira. Conforme a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEOLICA) a matriz brasileira é composta por 54% de fontes hidrelétricas, seguido de 13,4% de eólica e 8,7% de biomassa, vide Figura 1.2. Entretanto, a diversificação para outras fontes renováveis tem ganhado cada vez mais atenção devido a necessidade de segurança energética e o compromisso com a sustentabilidade ambiental. Os primeiros passos foram dados durante a crise do petróleo na década de 1970, quando o Brasil iniciou um dos maiores programas de biocombustíveis do mundo, o Programa Nacional do Álcool (PROALCOOL), para aumentar a independência em relação ao petróleo importado. [MICHELLON; SANTOS; RODRIGUES, 2008]

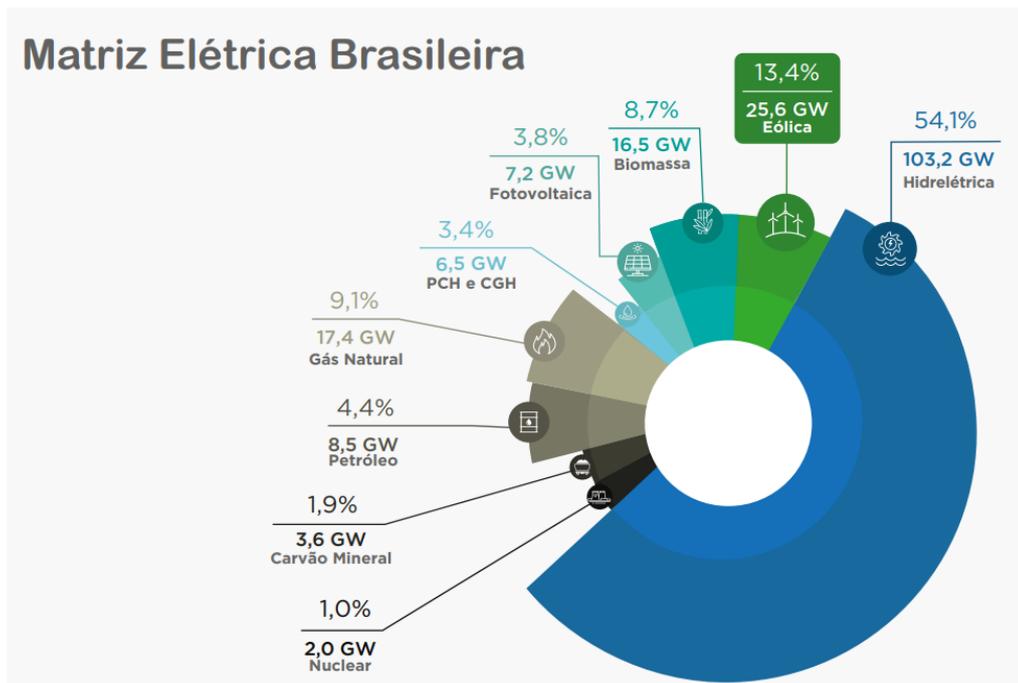


Figura 1.2 – Matriz elétrica brasileira de 2022, composta por 54% de fontes hidrelétricas. Fonte: [ABEEOLICA, 2022]

A partir dos anos 2000, o Brasil começou a diversificar ainda mais a sua matriz energética. O Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), lançado em 2002, através da lei nº 10.438 de 26 de abril de 2002, foi um marco na política de incentivo à energia renovável no Brasil, impulsionando significativamente a geração de energia a partir de fontes eólica, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas. [BRASIL, 2002]

Nas últimas décadas, temos visto uma expansão significativa na incorporação de fontes de energia solar e eólica na matriz energética brasileira. A energia eólica, em particular, experimentou um crescimento exponencial, tornando o Brasil um 6 principais *players* globais nessa área, segundo a ABEEOLICA e ilustrado na Figura 1.3.

A energia solar também tem avançado, segundo a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR) e ilustrado na Figura 1.4, a potência instalada solar fotovoltaica aumentou mais de 3,5 vezes entre 2020 e maio de 2023. Este crescimento tem sido motivado por várias razões, entre elas os elevados custos da energia elétrica no Brasil e os frequentes aumentos na tarifa de luz, a redução nos preços dos sistemas fotovoltaicos, as facilidades em linhas de financiamento, as condições climáticas propícias existentes no país, os baixos custos de manutenção desses sistemas e o aspecto da sustentabilidade. [PORTALSOLAR, 2022]; [ABSOLAR, 2023]

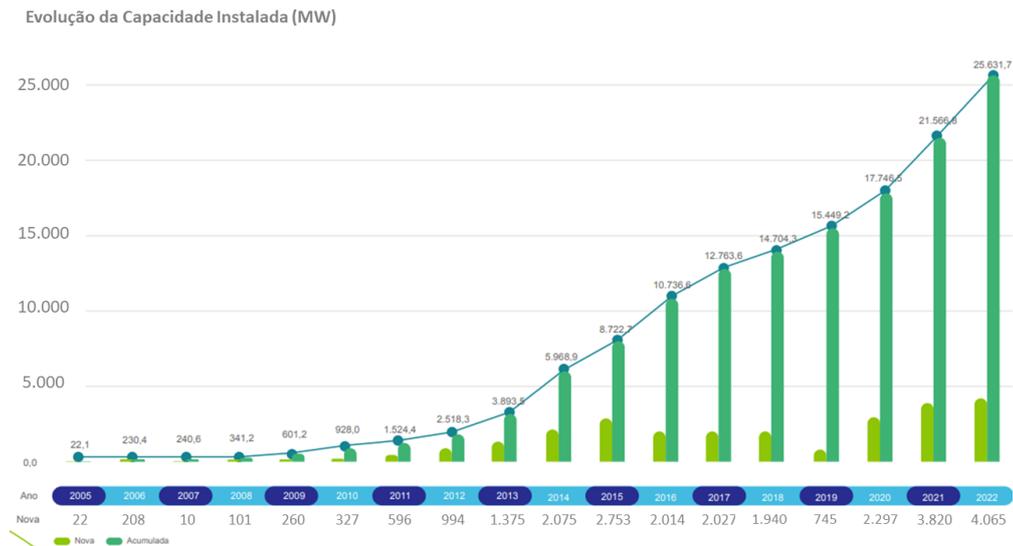


Figura 1.3 – Evolução da expansão de energia eólica no Brasil. Fonte: [ABEEOLICA, 2022]

Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil

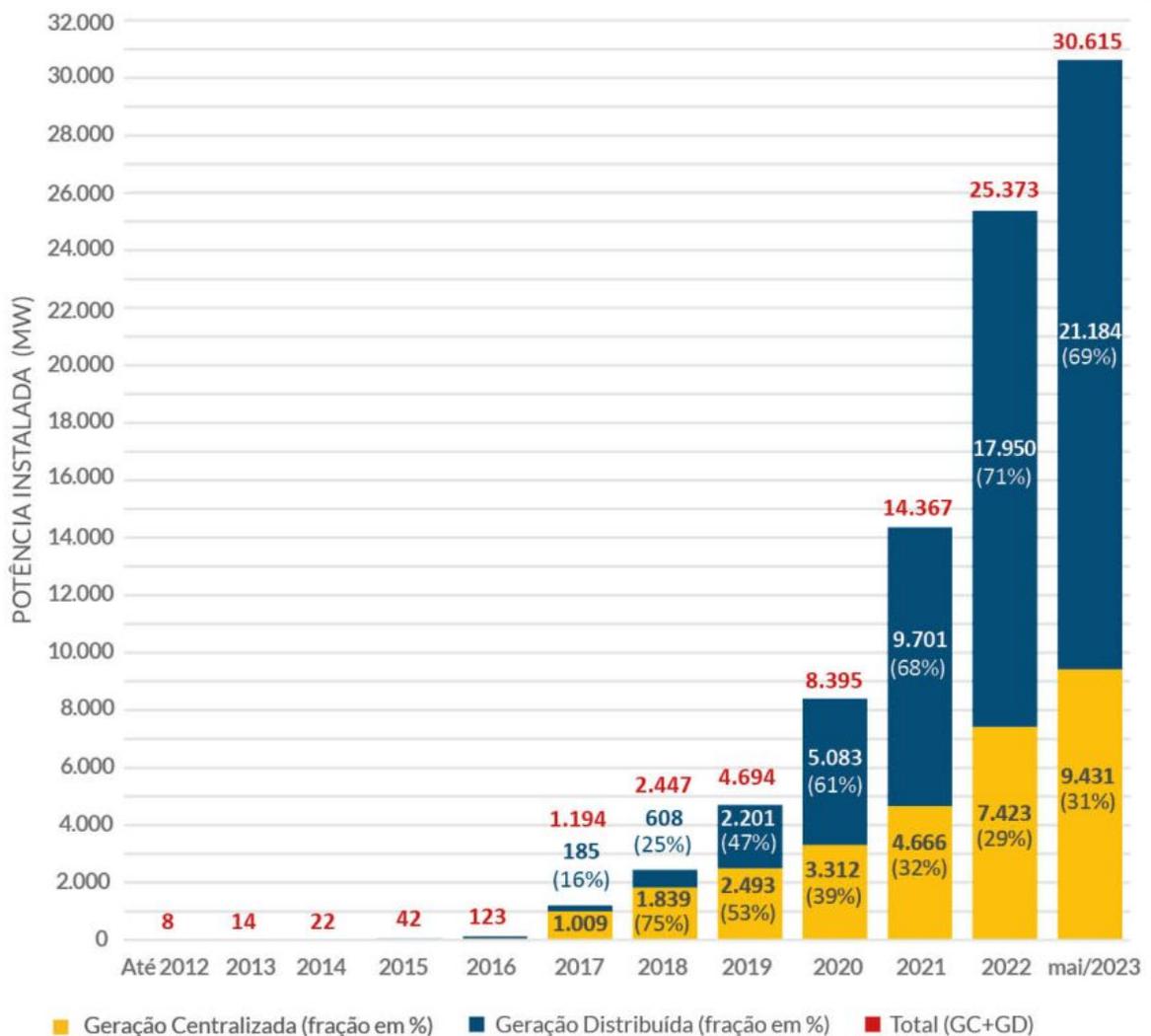


Figura 1.4 – Evolução da expansão de energia solar no Brasil. Fonte: [ABSOLAR, 2023]

Nesse contexto, as microrredes, ou do inglês *microgrids* (MG), têm ganhado destaque, pois representam um novo paradigma na forma como a energia é gerada e distribuída às cargas: são caracterizadas por uma geração de energia descentralizada e em geral renovável, geralmente localizada próxima aos pontos de consumo. A Figura 1.5 ilustra a configuração de uma MG. A vantagem das microrredes é que elas podem operar de forma autônoma, independente da rede elétrica principal. Isso significa que, em caso de falha na rede elétrica principal, durante um certo tempo as MGs podem continuar fornecendo energia aos consumidores conectados a ela. Além disso, como a geração de energia está localizada perto dos pontos de consumo, as perdas de transmissão e distribuição são minimizadas.

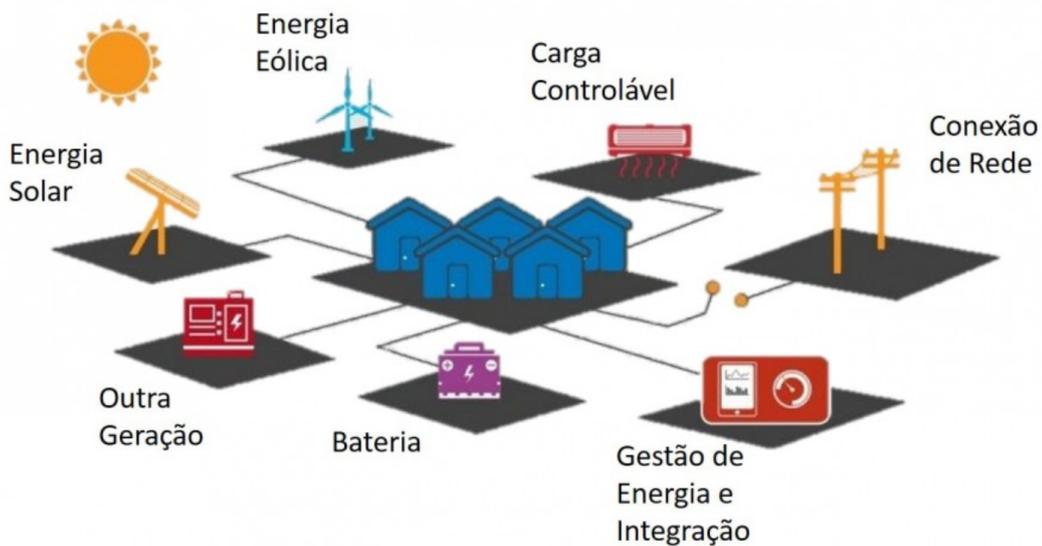


Figura 1.5 – Ilustração de uma microrrede elétrica. Fonte: [MARQUES, 2020]

A complexidade dos sistemas de microrredes, que abrangem múltiplas fontes de geração de energia, diferentes tipos de carga e inúmeras possibilidades de configuração, torna essencial a utilização de simulações para planejar, projetar e operar essas redes de forma eficaz. As simulações oferecem uma maneira de modelar e analisar esses sistemas complexos sem a necessidade de implementações físicas caras e demoradas. Elas permitem que os engenheiros experimentem diferentes configurações, avaliem o impacto de várias condições operacionais e otimizem o desempenho da microrrede antes de sua implementação no mundo real.

Uma ferramenta particularmente poderosa para este fim é a simulação em tempo real. A simulação em tempo real permite modelar o comportamento de uma microrrede em um ambiente virtual que opera no mesmo *time-step* que o mundo real, ou seja, cada unidade de tempo na simulação equivale à mesma unidade de tempo na realidade. Além disso, também possui a capacidade de comunicação entre o ambiente virtual e equipamentos reais. Isso permite a análise de cenários dinâmicos e complexos, incluindo flutuações rápidas de carga, interrupções e transientes. [LASSETER, 2002]

1.1 OBJETIVOS

Diante da contextualização apresentada, este trabalho tem como objetivo geral estudar, desenvolver e aplicar uma metodologia para implementação de microrredes em plataforma de simulação em tempo real.

Para alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos serão abordados:

- Realização de revisão bibliográfica sobre microrredes elétricas;
- Realização de revisão bibliográfica sobre simulações em plataforma de tempo real;
- Definição dos requisitos e características da plataforma de tempo real a ser utilizada na simulação da microrrede;
- Desenvolvimento da metodologia para modelagem e implementação de todo sistema no simulador em tempo real (STR);
- Apresentação de conclusões e recomendações com base nos resultados obtidos, além de fornecer *insights* para futuros estudos e implementações.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos, conforme descrito a seguir:

- Capítulo 2: Revisão Bibliográfica, em que são abordados os principais conceitos relacionados às microrredes e simulações em plataforma de tempo real;
- Capítulo 3: Materiais e Métodos, em que são descritos, de forma detalhada, os equipamentos disponíveis no laboratório e a metodologia utilizada para elaboração da simulação;
- Capítulo 4: Resultados, em que são apresentados e discutidos os resultados obtidos;
- Capítulo 5: Conclusão, em que tiram-se conclusões a respeito dos resultados obtidos, como também são levantados tópicos para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem como propósito introduzir e descrever os principais conceitos que dão suporte a este trabalho. Inicialmente, será apresentada a definição de microrredes, bem como suas características, topologias predominantes e os componentes que geralmente compõem tais sistemas. Em seguida, será apresentado o conceito e os tipos de simulações em plataforma de tempo real.

2.1 MICRORREDES ELÉTRICAS

2.1.1 Definição

As microrredes elétricas, são sistemas de distribuição de energia, que combinam a geração e a distribuição de energia de forma localizada e eficiente, podendo variar dos quilowatts (kW) até os megawatts (MW). A ideia por trás das microrredes é minimizar a dependência de grandes usinas de energia centralizadas e da rede elétrica tradicional, fornecendo uma maneira alternativa e mais resiliente de fornecer energia elétrica para casas, empresas, e até comunidades inteiras. [SOSHINSKAYA et al., 2014], [OLIVARES et al., 2014], [LASSETER, 2002]

O conceito de microrrede foi proposto pela *University of Wisconsin–Madison* (UWM), sendo definida como um grupo de recursos energéticos distribuídos, ou do inglês *distributed energy resources* (DERs), que operam como um único sistema contíguo. Isso significa que, mesmo que a microrrede esteja conectada à rede elétrica principal, ela pode isolar-se, ou a própria concessionária pode enviar o comando de ilhamento, e continuar a operar de maneira autônoma em caso de falhas ou outras interrupções na rede elétrica principal. [LASSETER, 2002]

2.1.2 Topologias de Microrredes

Uma distinção importante entre os tipos de microrredes é quanto ao tipo de barramento e a forma de como realiza-se a interface entre o barramento e os sistemas de geração e cargas. Esta distinção, conhecida como topologia, é dividida em: corrente contínua (CC), corrente alternada (CA) e híbrida. [GALO et al., 2014] [PLANAS et al., 2015]

2.1.2.1 Microrredes CA

As microrredes CA são sistemas que operam com corrente alternada - podendo ainda ser monofásicas ou trifásicas -, o tipo de corrente elétrica dominante na maioria das redes elétricas modernas. Embora fontes renováveis, como a energia solar, gerem corrente contínua, esta é geralmente convertida em corrente alternada. [GALO et al., 2014]; [ELSAYED; MOHAMED; MOHAMMED, 2015]

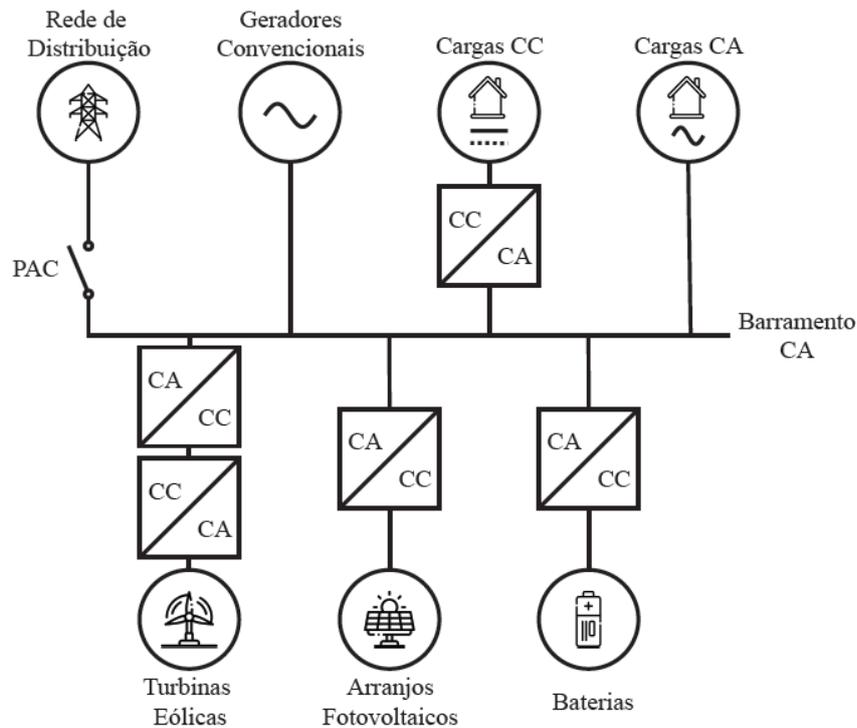


Figura 2.1 – Microrrede de topologia CA. Fonte: [PINTO, 2022]

A Figura 2.1 ilustra uma MG CA composta por cargas CC e CA; fontes eólicas; fontes fotovoltaicas e um sistema de baterias. As fontes convencionais e as cargas CA são conectadas diretamente no barramento CA, enquanto os outros componentes da microrrede passam por conversores CC-CA.

Apesar da energia gerada em uma turbina eólica ser de natureza alternada, há várias razões para utilização dos conversores entre a geração e o barramento:

- A energia gerada pela turbina eólica tem uma frequência e tensão que variam com a velocidade do vento. Para garantir que a energia possa ser utilizada de forma eficiente e segura, um conversor é necessário para regular esses parâmetros para valores consistentes e utilizáveis;
- A energia gerada pela turbina eólica deve ser sincronizada com a frequência e a tensão da rede elétrica à qual será conectada. Os conversores possibilitam isso e garantem a compatibilidade com a rede;

- Os conversores também atuam na maximização da captação de energia. Quando equipados com técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT), esses dispositivos conseguem se adaptar às condições de vento variáveis e maximizar a energia extraída do vento.

2.1.2.2 Microrredes CC

As microrredes CC, por outro lado, são baseadas na corrente contínua, que é frequentemente usada em sistemas de energias renováveis, como sistemas fotovoltaicos. Este tipo de microrrede pode ser mais eficiente do que as CA, pois evitam as perdas que ocorrem durante a conversão CA-CC. Outro ponto simplificador é o fato de que a rede CC não tem preocupações em relação ao sincronismo de frequência entre a rede principal e as fontes de energia da MG. [GALO et al., 2014]; [ELSAIED; MOHAMED; MOHAMMED, 2015]

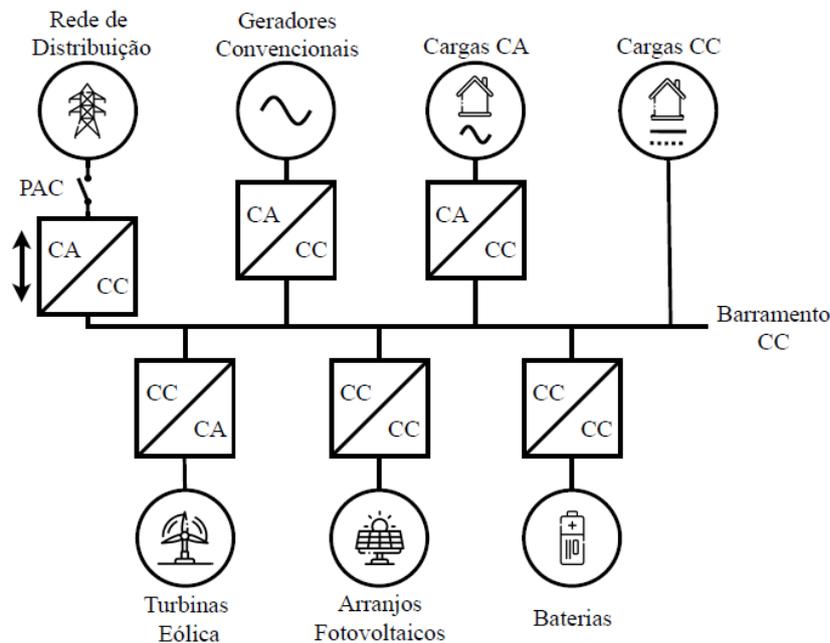


Figura 2.2 – Microrrede de topologia CC. Fonte: [PINTO, 2022]

A Figura 2.2 ilustra uma MG CC composta por cargas CC e CA; fontes eólicas; fontes fotovoltaicas e um sistema de baterias. As cargas CC são conectadas diretamente no barramento CC, enquanto os outros componentes da microrrede passam por conversores CA-CC.

De maneira semelhante à necessidade da utilização de conversores para conexão de uma fonte eólica, que gera corrente alternada, ao barramento CA, os conversores CC-CC são essenciais para interligar os arranjos fotovoltaicos, que produzem corrente contínua, ao barramento CC:

- A energia gerada por uma usina solar varia com irradiação que o painel recebe. Para

garantir que a energia possa ser utilizada de forma eficiente e segura, um conversor é indispensável para regular esses parâmetros ;

- Os conversores também atuam na maximização da captação de energia. Quando equipados com técnicas de MPPT, esses dispositivos conseguem se adaptar às condições solares e maximizar a potência injetada no barramento.

2.1.2.3 Microrredes Híbridas

Este tipo de microrrede possui um barramento CC e outro CA, reduzindo assim a quantidade de conversores necessários para a conexão entre as fontes, cargas, sistemas de armazenamento e a rede principal, conforme ilustrado na Figura 2.3. Já a conexão entre os barramentos é feita utilizando um conversor bidirecional cuja função é a de contralar o fluxo de potência entre os dois barramentos. [NEJABATKHAH; LI, 2015]

As microrredes híbridas combinam os elementos das microrredes CA e CC, o que pode fornecer maior flexibilidade e eficiência, entretanto, a estratégia de controle torna-se um ponto mais complexa, tornando a operação deste tipo de rede mais desafiadora. [NEJABATKHAH; LI, 2015]

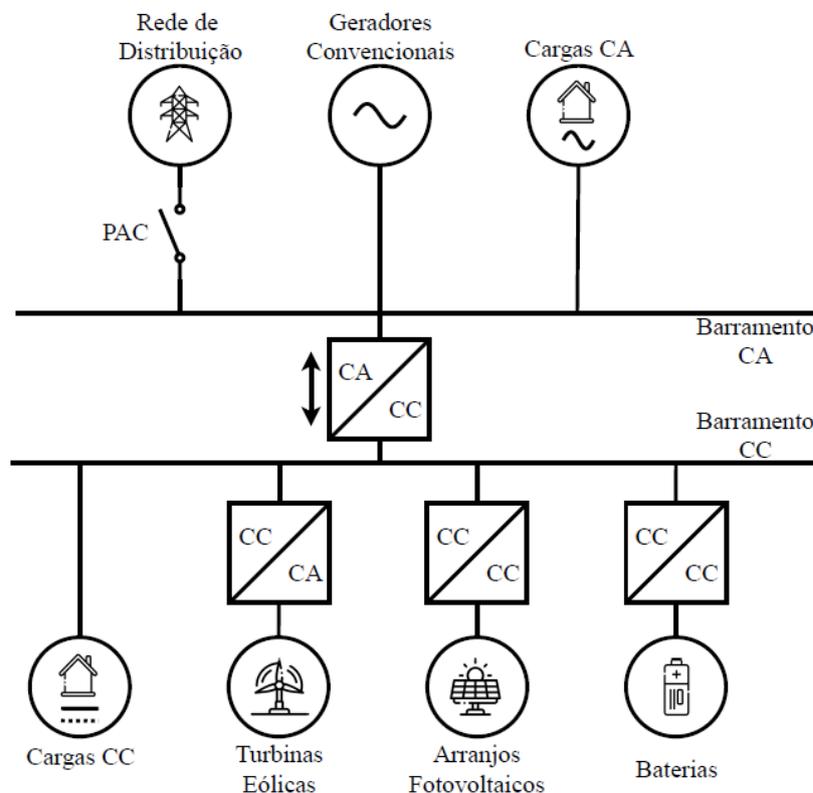


Figura 2.3 – Microrrede de topologia híbrida CA/CC. Fonte: [PINTO, 2022]

2.1.3 Componentes de Microrredes

As microrredes elétricas, representam uma infraestrutura complexa que combina múltiplos componentes e sistemas em uma única rede. Os principais componentes de uma MG são: fontes de energia, cargas elétricas, sistemas de armazenamento e sistemas de controle. As subseções a seguir irão detalhar estes componentes. [PARHIZI et al., 2015]

2.1.3.1 Fontes de Geração

As microrredes abrangem uma variedade de fontes de energia como geradores despacháveis, geradores eólicos e fotovoltaicos. O tipo de geração escolhido depende de fatores como a localização geográfica, o acesso a recursos naturais, e as necessidades específicas dos usuários finais.

As fontes renováveis de energia, como solar e eólica são classificadas como fontes não despacháveis e são os principais componentes de uma microrrede, graças à crescente ênfase na sustentabilidade e redução das emissões de carbono. Em adição às fontes de energia renováveis, muitas microrredes também incorporam geradores a diesel ou gás natural em seus sistemas de geração. Tais geradores, categorizados como fontes despacháveis, são utilizados para fornecer segurança ao sistema em caso de problemas na rede, permitindo a operação de forma ilhada até que seja reconectada a subestação. [PLANAS et al., 2015]; [KATIRAEI et al., 2008]; [MARIAM; BASU; CONLON, 2013]; [HATZIARGYRIOU et al., 2007]

2.1.3.2 Sistemas de Armazenamento

No contexto das microrredes, o armazenamento de energia é realizado através da conversão da energia elétrica para um formato diferente, que seja mais apropriado e eficiente para o armazenamento. As principais tecnologias disponíveis, ilustradas na Figura 2.4, são divididas em sistemas elétricos, mecânicos, químicos e térmicos. Em relação as microrredes, segundo [TAN; LI; WANG, 2013], as baterias mais apropriadas são as de Lítion Íon, Chumbo-ácido e Níquel-Ferro.

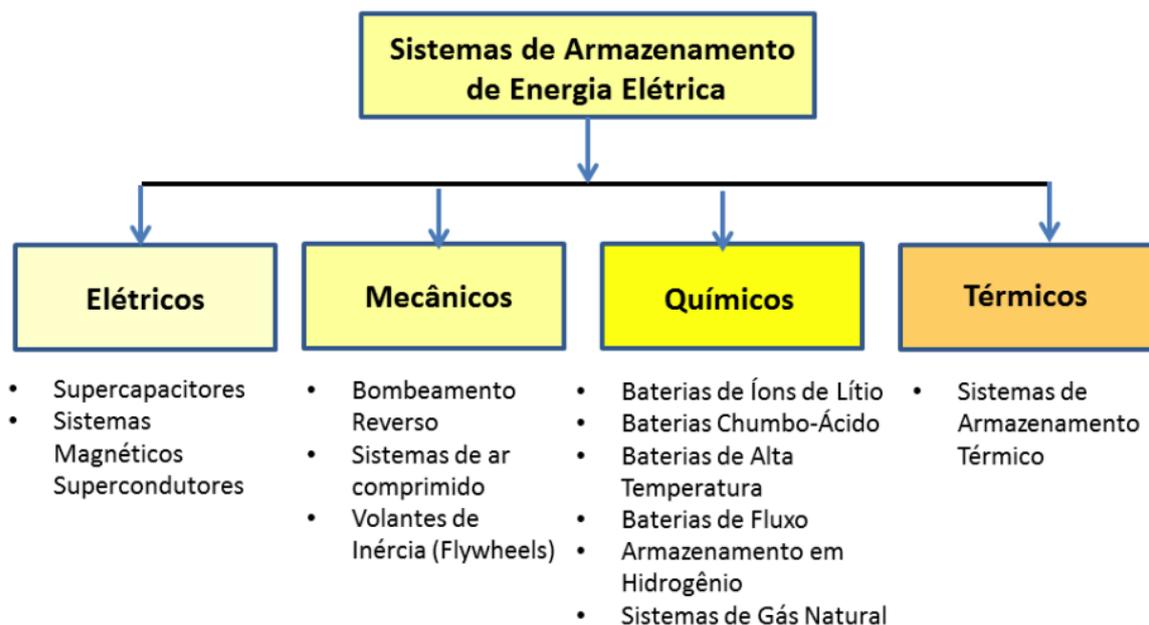


Figura 2.4 – Principais tecnologias de armazenamento de energia. Fonte: [BUENO; BRANDAO, 2016]

Os sistemas de armazenamento de energia têm funções importantes na operacionalização das MG, como equilibrar a oferta e a demanda de energia, absorvendo energia excedente durante períodos de baixa demanda e fornecendo energia durante picos de demanda; permitir operação durante interrupções de energia ou outras falhas na rede principal, suporte de tensão e frequência, *black-start* e melhora na qualidade da energia. Ou seja, atenuam a natureza irregular das fontes renováveis, resultando na melhoria do desempenho global da microrrede. [MARIAM; BASU; CONLON, 2013], [SOSHINSKAYA et al., 2014], [LASSETER, 2002]

2.1.3.3 Cargas

As microrredes podem atender diferentes tipos de cargas, como residências, comércios, indústrias e até mesmo comunidades inteiras. Entretanto, é importante diferenciá-las em relação ao seu nível de prioridade. [PLANAS et al., 2015], [SOSHINSKAYA et al., 2014]

2.1.3.3.1 Cargas Críticas

As cargas críticas são aquelas que necessitam de um fornecimento de energia contínuo e confiável, independentemente das condições externas ou flutuações no fornecimento de energia. A interrupção no fornecimento de energia para essas cargas pode resultar em consequências graves, como perda de vidas, danos significativos ao equipamento, perda de informações ou interrupção de serviços essenciais. [PLANAS et al., 2015]; [SOSHINSKAYA et al., 2014]

Exemplos de cargas críticas podem incluir hospitais, bancos de dados e certas infraestruturas.

turas industriais onde uma interrupção do fornecimento de energia poderia ter um impacto significativo na produção ou segurança.

2.1.3.3.2 Cargas Não Críticas

Por outro lado, as cargas não críticas são aquelas que, embora necessárias para o funcionamento normal da vida cotidiana ou dos negócios, podem tolerar interrupções de energia de curta duração ou variações na qualidade da energia sem consequências graves. Estas podem incluir cargas residenciais como eletrodomésticos e iluminação, ou cargas comerciais como sistemas de escritórios e iluminação de lojas. Embora o fornecimento de energia para estas cargas deva ser mantido sempre que possível, elas podem ser temporariamente desligadas ou ter seu consumo reduzido em situações onde a demanda de energia excede a oferta, ou durante emergências para garantir que as cargas críticas continuem a receber energia suficiente. [PLANAS et al., 2015]; [SOSHINSKAYA et al., 2014]

2.1.4 Modos de Operações de Microrredes

As microrredes devem ser flexíveis e capazes de operar em diferentes modos, dependendo das circunstâncias. Estes modos são nomeados modo conectado e modo ilhado.

2.1.4.1 Modo Conectado

No modo conectado, a microrrede está conectada à rede de distribuição. Neste cenário, a microrrede pode tanto consumir energia da rede principal como fornecer energia excedente para rede principal, dependendo das suas necessidades, ou seja, o fluxo de potência é bidirecional. Neste modo, a MG pode tirar proveito da capacidade e estabilidade da rede principal para atender às suas necessidades de energia, especialmente durante períodos de alta demanda ou quando a geração interna é insuficiente. Neste modo, a tensão e a frequência são impostas pela rede principal. [ROCABERT et al., 2012]

2.1.4.2 Modo Ilhado

No modo ilhado, a microrrede opera de forma autônoma, desconectada da rede principal, devido a uma falta na rede principal ou problemas de qualidade da rede, por exemplo. A principal vantagem do modo ilhado é a resiliência. Em caso de falha na rede principal, a microrrede pode continuar a fornecer energia para suas cargas durante um determinado intervalo de tempo, evitando interrupções no fornecimento de energia. Isso é particularmente importante para cargas críticas que requerem uma fonte de energia confiável e contínua. Ao conectarem-se à rede elétrica os sistemas devem estar sincronizados e operarem simultaneamente. [YAMASHITA; VECHIU; GAUBERT, 2020]; [ANEEL, 2021]

O ilhamento não intencional é um ponto de atenção complexo. Este fenômeno pode levar à formação de tensão no ponto de acoplamento comum (PAC), representando um risco para as equipes de manutenção que podem estar trabalhando no sistema durante a interrupção. Eles podem não estar cientes da presença desta tensão, o que pode levar a situações inseguras. Medidas apropriadas de controle e proteção devem ser implementadas para detectar e gerenciar essas situações. [MELO, 2021]

2.1.5 Controle de Microrredes

A configuração da arquitetura de controle é determinada pela natureza específica da microrrede em questão ou pela infraestrutura preexistente, este controle envolve a gestão coordenada de geração, armazenamento, distribuição e consumo de energia. Esse gerenciamento é importante para garantir a confiabilidade e eficiência do sistema. [BORDONS; GARCIA-TORRES; VALVERDE-ISORNA, 2015]; [ROCABERT et al., 2012]

O controle de microrredes necessita de um conjunto complexo para superar desafios como a transição entre os modos conectado à rede e ilhado. Esta transição deve ser gerenciada de forma suave. Além disso, a proteção do sistema contra falhas ou condições de operação anormais, como curtos-circuitos ou sobrecargas, é outro desafio. [ROCABERT et al., 2012]; [ANEEL, 2021]

2.1.5.1 Controle Hierárquico

O controle hierárquico é um dos principais métodos usados para gerenciar as operações de uma microrrede, permitindo a coordenação eficaz de vários elementos de geração, armazenamento e demanda. Neste modelo de controle, a estrutura de controle é geralmente dividida em três níveis: primário, secundário e terciário. A Figura 2.5 apresenta uma visão geral das principais funcionalidades destes três níveis. [SCHWAEGERL et al.,]



Figura 2.5 – Funcionalidades do sistema de controle de uma microrrede. Fonte: Adaptado de [BELLIDO, 2018]

2.1.5.1.1 Controle Primário

O controle primário é a primeira e mais rápida camada de gerenciamento de uma microrrede elétrica. Em sua essência, está focado na estabilização instantânea e na regulação do sistema, principalmente em relação à frequência e tensão. Um elemento fundamental do controle primário é o equilíbrio entre a geração e a demanda de energia. Em situações normais, a geração de energia deve ser igual à demanda para garantir a estabilidade da frequência e da tensão. No entanto, alterações rápidas e inesperadas na demanda ou na geração de energia podem causar um desequilíbrio. [ALTIN; EYIMAYA, 2021]; [AHMED et al., 2020]

O controle primário é particularmente crucial quando a microrrede está operando no modo ilhado, isto é, quando está desconectada da rede principal. Nestes cenários, a microrrede deve ser capaz de autoregular sua frequência e tensão, já que não possui a referência da rede principal.

O controle primário opera de forma descentralizada e autônoma, o que significa que cada inversor ou conversor faz seus próprios ajustes com base em suas observações locais. Isso permite uma resposta rápida às mudanças, mas também significa que o controle primário não tem uma visão global do sistema ou pode otimizar o desempenho da microrrede como um todo. Essa tarefa é deixada para as camadas superiores de controle. [ALTIN; EYIMAYA, 2021]; [AHMED et al., 2020]

2.1.5.1.2 Controle Secundário

O controle secundário, por outro lado, tem a tarefa de gerenciar as variáveis de controle da microrrede em um intervalo de tempo mais longo. Ele também corrige as flutuações e

os desvios de tensão e frequência que podem ter ocorrido no nível primário. O controle secundário também é responsável pelo gerenciamento do fluxo de energia entre a microrrede e a rede principal quando a microrrede está operando no modo conectado. [KATIRAEI et al., 2008]

No entanto, a implementação do controle secundário pode apresentar alguns desafios. Por exemplo, como este controle requer uma rede de comunicação confiável para transmitir informações entre o controlador secundário e os vários dispositivos dentro da microrrede, a segurança da informação e a resiliência podem se tornar preocupações significativas. [BORDONS; GARCIA-TORRES; VALVERDE-ISORNA, 2015]

O controle secundário não se destina a lidar com a otimização da operação da microrrede ou a coordenação do consumo e geração de energia em resposta a variações nas tarifas de energia ou outros sinais de mercado. Estas questões são geralmente tratadas pelo controle terciário, que é o próximo nível na hierarquia de controle das microrredes.

2.1.5.1.3 Controle Terciário

O controle terciário é o nível mais alto na hierarquia de controle em uma microrrede e têm o objetivo de otimizar o desempenho geral da MG, levando em conta fatores como custos de operação, confiabilidade do serviço e impactos ambientais. Este nível de controle é responsável por tomar decisões de alto nível, como quando operar no modo ilhado ou conectado e como programar a operação de diferentes elementos da microrrede para maximizar a eficiência. [ZAMORA; SRIVASTAVA, 2010]; [AHMED et al., 2020]

O controle terciário visa o planejamento e a gestão econômica da microrrede, operando em uma escala de tempo mais lenta, geralmente de minutos a horas, e até mesmo dias. Seu objetivo é otimizar a operação da microrrede, levando em consideração uma série de fatores, como tarifas de energia, disponibilidade de recursos renováveis, demanda de carga e restrições do sistema. [AHMED et al., 2020]

2.2 SIMULAÇÕES EM TEMPO REAL

Uma simulação computacional é uma forma de utilização de um modelo matemático utilizado para imitar, ou reproduzir, os processos e operações do mundo real. As simulações são frequentemente utilizadas em diversas áreas como na economia e na engenharia. As simulações computacionais podem testar cenários e situações complexas de maneira eficiente, economizando tempo e recurso, quando comparadas a experimentos reais. [BELANGER; VENNE; PAQUIN, 2010]; [NOUREEN; ROY; BAYNE, 2017]

Entretanto, a eficiência das simulações depende da relação entre a complexidade dos modelos matemáticos e da capacidade computacional disponível. Neste contexto, a simulação

em tempo real, ou do inglês *real time simulation* (RTS), permite interações em tempo real com o sistema em estudo replicando fielmente as condições do mundo real. [BELANGER; VENNE; PAQUIN, 2010]; [NOUREEN; ROY; BAYNE, 2017]

O que diferencia as simulações em tempo real, das simulações tradicionais, ou simulações *offline*, é o intervalo de tempo de referência para resolução das equações que representam o sistema, o chamado *time-step*. Nas simulações *offline*, as equações podem ser resolvidas com um tempo maior ou menor que o *time-step*, dependendo da capacidade computacional e da complexidade do sistema modelado. Em contrapartida, nas RTS o tempo de resolução das equações deve ser menor ou igual o *time-step*, ou seja, a simulação em tempo real deve reproduzir os resultados do sistema no mesmo tempo em que a planta real o faria. [BELANGER; VENNE; PAQUIN, 2010]

A Figura 2.6 ilustra os três casos diferentes de simulação: simulações em tempo real e simulações *offline* mais rápidas e mais lentas que o tempo real. Na Figura 2.6 (a), a simulação *offline* é mais rápida que o tempo real, pois as resoluções das equações que modelam o sistema foram resolvidas em um tempo menor que o *time-step* definido e imediatamente deu-se continuidade aos próximos cálculos. Já na Figura 2.6 (b), trata-se de uma simulação *offline* mais lenta que o tempo real, ou seja, o tempo dos cálculos das equações foram maiores que o *time-step* definido. Quando isto ocorre, é chamado de *overrun*. Por fim, em 2.6 (c) é ilustrado uma simulação em tempo real que reproduz os resultados do sistema no mesmo tempo que a planta real o faria. Portanto, mesmo que a resolução das equações sejam resolvidas em um tempo menor que o *time-step*, espera-se a sua conclusão para dar início ao próximo cálculo. [BELANGER; VENNE; PAQUIN, 2010]; [NOUREEN; ROY; BAYNE, 2017]

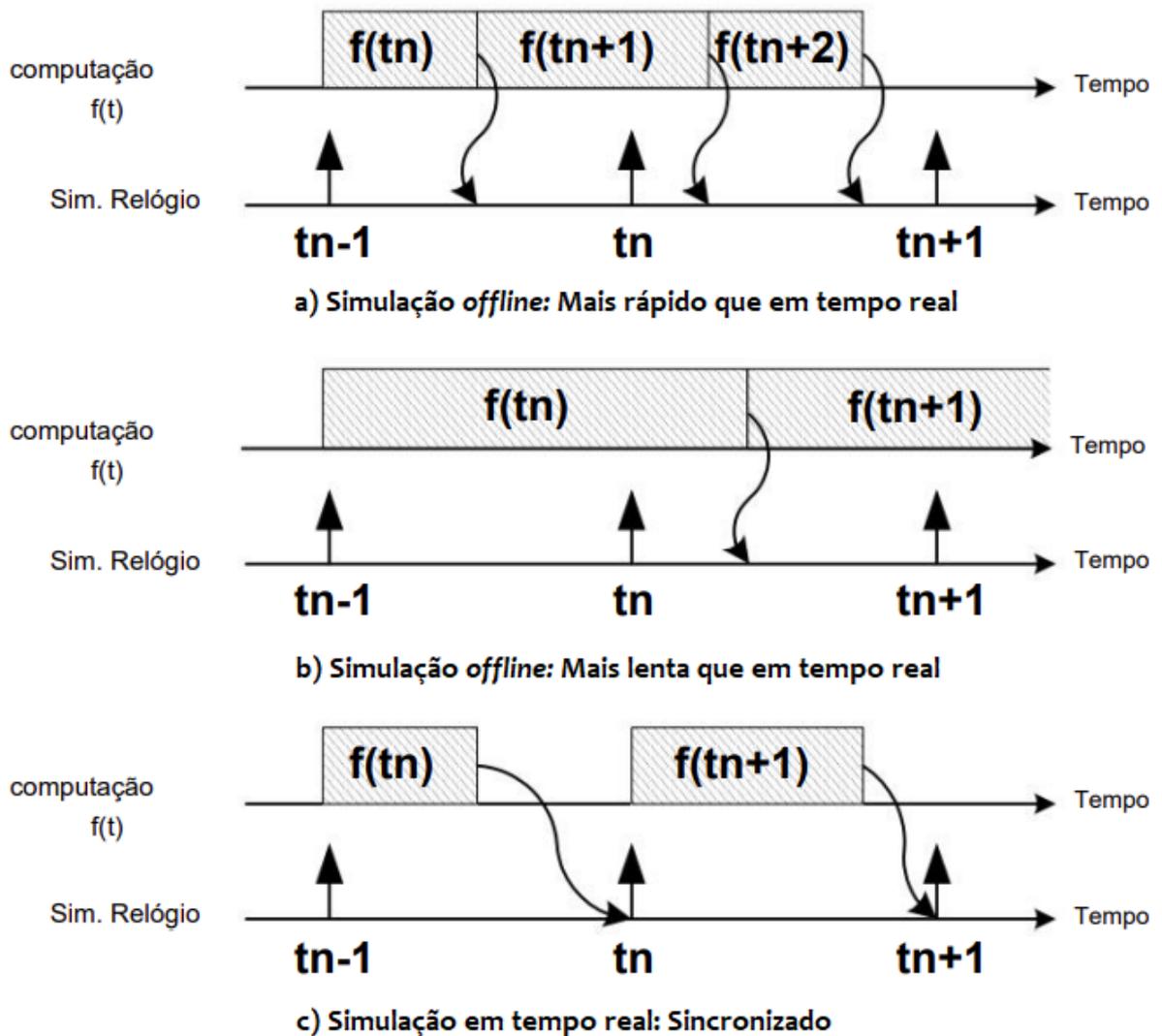


Figura 2.6 – Simulações *offline* e em tempo real. Fonte: Adaptado de [BELANGER; VENNE; PAQUIN, 2010]

2.2.1 Simulações *Hardware-in-the-Loop*

As simulações em tempo real permitem a comunicação entre o modelo implementado no computador e equipamentos reais, os chamados equipamento sob teste, ou do inglês *hardware-under-test* (HuT). Este tipo de simulação é chamada de *hardware-in-the-loop* (HIL). [NOUREEN; ROY; BAYNE, 2017]; [LAUSS et al., 2016]; [GUILLAUD et al., 2015]; [LUNDSTROM et al., 2016]

As simulações HIL dividem-se em duas categorias: a) *controller-in-the-loop* (CHIL), quando há apenas trocas de sinais de controle entre a rede simulada e o HuT, como por exemplo, a interação de relés de proteção com a rede elétrica modelada; b) *power-hardware-in-the-loop* (PHIL), neste caso além de utilizar equipamentos reais, também faz-se uso de

amplificadores de potência entre o equipamento real e a rede simulada, assim, além das comunicações de controle, também são transferidas informações de potência. As Figuras 2.7 e 2.8 ilustram as conexões das simulações CHIL e PHIL, respectivamente. [NOUREEN; ROY; BAYNE, 2017]; [LAUSS et al., 2016]; [GUILLAUD et al., 2015]; [LUNDSTROM et al., 2016]

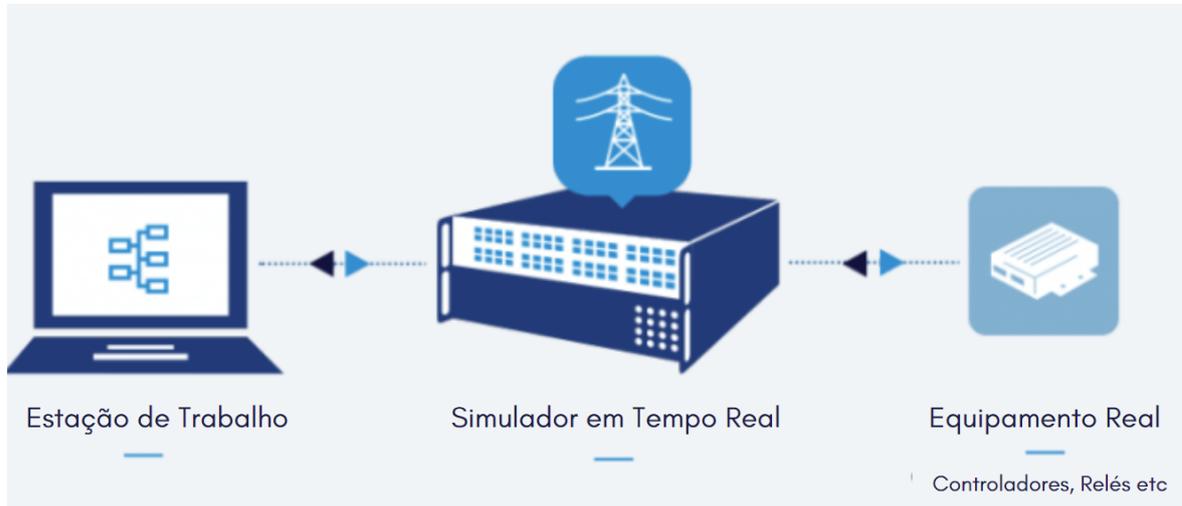


Figura 2.7 – Simulações *controller-hardware-in-the-loop*. Há apenas trocas de sinais de controle entre a rede simulada e o HuT. Fonte: Adaptado de [OPAL-RT, 2023b]

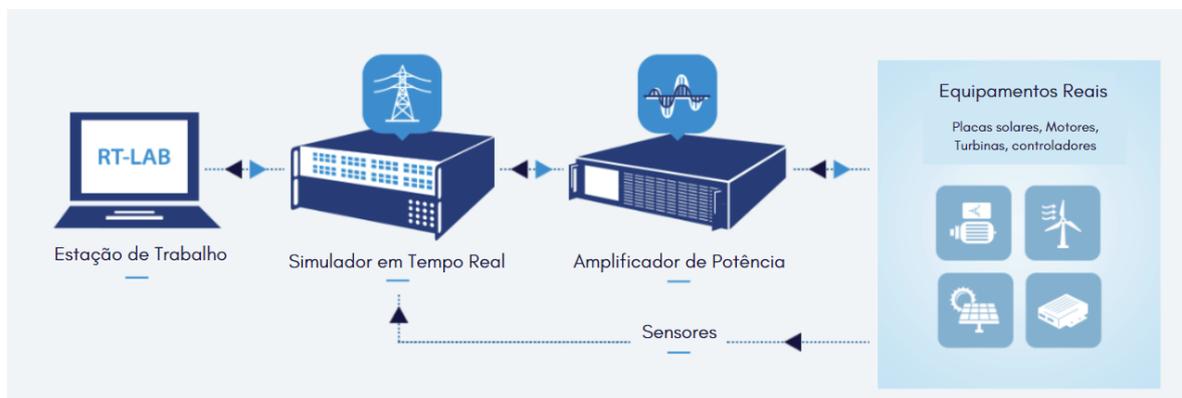


Figura 2.8 – Simulações *power-hardware-in-the-loop*. Além das comunicações de controle, também são transferidas informações de potência entre a rede simulada e o HuT. Fonte: Adaptado de [OPAL-RT, 2023d]

2.2.2 Simulações *Software-in-the-Loop*

Por outro lado, nas etapas iniciais de projeto são feitas simulações totalmente digitais, ou seja, sem a utilização de equipamentos reais na malha de simulação. Este tipo de simulação é menos custosa e tem objetivo de buscar falhas já nas primeiras etapas do projeto, estas são as chamadas simulações em tempo real do tipo *software-in-the-loop* (SIL). A Figura 2.9 ilustra as conexões das simulações SIL. [NOUREEN; ROY; BAYNE, 2017]; [LAUSS et al., 2016];

[GUILLAUD et al., 2015]; [LUNDSTROM et al., 2016]

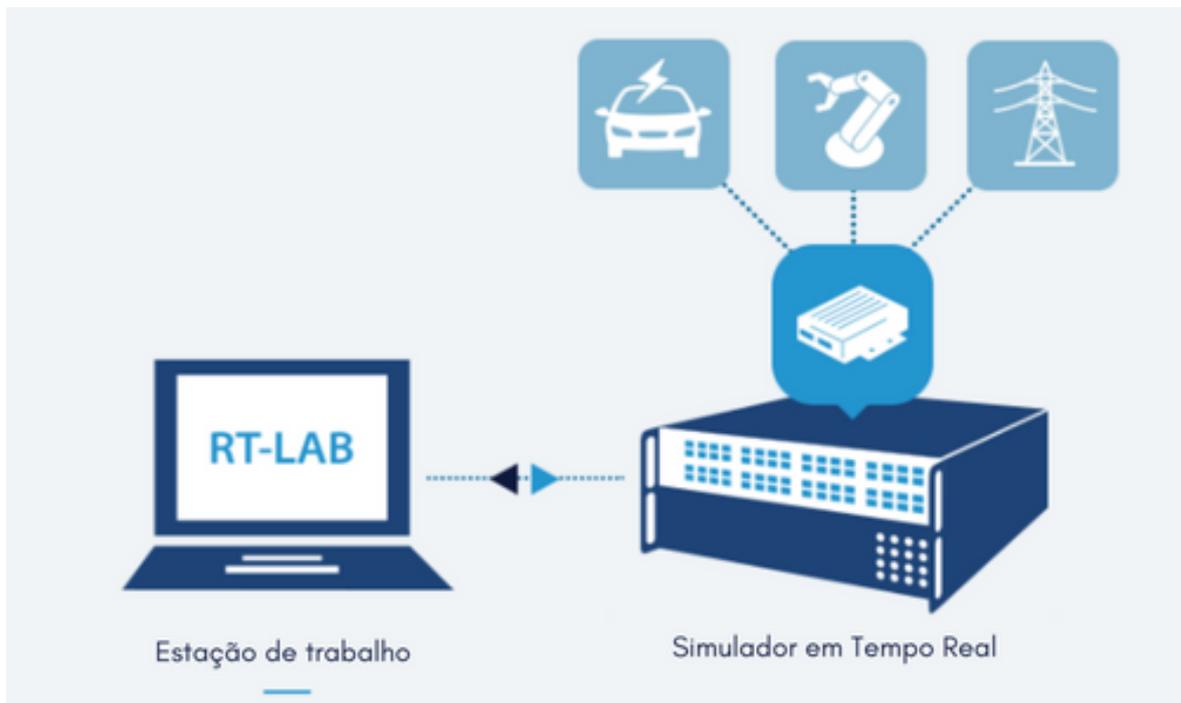


Figura 2.9 – Simulações *software-in-the-loop*. Este tipo de simulação é totalmente digital, sem utilização de equipamentos reais. Fonte: Adaptado de [OPAL-RT, 2023e]

Dado que, toda a simulação é implementada no STR, a sincronização com o “mundo real” não é crítica. Sendo assim, o tempo para resolução dos cálculos pode ser mais rápido ou mais lento que o *time-step* definido, dependendo da complexidade do modelo e do poder computacional do simulador. [DEMERS; GOPALAKRISHNAN; KANT, 2007]; [BELANGER; VENNE; PAQUIN, 2010]; [LUNDSTROM et al., 2016]

2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo proporcionou uma compreensão sobre as microrredes elétricas, abordando suas topologias, componentes, modos de operação e estratégias de controle. Além disso, foram discutidos os conceitos e os diferentes tipos de simulações em tempo real.

Na próxima seção, serão apresentados os materiais e métodos utilizados para implementação de uma microrrede utilizando simulação em tempo real do tipo *software-in-the-loop*.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo tem como propósito descrever os equipamentos e a metodologia utilizada para desenvolvimento de uma simulação do tipo *software-in-the-loop* de microrrede elétrica.

Serão descritos os computadores e *softwares* utilizados. Além disso, será apresentada uma abordagem englobando os componentes do sistema: rede, sistema de geração, armazenamento e cargas. Por fim, serão apresentadas as etapas necessárias para implementação da simulação na plataforma de tempo real.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Estrutura Computacional

Neste trabalho foram utilizados dois sistemas computacionais: a) um PC *Windows*®, para modelagem de todo sistema e b) plataforma de tempo real, para implementação da simulação. A Figura 3.1 apresenta infraestrutura laboratorial utilizada, composta pelo computador utilizado para modelagem do sistema e o STR.

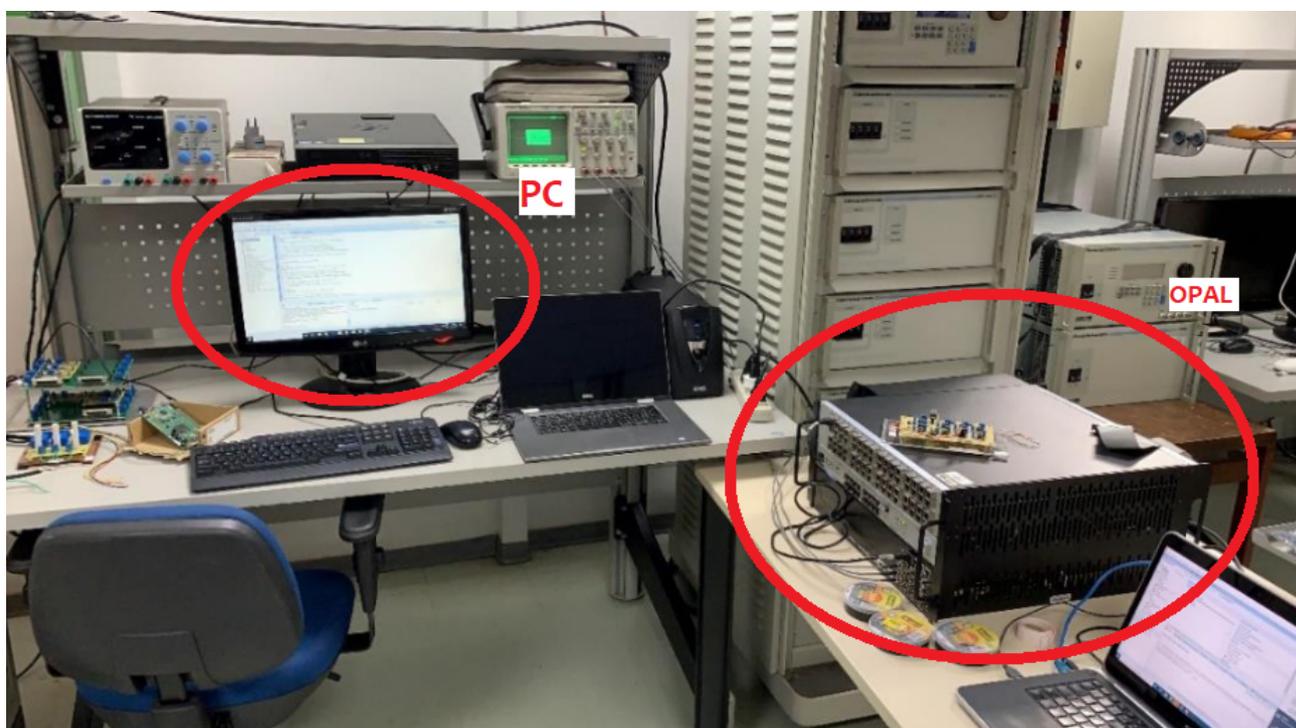


Figura 3.1 – Infraestrutura laboratorial. A esquerda: computador utilizado para modelagem do sistema; a direita: simulador em tempo real. Fonte: Adaptado de [MELO, 2021]

3.1.1.1 Computador *Windows*®

As especificações do PC utilizado estão apresentadas na tabela 3.1. Embora seja necessário que este equipamento possua capacidade suficiente para executar o MATLAB/Simulink®, não é necessário que ele tenha um alto desempenho. Isso se deve ao fato de que a simulação será, de fato, implementada na plataforma de tempo real, a qual exige uma capacidade computacional significativa.

Tabela 3.1 – Especificações do Computador *Windows*®. Fonte: Autoria própria.

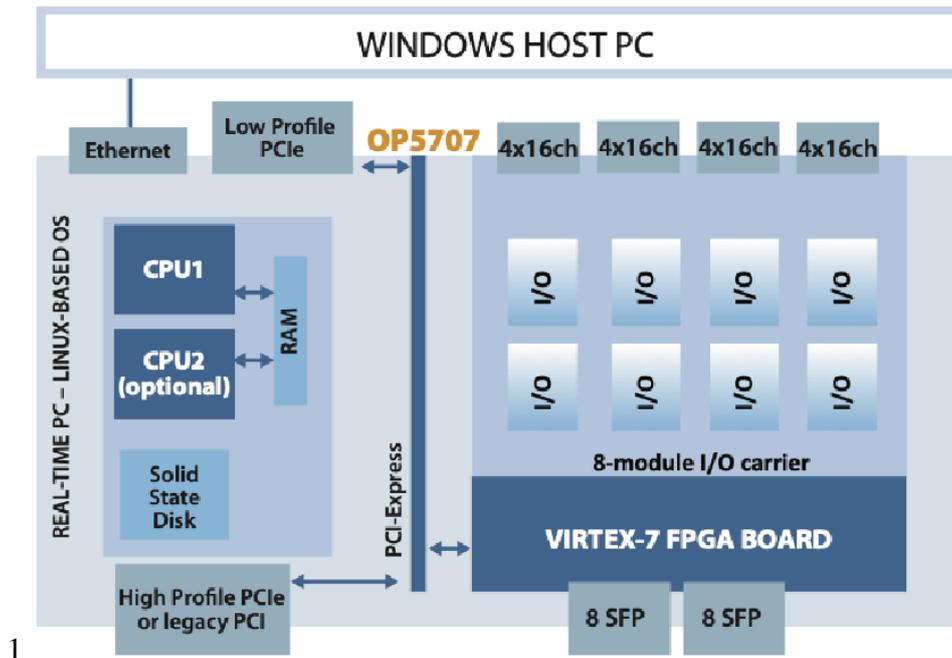
Sistema Operacional	Processador	Mémoria RAM
<i>Windows</i> ® 10 Education	Intel® Core™ i5-2500U 3.30 GHz	4,00 GB

3.1.1.2 Simulador em Tempo Real

O STR disponível no Laboratório de Redes Elétricas Inteligentes (REI Lab) corresponde ao modelo OP5700-8 da série OP5707 da OPAL-RT®, ilustrado na Figura 3.2. A arquitetura deste dispositivo, ilustrada na Figura 3.3, combina as capacidades de um arranjo de porta programável em campo, ou do inglês *field programmable gate array* (FPGA) Xilinx® Virtex®-7 com 8 núcleos de processamento Intel® Xeon® de alto desempenho. O equipamento possui 16 canais de entradas analógicas de 16 bits, 400kS/s e faixa de tensão de $\pm 20V$, bem como 16 canais de saídas analógicas de 16 bits, 1MS/s e faixa de tensão de $\pm 16V$. Essas interfaces analógicas/digitais permitem a comunicação entre o simulador e o HuT, em implementações de simulações PHIL, HIL e CHIL. O STR possui a sua disposição o total de 8 núcleos de processamento, no entanto, com a licença atualmente adquirida, apenas um desses núcleos está disponível para uso. A habilitação dos núcleos restantes pode ser realizada através da aquisição de uma licença mais *premium*.



Figura 3.2 – Simulador em tempo real OPAL 5700. Fonte: [SOUZA et al., 2021]



1
 Figura 3.3 – Arquitetura do simulador OPAL 5707. Fonte: [OPAL-RT, 2023a]

3.1.2 Ferramentas Computacionais

Neste trabalho, foram utilizados dois *softwares* principais: a) MATLAB/Simulink®, para desenvolvimento do modelo e b) RT-Lab®, para implementação do modelo na plataforma OP5700-8. A seguir, serão fornecidos detalhes sobre estes *software* e aspectos importantes relacionados a sua utilização.

3.1.2.1 MATLAB/Simulink®

Neste trabalho, foi utilizado o Simulink®, em conjunto com o SimScape Power Systems® para modelagem de todos componentes da microrrede.

O MATLAB® é uma plataforma de computação numérica e programação que é amplamente utilizada em uma variedade de áreas, como engenharia, ciência da computação, matemática aplicada, física, estatística e muitas outras disciplinas técnicas. Desenvolvido pela MathWorks®, o MATLAB® oferece um ambiente de trabalho que combina uma linguagem de programação, uma biblioteca de funções matemáticas e ferramentas para análise, visualização e modelagem de dados. [MATLAB, 2018]

O Simulink® é uma extensão do MATLAB® que permite a modelagem, simulação e implementação de sistemas. Ele fornece uma abordagem gráfica para a construção de modelos, onde os componentes do sistema são representados por blocos e as conexões entre eles descrevem o fluxo de informações e sinais. Estes blocos pré-definidos podem ser interconectados permitindo a criação de modelos. [MATLAB, 2018]

O SimScape Power Systems® é uma biblioteca específica do SimScape®, uma extensão do MATLAB® e do Simulink®, que permite modelar e simular sistemas de potência. A biblioteca oferece componentes que podem ser interconectados e configurados para criar modelos de sistemas elétricos complexos. [MATLAB, 2023]

3.1.2.2 Software de tempo real

A OPAL-RT Technologies® possui diferentes ferramentas para serem utilizadas na plataforma. É essencial determinar o uso da tecnologia adequada, de acordo com a frequência do fenômeno transitório simulado e do número de nós do sistema. A Figura 3.4 ilustra as ferramentas disponíveis com suas respectivas aplicações e restrições de número de nós e *time-step*.

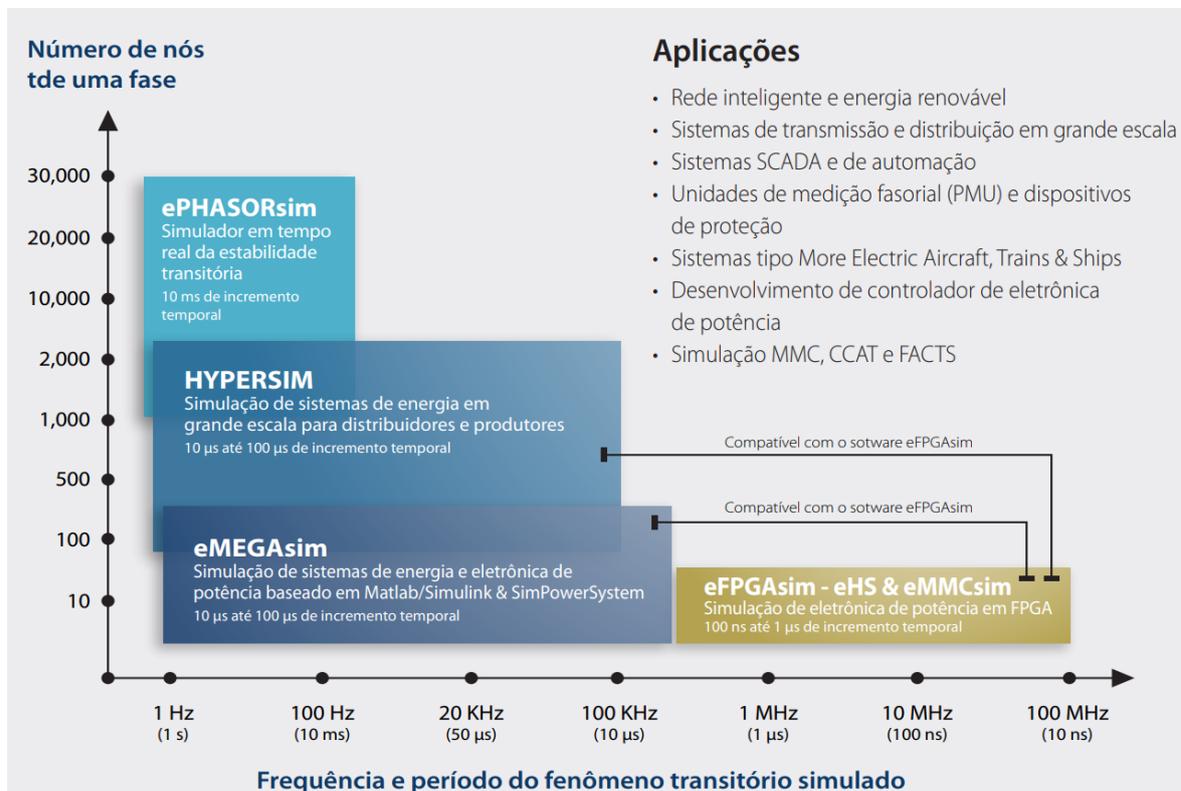


Figura 3.4 – Características dos softwares OPAL-RT Technologies®. Fonte: Adaptado de [OPAL-RT, 2017]

- HYPERSIM®

O HYPERSIM®, diferentemente das outras soluções, não possui integração com o ambiente MATLAB®/SIMULINK®. O HYPERSIM® é utilizado especificamente para testes *HIL*. Suas aplicações estão relacionadas a geração, transmissão e distribuição de sistemas de energia, incluindo microrredes fotovoltaicas, turbinas eólicas, geradores, bancos de capacitores, entre outros. [OPAL-RT, 2017]

- eMEGASIM®

O eMEGASIM® é utilizado para testes de sistemas de controle e proteção de simulações *HIL*. O eMEGASIM® simula de forma precisa os transientes eletromagnéticos requeridos pelas redes de energia e pelos sistemas de eletrônica de potência. [OPAL-RT, 2017]

- eFPGAsim®

O eFPGAsim® é utilizado em teste de aplicações de eletrônica de potência e controle que necessitam de *time-step* abaixo de microssegundos. O eFPGAsim® é a solução que permite o menor *time-step*, em contrapartida a sua capacidade em termos de quantidade de nós é a menor. [OPAL-RT, 2017]

- ePASHORsim®

O ePASHORsim® é a ferramenta capaz de simular o maior número de nós (e portanto, sua capacidade em termos de *time-step* é reduzida). O ePASHORsim® é uma solução no domínio fasorial que permite que os valores de tensão eficaz e ângulos de tensão e corrente sejam computados, bem como potências ativas e reativas tanto de sistemas balanceados, quanto desbalanceados. [OPAL-RT, 2017]

- RT-Lab®

O RT-Lab® é a ferramenta que interage com o eMEGASIM®, eFPGAsim® e o ePASHORsim®. No RT-Lab® é feito o gerenciamento e configuração da simulação e da plataforma de simulação em tempo real. [OPAL-RT, 2017]

Neste trabalho, o RT-Lab® foi o ambiente escolhido para implementação do projeto, uma vez que está é a ferramenta disponível na licença adquirida pelo REILab.

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Modelagem do Sistema

O projeto foi desenvolvido utilizando o ambiente MATLAB/Simulink® em conjunto com a biblioteca SimsCape Power Systems. [MATLAB, 2023]

Este estudo utilizou como ponto de referência a microrrede descrita em [KHAN et al., 2018]. No modelo original, uma microrrede CA monofásica simplificada é apresentada, cujo comportamento é descrito durante um ciclo de operação de 24 horas, desenvolvida no

domínio fasorial. Contudo, a fim de permitir a implementação na plataforma de tempo real, tornou-se necessário adaptar a totalidade do comportamento do sistema para uma operação em tempo discreto. Neste processo, optou-se pela substituição de todos os sinais complexos por sinais reais.

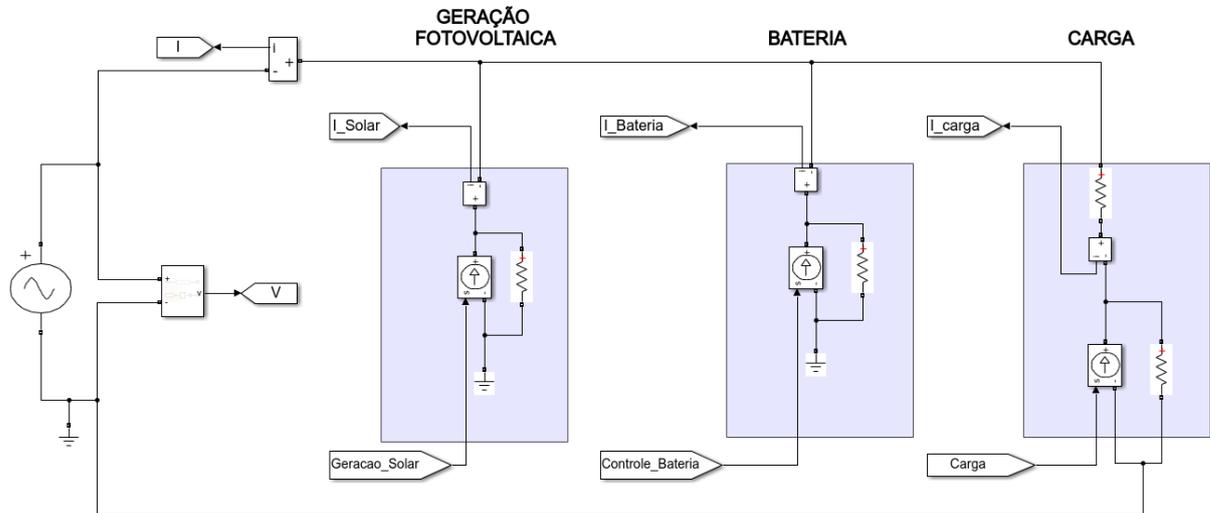


Figura 3.5 – Modelagem da microrrede. Fonte: Autoria própria.

- Rede Principal: Foi utilizado como rede elétrica principal uma fonte monofásica de 220V;
- Energia Solar: A geração fotovoltaica implementada consiste em uma fonte de corrente controlada ilustrada na Figura 3.5. Neste caso, a fonte de corrente controlada é utilizada para simular a corrente gerada pelos módulos fotovoltaicos. O controle desta fonte de corrente é feito com base no perfil de geração que é uma função do tempo e que representa a variação da geração de energia solar ao longo do dia.

A curva de geração adotada neste estudo, ilustrada na Figura 3.6, tem como referência a base de dados disponibilizada pelo Operador Nacional do Sistema (ONS). Especificamente, foi selecionado o perfil de geração da Usina PQU DFDF MMDG, situada no Distrito Federal, correspondente ao dia 22 de maio de 2023. A curva de geração utilizada possui pico de 5 kW e refere-se a um dia ensolarado típico, em que a curva de geração de energia solar assume uma forma característica de distribuição gaussiana. Com o amanhecer, a produção de energia começa a subir lentamente a partir do zero. A medida que o sol se eleva no céu, a intensidade da irradiação solar aumenta, resultando em um aumento gradual da produção de energia elétrica pelos módulos solares. O pico de geração ocorre ao meio-dia. Em seguida à medida que o sol começa a se pôr, a geração de começa a diminuir de maneira simétrica em relação ao aumento da manhã, refletindo o caminho do sol no céu. Ao anoitecer, a produção de energia volta a zero. [ONS, 2023]

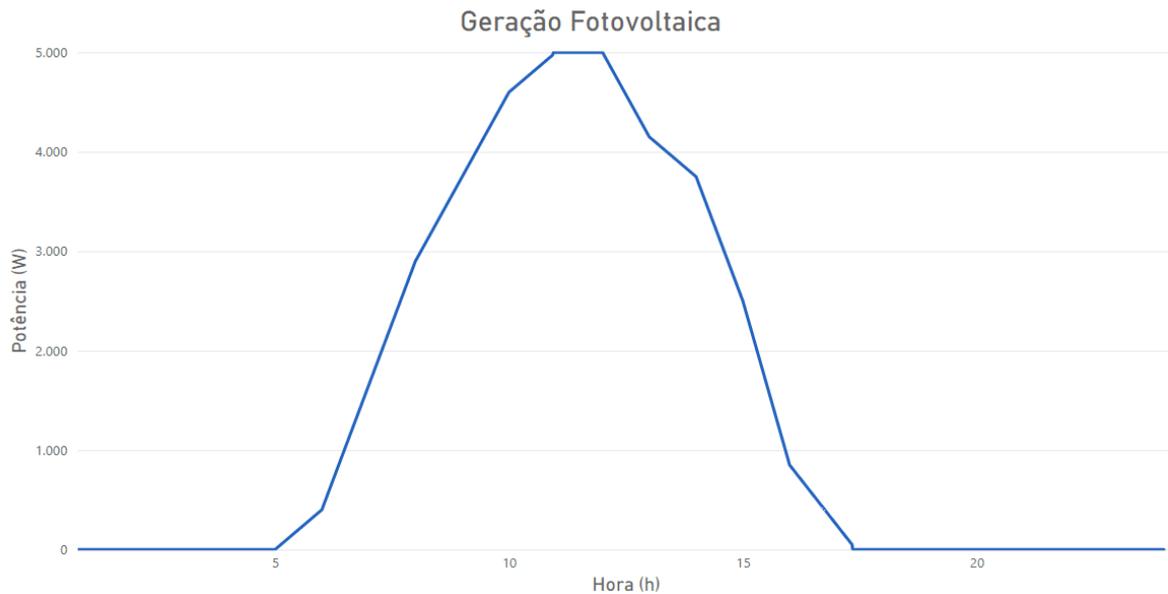


Figura 3.6 – Perfil de geração utilizado. Fonte: Autoria própria.

- **Bateria:** O sistema de armazenamento de energia implementado possui 1000 Ah e consiste em uma fonte de corrente controlada ilustrada na Figura 3.5. A bateria é controlada por um controlador que tem o objetivo de manter um equilíbrio entre a geração e o consumo de energia.

O sistema de controle da bateria, ilustrado na figura 3.7, emprega a seguinte estratégia de despacho de carga: quando há excesso de geração de energia renovável, a bateria é carregada. Se a geração de energia renovável não for suficiente para suprir a demanda da carga, a rede principal é acionada para fornecer a energia necessária.

- **Cargas:** A carga implementada consiste em uma fonte de corrente controlada ilustrada na Figura 3.5. Neste caso, a fonte de corrente controlada é utilizada para simular a corrente consumida pelas residências. O controle desta fonte de corrente é feito com base no perfil de carga que é uma função do tempo e que representa a variação da demanda de energia ao longo do dia.

A curva de carga adotada neste estudo, ilustrada na Figura 3.8 tem pico de 2,5 kW e referência na base de dados disponibilizada pela Eletrobras na Pesquisa de posse e hábitos de uso de equipamentos elétricos na classe residencial (PPH) 2019. Especificamente, foi selecionado o perfil de carga de uma residência situada no Distrito Federal, correspondente ao mês de maio de 2019. [ELETROBRAS, 2019].

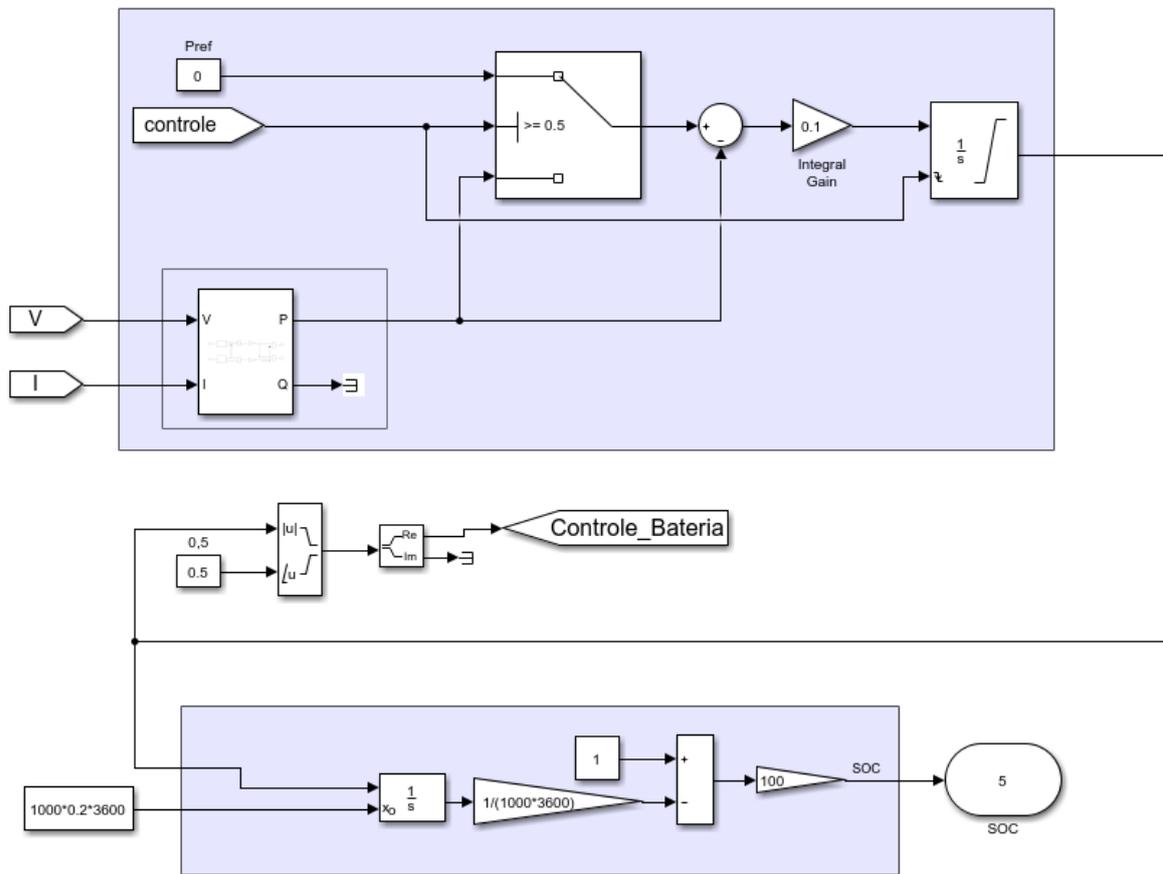


Figura 3.7 – Sistema de controle da bateria. Fonte: Autoria própria.

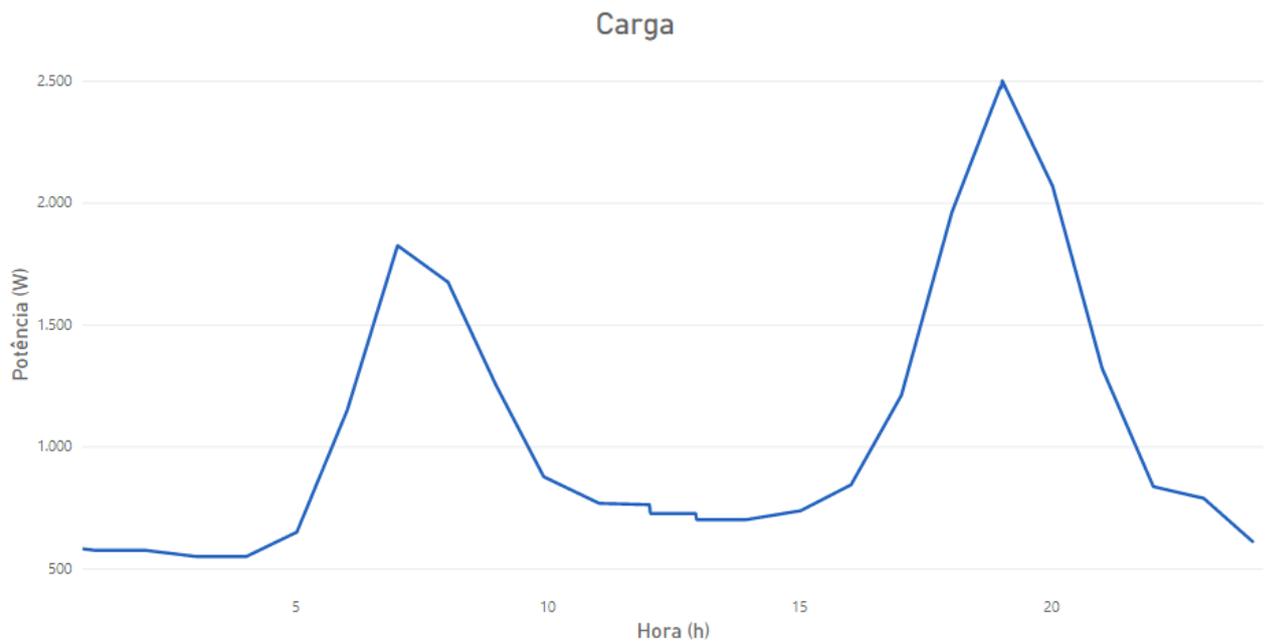


Figura 3.8 – Perfil de carga utilizado. Fonte: Autoria própria.

O perfil de carga deste projeto representa uma curva residencial típica em que normal-

mente o consumo de energia residencial é baixo durante a noite, quando a maioria dos aparelhos está desligada e as pessoas estão dormindo. Há um aumento acentuado no consumo de energia no início da manhã, que corresponde ao horário em que as pessoas se levantam e começam suas rotinas diárias, ligando eletrodomésticos, preparando o café da manhã, tomando banho e assim por diante.

Durante o dia, quando a maioria das pessoas está fora de casa, a demanda de energia tende a cair, embora haja algum consumo contínuo devido a aparelhos como geladeiras, sistemas de aquecimento ou resfriamento, e dispositivos em *standby*.

No final da tarde e início da noite, ocorre outro pico de consumo de energia. Este é geralmente o período de maior consumo de energia em uma residência, pois coincide com o horário em que as pessoas retornam do trabalho ou da escola e atividades como cozinhar, assistir à televisão, utilizar computadores e outros aparelhos eletrônicos estão em seu auge.

Após esse pico da noite, o consumo de energia começa a diminuir à medida que as pessoas vão dormir e a maioria dos aparelhos é desligada, retornando aos níveis baixos durante a noite.

3.2.2 Implementação

Para implementação do projeto na plataforma de tempo real é necessário seguir as seguintes etapas:

1. Simulação *offline*: inicialmente, é necessário realizar a modelagem do sistema de maneira *offline*, isto é, sem a utilização da plataforma de tempo real, mas puramente utilizando o ambiente MATLAB/SIMULINK®, conforme ilustrado na Figura 3.9. Esta etapa inicial é necessária para testar a simulação e corrigir eventuais erros. Após a execução da simulação *offline*, é possível passar para o próximo passo, o de ajuste do modelo.

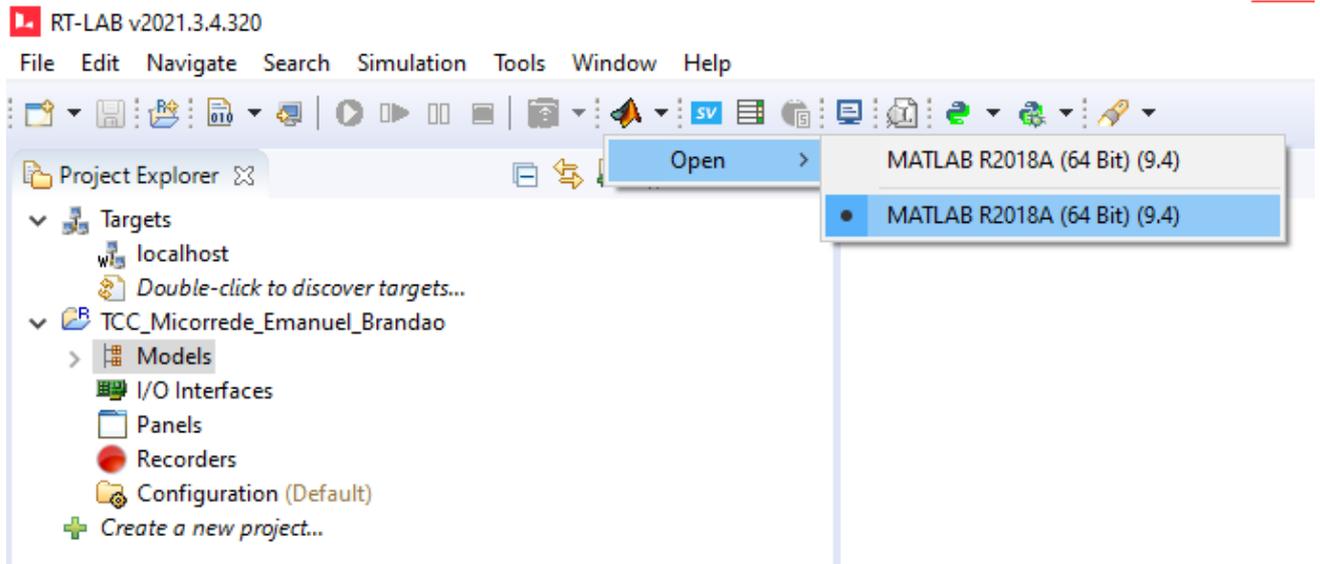


Figura 3.9 – Tela do RT-LAB® que ilustra a primeira etapa, simulação *offline*. Neste caso o projeto é simulado utilizando apenas o ambiente MATLAB/SIMULINK®. Fonte: Autoria própria.

2. Ajuste do modelo: após a validação da simulação *offline*, pode-se iniciar os ajustes necessários para que o projeto seja compatível com o STR.

A plataforma de simulação da OPAL-RT Technologies® é dividida em duas estruturas, são elas: a) *target*: responsável pelas etapas de cálculos da simulação; b) *host*: responsável pelo envio das entradas e recebimento das saídas, vindas do *target*. A comunicação entre o *host* e o *target* é feita via *Ethernet* TCP/IP.

Com base nestas duas estruturas, a camada mais alta do modelo desenvolvido no MATLAB®/SIMULINK® deve possuir dois subsistemas, são eles: a) SC: responsável pelas etapas de cálculo (*target*); b) SM: correspondente às etapas de visualizações (*host*). Para comunicação entre estes dois subsistemas, utiliza-se o bloco *opcomm* tanto no SC, quanto no SM. A Figura 3.10 ilustra estes subsistemas implementados no MATLAB®/SIMULINK®. Por fim, após estes ajustes no modelo, pode-se iniciar a execução no STR.

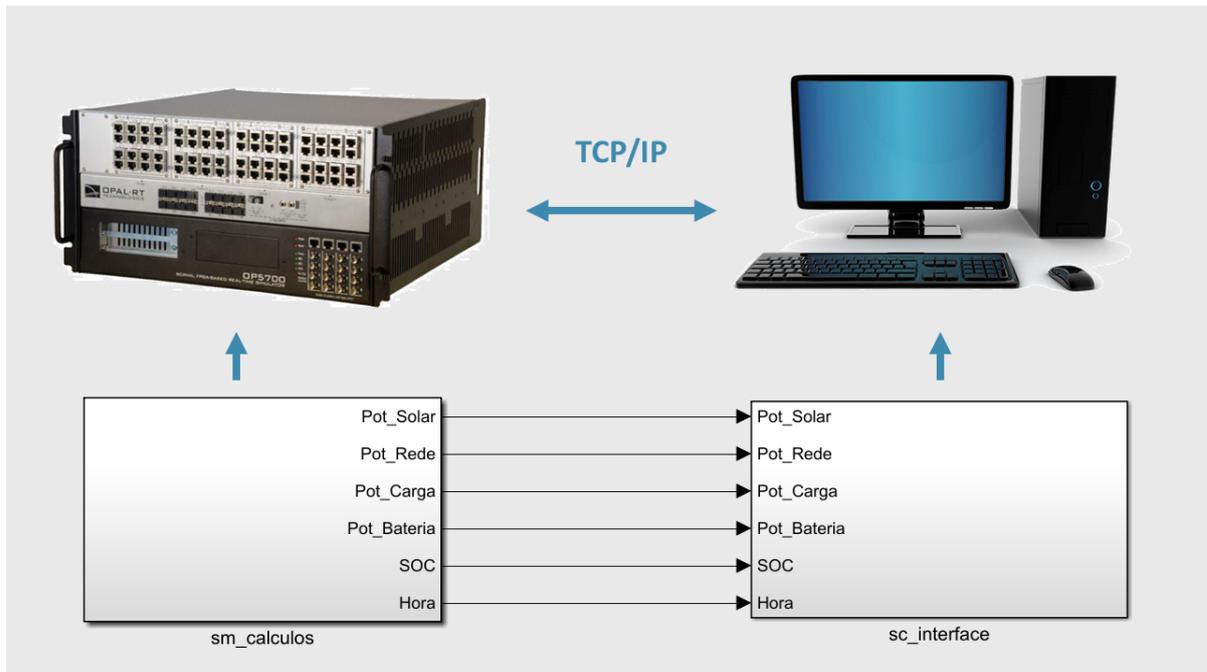


Figura 3.10 – Conexão dos blocos SM (visualização) e SC (cálculos). Fonte: Autoria própria.

3. Execução em tempo real: após dividir o modelo nos subsistemas SC e SM, pode-se iniciar as etapas necessárias para simulação *online*. Estas etapas são divididas em *build*, *load* e *execute*, nesta ordem, conforme ilustrado na figura 3.11.

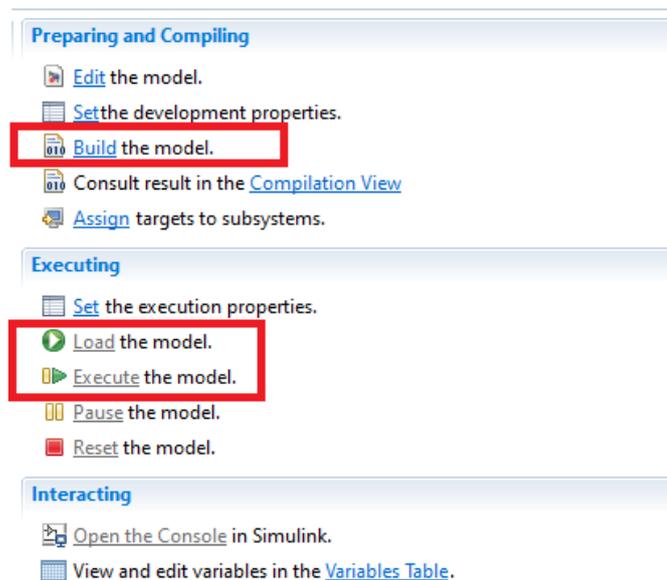


Figura 3.11 – Tela do RT-LAB® que ilustra o passo a passo necessário para execução da simulação no STR. Fonte: Autoria própria.

Após o modelo ser carregado nas etapas de *build* e *load*, o último passo é o *execute*. Nesta etapa, a plataforma OP5707-8 é responsável pelos cálculos do sistema, enquanto o MATLAB/SIMULINK® tem a função de interface gráfica.

3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Assim, este capítulo ofereceu uma descrição dos equipamentos e da metodologia empregada para o desenvolvimento de uma simulação do tipo *software-in-the-loop*. Discutiu-se a estrutura e as ferramentas computacionais necessária para o processo.

Além disso, descreveu-se o procedimento detalhado que deve ser seguido para migração da simulação do ambiente *offline* para *online*, utilizando o STR. As etapas apresentadas são indispensáveis para o funcionamento adequado de projetos que fazem uso do RT-LAB®.

Na próxima seção será apresentado o cenário simulado, além disso os resultados serão expostos e discutidos.

4

RESULTADOS

Para uma avaliação abrangente do desempenho de uma microrrede elétrica, foi realizado um estudo simulando um dia típico de operação.

Em relação a geração fotovoltaica, foi utilizado o perfil de geração ilustrado na Figura 3.6. Como carga total, foi utilizado o perfil de carga ilustrado na figura 3.8 multiplicado por um fator de ganho constante de 3, com objetivo de representar uma pequena comunidade de três residências.

Durante o período entre o meio-dia e às 18 horas, um cenário específico foi explorado, desativando-se o controle do sistema de bateria. Essa configuração possibilitou uma análise do comportamento da rede principal em conjunto com o sistema fotovoltaico em relação à demanda da carga.

A Figuras 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5 ilustram as potências entregues/absorvidas do sistema fotovoltaico, da rede principal, das cargas e do sistema de bateria, respectivamente, ao longo do dia.

Na Figura 4.1, é possível observar a evolução da potência fornecida pelo sistema fotovoltaico ao longo do dia. Essa curva reflete a geração de energia, mostrando as variações decorrentes da irradiação solar.

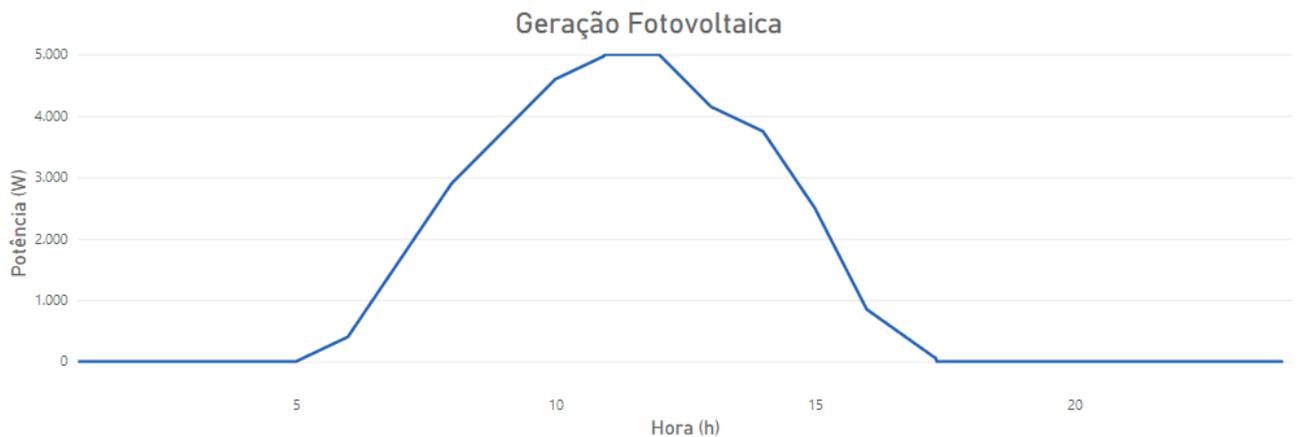


Figura 4.1 – Potência na geração fotovoltaica ao longo do dia. Fonte: Autoria própria.

A Figura 4.2 apresenta as potências fornecidas pela rede principal ao longo do dia. Essa visualização destaca a contribuição da rede elétrica na suplementação das demandas energéticas, especialmente durante os períodos em que a geração solar não é suficiente para atender às cargas e quando o controle da bateria está desativado.

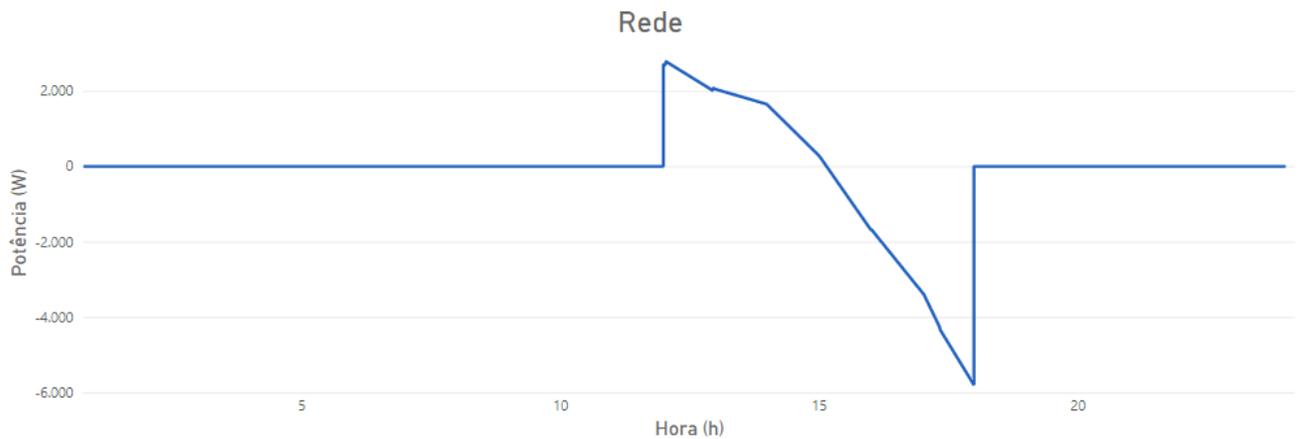


Figura 4.2 – Potência na rede ao longo do dia. Fonte: Autoria própria.

As Figuras 4.3 e 4.4 ilustram as potências absorvidas pelas cargas e pelo sistema de bateria, respectivamente. Essas representações evidenciam a variação da demanda energética ao longo do dia, bem como a capacidade da bateria em absorver e fornecer energia de acordo com as necessidades do sistema.

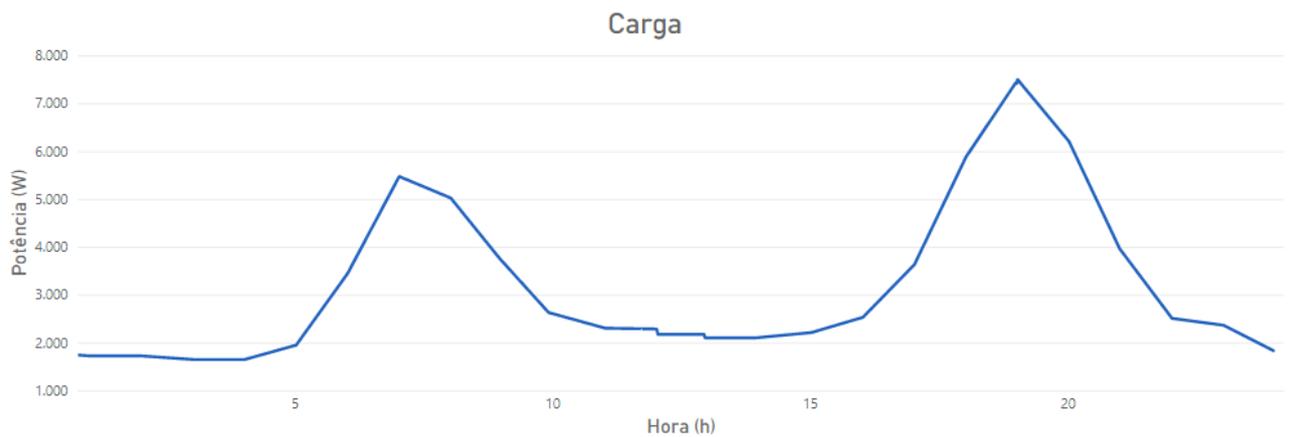


Figura 4.3 – Demanda da carga ao longo do dia. Fonte: Autoria própria.

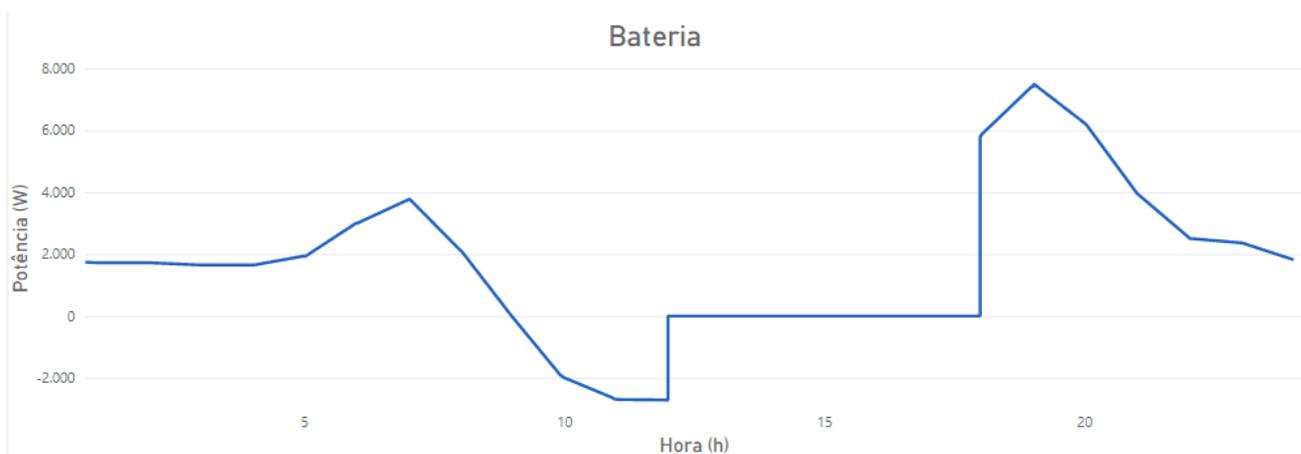


Figura 4.4 – Potência na bateria ao longo do dia. Fonte: Autoria própria.

Por fim, a Figura 4.5 mostra a evolução da potência armazenada ou fornecida pela bateria ao longo do dia.

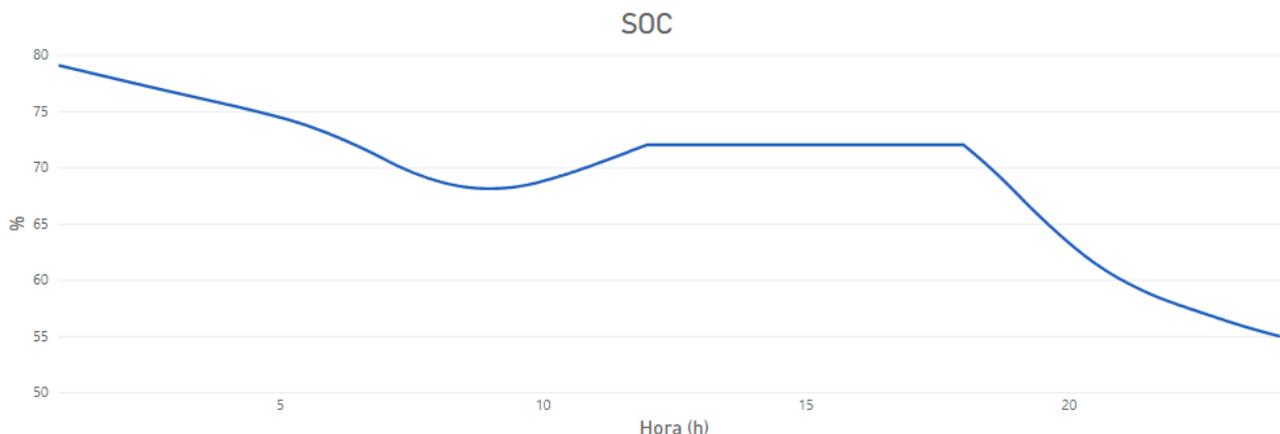


Figura 4.5 – Estado de carga da bateria ao longo do dia. Fonte: Autoria própria.

4.1 DISCUSSÃO

1. Manhã: Às 5h00 a usina fotovoltaica iniciou a geração de energia, possibilitando atender às demandas energéticas das cargas por meio da combinação da energia armazenada na bateria e da energia solar disponível. Essa configuração permitiu que as cargas fossem supridas de forma autônoma, sem a necessidade de recorrer à rede principal para atender às suas necessidades energéticas..

Após o pico de demanda da manhã, às 8h00 a carga energética diminuiu, permitindo que a bateria fosse recarregada por meio da absorção de potência do sistema fotovoltaico. Ao atingir o horário de 12h00, o sistema de controle da bateria foi desligado, e as cargas passaram a ser supridas pela rede principal e pelo sistema solar. Nesse momento, devido à baixa demanda, o sistema fotovoltaico redirecionou o excedente de energia gerada para a rede principal, uma vez que não havia carga suficiente nem sistema de armazenamento para ser carregado.

1. Tarde: Entre 12h00 e 15h00, o sistema solar forneceu uma quantidade excedente de potência para a rethem, devido a baixa demanda das cargas. No entanto, a partir das 15h00, à medida que a carga aumentou, o sistema solar não conseguiu suprir sozinho todas as demandas, resultando no fornecimento complementar de energia pela rede principal.

Neste período, o pico demandado pelas cargas foi de 5,8 kW às 17h55. Neste momento, a geração fotovoltaica estava zerada e foi necessário o suprimento da carga pela rede.

1. Noite: Às 18h00, o sistema de armazenamento retomou a sua operação, coincidindo com o término da curva de geração solar. Nesse momento, as baterias assumiram a responsabilidade de fornecer energia para as cargas, garantindo o suprimento contínuo até o final da noite. Essa transição para o uso das baterias foi essencial para manter a estabilidade do sistema e assegurar a disponibilidade de energia durante as horas em que não havia geração solar disponível.

4.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, foi apresentado o cenário de simulação utilizado para avaliar o desempenho da microrrede elétrica ao longo de um dia típico.

Os resultados obtidos demonstraram a capacidade da microrrede em atender eficientemente às demandas energéticas por meio da combinação de fontes de energia renovável, como a geração solar, e o armazenamento em baterias. Durante os períodos em que a geração solar foi suficiente para suprir as cargas, a microrrede operou de forma autossuficiente, sem a necessidade de recorrer à rede principal.

Além disso, a capacidade das baterias de armazenar o excedente de energia gerada durante os momentos de maior irradiação solar e fornecê-la durante os períodos de baixa geração contribui para a maximização do aproveitamento das energias renováveis disponíveis, redução de custos e maior resiliência do sistema.

Esses resultados evidenciam a viabilidade das microrredes elétricas como uma solução eficaz para enfrentar os desafios energéticos atuais, ao mesmo tempo em que impulsionam a transição para uma matriz energética mais sustentável e de baixo carbono.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi realizado uma exploração dos principais conceitos e definições relacionados às microrredes elétricas, bem como foi implementada uma simulação que proporcionou uma análise e avaliação deste sistema.

No âmbito dos conceitos, foram abordados temas como a importância da inserção de fontes de energia renovável na matriz energética brasileira, as topologias de microrredes, seus componentes e modos de operação.

No que diz respeito às simulações, foram destacadas as diferenças entre as simulações tradicionais e as implementadas em plataforma de tempo real. Além disso, foram conceituados os diferentes tipos de simulações em tempo real: HIL, CHIL, PHIL e SIL.

Por fim, foi abordada a metodologia e os materiais necessários para a implementação das simulações em plataforma de tempo real. Na simulação proposta, foram utilizados dados realistas que refletem as condições do Centro-Oeste brasileiro, com foco especial no Distrito Federal, fortalecendo a validade e a relevância dos resultados obtidos.

A análise do comportamento da microrrede ao longo de um dia típico demonstrou sua capacidade de atender às demandas energéticas de forma eficiente, utilizando a combinação de fontes de energia renovável, como a geração solar, e a disponibilidade de armazenamento em baterias. Durante o período em que a geração solar foi suficiente para atender às cargas, a microrrede operou de maneira autossuficiente, sem a necessidade de recorrer à rede principal.

Através do controle inteligente e do uso otimizado dos recursos disponíveis, as microrredes elétricas se mostraram capazes de equilibrar a oferta e a demanda de energia de forma eficiente. Durante o dia, a geração solar atendeu grande parte das cargas, enquanto a bateria armazenava o excedente de energia para uso posterior. Essa abordagem permitiu maximizar o aproveitamento das fontes renováveis, reduzindo a necessidade de utilizar a rede principal e minimizando as emissões de gases de efeito estufa.

Em conclusão, as microrredes elétricas representam uma solução promissora para a transição energética. Combinando a utilização de fontes renováveis, armazenamento em baterias e tecnologias de controle avançadas, elas proporcionam uma alternativa viável e sustentável para o fornecimento de energia. Essa abordagem descentralizada e inteligente tem o potencial de transformar a maneira como geramos, consumimos e compartilhamos energia, promovendo um futuro energético mais limpo, eficiente e resiliente para todos.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Neste projeto, foi realizada uma análise e implementação de uma rede monofásica, com foco no controle do equilíbrio energético da potência ativa. O desenvolvimento desse conceito oferece várias oportunidades para futuras pesquisas e aprimoramentos. A seguir, estão algumas sugestões de direções que podem ser exploradas:

- Utilização de outros *softwares* de tempo real, como o HYPERSIM® e eMEGASIM®, por exemplo;
- Implementação de simulações em tempo real utilizando *hardware* na malha de controle, ou seja, uma simulação HIL;
- Implementação de controles avançados;
- Realização de análises de viabilidade econômica detalhadas para avaliar os aspectos financeiros das microrredes elétricas, considerando os custos de investimento, as tarifas de energia e as políticas regulatórias;

BIBLIOGRAFIA

- ABEEOLICA. Boletim de geração eólica 2022. 2022. Disponível em: <<https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2023/06/Boletim-de-Geracao-Eolica-2022.pdf>>.
- ABSOLAR. Panorama da solar fotovoltaica no brasil e no mundo. 2023. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>.
- AHMED, M. et al. Stability and control aspects of microgrid architectures—a comprehensive review. *IEEE Access*, v. 8, p. 144730–144766, 2020.
- ALTIN, N.; EYIMAYA, S. E. A review of microgrid control strategies. *2021 10th International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA)*, p. 412–417, 2021.
- ANEEL. Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – prodist. *Módulo 3 - Conexão ao sistema de distribuição de energia elétrica*, 2021.
- BELANGER, J.; VENNE, P.; PAQUIN, J.-N. The what, where, and why of real-time simulation. p. 37–49, 01 2010. Disponível em: <https://blob.opal-rt.com/medias/L00161_0436.pdf>.
- BELLIDO, M. M. H. Microrredes elétricas: Uma proposta de implementacao no brasil. *Tese (doutorado) –UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético*, 2018.
- BORDONS, C.; GARCIA-TORRES, F.; VALVERDE-ISORNA, L. Gestión Óptima de la energía en microrredes con generación renovable. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, v. 15, 06 2015.
- BRASIL. Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002. 2002. Disponível em: <<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2002/lei-10438-26-abril-2002-456860-publicacaooriginal-1-pl.html>>.
- BUENO; BRANDAO. Visão geral de tecnologia e mercado para os sistemas de armazenamento de energia elétrica no brasil. *Associação Brasileira de Armazenamento e Qualidade d Energia - ABAQUE*, 2016.
- DEMERS, S.; GOPALAKRISHNAN, P.; KANT, L. A generic solution to software-in-the-loop. *MILCOM 2007 - IEEE Military Communications Conference*, p. 1–6, 2007.
- ELETOBRAS. Pesquisa de posse e hábitos de uso de equipamentos elétricos na classe residencial. 2019. Disponível em: <<https://q.eletobras.com/pt/Paginas/PPH-2019.aspx>>.
- ELSAYED, A. T.; MOHAMED, A. A.; MOHAMMED, O. A. Dc microgrids and distribution systems: An overview. *Electric Power Systems Research*, v. 119, p. 407–417, 2015. ISSN 0378-7796. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779614003885>>.
- GALO, J. J. et al. Criteria for smart grid deployment in brazil by applying the delphi method. *Energy*, v. 70, p. 605–611, 2014. ISSN 0360-5442. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544214004460>>.

GUILLAUD, X. et al. Applications of real-time simulation technologies in power and energy systems. *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, v. 2, n. 3, p. 103–115, 2015.

HATZIARGYRIOU, N. et al. Microgrids. *Power and Energy Magazine, IEEE*, v. 5, p. 78 – 94, 08 2007.

IEA, I. E. A. Electricity market report 2023. 2023. Disponível em: <<https://iea.blob.core.windows.net/assets/255e9cba-da84-4681-8c1f-458ca1a3d9ca/ElectricityMarketReport2023.pdf>>.

KATIRAEI, F. et al. Microgrids management: Controls and operation aspects of microgrids. *IEEE Power and Energy Magazine*, v. 6, n. 3, p. 54–65, 2008.

KHAN, M. R. B. et al. Energy management system for pv-battery microgrid based on model predictive control. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, v. 15, 11 2018.

LASSETER, B. Microgrid: Distributed power generation. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, 2002.

LAUSS, G. F. et al. Characteristics and design of power hardware-in-the-loop simulations for electrical power systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 63, n. 1, p. 406–417, 2016.

LUNDSTROM, B. et al. Evaluation of system-integrated smart grid devices using software- and hardware-in-the-loop. *2016 IEEE Power Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, p. 1–5, 2016.

MARIAM, L.; BASU, M.; CONLON, M. A review of existing microgrid architectures. *Journal of Engineering*, v. 2013, 01 2013.

MARQUES, G. Você sabe o que é uma microrrede? *Legado Energias*, 2020. Disponível em: <<https://legadoenergias.com/publicacao/voce-sabe-o-que-e-uma-microrrede/>>.

MATLAB. *version 7.10.0 (R2010a)*. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc., 2018.

MATLAB. *Simscape Help Center*. The MathWorks Inc., 2023. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/simscape/>>.

MATTEDE, H. Um pouco mais sobre o sistema elétrico de potência (sep). 2020. Disponível em: <<https://www.mundodaeletrica.com.br/um-pouco-mais-sobre-o-sistema-eletrico-de-potencia-sep/>>.

MELO, F. C. Implementação de infraestrutura laboratorial permitindo a realização de simulações phil (power hardware-in-the-loop). *Geração Distribuída no Campus da Universidade de Brasília Integrada à Rede de Distribuição da CEB. Termo de Cooperação Técnica 502/2018 – CEB DISTRIBUIÇÃO S/A*, 2021.

MICHELLON, E.; SANTOS, A.; RODRIGUES, J. Breve descrição do proálcool e perspectivas futuras para o etanol produzido no brasil. *XLVI Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural*, 01 2008.

- NEJABATKHAH, F.; LI, Y. W. Overview of power management strategies of hybrid ac/dc microgrid. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 30, n. 12, p. 7072–7089, 2015.
- NOUREEN, S. S.; ROY, V.; BAYNE, S. B. An overall study of a real-time simulator and application of rt-lab using matlab simpowersystems. *2017 IEEE Green Energy and Smart Systems Conference (IGESSC)*, p. 1–5, 2017.
- OLIVARES, D. E. et al. Trends in microgrid control. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 5, n. 4, p. 1905–1919, 2014.
- ONS, O. N. do S. Histórico da operação: Geração de energia. 2023. Disponível em: <https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao_energia.aspx>.
- OPAL-RT. Real-time simulation solutions for power grids and power electronics. 2017. Disponível em: <https://blob.opal-rt.com/medias/L00161_0260.pdf>.
- OPAL-RT. Flagship real-time digital simulator. 2023. Disponível em: <<https://www.opal-rt.com/simulator-platform-op5707/>>.
- OPAL-RT. Hardware-in-the-loop: Faster testing, great results. 2023. Disponível em: <<https://www.opal-rt.com/hardware-in-the-loop/>>.
- OPAL-RT. Rt-lab: Basic concepts and compatibility. 2023. Disponível em: <<https://opal-rt.atlassian.net/wiki/spaces/PRD/pages/143984789/RT-LAB+Basic+Concepts+and+Compatibility>>.
- OPAL-RT. Software-in-the-loop: A revolution in the industry. 2023. Disponível em: <<https://www.opal-rt.com/power-hardware-in-the-loop/>>.
- OPAL-RT. Software-in-the-loop: Fastest production source code validation. 2023. Disponível em: <<https://www.opal-rt.com/software-in-the-loop/>>.
- PARHIZI, S. et al. State of the art in research on microgrids: A review. *IEEE Access*, v. 3, p. 890–925, 2015.
- PINTO, L. C. Modelagem e controle de uma microrrede híbrida ca/cc em operação conectada à rede. *Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Elétrica) - Universidade de Brasília*, 2022.
- PLANAS, E. et al. Ac and dc technology in microgrids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 43, p. 726–749, 2015. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114010065>>.
- PORTALSOLAR. Dados do mercado de energia solar no brasil. 2022. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/mercado-de-energia-solar-no-brasil.html>>.
- ROCABERT, J. et al. Control of power converters in ac microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 27, n. 11, p. 4734–4749, 2012.
- SCHWAEGERL, C. et al. Report on the technical, social, economic, and environmental benefits provided by microgrids on power system operation. *Advanced Architectures and Control Concepts for More Microgrids*. <http://www.microgrids.eu/documents/668.pdf>.

SOSHINSKAYA, M. et al. Microgrids: Experiences, barriers and success factors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 40, p. 659–672, 12 2014.

SOUZA, L. C. de et al. Análise e implementação de um amplificador bidirecional trifásico no contexto de simulações power hardware-in-the-loop (phil). *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, v. 1, 2021.

TAN, X.; LI, Q.; WANG, H. Advances and trends of energy storage technology in microgrid. *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, v. 44, n. 1, p. 179–191, 2013. ISSN 0142-0615. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061512003754>>.

YAMASHITA, D. Y.; VECHIU, I.; GAUBERT, J.-P. A review of hierarchical control for building microgrids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 118, p. 109523, 2020. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119307312>>.

ZAMORA, R.; SRIVASTAVA, A. K. Controls for microgrids with storage: Review, challenges, and research needs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 14, n. 7, p. 2009–2018, 2010. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032110000742>>.

APÊNDICES

A CURVAS DE GERAÇÃO E DE CARGA

Neste apêndice serão detalhadas as curva de carga e de geração fotovoltaica utilizada neste trabalho.

A.1 CURVA DE GERAÇÃO

A Figura A.1 demonstra a geração fotovoltaica utilizada originalmente em [LUNDSTROM et al., 2016] em comparação com a curva proposta neste estudo.

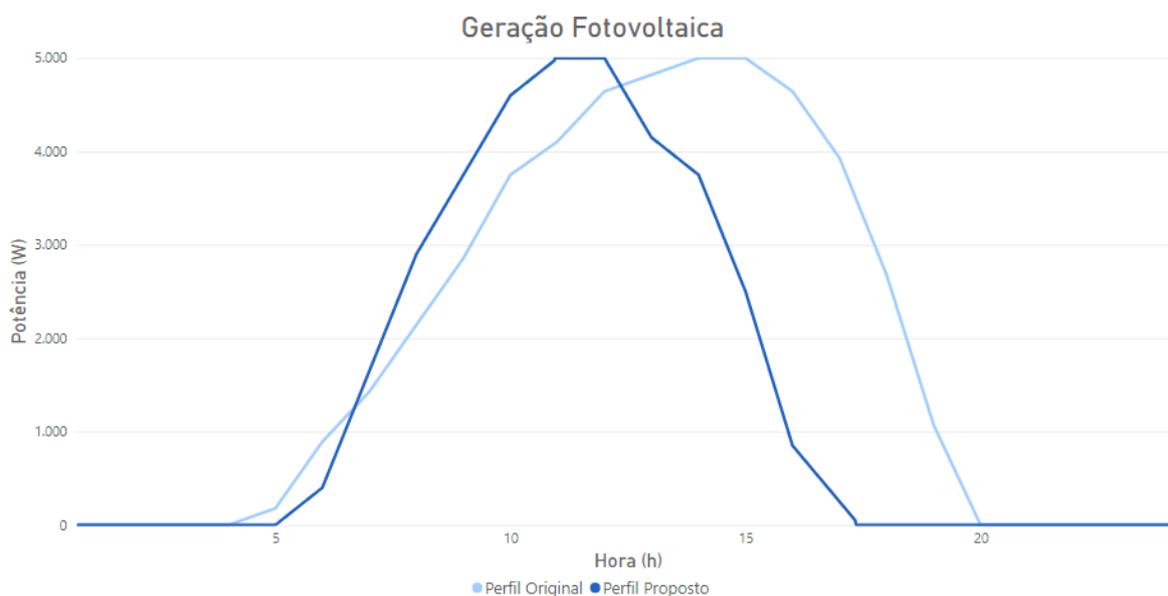


Figura A.1 – Comparação da geração utilizada em [LUNDSTROM et al., 2016] e a proposta neste trabalho. Fonte: Autoria própria.

A.2 CURVA DE CARGA

A Figura A.2 demonstra a carga utilizada originalmente em [LUNDSTROM et al., 2016] em comparação com a curva proposta neste estudo.

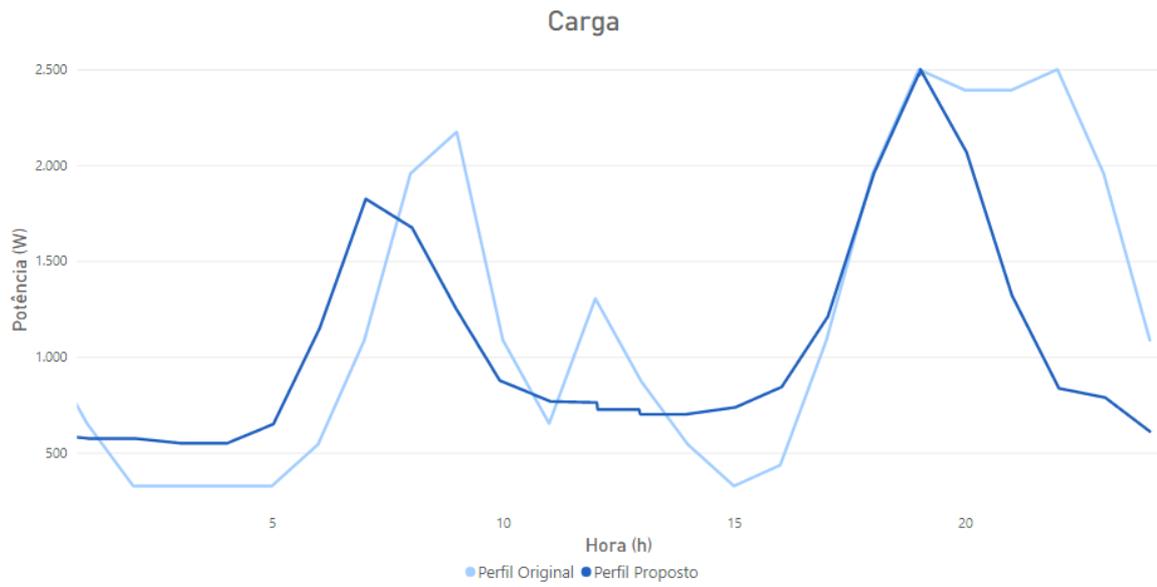


Figura A.2 – Comparação da carga utilizada em [LUNDSTROM et al., 2016] e a proposta neste trabalho. Fonte: Autoria própria.

B TUTORIAL DE INSTALAÇÃO DO RT-LAB®

Neste apêndice será apresentado o passo a passo necessário para instalação do RT-Lab®. Além disso, também será discutido os principais erros e a compatibilidade necessária entre os ambientes MATLAB/Simulink® e RT-Lab®.

B.1 PRÉ-REQUISITOS MÍNIMOS

Antes de instalar o RT-Lab®, é importante verificar os requisitos mínimos necessários (de hardware e de software). Estes requisitos podem mudar a medida que surgem novas versões do RT-Lab®. Atualmente, os requerimentos de hardware são:

- Sistema operacional *Windows*;
- Processador Intel ou AMD x86-64;
- 3,8 GB de espaço no HD;
- 4 GB of RAM (incluindo uso do MATLAB/Simulink®).

Além da compatibilidade de hardware, é importante verificar a compatibilidade da versão do RT-Lab® com a versão do MATLAB/Simulink®, vide Figura B.1.

	R2015B 32/64 bits	R2016A 64 bits	R2016B 64 bits	R2017A 64 bits	R2017B 64 bits	R2018A/B 64 bits	R2019A/B 64 bits	R2020A/B 64 bits	R2021A/B 64 bits	R2022A 64 bits
RT-LAB 2020.1	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	-	-	-
RT-LAB 2020.2	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	-	-	-
RT-LAB 2020.3	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	-	-	-
RT-LAB 2020.4	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	-	-	-
RT-LAB 2021.1	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	-	-
RT-LAB 2021.2	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	-	-
RT-LAB 2021.3	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	-	-
RT-LAB 2022.1	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	-
RT-LAB 2023.1	Y	-	-	-	-	Y	Y	Y	Y	Y

Figura B.1 – Versões do MATLAB/Simulink®) compatíveis com cada versão do RT-Lab®.
Fonte: [OPAL-RT, 2023c]

Existem alguns pontos de atenção no momento da instalação do MATLAB/Simulink®, visando evitar erros na comunicação com o RT-Lab®:

- Diretório de instalação: o MATLAB/Simulink® deve ser instalado no diretório padrão:

C:\Program Files \MATLAB \ 'versão do MATLAB';

- Toolboxes: não poderão ser instaladas as *toolboxes* 'Polyspace'.

Todos os requisitos de hardware e softwares (inclusive de versão do sistema operacional Windows) podem ser verificados no “*RT-LAB | Installation Guide*”, na seção “*RT-LAB: Basic Concepts and Compatibility*”, disponível em [OPAL-RT, 2023c].

B.2 INSTALAÇÃO

O download do RT-Lab® pode ser feito em <<https://www.opal-rt.com/download-center/>>

Após fazer o download do instalador, basta executá-lo e seguir os passos. É recomendável não trocar o diretório de instalação, para evitar erros. As Figuras B.2 à B.8 ilustram o roteiro de instalação.

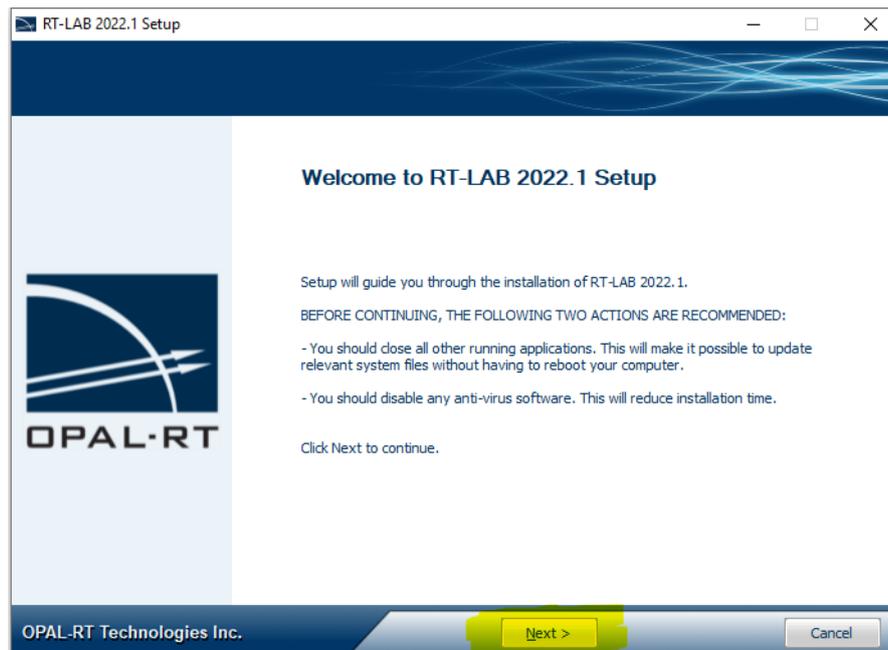


Figura B.2 – Página de instalação 1: introdução. Fonte: Autoria própria.

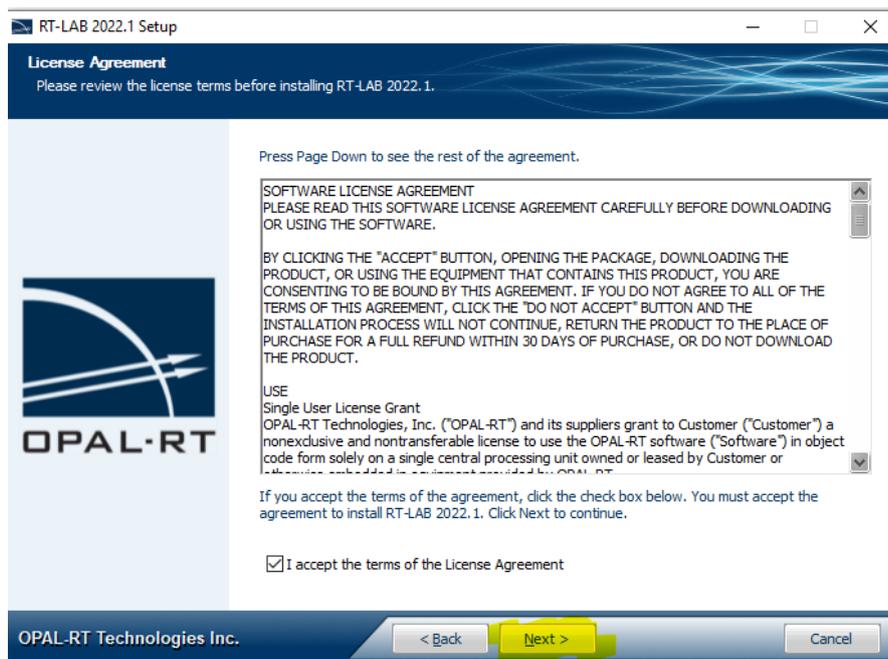


Figura B.3 – Página de instalação 2: aceite da licença RT-Lab®. Fonte: Autoria própria.

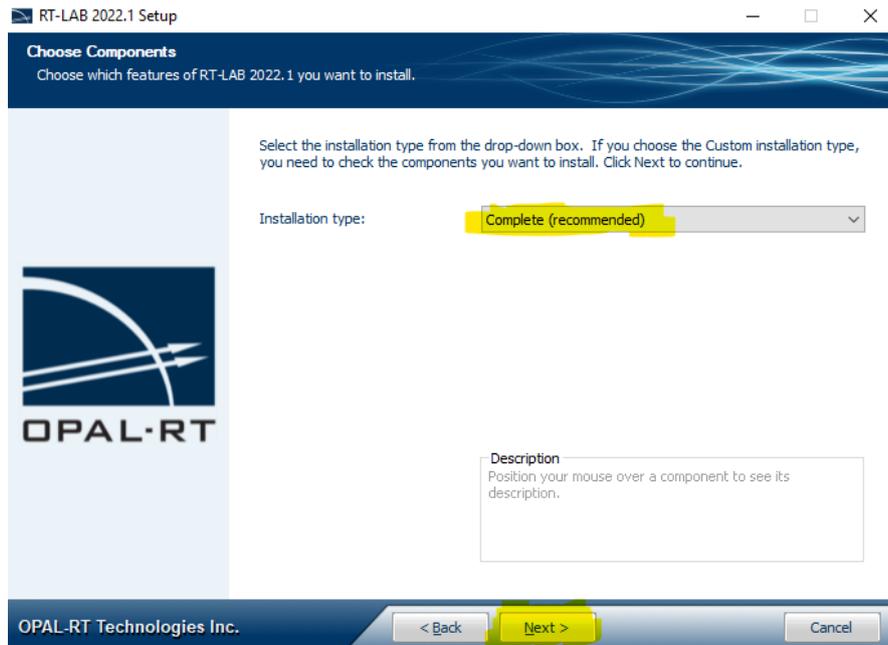


Figura B.4 – Página de instalação 3: tipo de instalação. Fonte: Autoria própria.

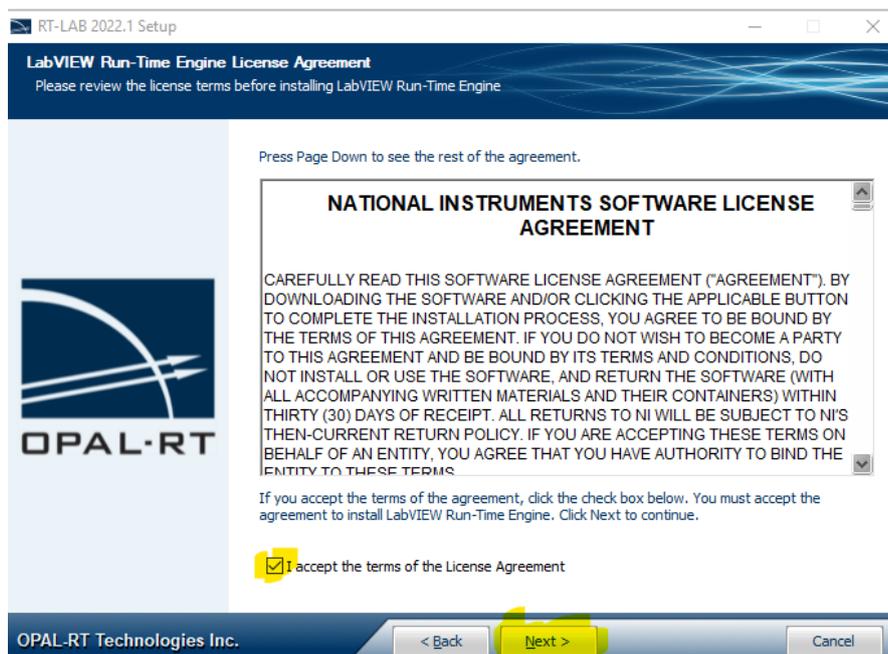


Figura B.5 – Página de instalação 5: aceite da licença National Instruments®. Fonte: Autoria própria.

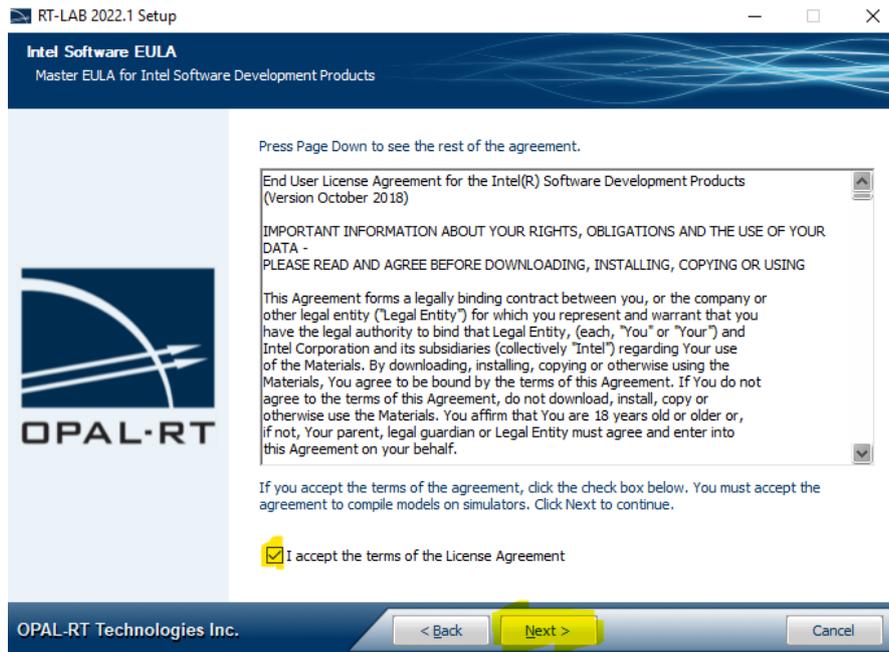


Figura B.6 – Página de instalação 5: aceite da licença Intel®. Fonte: Autoria própria.



Figura B.7 – Página de instalação 6: diretório de instalação. Fonte: Autoria própria.



Figura B.8 – Página de instalação 7: instalação do RT-Lab®. Fonte: Autoria própria.

O tempo de instalação do RT-Lab® pode demorar, dependendo da configuração do computador. Após a instalação do RT-Lab®, será iniciado automaticamente a instalação do LabView®, conforme a Figura B.9.

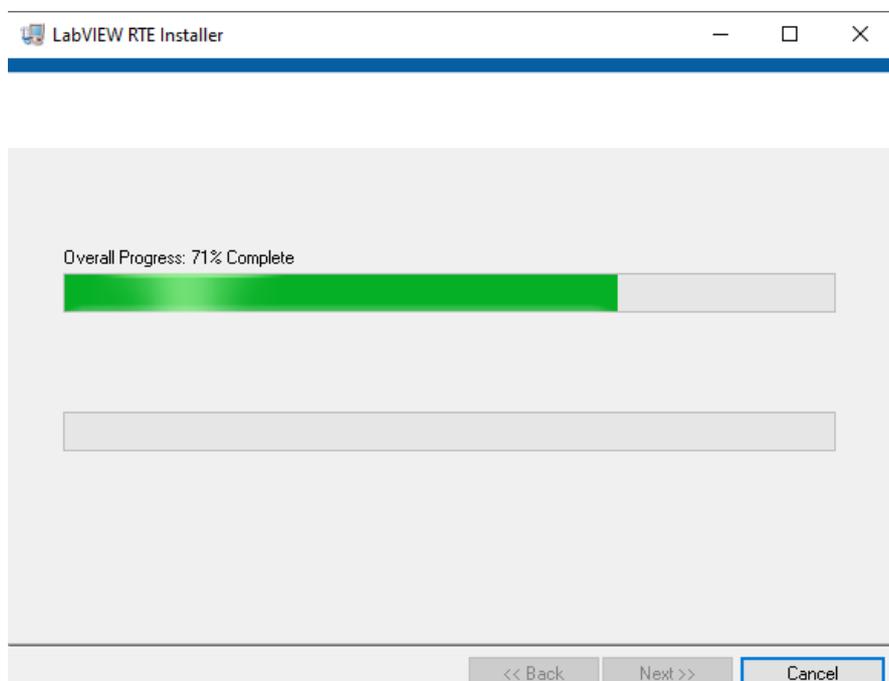


Figura B.9 – Página de instalação 8: instalação do LabView®. Fonte: Autoria própria.

Após estas etapas a instalação foi finalizada.

B.2.1 Validação da instalação

B.2.1.1 *Toolboxes* OPAL-RT®

Após instalar o RT-Lab® é importante verificar se as *toolboxes* da OPAL-RT® foram instaladas corretamente. Para fazer essa verificação é simples, basta:

- 1) Abrir o *Command Window* do MATLAB/Simulink®;
- 2) Escrever o comando *ver* (esse comando exibe as informações de versão para todos os produtos instalados);
- 3) Verificar se as *toolboxes* 'RT-LAB', 'RT-EVENTS', 'ePHASORSIM' e 'eMEGASIM' estão instaladas, conforme ilustrado na Figura B.10.

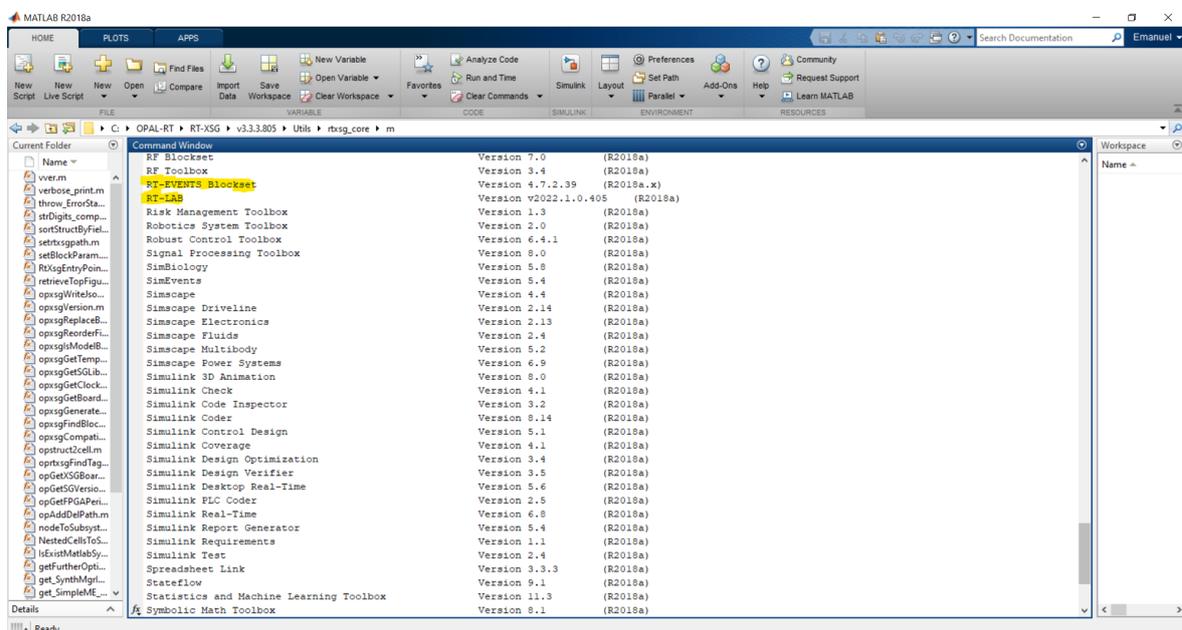


Figura B.10 – *Toolboxes* da OPAL-RT®. Fonte: Autoria própria.

Caso as *toolboxes* não estiverem instaladas, é necessário fazer a instalação manualmente. Para fazer a instalação manual, basta executar o script disponível em:

C:\OPAL-RT\RT-LAB\RT-Lab version\simulink\m\setup_rtlab.m

B.2.1.2 Conexão do RT-Lab® com MATLAB/Simulink®

Para abrir os modelos no MATLAB/Simulink® é necessário que exista uma conexão com o RT-Lab®. Para verificar se essa conexão foi realizada é necessário:

- 1) Executar o RT-Lab® ;

- 2) Abrir a aba *Tools*, na parte superior;
- 3) Verificar se há a opção *Open MATLAB XX VERSION*, conforme Figura B.11.

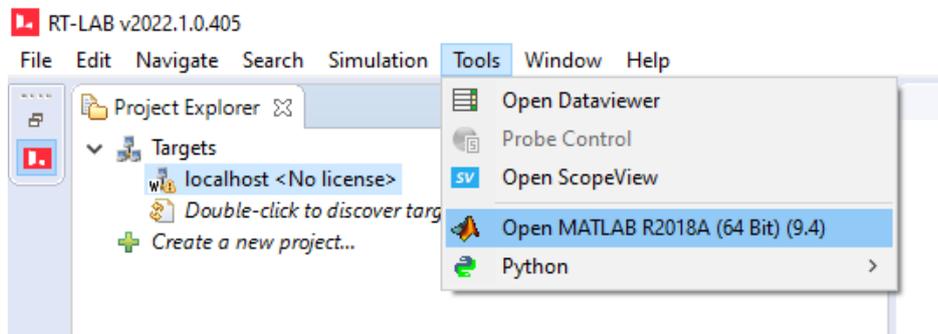


Figura B.11 – Conexão do RT-Lab® com MATLAB/SIMULINK®. Fonte: Autoria própria.

Caso a conexão não tenha funcionado, verifique a seção B.5.1.

B.3 CONEXÃO NA REDE

Por fim, é necessário conectar o simulador, ou *target*, à estação de comando *Windows*, PC, via TCP/IP, conforme ilustrado na figura B.12.



Figura B.12 – Comunicação entre o *target* e a estação de comando *Windows*. Fonte: Autoria própria.

Para realizar a conexão, é necessário:

- 1) Localizar o endereço IP do *target*: é o adesivo colado no simulador;
- 2) Conectar o simulador ao computador *Windows* com cabo *ethernet* via porta LAN;
- 3) Modificar o endereço IP do PC para que ele fique conectado na mesma rede do simulador.

Para modificação do endereço IP do PC, é necessário:

1) Abra as Configurações de Rede e Internet, no canto inferior direito da barra do *Windows*, conforme figura B.13;



Figura B.13 – Configurações de Rede e Internet. Fonte: Autoria própria.

2) Clique em Status > Alterar opções de Adaptador, conforme figura B.14;

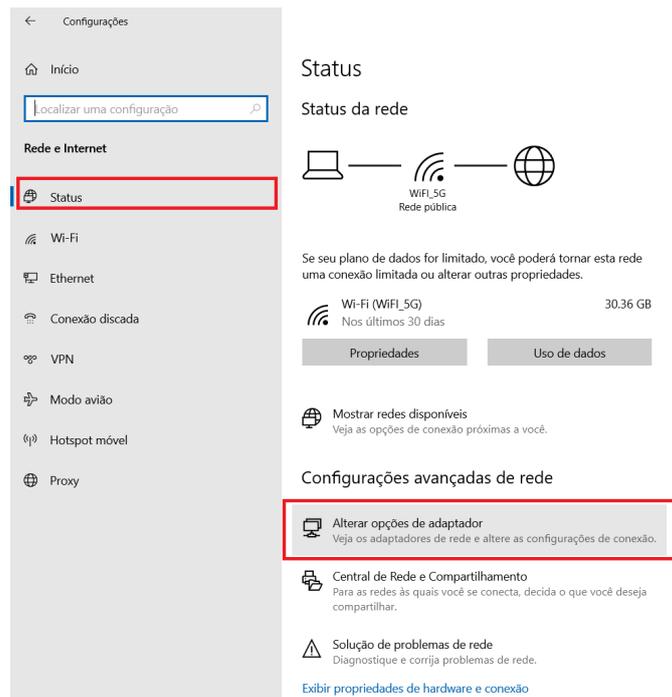


Figura B.14 – Alterar opções de Adaptador. Fonte: Autoria própria.

3) Clique em *Ethernet* > Protocolo IP Versão 4 (TCP/IPv4) > Propriedades, conforme figura B.15;

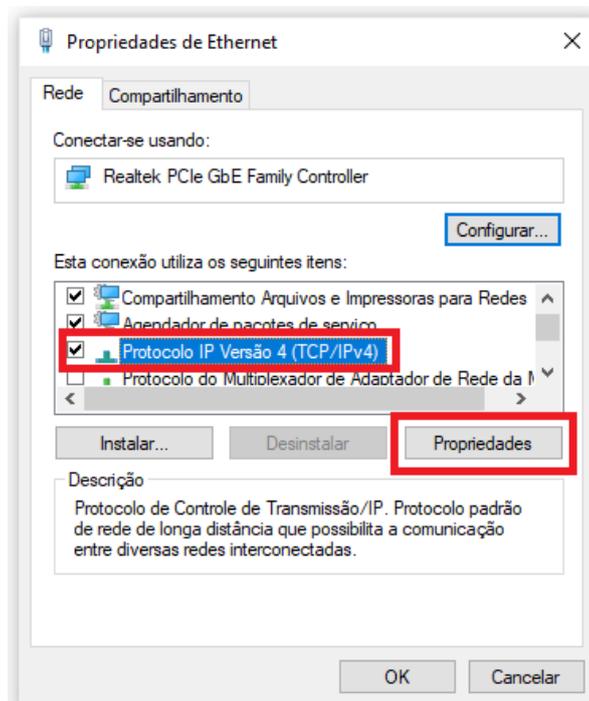


Figura B.15 – Protocolo IP Versão 4 (TCP/IPv4). Fonte: Autoria própria.

4) Selecione Usar o seguinte endereço IP. Insira o IP do simulador em Endereço IP e 255.255.255.0 na Máscara de Rede, conforme figura B.16;

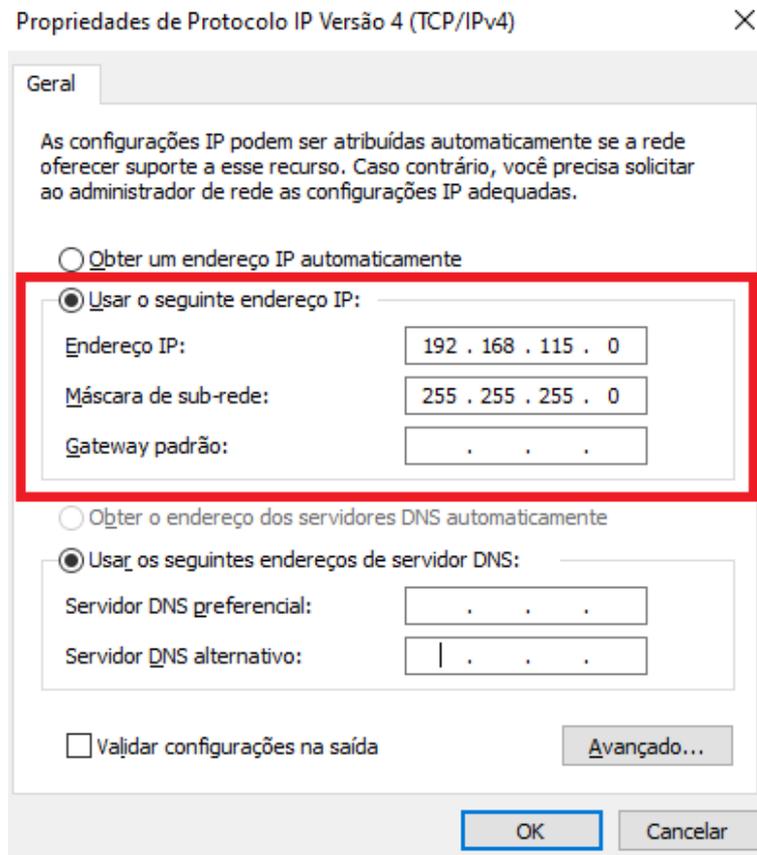


Figura B.16 – Alteração do IP e da máscara de rede. Fonte: Autoria própria.

Assim, o PC estará conectado ao *target*.

B.4 LICENÇA

B.4.1 Licença do *target*

O *target*, simulador, já possui a sua licença instalada de fábrica.

B.4.2 Licença do *host*

O *host*, estação *Windows*, deve ter sua licença instalada manualmente. O laboratório possui uma licença permanente que deve ser instalada no computador específico que está conectado ao *target*. Essa licença é válida apenas para esse computador.

Para instalar a licença em outros computadores, é necessário solicitar a licença à OPAL-RT®. Segue abaixo os passos necessários para solicitação da licença:

- Com o botão direito clique em *localhost* > *License*> *Request a license*, vide Figura

B.17;

- Preencha o formulário com um *e-mail* válido, a licença será enviado para este *e-mail* em cerca de 3 dias úteis.

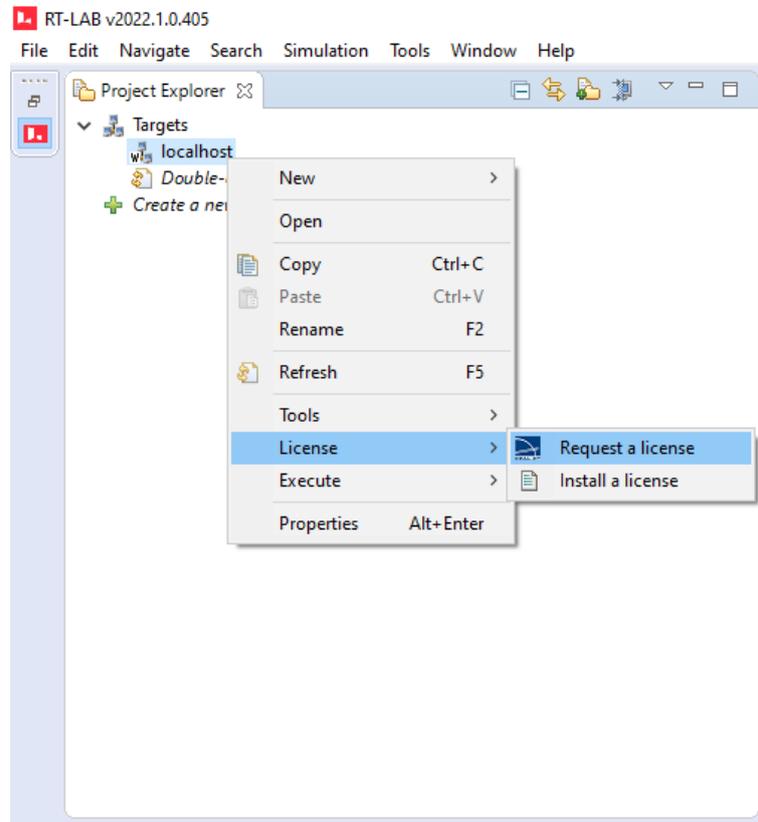


Figura B.17 – Solicitação de licença. Fonte: Autoria própria.

B.4.2.1 Instalação da licença do *host*

Para instalação da licença é necessário clicar com o botão direito clique em *localhost* > {*License* > *Install a license* e selecionar a licença.

B.5 ERROS COMUNS

Durante a jornada utilizando o RT-Lab® é comum se deparar com diversos erros, e para continuar a trilha é necessário aprender a contorná-los. A seguir será descrito um erro comum e sua solução

B.5.1 RT-Lab® não reconhece o MATLAB/Simulink®

Problema: O RT-Lab® não consegue reconhecer que existe o MATLAB/Simulink® instalado no PC, conforme a figura B.11.

Solução:

- 1) Reinstalar o MATLAB/Simulink® sem as *toolboxes Polyspace*;
- 2) Instalar o RT-Lab® e o MATLAB/Simulink® nos diretórios padrões.

Após realizar estes dois passos, espera-se que este problema seja solucionado.