

**Alunos:** Clebson Sabino Luz; Daniel Moura Trancoso Silva; Eduardo Machado Aoyama; Gabriel Katsumata Dias; Gabriel Pinto Felix Antonio; Nicolas Alfredo de Marchi Iaccarino

**Orientador:** Prof. Dr. Silvio Xavier Duarte - sduarte@fei.edu.br



## ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE UMA USINA HIDRELÉTRICA REVERSÍVEL PARA SISTEMAS ISOLADOS: Aplicação na Ilha de Fernando de Noronha

### RESUMO

O presente trabalho avaliou a viabilidade técnica e econômica de uma usina hidrelétrica reversível para sistemas isolados, considerando sua aplicação em Fernando de Noronha a fim de abastecer a iluminação pública de uma rua da ilha para substituição do uso de óleo diesel. Para esse objetivo, foram consideradas a existência de 50 lâmpadas com potência equivalente de 1kW que devem ser alimentadas pela hidrelétrica reversível durante um período de 12 horas, propondo a modelagem e simulação desse sistema utilizando o *software* MATLAB® Simulink. A energia proveniente para prover a reversibilidade será advinda de painéis solares. Como resultados, obteve-se uma geração de energia elétrica condizente com a carga alimentada e o período imposto, um armazenador com uma eficiência de aproximadamente 31,71% e um retorno financeiro em 37 anos, mesmo considerando a substituição de alguns equipamentos de baixa vida útil durante o período de utilização do projeto. Outro resultado obtido foi a compensação de aproximadamente 3,2 toneladas de gás carbônico anualmente devido à substituição da energia proveniente de geradores à diesel.

### INTRODUÇÃO

Garantir o acesso à energia elétrica limpa para todos é um dos objetivos de desenvolvimento sustentável da ONU, porém só no Estado do Amazonas, aproximadamente 1 milhão de brasileiros não possuem acesso à energia elétrica. O não fornecimento de energia elétrica para essa parcela da população se dá por conta da grande distância entre os locais em que a energia elétrica é gerada e o local em que esta deveria ser consumida, visto que os custos de implementação de linhas de transmissão aumentam conforme a distância percorrida.

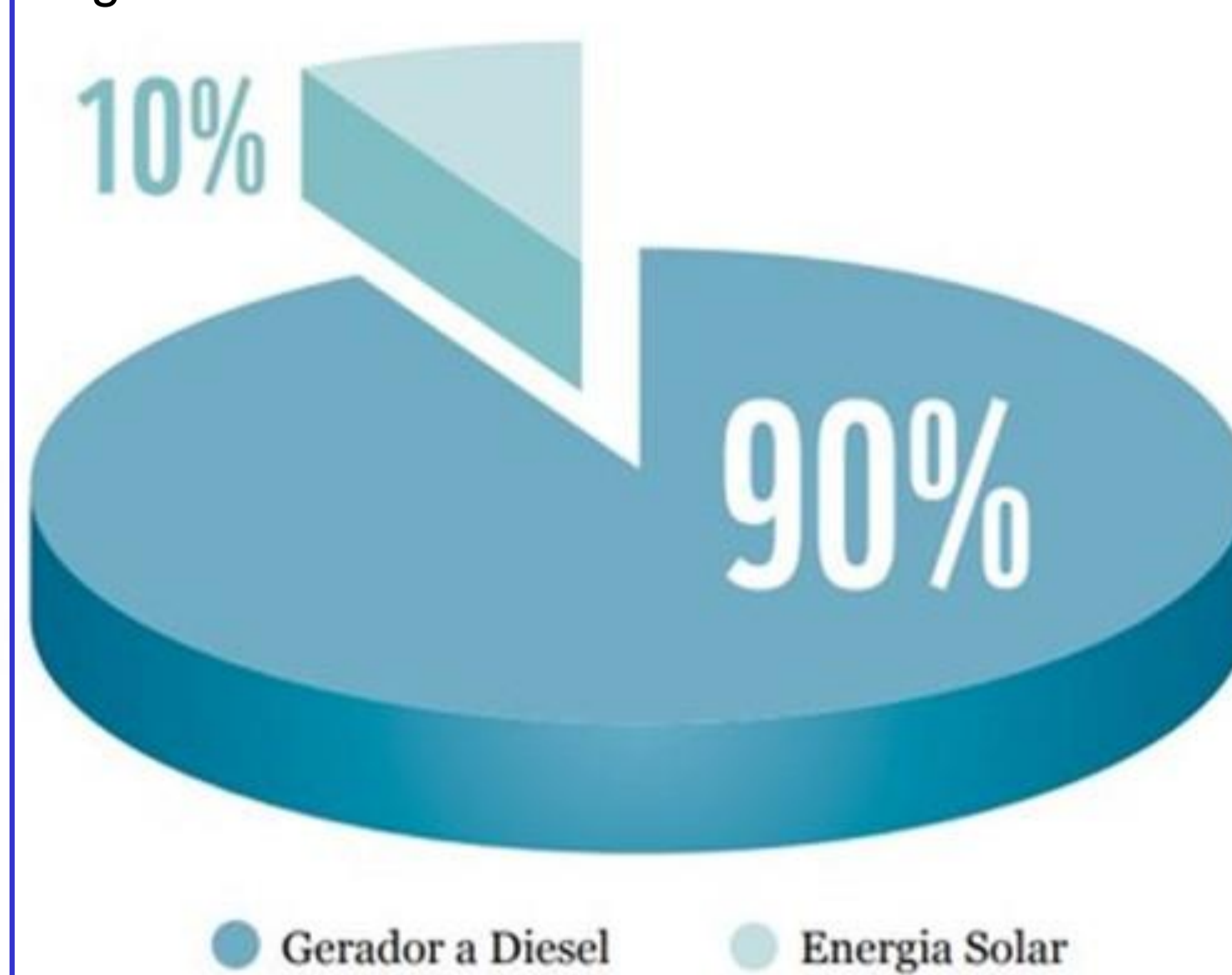
Para sistemas isolados do SIN, as possíveis fontes de energia elétrica são os geradores a óleo diesel e pequenas usinas fotovoltaicas. Os geradores a óleo diesel, além de seu alto custo de operação, causam danos ao meio ambiente por serem altamente poluentes, principalmente no Brasil, onde os níveis de enxofre admitidos no diesel são muito elevados. Já os sistemas fotovoltaicos, apesar de serem fontes de energia renováveis, são sistemas cuja geração de energia é intermitente e dependente do sol, portanto, se faz necessário realizar um armazenamento da energia gerada para posterior consumo, na maioria dos casos, este armazenamento é realizado utilizando armazenadores eletroquímicos, como baterias de chumbo-ácido ou baterias de íons-lítio. O descarte da bateria química utilizada, se realizado de forma inapropriada, ocasiona danos ao meio ambiente e que, infelizmente, por conta da falta de conhecimento da população em geral, trata-se de uma ocorrência habitual.

Uma possível solução sustentável são as Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR). Essas usinas operam com o armazenamento de energia, por meio da energia potencial gravitacional, entre dois reservatórios distintos, superior e inferior. A UHR possui a mesma funcionalidade de uma usina hidrelétrica, se diferenciando na questão de que a UHR possui um mecanismo de bombeamento de água do reservatório inferior para o reservatório superior. Apesar do bombeamento exigir uma fonte de energia elétrica externa, se for utilizado energias renováveis o sistema apresenta vantagens, principalmente em relação aos requisitos ambientais, caso construído em um local adequado, em relação a seus concorrentes.

Fernando de Noronha, um arquipélago brasileiro, é um paraíso ecológico da humanidade, porém apesar deste título, é um sistema isolado abastecido, principalmente, por geradores a diesel e apesar de painéis solares ao longo da principal Ilha de Fernando de Noronha, este sistema possui uma pequena participação na matriz elétrica do local, como exposto na Figura 1.

O sistema dimensionado neste trabalho teve sua carga fixada em 50 lâmpadas de LED de 20 Watts, totalizando 1 kW de potência, que deverão ser energizadas durante um período de 12 horas com a energia elétrica gerada pela usina fotovoltaica que será armazenada na UHR. O conjunto de lâmpadas citadas são referentes à iluminação pública de uma via presente na ilha.

Figura 1 – Matriz elétrica de Fernando de Noronha.



Fonte: WFF-BRASIL, 2021.

### DIMENSIONAMENTO DOS SISTEMAS E COMPONENTES

Este trabalho propõe o uso de uma UHR na Ilha de Fernando de Noronha com o uso de energia solar para suprir o sistema reversível. Para isto, foi considerado o suprimento de energia de 1 kW, correspondente a 50 lâmpadas de 20 W, durante aproximadamente 12 horas, para iluminação pública da Rua Eurico de Cavalcanti Albuquerque, Vila do Boldró, localizada na Ilha de Fernando de Noronha. Foram realizados os seguintes passos de estudo e desenvolvimento:

- A. Dimensionamento dos componentes do sistema da Hidrelétrica
- B. Dimensionamento dos componentes de bombeamento (reversível);
- C. Dimensionamento dos componentes de geração de energia solar que alimenta a bomba durante o dia;
- D. Desenvolvimento de modelos para a UHR no *Software* Matlab® Simulink para:
  - a. Analisar o comportamento de energia em regime transitório e permanente;
  - b. Confirmar o dimensionamento realizado.

**Alunos:** Clebson Sabino Luz; Daniel Moura Trancoso Silva; Eduardo Machado Aoyama; Gabriel Katsumata Dias; Gabriel Pinto Felix Antonio; Nicolas Alfredo de Marchi Iaccarino

**Orientador:** Prof. Dr. Silvio Xavier Duarte - sduarte@fei.edu.br



## ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE UMA USINA HIDRELÉTRICA REVERSÍVEL PARA SISTEMAS ISOLADOS: Aplicação na Ilha de Fernando de Noronha

### DIMENSIONAMENTO DOS COMPONENTES DA HIDRELÉTRICA REVERSÍVEL

A partir do perfil topográfico exposto na Figura 2, foi possível obter o salto bruto disponível para o morro do pico em Fernando de Noronha, que apesar de possuir cerca de 170 metros disponíveis, foram considerados no dimensionamento uma queda bruta de apenas 60 metros, para facilitar uma eventual instalação dos reservatórios soterrados, evitando assim uma poluição visual na instalação da UHR.

Os componentes do sistema da hidrelétrica, do sistema reversível e do sistema solar foram dimensionados a fim de cumprir com o objetivo do projeto e garantir uma redundância de um dia de armazenamento.

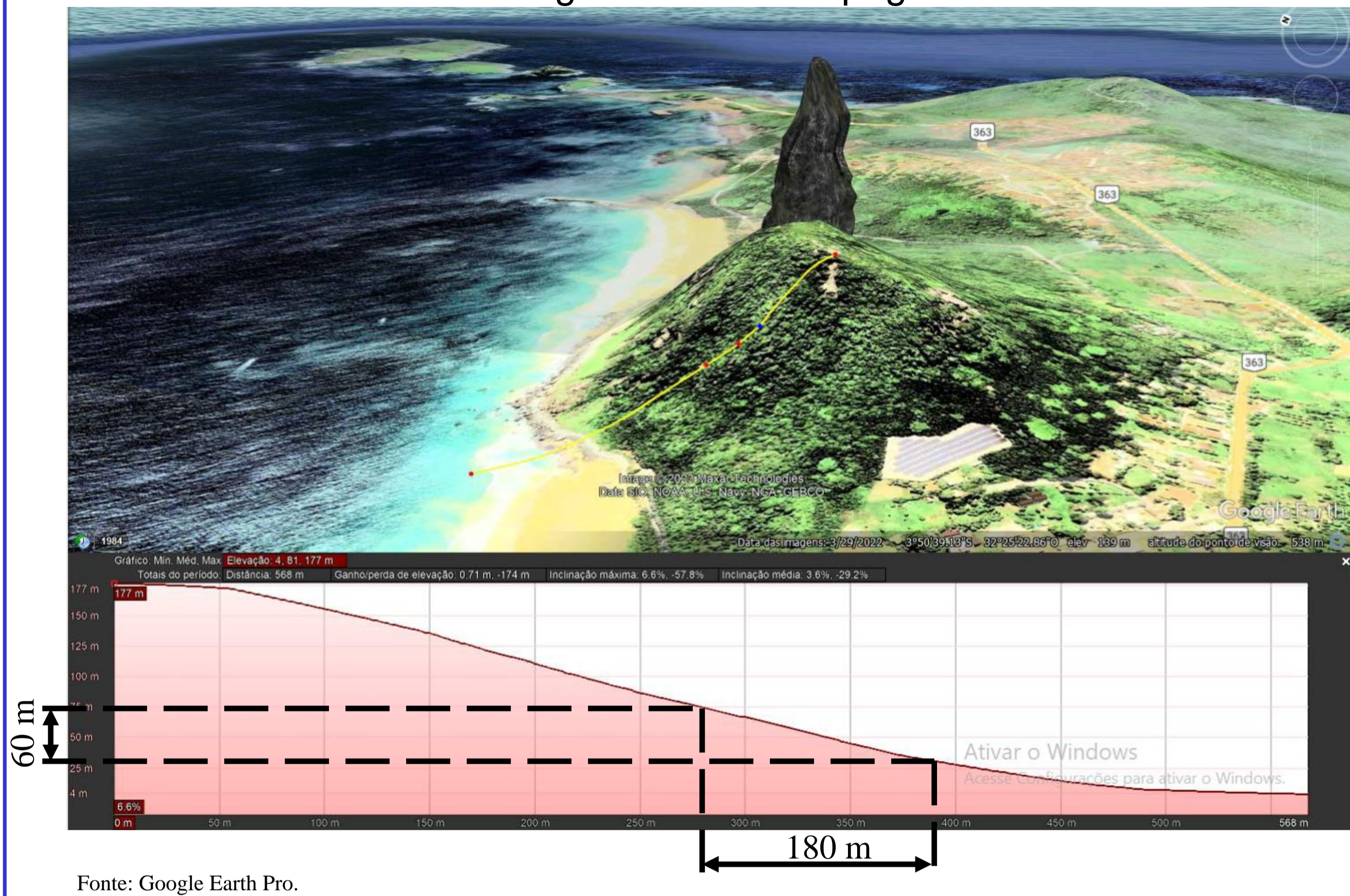
Elaborou-se a Tabela 1 que expõe todos os equipamentos e materiais necessários para a UHR dimensionada.

Tabela 1 – Lista de Equipamentos e Materiais

Sistema	Descrição	Fabricante	Quantidade
Hidrelétrica	Turbina tipo Turgo	Forster Technology	1
Hidrelétrica	Tubulação de Aço galvanizado $\phi$ : 2,25"	Atitubos	180 m
Hidrelétrica	Reservatórios 20.000 L	Sultanques	5 · 3 = 15
Hidrelétrica	Conectores tubulação (Curvas, T's, diversos)	Atitubos	-
Reversível	Bomba para vazão 25 m <sup>3</sup> /h e 66 mca	Schneider	1
Reversível	Soft Starter 220 V 17 A	WEG	1
Reversível	Água	-	200.000 L
Solar	Placa solar Luxen Solar Series 5 595 Wp	Luxen Solar	21
Solar	Inversor Trifásico 15 kW	Canadian Solar	1
Solar	Conectores, cabos e diversos	Penzel	25
Solar	Suportes mecânicos	MetalLight	21

Fonte: Autores.

Figura 2 – Perfil topográfico.



Fonte: Google Earth Pro.

Da Tabela 1, nota-se o uso de 5 reservatórios de 20.000 L para reduzir o custo com este componente. O uso de 3 conjuntos de reservatórios foi considerado para incluir uma redundância no armazenamento de energia para eventuais dias em que não haja sol. Outro componente considerado foi o *soft starter*, equipamento para partida suave de motores, já que este será alimentado por painéis solares que não utilizam baterias, é fundamental o uso de um dispositivo para evitar uma corrente de partida elevada do motor que aciona a bomba. Ademais, a eficiência do armazenador foi calculada em 31,76%, valor este inferior quando comparado ao armazenamento utilizando baterias de chumbo-ácido, porém apesar de sua baixa eficiência de armazenamento, o projeto se mostrou viável do ponto de vista ambiental, visto que este tipo de armazenador possui baixos impactos ambientais.

### ESTUDO DA VIABILIDADE AMBIENTAL E ECONÔMICA

De acordo com WFF-Brasil (2021), o consumo de energia na Ilha de Fernando de Noronha em 2018 foi de 18.590 MWh, ocasionando uma média de consumo mensal de 554 mil litros de óleo diesel e emitindo por mês 1.170.000 kgCO<sub>2</sub>. A partir destes dados, foi possível obter uma média de emissão de gás carbônico por energia consumida igual a 0,76 kgCO<sub>2</sub>. Visto que o projeto da usina hidrelétrica reversível propõe um funcionamento em um período de 12 horas, gerando uma potência de 1 kW no total, a energia diária gerada é de 12 kWh/dia e a energia mensal gerada, de 360 kWh/mês. Desse modo, a quantidade de gás carbônico em quilogramas compensados devido ao uso da usina hidrelétrica reversível seria de aproximadamente 271,9 kgCO por mês ou 3.262,7 kgCO<sub>2</sub> por ano.

A partir da lista de equipamentos, foi possível realizar uma estimativa dos custos apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Estimativa de Custos Envolvidos no Projeto

Descrição	Custo unitário	Quantidade	Custo Total
Turbina tipo Turgo e gerador trifásico 220 V	R\$ 6.916,96	1	R\$ 6.916,96
Tubulação de Aço galvanizado $\phi$ : 2"	R\$ 78,97/m	180 m	R\$ 14.214,69
Reservatório 20.000L	R\$ 7899,00	5 · 3 = 15	R\$ 118.485,00
Gastos para construção civil/Terraplanagem	R\$ 62.004,96	-	R\$ 60.007,32
Conectores tubulação (Curvas, T's e diversos)	R\$ 1.421,47	-	R\$ 1.421,47
Bomba para vazão 25 m <sup>3</sup> /h e 66 mca	R\$ 15.408,90	1	R\$ 15.408,90
Soft Starter 220 V 17 A	R\$ 2.519,00	1	R\$ 2.519,00
200.000L de água	R\$ 4,50/1.000L	200.000 L	R\$ 900,00
Placa solar Luxen Solar Series 5 595 Wp	R\$ 1.499,00	21	R\$ 31.479,00
Inversor Trifásico 15 kW	R\$ 7.148,39	1	R\$ 7.148,39
Conectores, cabos e diversos	R\$ 3,00	20	R\$ 60,00
Suportes mecânicos	R\$ 190,00	21	R\$ 3.990,00

Fonte: Autores.

A partir da Tabela 2, foi possível determinar que o custo de construção do projeto será de R\$ 273.433,60. É importante ressaltar que os custos apresentados nesse levantamento foram obtidos de forma a adquirir uma avaliação conservativa.

Para cálculo do *payback* do projeto, as seguintes premissas foram adotadas:

- Custo de construção do projeto como único investimento inicial;
- Substituição da água do sistema a cada ano;
- Substituição de todo o sistema solar a cada 12 anos devido a vida útil das placas;
- Taxa de juros do projeto (taxa mínima da atratividade) que acompanha a inflação (4%);

Para o fluxo de caixa anual, considerou-se a economia com diesel de R\$8.640,00 referente aos 4.320 kWh que deixaram de ser gerados pelos geradores a diesel de Fernando de Noronha e a venda dos créditos de carbono de R\$ 0,425 por kgCO<sub>2</sub> compensado, totalizando R\$ 10.026,15 de economia anual.

A partir do fluxo de caixa projetado, obteve-se um retorno financeiro do investimento realizado a partir de 37 anos de sua construção.

**Alunos:** Clebson Sabino Luz; Daniel Moura Trancoso Silva; Eduardo Machado Aoyama; Gabriel Katsumata Dias; Gabriel Pinto Felix Antonio; Nicolas Alfredo de Marchi Iaccarino

**Orientador:** Prof. Dr. Silvio Xavier Duarte - sduarte@fei.edu.br

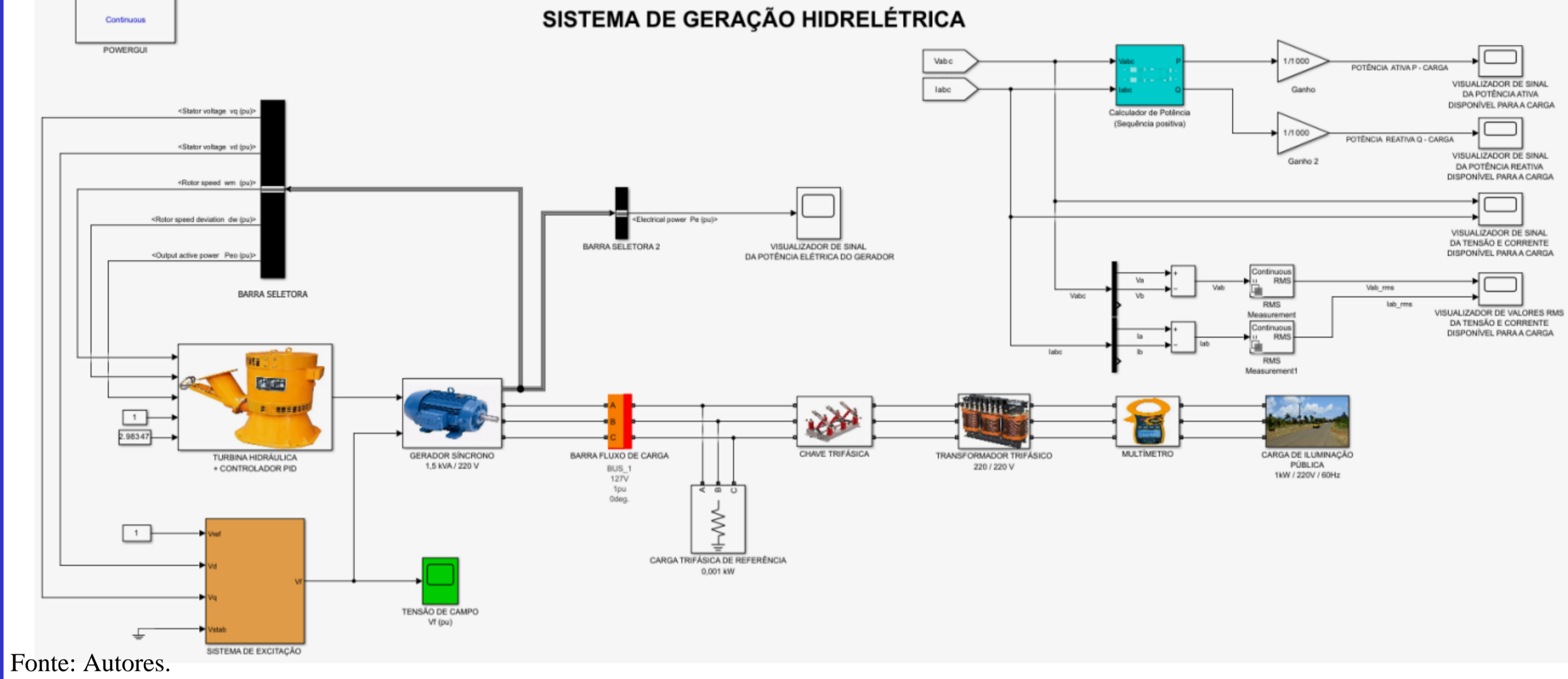


## ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE UMA USINA HIDRELÉTRICA REVERSÍVEL PARA SISTEMAS ISOLADOS: Aplicação na Ilha de Fernando de Noronha

### MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE ENERGIA HIDRELÉTRICA E SOLAR

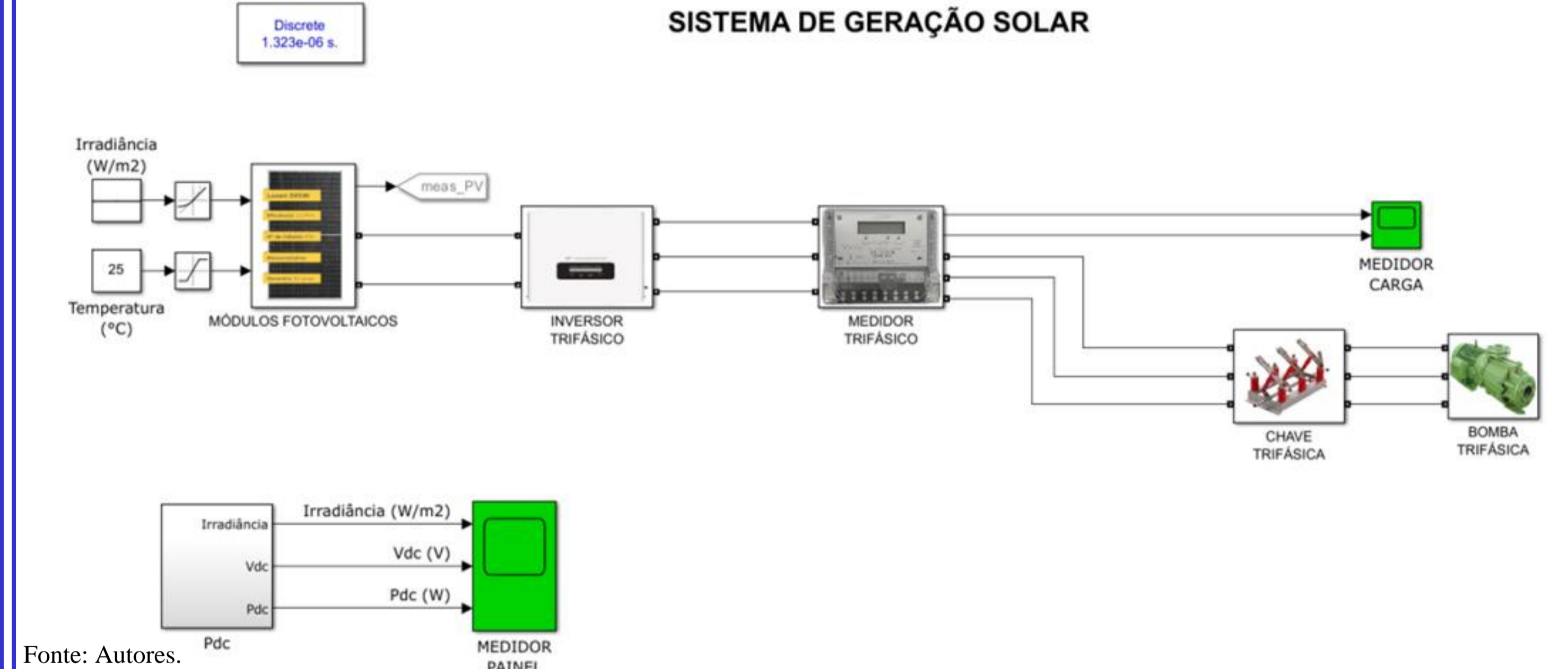
A modelagem da geração de energia hidrelétrica e solar são expostas nas Figuras 3 e 4, respectivamente. Alguns resultados obtidos das simulações realizadas são expostos nas Figuras 5 e 7 para a geração de energia hidrelétrica e Figuras 6 e 8 para a geração de energia solar.

Figura 3 – Modelagem da Geração de Energia Hidrelétrica.



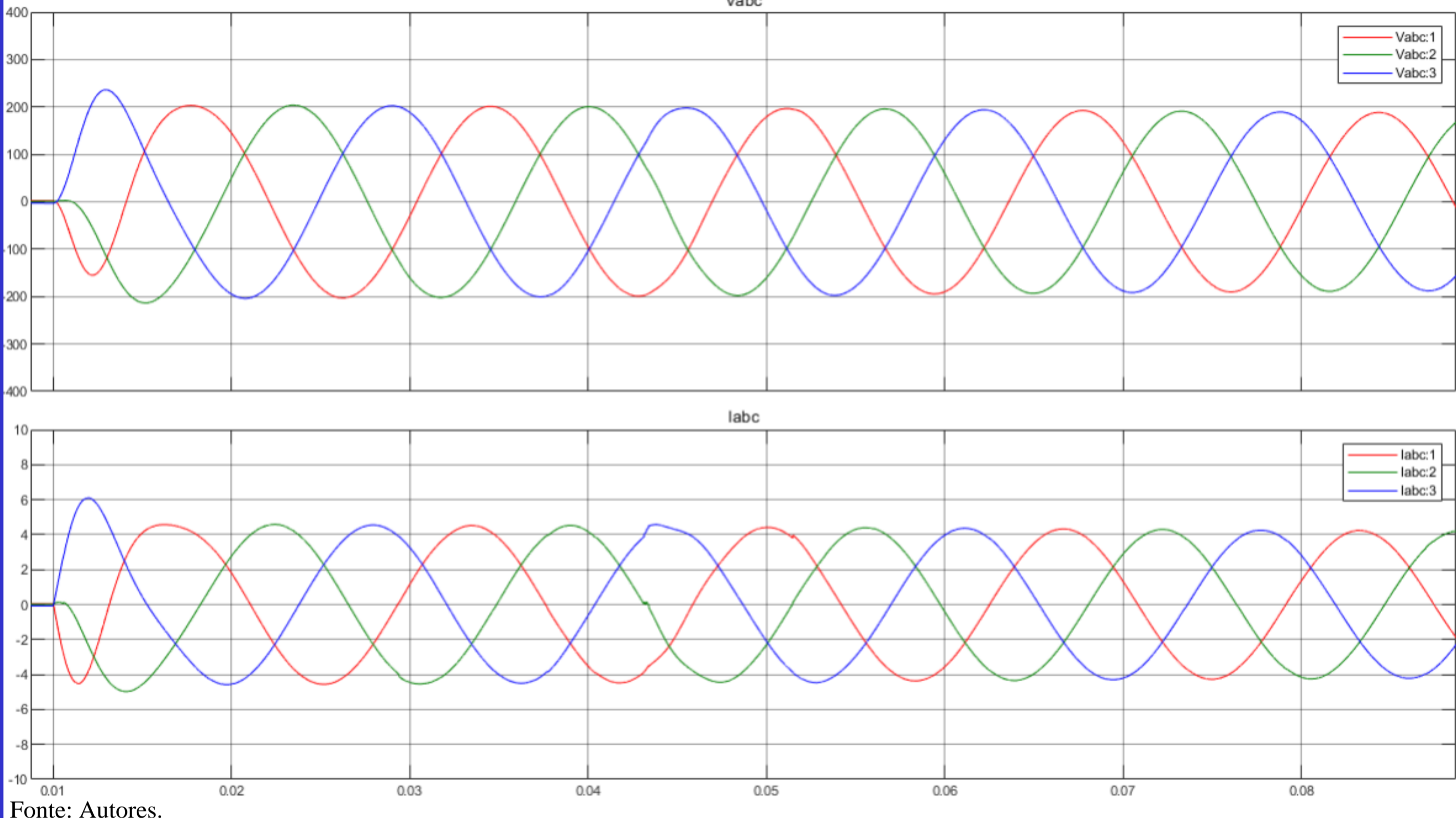
Fonte: Autores.

Figura 4 – Modelagem da Geração de Energia Solar.



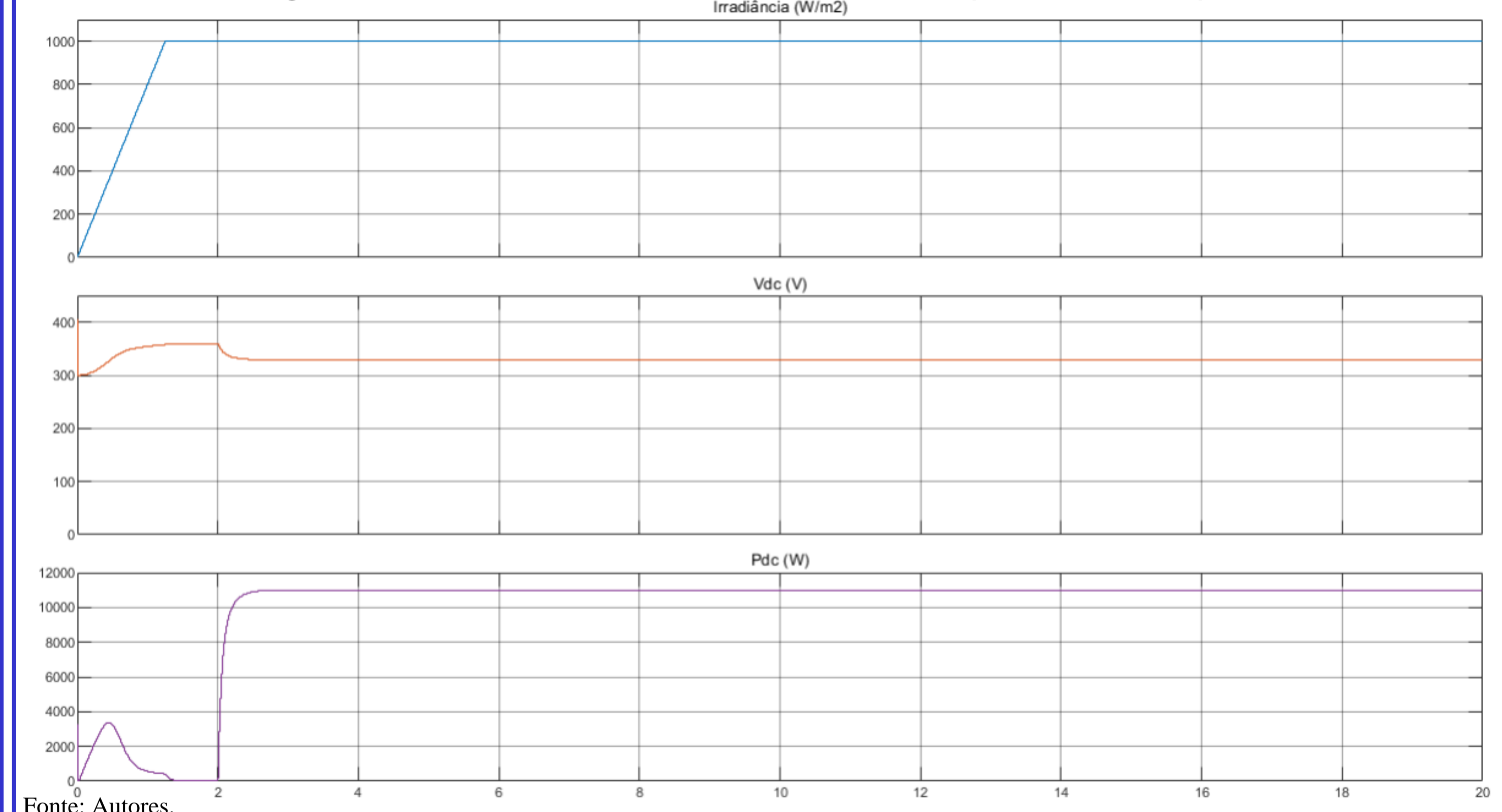
Fonte: Autores.

Figura 5 – Formas de onda da tensão e corrente na carga.



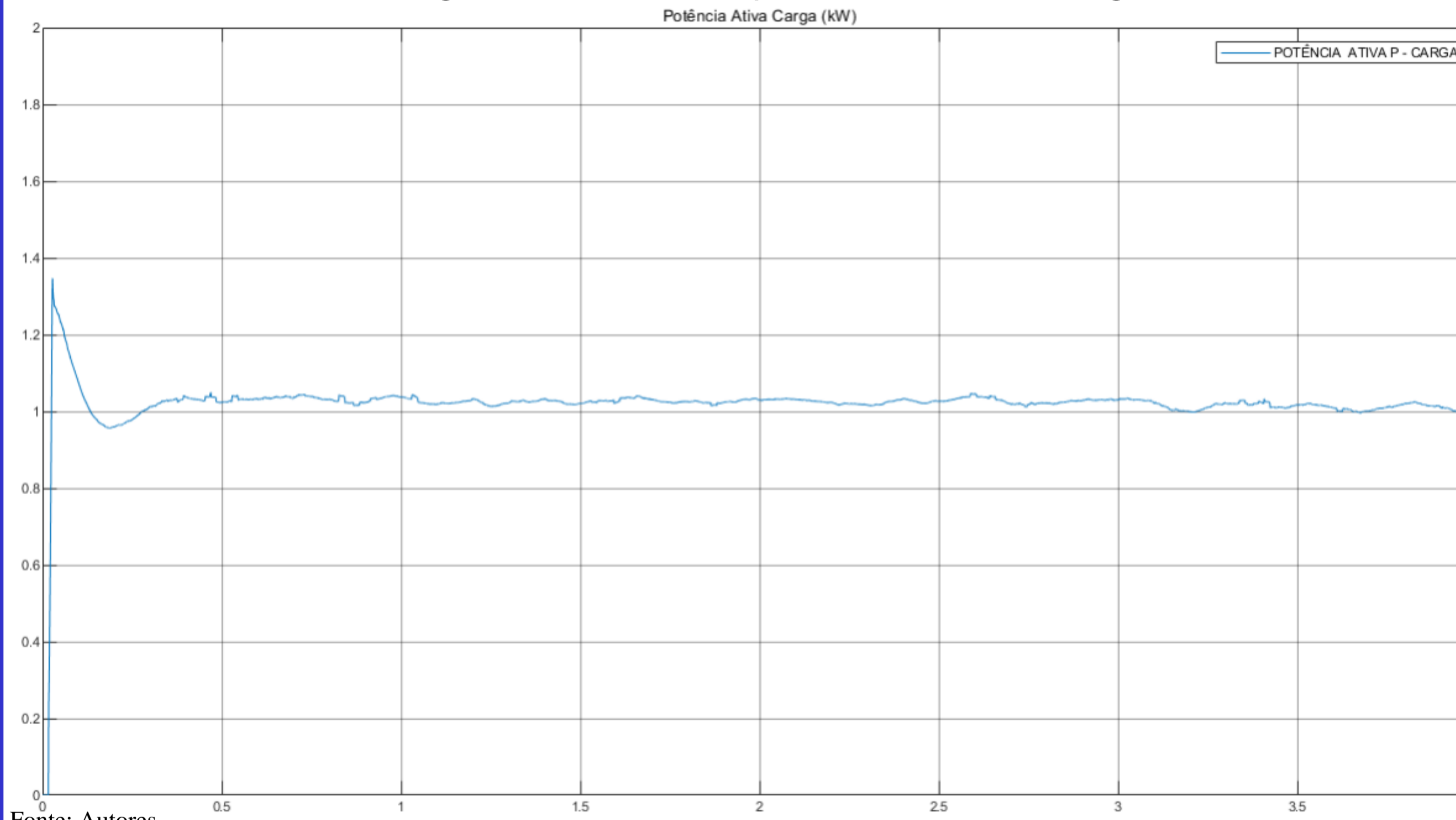
Fonte: Autores.

Figura 6 – Curvas de Irradiância, tensão e potência dos painéis.



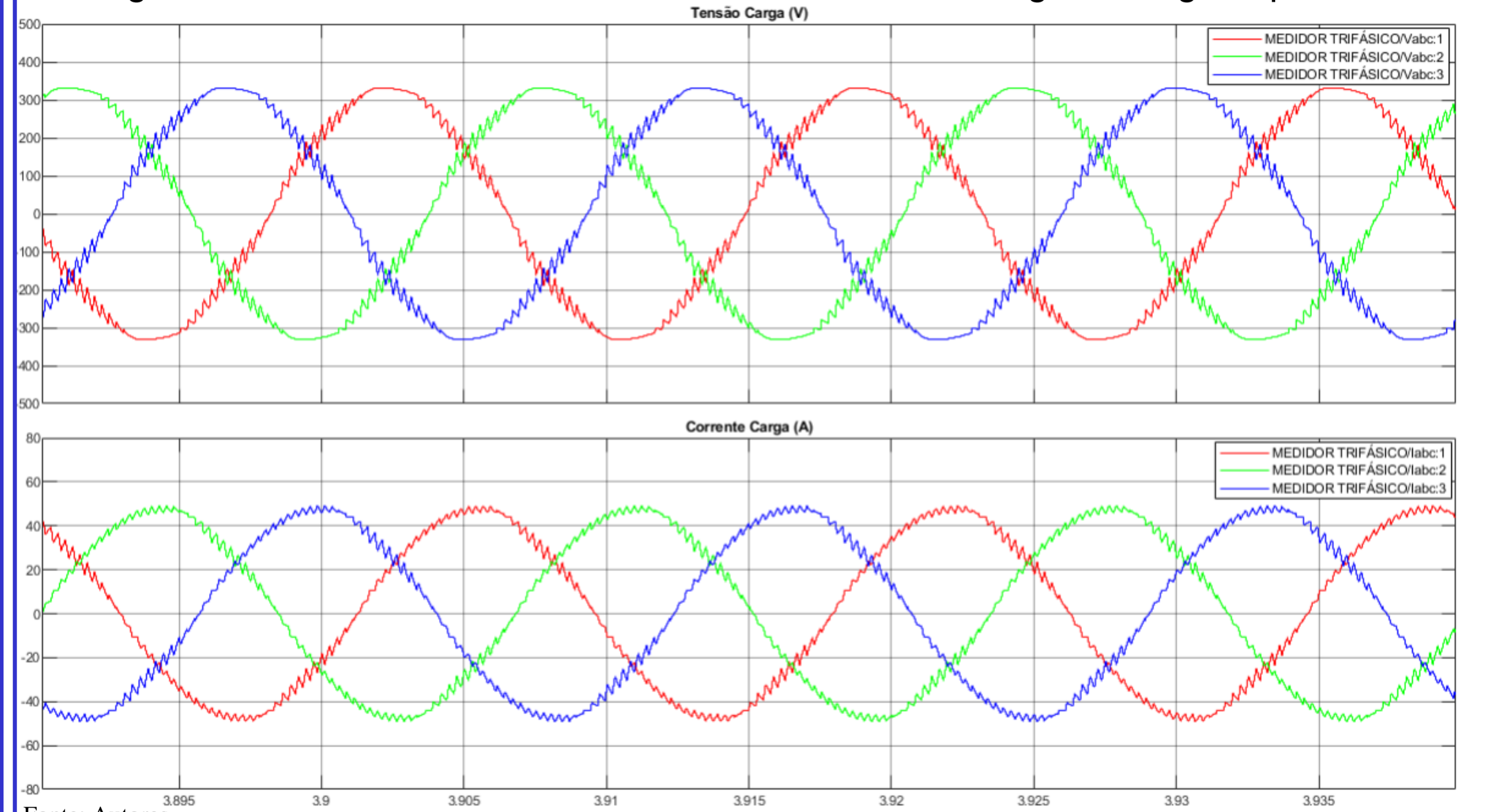
Fonte: Autores.

Figura 7 – Curva da potência ativa da carga.



Fonte: Autores.

Figura 8 – Formas de onda da tensão e corrente na carga em regime permanente.



Fonte: Autores.

### PRINCIPAIS CONCLUSÕES

Com o projeto realizado, foi obtido um armazenador com eficiência de 31,71%, um *payback* projetado de 37 anos e uma compensação de 3.262,7  $kgCO_2$  por ano, estando alinhado com os objetivos de desenvolvimento sustentável da ONU e as crescentes buscas por soluções sustentáveis no fornecimento de energia elétrica. Além disso, o projeto pode ser implementado em outros sistemas isolados, adaptando-o para este outro sistema.

Ademais, a modelagem realizada se mostrou eficaz para a simulação do sistema proposto, possibilitando inclusive o estudo para regime transitório e caso adaptada pode ser utilizada para um possível estudo de curto-circuito na geração de energia elétrica por hidrelétrica ou energia solar.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

WWF. GERAÇÃO DE ENERGIA EM FERNANDO DE NORONHA: ALTERNATIVAS PARA A DIMINUIÇÃO DE EMISSÕES DE CO2 NO TRANSPORTE E ELETRICIDADE BRASIL. 2021. Brasília/DF: WWF-Brasil, 2020. Disponível em: [https://wwfbr.awsassets.panda.org/downloads/geracao\\_de\\_energia\\_fernando\\_de\\_noronha\\_versao\\_web\\_1.pdf](https://wwfbr.awsassets.panda.org/downloads/geracao_de_energia_fernando_de_noronha_versao_web_1.pdf). Acesso em: 5 abr. 2023.